

Chapitre I

Rayonnement

Remarque lecture : Première partie relue par Najda

Dans cette partie on fait uniquement du rayonnement sur des cas 1D ; en s'aidant du tuning pour répondre à certaines questions.

Les biais de rayonnement restent important à la surface des continents. Sont-ils du à une mauvaise représentation des nuages (sous-estimation de la couverture nuageuse par exemple) ou à une mauvaise représentation du rayonnement et en particulier des interactions entre rayonnement et nuage ? On cherche ici à quantifier ces deux sources d'erreurs / d'incertitudes.

Le modèle de transfert radiatif utilisé jusqu'à lors, rrtm, repose sur des hypothèses de modélisation importantes quand aux interactions nuage-rayonnement :

- nuage homogène en eau par maille
- empilement vertical des nuages maximum-aléatoire
- pas de représentation des effets 3D

Il existe aujourd'hui un modèle de transfert radiatif (ECRAD) utilisant des hypothèses moins "restreintes" ; donc qui représente l'hétérogénéité de l'eau nuageuse dans le nuage, un empilement vertical exponentiel-aléatoire (qui reste une représentation de proche ne proche) et qui représente les effets 3D. Les études actuelles sur des scènes nuageuses montrent que ces effets sont importants pour avoir une bonne représentation du rayonnement arrivant à la surface et repartant vers l'univers.

Plusieurs questions émergent :

- ces processus sont-ils important à modéliser à l'échelle climatique, et pourquoi ?
- Quelles interaction existe-t-il entre une non représentation de ces processus et le tuning du modèle qui porte en partie sur des métriques radiative ?

Alors, qu'est ce que j'ai en réserve

- Etude de sensibilité des paramètres libres d'ECRAD (4 paramètres) sur des cas 1D de cumulus et de stratocumulus de LMDZ
- Forcer la compensation d'erreur nuage-rayonnement pour avoir le bon rayonnement à TOA sur des cas de cumulus
- Paramétrisation de FSD sur cumulus et stratocumulus. Diagnostique de la valeur de FSD dans les LES de ces cas. Apport et apprentissage de la paramétrisation.
- Importance de la représentation de l'hétérogénéité de l'eau intra-nuageuse pour le rayonnement des stratocumulus

Autres objectifs peut-être plus technique :

- choix du solver d'ecrad pour le climat, et la valeur de ses paramètres libres
- ce qui implique d'adapter la méthodologie de tuning existante, et par exemple d'intégrer des métriques radiatives dans le tuning 1D
- Travailler sur la cohérence LMDZ-ECRAD
 - paramétrisation des paramètres libres d'ECRAD (FSD comme objectif pour la thèse)

Je suis plus sur d'être d'accord avec tous ce que j'ai dit. Je crois que la question du tuning et du too few too bright va peut-être être beaucoup plus centrale que ce que je n'imaginais (ça va pas mal dépendre des résultats du tuning compensation d'erreur). Je crois qu'il faut que je pense aussi à des expériences pour justifier la paramétrisation de FSD que l'on va rajouter. Et d'ailleurs, on la calcul que sur des zones de nuages liquide avec thermiques actifs ; comment on fait le raccordement avec le reste pour le 3D ? est-ce que en l'état ça a même un intérêt de faire du 3D avec ?

[Avant de commencer, redire la place de ce chapitre dans le manuscrit. Je fais une proposition ci dessous ; inspirée des passages que j'ai copié de ton positionnement.]

Nous entrons ici dans le chapitre concernant l'ajustement des flux radiatifs en présence de nuages. *[une phrase pour dire l'enchaînement avec ce qui précède ? Genre "on a vu que les flux radiatifs au SIRTA..."]* Les travaux présentés ici sont motivés par trois éléments, qui structurent le chapitre en trois sections :

1. l'arrivée du nouveau modèle de transfert radiatif ecRad (Hogan and Bozzo, 2018), proposant notamment différentes hypothèses de prise en compte des nuages par le modèle de transfert radiatif, constitue aujourd'hui un contexte très favorable à la revisite de la modélisation des interactions entre nuages et rayonnement dans LMDZ. ecRad est présenté en Section I.1 ;
2. l'enrichissement du cadre 1D/LES par des calculs de référence radiatifs par Monte Carlo Villefranque et al. (2019) permet de déployer ce cadre pour éclairer la question des compensations d'erreurs entre nuages et rayonnement, ce qui est l'objet d'un article présenté en Section I.2 ;
3. le développement de la nouvelle version de LMDZ pour l'exercice d'intercomparaison CMIP7, incluant le nouveau modèle de rayonnement ecRad, a permis de réaliser des premiers tests de sensibilité au choix du modèle radiatif en 3D. Des premiers résultats sont présentés en Section I.4.

I.1 Transfert radiatif avec ecRad

ecRad est un logiciel de transfert radiatif développé au Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT ou ECMWF en anglais pour *European Center for Medium-Range Weather Forecasts*). Il est utilisé de manière opérationnelle pour les prévisions météorologiques du Centre Européen, effectué avec le modèle global IFS (Integrated Forecasting System), depuis juillet 2017. Son utilisation dans l'IFS est décrite par Hogan and Bozzo (2018). Le développement de ecRad a été motivé par deux grandes raisons : (1) Optimiser le code pour réduire le coût de calcul du transfert radiatif afin de pouvoir l'appeler plus fréquemment et/ou utiliser des modèles de transfert radiatif plus complexes pour le même coût de calcul ; (2) Avoir un modèle de transfert radiatif flexible afin de faciliter son développement, son partage et la recherche qui l'entoure. Cette flexibilité est rendue possible grâce à une organisation modulaire de ecRad en 5 composantes : 4 composantes indépendantes pour calculer les propriétés optiques (de la surface, des gaz, des aerosols et des nuages) et une composante, appelé solveur, combinant les propriétés optiques du ciel-clair, des nuages et de la surface (Figure I.1). C'est cet

aspect modulaire qui fait que ecRad est considéré comme un logiciel et non comme un modèle : il intègre en effet plusieurs modèles de transfert radiatif et de propriétés optiques.

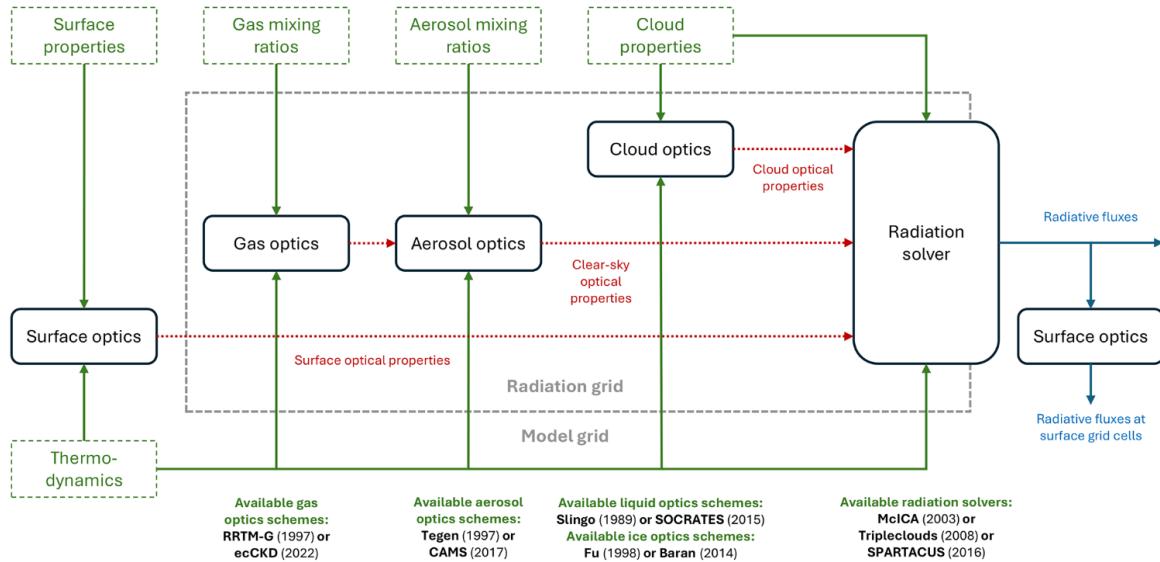


FIGURE I.1 – Schéma issu de Grailet et al. (2025), illustrant l’architecture de ecRad. Les 5 grandes boîtes correspondent aux 5 modules de ecRad. Les boîtes pointillées correspondent aux entrées de ecRad. La boîte “Thermodynamique” correspond aux profils de température et de pression aux inter-couches. Les flèches en pointillé modélisent les structures de données internes d’ecRad. La boîte en pointillés en arrière-plan représente les étapes d’interpolation utilisées pour passer de la grille du modèle d’atmosphère à celle de ecRad et vice versa.

Bien que ecRad soit développé pour l’IFS, il est conçu informatiquement de manière indépendante du modèle atmosphérique de l’IFS. Il peut ainsi être téléchargé seul et utilisé pour simuler les profils de flux radiatifs à partir de n’importe quel profil atmosphérique respectant sa nomenclature : cela peut être des profils issus de modèles atmosphériques ou de réanalyses par exemple. Il peut aussi être intégré à d’autres modèles atmosphériques que celui de l’IFS. Sa modularité lui permet de calculer les flux radiatifs en utilisant différents modèles et différentes hypothèses, qui peuvent être adaptés à une diversité d’applications et de résolutions. Les modules disponibles dans ecRad sont détaillés Figure I.2.

Ces dernières années, ecRad s’est beaucoup répandu en Europe. Il est notamment distribué et utilisé dans sa version offline avec l’outil de tuning `htexplo`, pour être utilisé dans le cadre 1D/LES de développement des modèles développé par Dephy (voir Section I.2). Il a également été intégré dans différents modèles atmosphériques : dans les modèles de Météo-France (Meso-NH pour les LES (Jahangir, 2022), HARMONIE-AROME pour la Prévision Numérique du Temps (PNT) en Europe, ARPEGE et ARPEGE-Climat pour la PNT globale et l’étude du climat), dans le modèle ICON, dans plusieurs modèles atmosphériques régionaux (MAR (Grailet et al., 2025) et RACMO (van Dalum et al., 2024)) et enfin dans le GCM LMDZ (voir Section I.4).

I.1.1 Prise en compte des nuages pour le transfert radiatif dans ecRad

La prise en compte des nuages dans le transfert radiatif est assurée par le solveur de ecRad. C’est lui qui combine la partie ciel-cair de la colonne atmosphérique avec la partie nuageuse, puis calcule les profils des flux radiatifs de la colonne atmosphérique (un flux montant et un flux descendant à chaque interface entre couches). Quatre solveurs sont actuellement disponibles dans ecRad : Homogeneous, McICA, TripleClouds et SPARTACUS. Le solveur Homogeneous

Table 2*Summary of the Main Options Available in ecRad, Each of Which Can Be Selected at Run-Time*

Property	Options
Gas optics model	Monochromatic; RRTM-G (other options are planned)
Aerosol optics model	Generalized (supporting Tegen and CAMS types); optics computed externally
Liquid cloud optics	Slingo (1989) and Lindner and Li (2000); SOCRATES
Ice cloud optics	Fu (1996) and Fu et al. (1998) ; Yi et al. (2013); Baran et al. (2014)
δ -Eddington mode	Particles and gases; Particles only
SW and LW solver	Homogeneous; McICA ; Tripleclouds; SPARTACUS
Longwave scattering	Off; cloud only ; cloud and aerosols
Cloud overlap scheme	EXP-EXP (only available with McICA); MAX-RAN; EXP-RAN
Cloud overlap parameter	alpha (Hogan & Illingworth, 2000) ; beta (Shonk et al., 2010)
Cloud water PDF shape	Gamma ; Lognormal

Note. The settings expected in the next operational cycle (46R1) are shown in bold. The earlier IFS implementation of ecRad in Cycle 43R3 were the same except for longwave scattering being switched off and δ -Eddington scaling being applied to particles and gases. RRTM-G = Rapid Radiative Transfer Model for GCMs; SPARTACUS = Speedy Algorithm for Radiative Transfer through Cloud Sides; SW = shortwave; LW = longwave.

FIGURE I.2 – Ce tableau est issu de Hogan and Bozzo (2018). Il répertorie les principales options possibles pour les différents modules de ecRad. En gras sont indiqués les options choisies pour la version de ecRad intégrée dans l'IFS.

fait l'hypothèse que chaque couche est soit complètement occupée par un nuage homogène, soit totalement ciel-clair. Ce solveur n'est donc pas adapté pour le calcul de transfert radiatif d'un GCM et ne sera pas étudié ici. En plus des tables de propriétés optiques des gaz et des nuages, et des propriétés thermodynamiques de l'atmosphère (température et pression), les solveurs prennent en entrée les profils verticaux de quantité d'eau condensée (liquide et solide), de fraction nuageuses et de taille de gouttes et cristaux. Différentes hypothèses sont formulées afin de pouvoir calculer le transfert radiatif à partir de ces informations.

I.1.1.1 Hypothèses de prise en compte des nuages disponibles dans ecRad

Recouvrement vertical des nuages

Les solveurs ont besoin de connaître comment les fractions nuageuses fournies en entrées sont positionnées les unes au-dessus des autres. La façon de positionner les fractions nuageuses sur la verticale est appelée modèle de recouvrement vertical. Ce modèle va aussi déduire du profil de fraction nuageuse, la couverture nuageuse, c'est-à-dire la fraction surfacique de la colonne qui, vue du ciel (ou de la surface), est couverte par des nuages. Cette couverture nuageuse influence au premier ordre les flux radiatifs solaires dans la colonne : à fraction nuageuse égale, plus la couverture nuageuse est grande, plus le flux solaire transmis à la surface va être petit. Tous les solveurs n'utilisent pas directement cette information : elle est utilisée explicitement dans MCICA tandis que dans Tripleclouds et Spartacus elle est uniquement diagnostique.

Il existe plusieurs modèles de recouvrement possible, illustrés Figure I.3. Le modèle de recouvrement aléatoire dispose aléatoirement les fractions nuageuses sur la verticale du modèle : la position du nuage dans une couche donnée ne dépend pas de la position des nuages dans les autres couches. La couverture nuageuse de deux couches nuageuses adjacentes i et j , notée $c_{rand}(i, j)$ est alors donnée par l'Equation I.1, avec α_i et α_j les fractions nuageuses des couches i et j .

$$c_{rand}(i, j) = \alpha_i + \alpha_j - \alpha_i \cdot \alpha_j \quad (\text{I.1})$$

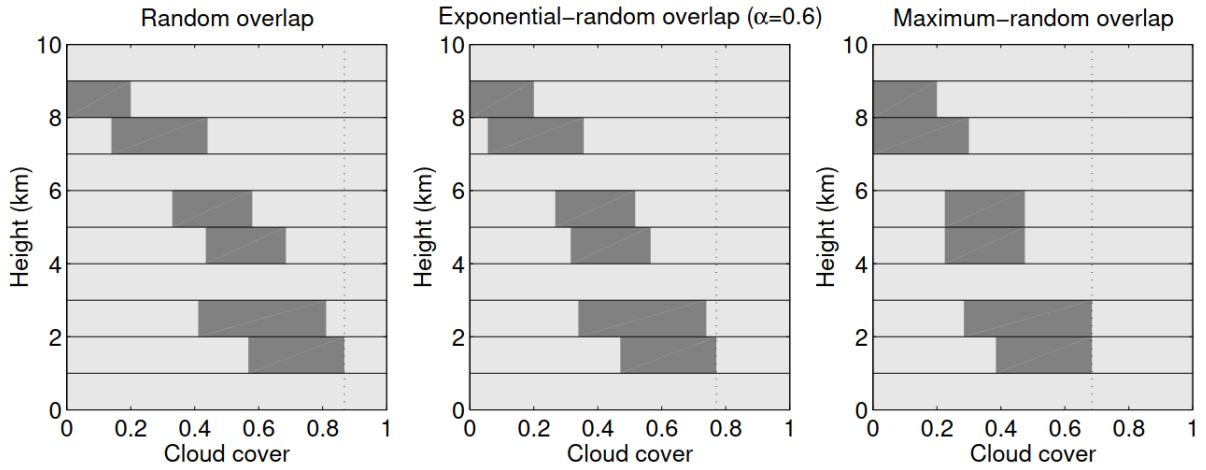


FIGURE I.3 – Schéma de trois hypothèses possibles de recouvrement des nuages dans les colonnes d'un GCM, issu de Hogan and Shonk (2008). A gauche le recouvrement aléatoire, au milieu le recouvrement exponentiel-aléatoire avec une facteur w égale à 0.6 pour toutes les couches de nuage adjacent et à droite recouvrement maximum-aléatoire. La ligne verticale en pointillé indique la couverture nuageuse totale de la colonne.

Parmis les modèles de recouvrement existant, ce modèle maximise la couverture nuageuse totale à profil de fraction nuageuse égale. Il a le défaut d'être très sensible à la résolution verticale du modèle.

Le modèle maximum-aléatoire, appelé "Max-Ran" pour maximum-random dans ecRad, distingue les couches de nuages adjacents, des couches de nuages non adjacents, c'est-à-dire séparés par au moins une couche de ciel-clair. Ce modèle recouvre aléatoirement les couches nuageuses non adjacentes, et maximise le recouvrement des couches nuageuses adjacentes. La couverture nuageuse de deux couches de nuages adjacentes, notée $c_{max}(i, j)$ s'exprime alors avec l'Equation I.2

$$c_{max}(i, j) = \max(\alpha_i, \alpha_j) \quad (\text{I.2})$$

Ce modèle minimise la couverture nuageuse à profil de fraction nuageuse égale. Ce modèle de recouvrement est classiquement utilisé dans les GCMs, et c'est celui qui est utilisé dans la version CMIP6 de LMDZ.

Le modèle exponentiel-aléatoire, appelé "Exp-Ran" dans ecRad pour exponential-random, est un modèle de recouvrement intermédiaire aux deux modèles précédents. Il a été développé par Hogan and Illingworth (2000) à partir d'observations radar de nuages. Cette étude montre que lorsque deux couches de nuages sont séparées par du ciel-clair sur la verticale, le recouvrement des nuages de ces couches est bien aléatoire. Par contre, si les couches de nuages ne sont pas séparées par du ciel-clair, leur recouvrement n'est pas forcément maximal comme le suppose le modèle Max-Ran. Ils proposent d'exprimer le recouvrement de ces couches comme une somme pondérée d'un recouvrement maximal et d'un recouvrement aléatoire, selon l'Equation I.3.

$$c_{exp}(i, j) = w c_{max} + (1 - w) c_{rand} \quad (\text{I.3})$$

La formulation du poids w accordé au recouvrement maximal est dérivée des observations et montre qu'il peut être exprimé sous forme d'exponentielle décroissante de la distance entre les couches Δz . On modélise ainsi $w = e^{-\frac{\Delta z}{\ell_0}}$. La longueur caractéristique de cette décorrélation est donnée par ℓ_0 , appelée longueur de décorrélation. Lorsque la distance entre deux couches est très petite devant cette longueur de décorrélation, alors les couches sont encore très corrélées

et w est proche de 1 : on retrouve un recouvrement maximal des couches. Si au contraire la distance entre les couches est très grande devant cette longueur de décorrélation, alors les deux couches sont très peu corrélées et w est proche de 0 : on retrouve un recouvrement aléatoire des couches.

Les trois solveurs MCICA, Tripleclouds et Spartacus peuvent au choix utiliser un recouvrement vertical maximum-aléatoire ou exponentiel-aléatoire. Dans ce dernier cas, la longueur de décorrélation ℓ_0 est un paramètre libre de ce modèle de recouvrement vertical des nuages.

Hétérogénéité horizontale de l'eau nuageuse



FIGURE I.4 – Rendu physiquement réaliste d'un stratocumulus complètement couvrant, à gauche vu du dessous et à droite vu du dessus. On voit des zones plus claires et d'autres plus foncées, traduisant des différences d'épaisseur optique du nuage. Vues du dessous, les zones plus claires correspondent à des zones d'épaisseur optique plus fines. Vu du dessus, c'est l'inverse . Le stratocumulus est issu du cas FIRE simulé avec le modèle LES Meso-NH Lafore et al. (1998); Lac et al. (2018) et la visualisation est rendue possible par le code de transfert radiatif htrdr développé dans la thèse de Villefranque (2019).

Les nuages ont des épaisseurs optiques hétérogènes sur l'horizontale. Cela est particulièrement visible sur les stratocumulus, comme le montre la Figure I.4. Plus le nuage est hétérogène, plus il transmet du rayonnement solaire et moins son albédo est fort. L'amplitude de ces hétérogénéités peut être modélisée par le paramètre **FSD** (pour *Fractional Standard Deviation*), défini par l'Equation I.4,

$$\mathbf{FSD} = \frac{\sigma_\tau}{\bar{\tau}} \quad (\text{I.4})$$

avec $\bar{\tau}$ l'épaisseur optique moyenne du nuage sur l'horizontale et σ_τ son écart-type sur l'horizontale, à l'intérieur d'une couche donnée.

L'épaisseur optique d'une couche d'eau nuageuse est proportionnelle à son contenu en eau divisé par le rayon effectif des condensats. Soit $\tau \propto q_c/r_{eff}$. L'approximation est souvent faite que ce sont les variations horizontales du contenu en eau condensé qui sont les premières responsables des variations horizontales de l'épaisseur optique. Le paramètre d'intensité des hétérogénéité horizontales des épaisseur optique du nuage **FSD** est alors approximé par l'Equation I.5.

$$\mathbf{FSD} = \frac{\sigma_{q_c}}{\bar{q}_c} \quad (\text{I.5})$$

avec \bar{q}_c le contenu en eau condensée nuageuse dans la maille, en kg d'eau condensé par kg d'air nuageux, et σ_{q_c} son écart-type sur l'horizontale.

Le paramètre libre **FSD** est utilisé dans les trois solveurs de ecRad pour quantifier l'intensité des hétérogénéités horizontales des épaisseur optique des nuages. Dans la modèle de transfert radiatif de LMDZ version CMIP6, les épaisseur optiques des nuages sont considérées comme homogènes horizontalement (**FSD** = 0).

Recouvrement vertical des hétérogénéités horizontales

Le recouvrement vertical des hétérogénéités horizontales a également un impact sur la transmissivité du rayonnement. En effet, si toutes les zones optiquement fines du nuage se recouvrent sur la verticale, et toutes les zones optiquement épaisses aussi, alors le rayonnement solaire transmis sera moins important que si les hétérogénéités horizontales se recouvrent aléatoirement, car le nuage sera au total plus homogène (intégré sur la verticale). Si le modèle de recouvrement choisi est le modèle maximum-aléatoire, alors les hétérogénéités vont également suivre un modèle de recouvrement maximum-aleatoire. Si le modèle vertical de recouvrement choisi est un modèle exponentiel-random, une deuxième longueur de décorrélation est utilisée pour le recouvrement des hétérogénéités, que l'on note ℓ_h .

Effets radiatifs 3D

Dans un champ nuageux 3D, les effets radiatifs 3D sont définis comme la différence entre la résolution des équations du transfert radiatif dans les trois dimensions (le rayonnement se propage dans tout le domaine) et une résolution verticale uniquement (où le rayonnement ne se propage pas horizontalement). Ils quantifient donc ce qui est négligé lorsque le transfert radiatif est résolu sous hypothèse 1D. Aux échelles d'une LES, les effets 3D qui comptent sont "inter-colonnes", c'est à dire que l'erreur vient du fait que l'hypothèse 1D néglige les transferts de rayonnement entre les colonnes. Aux échelles d'un GCM, les effets 3D qui comptent sont "sous-maille", c'est à dire que l'erreur vient du fait que l'hypothèse 1D néglige le transfert horizontal au sein de la colonne (à travers les bords des nuages qui sont eux-mêmes sous-maille, notamment).

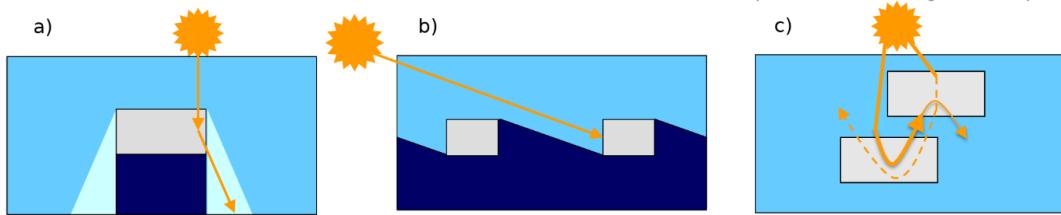


FIGURE I.5 – Schéma issu de Schäfer et al. (2016), représentants les effets radiatifs 3D associés aux nuages dans le solaire. (a) *side leakage or escape* (b) *side illumination* ou effet d'ombre (c) *entrainment* ou piégeage

Les effets radiatifs 3D dans l'atmosphère sont majoritairement dus à la présence de nuage.

Dans le solaire, les effets radiatifs 3D dus à la présence de nuage sont généralement catégorisés en 4 processus :

- *side leakage or escape* : les photons à l'intérieur du nuage peuvent s'en échapper par les bords latéraux du nuage et atteindre la surface. Ce processus augmente la transmissivité de la scène nuageuse en créant une surillumination de la surface, autour des ombres des nuages (Figure I.5 (a)). Pour les cumulus, ce processus est majoritaire lorsque le soleil est proche du zenith, et ajoute environ 25% de flux à la surface [citations ?].
- *side illumination* ou effet d'ombre : lorsque le soleil n'est pas parfaitement au zénith, les photons arrivant sur le nuage sont également intercepté par les bords latéraux des nuages. Ce processus augmente la réflectivité et l'absorptivité des nuages. C'est ce qui fait que les nuages ont des plus grandes ombres lorsque le soleil est proche de l'horizon qu'à midi (Figure I.5 (b)). Pour les cumulus, ce processus est majoritaire lorsque le soleil est proche de l'horizon, et peut doubler le flux réfléchi au sommet de l'atmosphère [citation ?]
- *channeling* : les photons émis par les zones optiquement épaisses du nuage vont rencontrer des zones optiquement plus fines, leur permettant d'atteindre plus facilement la surface,

ce qui augmente la transmissivité du nuage. Ce processus se rapproche du side leakage mais a lieu à l'intérieur du nuage, plutôt qu'entre nuage et ciel clair.

- *entrapment* ou piégeage : lorsqu'ils repartent vers l'espace, les photons réfléchis ou émis par la surface ou par un nuage bas peuvent être interceptés par un nuage situé à une altitude plus élevée qui ne serait pas directement au dessus du nuage bas, et redirigés vers la surface (Figure I.5 (c)). Ce processus domine dans les scènes où il y a plusieurs couches nuageuses, ou en cas de fort albédo de surface (Hogan et al., 2019; ?).

Dans le solaire, les effets 3D peuvent être négatifs ou positifs sur le flux incident en surface, suivant le type de nuage et l'angle solaire (positif pour les angles solaires proches du zenith et négatif pour les angles solaires proches de l'horizon).

Les processus de *side escape*, *channeling* et piégeage, sont fortement liés à la présence de diffusion multiple. Or, dans le domaine infrarouge, les nuages sont moins diffusants que dans le solaire. Ces phénomènes sont donc présents mais les effets 3D sont dominés par l'émission de rayonnement infrarouge par les bords des nuages vers le haut et vers le bas. Les effets radiatifs 3D associés aux nuages sur le flux radiatif arrivant à la surface sont toujours positifs.

Seul le solveur SPARTACUS propose une paramétrisation des effets radiatifs 3D associés aux nuages. Les autres solveurs ainsi que le modèle de transfert radiatif de LMDZ version CMIP6 ne les prennent pas en compte.

I.1.1.2 Traitement des hypothèses par les solveurs

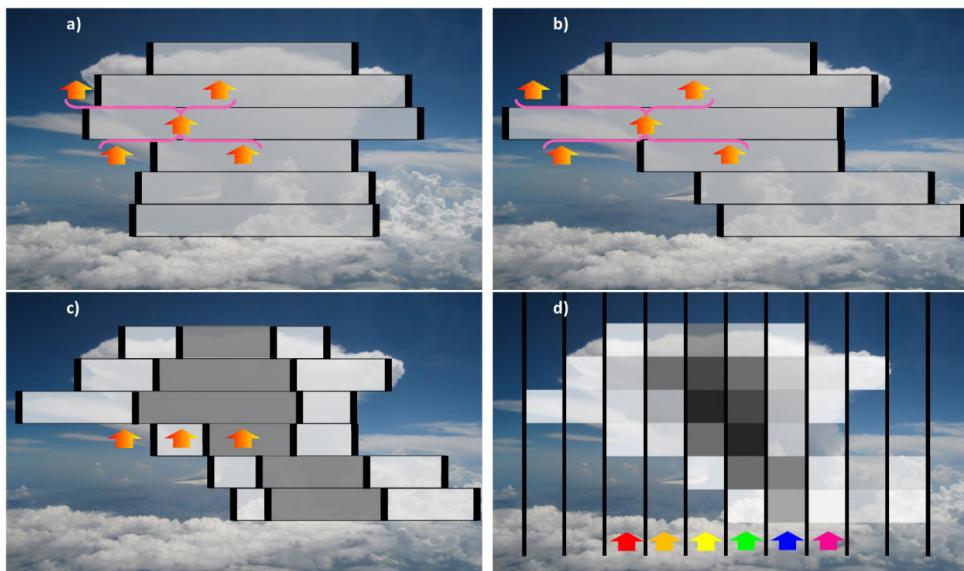


FIGURE I.6 – Schéma issu de Villefranque (2019) (a) nuage homogène avec recouvrement maximal, ce qui correspond aux hypothèses du schéma de transfert radiatif de LMDZ dans sa version CMIP6, (b) nuage homogène avec recouvrement exponentiel (c) nuage hétérogène illustrant le solver TripleClouds avec un recouvrement exponentiel (d) nuage hétérogène illustrant la méthode McICA avec un recouvrement exponentiel

McICA

Le solveur McICA (pour Monte Carlo Independent Column Approximation) est décrit en détail dans Hogan and Bozzo (2018). Il combine une approche statistique (Monte Carlo) avec l'approximation des colonnes indépendantes (ICA pour *Independent Column Approximation*),

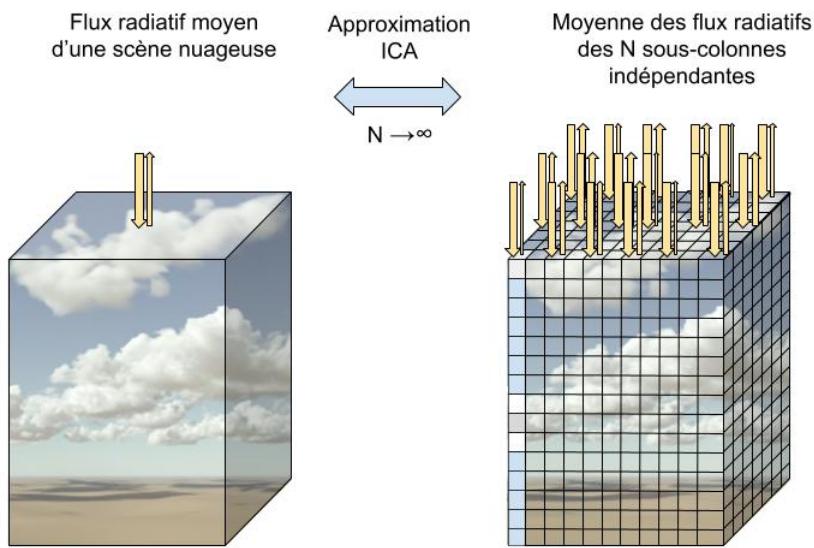


FIGURE I.7 – Schéma représentant l'approximation des colonnes indépendantes (ICA). Cette approximation stipule que le flux radiatif moyen d'une colonne atmosphérique est égal à la moyenne des flux radiatifs calculés indépendamment dans les N sous-colonnes découplant la colonne initiale (où chaque maille de chaque sous-colonne est optiquement homogène) ; lorsque le nombre de sous-colonnes tend vers l'infini. L'image des nuages est un rendu physiquement réaliste effectué avec htrdr (Villefranque et al., 2019) de la 8ème heure de la simulation du cas ARMCU effectuée par le modèle LES Meso-NH.

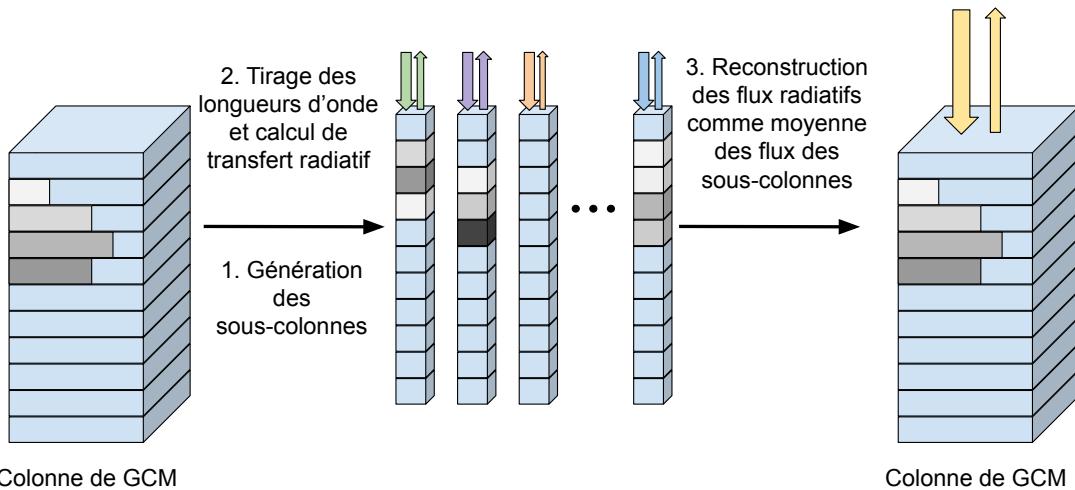


FIGURE I.8 – Schéma représentant la méthode de McICA pour le calcul du transfert radiatif. Etape 1 : Les profils d'entrées, fournis par le GCM, associés aux hypothèses de recouvrement vertical et d'hétérogénéité horizontale des nuages, sont utilisés pour générer N sous-colonnes atmosphériques. Etape 2 : Un tirage aléatoire est réalisé pour déterminer la longueur d'onde associée à chaque sous-colonne, puis le transfert radiatif monochromatique est résolu dans chaque sous-colonne avec un modèle à deux flux. Etape 3. Les profils de flux radiatifs dans les domaines solaires (ou IR) finaux sont calculés comme la moyenne des profils des sous-colonnes.

qui permet de prendre en compte des modèles de recouvrement verticaux des nuages exponentiel-random ainsi que l'hétérogénéité horizontale des épaisseurs optiques nuageuses.

L'approximation des colonnes indépendantes dit que le flux radiatif moyen d'une colonne atmosphérique, dont la description spatiale du milieu est parfaitement connue, est égal à la

moyenne des flux radiatifs calculés de manière indépendante dans chacune des sous-colonne dont les propriétés optiques sont homogènes dans chaque maille, lorsque le nombre de sous-colonne tend vers l'infini (Figure I.7). Cette approximation néglige les effets radiatifs 3D.

Cette approximation est utilisée pour calculer le transfert radiatif dans des colonnes atmosphériques hétérogènes typiques des GCMs. Un certain nombre de sous-colonne vont être générées, dans lesquels les propriétés optiques vont être homogènes dans chaque maille. Ces colonnes sont générées de manière à représenter correctement les nuages, c'est-à-dire à représenter correctement leur profils d'eau condensée et de fraction nuageuse fournis par le GCM, mais aussi leurs recouvrement vertical et hétérogénéité horizontale selon les hypothèses souhaitées. La méthode ICA ainsi décrite n'est pas utilisable dans les GCMs à cause de son coût de calcul trop élevé, égale au nombre de colonnes générées multiplié par le coût du transfert radiatif dans chaque colonne. Pour le réduire, Pincus et al. (2003) proposent de ne calculer le transfert radiatif que pour une des fréquences du spectre dans chacune des colonnes. L'échantillonnage des sous-colonne s'accompagne alors d'un échantillonnage des fréquences du spectre. Le fait que la moyenne des flux radiatifs monochromatiques des sous-colonnes tends vers le flux radiatif de la colonne intégré sur le spectre (solaire ou IR) lorsque le nombre de sous-colonnes générées est grand repose sur les principes des méthodes d'estimation de Monte Carlo. Cette méthode introduit un bruit statistique en sous-échantillonnant les distributions, ce qui peut être problématique dans un modèle de Prévision Numérique du Temps par exemple.

TripleClouds

Le solveur TripleClouds propose une extension des modèles de transfert radiatif à deux flux classiques, pour prendre en compte les hétérogénéités horizontales des épaisseurs optiques des nuages. La proposition faite par Shonk and Hogan (2008) est de séparer la partie de la maille nuageuse en deux zones : une zone de nuage optiquement fin homogène et une zone de nuage optiquement épais homogène, comme illustré Figure I.6 (c).

La définition de ces deux zones est pensée dans Shonk and Hogan (2008) à partir de la densité de probabilité (PDF) de l'eau nuageuse sous-maille, notée p_{Q_c} , et est illustrée Figure I.9. Dans la proposition initiale, la médiane de la PDF est choisie pour séparer les deux zones. Les fractions de nuage occupées par le nuage optiquement fin α_{fin} et le nuage optiquement épais α_{epais} sont déterminées par les équations I.6. Par définition, si l'on choisit la médiane pour séparer les deux régions alors les deux fractions sont égales à la moitié de la fraction nuageuse α .

$$\alpha_{fin} = \int_0^{q_c^{lim}} p_{Q_c}(q_c) dq_c \text{ et } \alpha_{epais} = \int_{q_c^{lim}}^{+\infty} p_{Q_c}(q_c) dq_c \quad (I.6)$$

Puis, le contenu en eau condensée de chacune des deux zones est donné par une valeur unique, q_c^{fin} pour la zone de nuage optiquement fin et q_c^{epais} pour la zone de nuage optiquement épais. Le contenu en eau condensée de la zone de nuage fin est choisi pour correspondre au 16^{ème} percentile de la distribution. Le contenu en eau du nuage épais est ensuite déterminé de manière à ce que la moyenne des deux contenus en eau corresponde au contenu en eau liquide du nuage totale, qui est une donnée d'entrée du modèle.

Dans l'implémentation de TripleClouds, ce sont les expressions de $f^{fin} = q_c^{fin}/\bar{q}_c$ et $f^{epais} = q_c^{epais}/\bar{q}_c$ qui sont paramétrisées puis utilisées comme facteur sur l'épaisseur optique moyenne du nuage afin de calculer l'épaisseur optique du nuage fin et du nuage épais. Si l'on remplace la PDF de l'eau condensé par la PDF des épaisseurs optiques dans les raisonnements de Shonk and Hogan (2008) et sur la Figure I.9 alors on a bien caractérisé les hétérogénéités horizontales des épaisseurs optiques du nuage et on a : $f^{fin} = \tau^{fin}/\bar{\tau}$ et $f^{epais} = \tau^{epais}/\bar{\tau}$.

f^{fin} est une fonction de **FSD**, qui est le rapport entre l'écart-type de la distribution d'épaisseur optique et sa moyenne (Equation I.4). La fonction dépend de la loi de distribution choisie

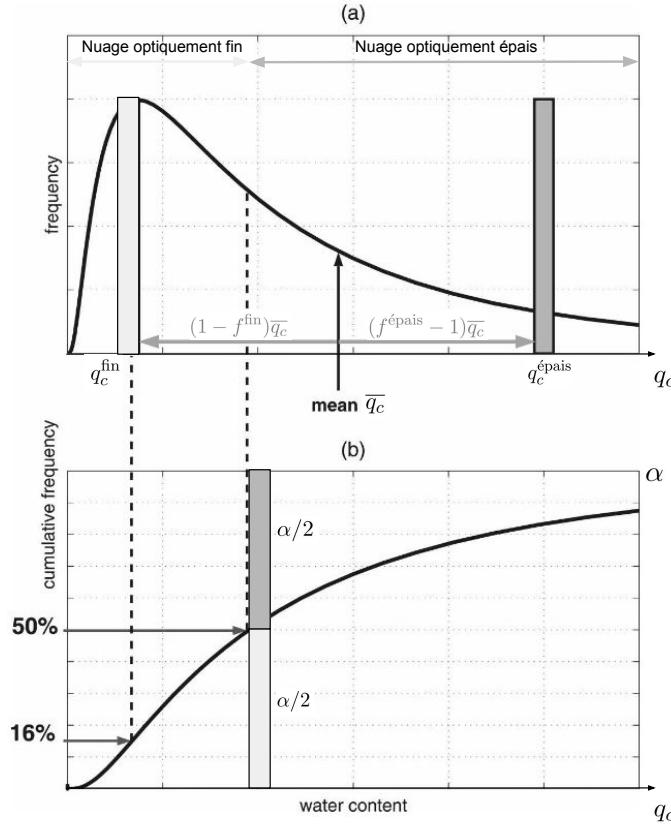


FIGURE I.9 – Schéma adapté de Shonk and Hogan (2008) (a) fonction de densité de probabilité p_{Q_c} du contenu en eau condensée q_c , de moyenne \bar{q}_c (b) fonction de répartition associée. q_c^{fin} (respectivement $q_c^{\text{épais}}$) est la valeur du contenu en eau condensée du nuage optiquement fin (respectivement épais), situé à la distance $(1 - f^{\text{fin}})\bar{q}_c$ (respectivement $(f^{\text{épais}} - 1)\bar{q}_c$) de la moyenne. La valeur asymptotique de la fonction de répartition de l'eau condensée est la fraction nuageuse α .

pour caractériser les hétérogénéités des épaisseurs optiques. C'est sur ce point que les choix ont évolué depuis Shonk and Hogan (2008). propose d'utiliser une loi lognormale puis Hogan et al. (2019) un loi gamma ; dont les expressions de f^{fin} , c'est-à-dire de leur 16^{ème} percentile normalisé, sont données Equation I.7.

$$f^{\text{fin}} = \begin{cases} e^{-\text{FSD}[1+0.5\text{FSD}(1+0.5\text{FSD})]} & (\text{gamma}) \\ \frac{e^{-\sqrt{\log(\text{FSD}^2+1)}}}{\sqrt{\text{FSD}^2 + 1}} & (\text{lognormale}) \end{cases} \quad (\text{I.7})$$

Hogan et al. (2019) montre qu'utiliser la loi gamma donne de meilleurs résultats qu'avec la loi lognormale, avec toutefois des erreurs qui deviennent importantes pour des grandes valeurs de **FSD** (supérieure à 2). Une correction est alors appliquée aux formulations de f^{fin} . Tout d'abord, f^{fin} est borné pour les valeurs basses par 0.025, tel que : $f_{\text{corr}}^{\text{fin}} = 0.975f^{\text{fin}} + 0.025$. Ensuite, pour des valeurs de **FSD** comprise entre 1,5 et 3,75, la fraction occupé par la région de nuage optiquement fin augmente linéairement de la fraction initiale $0,5\alpha$ à $0,9\alpha$. Puis, pour des **FSD** supérieurs à 3,75, la fraction occupée par la région de nuage optiquement fin est égale à $0,9\alpha$, avec α la fraction nuageuse totale de la maille.

Le recouvrement des hétérogénéités est pris en compte par un paramètre libre f_ℓ tel que la longueur de décorrélation des hétérogénéités est égale à $f_\ell \ell_0$.

SPARTACUS

Le solveur SPARTACUS (pour SPeedy Algorithm for Radiative TrAnsfer through CloUd Side, Hogan et al. (2016), Schäfer et al. (2016) et Hogan et al. (2019)) est un prolongement du solveur TripleClouds qui modélise les effets radiatifs 3D des nuages dans le solaire et l'infra-rouge. Cette modélisation consiste plus précisément à modéliser les effets des transferts radiatifs horizontaux au sein de la colonne atmosphérique, sur les flux radiatif verticaux. Cette modélisation est séparée en deux : une paramétrisation des effets des transports radiatifs horizontaux à travers les bords des nuages, au sein d'une même maille, sur les flux radiatifs verticaux montant et descendant aux interfaces de la maille (qui comprend les processus de *side illumination*, *side escape*, *channeling* et émission tridimensionnelle pour l'IR), et une paramétrisation du piégeage qui implique un changement de région d'une partie du flux (ciel-clair vers nuage optiquement fin ou épais) d'une couche à une autre, mais qui n'aurait pas eu lieu s'il s'était propagé uniquement verticalement (c'est à dire que le modèle de recouvrement nuageux utilisé dans un cadre 1D ne suffit pas à expliquer ce transfert).

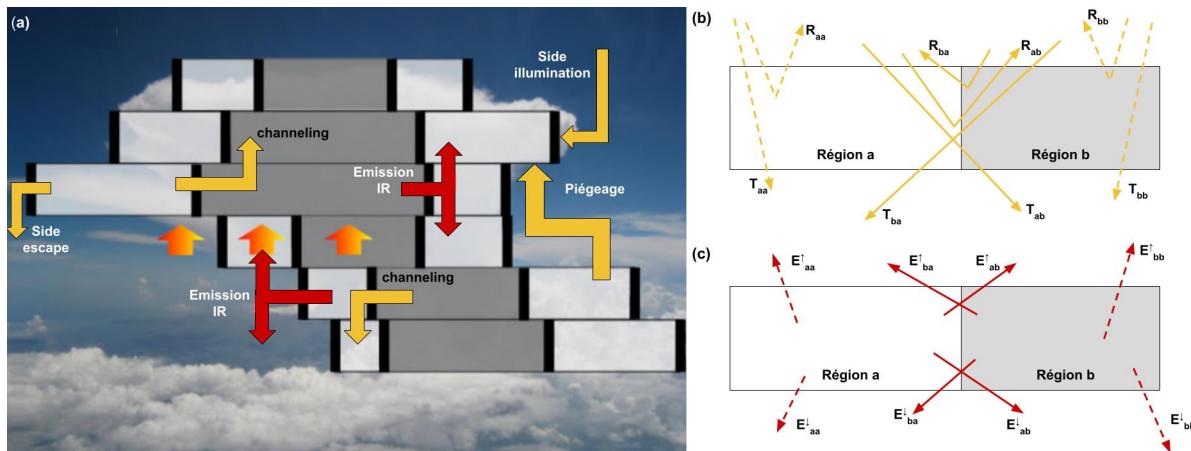


FIGURE I.10 – Schémas représentant les flux radiatifs paramétrisés par le solveur SPARTACUS. (a) Lien entre processus et flux radiatifs paramétrisés dans SPARTACUS. Les trois flèches oranges représentent les flux radiatifs déjà paramétrisés par le solveur TripleClouds. Les flèches jaunes et rouges représentent les flux radiatifs liés aux effets 3D, les flèches rouges pour les flux radiatifs spécifiques à l'IR. (b) et (c) Schéma adapté de Hogan et al. (2016) représentant les échanges radiatifs modélisés dans SPARTACUS entre deux régions a et b, qui peuvent être du ciel-clair et/ou des nuages optiquement fin et/ou épais. Les flèches pointillées schématisent les échanges déjà modélisés dans TripleClouds, celles en traits pleins les échanges ajouté dans Spartacus (b) Le flux radiatif arrivant en haut d'une région par diffusion peut être soit réfléchi (R) soit transmis (T) dans la même région (R_{aa} , R_{bb} , T_{aa} , T_{bb}) ou dans une autre région (R_{ab} , R_{ba} , T_{ab} , T_{ba}) (c) l'émission radiative dans une région dans l'IR (E) contribue au flux radiaitf ascendant (E^{\uparrow}) et descendant (E^{\downarrow}) de la même région (E_{aa} , E_{bb}) ou d'une autre région (E_{ab} , E_{ba}).

Une première paramétrisation modélise l'effet des transferts radiatifs horizontaux à l'intérieur d'une couche entre les régions ciel-clair et nuage optiquement fin, et entre les régions de nuage optiquement fin et optiquement épais. Le transport au sein d'une couche entre nuage optiquement épais et ciel-clair n'est pas autorisé. Les échanges pris en compte entre deux régions d'une même maille sont schématisés Figure I.10 (b) et (c). Le traitement du recouvrement vertical des nuages et de leurs hétérogénéités est pris en compte avec un modèle exponentiel-aléatoire. Tous ces transports horizontaux sont proportionnels à la surface de l'interface entre les couches. Les nuages sont considérés remplir toute la hauteur de la couche, comme sur la Figure I.10. Les transports horizontaux sont alors proportionnels à la hauteur de la couche et à la longueur de l'interface entre les régions ramenée à la surface de la maille. Cette densité de longueur des interfaces entre le ciel-clair et le nuage optiquement fin correspond à la densité

de bord des nuages, ou périmètre des nuages, noté p , en m^{-1} . Lorsque la fraction nuageuse est supérieure à 0.5, on parlera plutôt de densité de périmètre des trous.

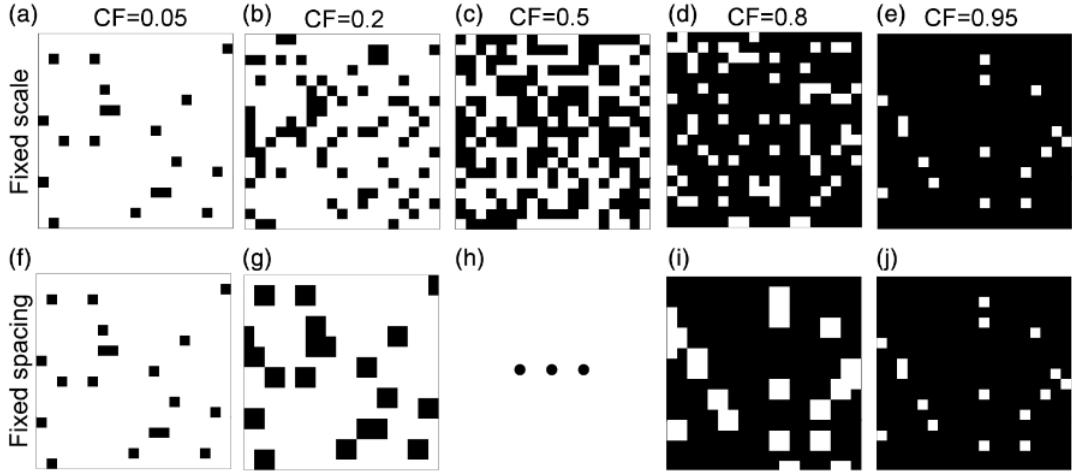


FIGURE I.11 – Schéma issu de Fielding et al. (2020) montrant la disposition des nuages (en noir) dans des pixels de $1 \times 1 \text{ km}^2$ pour différentes fraction nuageuses (colonne) (a-e) en utilisant la formulation I.8 avec une taille effective des nuages $\mathbf{Cs} = 1 \text{ km}$ et (f-j) en utilisant la formulation I.9 avec un espace effectif des nuages $\mathbf{Cx} = 4.6 \text{ km}$. On voit le nombre de nuages augmenter avec la fraction nuageuse (a-c) puis le nombre de trou diminuer avec la fraction nuageuse (d-e) lorsque l'on utilise la formulation avec une taille effective des nuages fixe. Lorsque l'on utilise la formulation avec un espace effectif fixe, on voit une augmentation de la taille des nuages avec la fraction nuageuse (f-g) puis une diminution de la taille des trou avec l'augmentation de la fraction nuageuse (i-j)

Plusieurs formulation de cette grandeur ont été proposées, afin de la relier à un paramètre libre, idéalement indépendant de la fraction nuageuse. Schäfer et al. (2016) propose de formuler ce périmètre surfacique par l'Equation I.8

$$p = \frac{4\alpha(1 - \alpha)}{\mathbf{Cs}} \quad (\text{I.8})$$

Avec α la fraction nuageuse et \mathbf{Cs} un paramètre libre représentant la taille effective des nuages, en mètre. Cette formulation est illustrée sur la première ligne de la Figure I.11, où l'on voit que le nombre de nuages augmente avec la fraction nuageuse, jusqu'à une fraction nuageuse de 0.5, puis le nombre de trou diminue lorsque la fraction nuageuse augmente.

Fielding et al. (2020) propose une formulation de la densité de longueur d'interface p en fonction du paramètre libre \mathbf{Cx} , représentant l'espace effectif des nuages (en mètre), selon l'Equation I.9, avec α la fraction nuageuse dans la maille.

$$p = \frac{4\sqrt{\alpha(1 - \alpha)}}{\mathbf{Cx}} \quad (\text{I.9})$$

Pour des fractions nuageuses inférieures à 0.5, la surface des nuages augmente lorsque la fraction nuageuse de la maille augmente, pour un même nombre de nuage. Pour des fractions nuageuses supérieures à 0.5, la surface des trous diminue lorsque la fraction nuageuse augmente, pour un même nombre de trous (Figure I.11 (f-j)).

De même, la densité de périmètre de l'interface entre nuage optiquement fin et nuage optiquement épais, notée p_{cl} , est déterminée en utilisant soit l'équation I.8 soit l'équation I.9, selon l'option choisie pour calculer p , en remplaçant α la fraction nuageuse α par la fraction nuageuse du nuage épais α_{epais} .

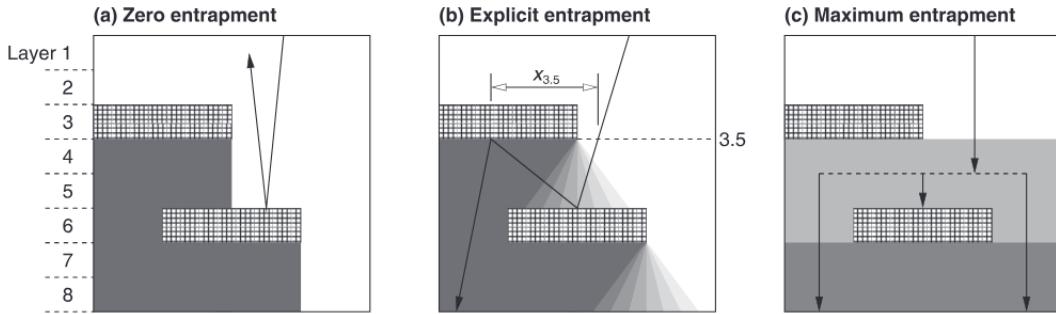


FIGURE I.12 – Schéma issu de Hogan et al. (2019) représentant les différents traitements possibles pour le piégeage dans SPARTACUS. Deux nuages de fraction 0,5 et épais d'une couche sont situés à la couche 3 et à la couche 6 de la colonne atmosphérique. Leur recouvrement est aléatoire. L'atténuation du rayonnement solaire descendant par les nuages est montrée avec les différents niveaux de gris. (a) cas sans piégeage (b) avec traitement explicite du piégeage et (c) avec traitement maximum du piégeage.

Le processus de piégeage prend en compte le fait que les rayons peuvent changer de région au cours de leur propagation à cause de leur direction de propagation qui n'est pas totalement verticale. Par exemple, un rayon réfléchi par le haut d'un nuage repart toujours vers l'espace s'il se propage uniquement sur la verticale (Figure I.12 (a)) alors qu'il peut en fait être intercepté par un nuage situé plus haut (Figure I.12 (b)), y compris un morceau du même nuage (Figure I.10 (a)). Ce processus de piégeage existe même sans modélisation des bords des nuages, contrairement aux autres effets radiatifs 3D modélisés dans SPARTACUS. Il est modélisé explicitement dans SPARTACUS (Hogan et al. (2019), Figure I.12 (b)) via la paramétrisation de la distance moyenne horizontale parcourue par les rayons qui sont interceptés par un nuage (la distance $x_{3.5}$ sur la Figure I.12 (b)). Ce processus est important dans les scènes où existent plusieurs couches de nuage (cumulus recouverts de cirrus par exemple). La modélisation de ce processus conduit toujours à une diminution de la réflectivité des scènes nuageuses (Hogan et al., 2019).

Les effets radiatifs 3D moyens dans le solaire, évalués sur 65 scènes nuageuses différentes par Hogan et al. (2019) ou par Barker et al. (2015), ont tendance à réduire la réflectivité des scènes nuageuses et ont donc un effet réchauffant sur l'atmosphère.

I.1.2 ecRad et le cadre SCM/LES

Les paramétrisations physiques de LMDZ sont traditionnellement développées et évaluées dans le cadre SCM/LES, ou 1D/LES. Dans ce cadre, une version uni-colonne du GCM, appelée SCM pour Single Column Model, et une simulation LES sont tournées en utilisant les mêmes forcages (profils initiaux, conditions de surface, avec parfois des tendances supplémentaires (sources ou puits) de vents, d'humidité et de chauffage imposés dans la colonne du GCM et dans le domaine de LES). Les résultats de la simulation LES, dont la résolution horizontale est de l'ordre de la dizaine ou centaine de mètres, sont alors utilisés comme référence pour la colonne du GCM associée. Les forcages sont choisis pour être typiques des situations météorologiques dont les processus sont paramétrisés dans le GCM (couche limite stable pour la turbulence, couche limite convective avec ou sans nuage, convection profonde etc.). Une bibliothèque de ces cas 1D rassemblant les forcages disponibles dans un format standardisé afin d'être utilisable par tous les modèles, est mise à disposition par Dephy (2020) (Développement et Evaluation PHYSique des modèles Atmosphériques). Ce cadre de travail permet de développer et d'évaluer les paramétrisations du GCM au niveau des processus et sans interaction avec la dynamique, dans un environnement très contrôlé et à très faible coût de calcul.

Ce cadre de travail a été élargi au tuning des paramètres libres des modèles atmosphériques

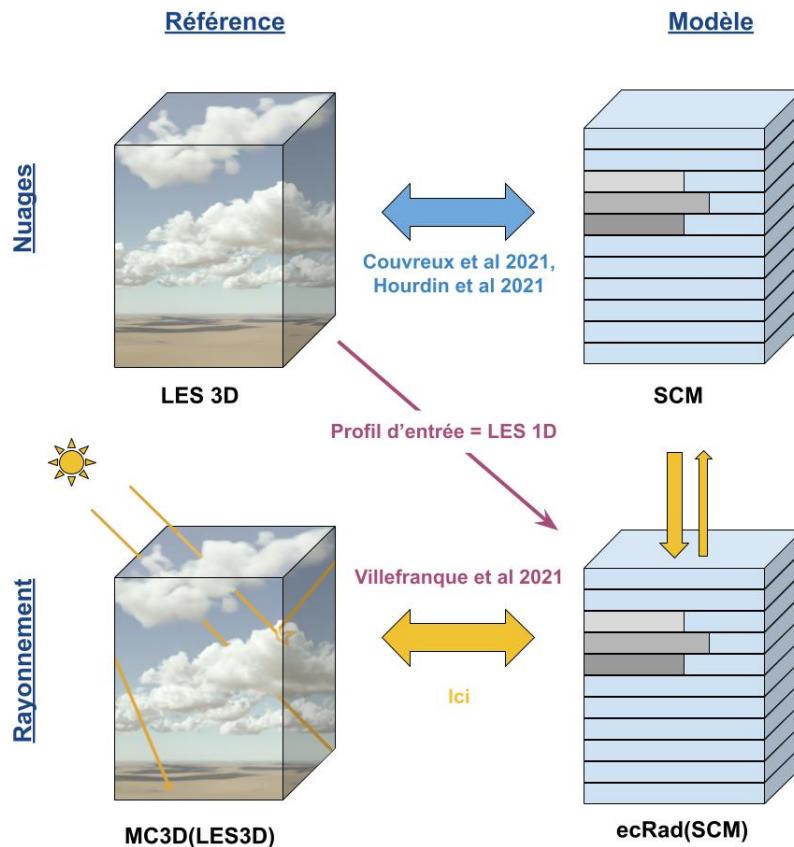


FIGURE I.13 – Schéma illustrant le cadre de travail SCM/LES (ou 1D/LES), pour l'évaluation, le développement et le tuning des GCMs. Les sorties de simulation d'une colonne de GCM peuvent être comparées aux sorties de simulations LES tridimensionnelles qui servent de références pour les variables de physique atmosphériques et nuageuses, et pour le tuning des paramètres libres du GCM (Couvreux et al., 2021; Hourdin et al., 2021). Les champs de LES convertis en propriétés optiques sont utilisés pour calculer des références radiatives par Monte Carlo (MC3D), qui peuvent ensuite être comparées à un calcul de transfert radiatif à deux flux utilisant comme profil d'entrée le profil moyen de la LES 3D (Villefranque et al., 2021) ou le profil du SCM (ici).

(LMDZ à l'IPSL, Meso-NH, AROME, ARPEGE à Météo-France) sur des cas de convection peu profonde dans le cadre de l'ANR HighTune, comme expliqué en détail section [mettre ref section]. Un des objectifs de l'ANR HighTune était de pouvoir tuner conjointement les propriétés physiques et radiatives des nuages à l'échelle des processus. Cependant, les modèles de LES utilisent des paramétrisations du transfert radiatif basées sur les mêmes hypothèses que dans les modèles de climat (approximation plan parallèle, colonnes indépendantes donc effets radiatifs 3D négligés). Les flux radiatifs simulés par la LES ne peuvent donc pas être considérés comme une référence. La première étape pour élargir le cadre 1D/LES au rayonnement a été de développer des outils de calcul de transfert radiatif sur les scènes nuageuses simulées par les LES, décrit section I.1.2.1. Ces outils ont été développés lors de l'ANR HighTune et dans le cadre de la thèse de Villefranque (2019). Les calculs ainsi réalisés ont servi comme référence pour le tuning des paramètres libres du solveur SPARTACUS de ecRad dans l'étude de Villefranque et al. (2021), dans lequel ecRad était exécuté en mode diagnostique sur les profils atmosphériques issues de la même simulation LES ayant servi pour le calcul de référence du rayonnement (section I.1.2.2). Enfin, dans la présente thèse, le cadre 1D/LES a été élargi au tuning des paramètres libres de ecRad et/ou de LMDZ, dans lequel ecRad est tourné en mode diagnostique et prenant en entré le profil issus du SCM ; et en utilisant comme référence les simulations LES et leurs

références radiatives associées. Les choix permettant cette comparaison sont détaillés section I.1.2.2.

I.1.2.1 Calculs radiatifs de référence par Monte Carlo sur des LES

Les calculs de référence de transfert radiatif sur des scènes nuageuses issues de simulations LES ont été développés dans la thèse de Villefranque (2019). Ces calculs de transfert radiatif sont basés sur une méthode de Monte Carlo en trois dimensions sur des champs de LES décrivant le milieu de propagation du rayonnement (l'atmosphère nuageuse) également en trois dimensions.

Les méthodes de Monte Carlo sont des méthodes probabilistes, permettant d'estimer l'espérance d'une variable aléatoire X en réalisant un grand nombre de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées à X . L'espérance d'une variable aléatoire X , noté $E[X]$, s'exprime pour les cas continus comme : $E[X] = \int_{x \in \Omega} x p_X(x) dx$, avec Ω le domaine des réalisations possibles de X et p_X la fonction densité de probabilité associée à X . L'espérance de X peut s'estimer à partir d'un échantillon de l'estimateur \bar{X} , construit comme la moyenne de n variables aléatoires i.i.d $\{X_i\}_{i \in [1;n]}$, soit : $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$. Le théorème central limite assure que la loi de \bar{X} tend vers une loi normale d'espérance $E[X]$ et d'écart type σ_X / \sqrt{n} , lorsque n tend vers l'infini. Autrement dit, pour un n assez grand, une réalisation de \bar{X} , obtenue en réalisant les n variables aléatoires i.i.d X_i , a une probabilité de 95% de tomber dans l'intervalle de confiance $[E[X] - 2\sigma_X / \sqrt{n}, [E[X] + 2\sigma_X / \sqrt{n}]$. Les méthodes de Monte Carlo sont très utiles pour estimer des intégrales de fonction dont on ne connaît pas la primitive. Si on note \mathcal{I} l'intégrale d'une fonction quelconque f , on peut réécrire cette intégrale comme l'espérance de la variable aléatoire $f(U)$ avec U une variable aléatoire que l'on sait échantillonner (par exemple de loi uniforme), et estimer cette espérance à partir de la réalisation d'un échantillon de variables U_i i.i.d à U , $\{f(u_i)\}_{i \in [1;n]}$. Les méthodes de Monte Carlo sont particulièrement efficaces pour estimer des intégrales multiples, où un tirage successif peut être fait à chaque nouvelle intégrale, grâce à la propriété de linéarité des espérances, aussi appelée "double randomisation" (Villefranque et al., 2022).

L'équation du transfert radiatif est très difficile à résoudre avec des méthodes déterministes en milieu hétérogène, à cause de la diffusion multiple et de sa haute dimensionnalité (3 dimensions spatiales, 2 dimensions directionnelles). Cependant, il existe une formulation intégrale de cette équation, qui peut être développée sous forme d'intégrales multiples grâce à la méthode du noyau itéré. Cette écriture est favorable à une lecture probabiliste, et à l'utilisation des méthodes de Monte Carlo. Les méthodes de Monte Carlo peuvent ainsi être utilisées pour estimer la luminance en un point, une direction et une longueur d'onde, ou des intégrales de cette luminance (sur un partie du spectre ou sur les angles solides par exemple).

Dans le cadre de la comparaison avec ecRad, on souhaite estimer le flux radiatif solaire descendant (ou montant) à une certaine altitude z_0 par méthode de Monte Carlo. C'est-à-dire estimer l'intégrale sur le spectre solaire, sur les directions venant du demi-hémisphère haut (ou bas pour le flux montant) et sur la surface horizontale d'altitude z_0 , de la luminance par Monte Carlo. Le problème va se modéliser avec :

- Une source d'émission de photon unique, qui est le soleil, dont on connaît la luminance en fonction de la longueur d'onde et qui a une position fixe déterminée par ses angles zenithal et azimutal. C'est une condition aux limites de l'équation de transfert : la luminance au sommet de l'atmosphère est connue : dans la direction du soleil, c'est la luminance solaire, dans les autres directions, c'est zéro.
- Une colonne atmosphérique avec un certain maillage contenant la description des propriétés optiques du milieu, dérivées de la simulation LES

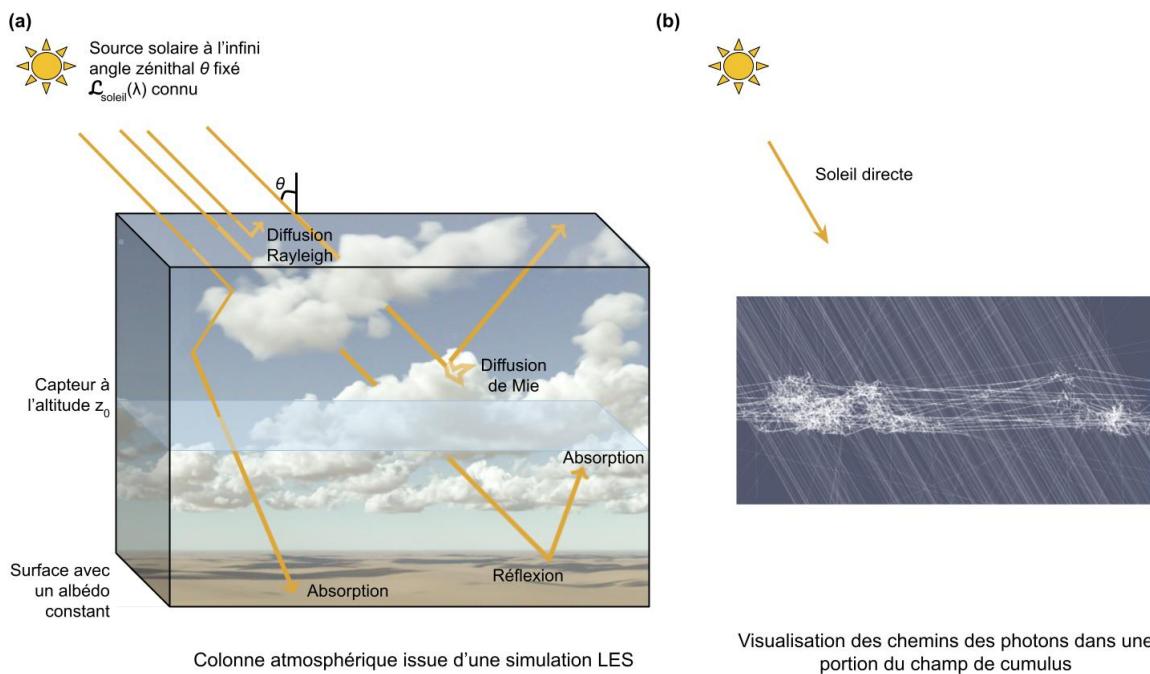


FIGURE I.14 – Schéma illustrant l'algorithme analogue de Monte Carlo. (a) Quelques chemins parcourus par les photons dans la colonne atmosphériques sont schématisés ici. Un capteur transparent chargé de compter les photons arrivant sur sa surface (depuis le haut ou le bas) est placé à l'altitude z_0 . L'image utilisée est un rendu photo réaliste produit par htrdr sur une scène de la simulation LES du cas ARMCU par Meso-NH. (b) Visualisation des chemins des photons (en blanc et vue de face) effectivement parcourus lors d'un calcul de transfert radiatif par Monte Carlo avec htrdr dans une portion de champ de cumulus. Les nuages sont repérables aux endroits où les photons sont fortement diffusés (diffusion de Mie) et changent ainsi souvent de direction sur de courtes distances.

- La surface, caractérisée dans ce calcul par un albédo constant dans l'espace, sur le spectre et les directions, et une fonction de réflectivité lambertienne
- Un capteur virtuel placé à la position où l'on souhaite calculer le flux (ici à l'altitude z_0), normal à la demi-sphère sur laquelle on veut intégrer le flux, (ici vers le haut).

Un algorithme de Monte Carlo analogue à la formulation intégrale du problème pourra être le suivant :

- Etape 1 : Un photon émis par le soleil arrive en haut de la colonne atmosphérique. La longueur d'onde λ du photon est tirée suivant la loi choisie pour décrire la luminance du soleil en fonction de la longueur d'onde (fonction de Planck à la température du soleil, spectre solaire discrétisé en fines bandes...), sa position d'entrée dans la colonne est tirée uniformément sur la surface de la colonne, et sa direction de pénétration dans l'atmosphère est connue et correspond à la position du soleil
- Etape 2 : On tire la distance l parcourue par le photon avant qu'il n'intéragisse avec l'atmosphère, suivant la loi de Beer-Lambert. Si pendant son trajet, le photon intercepte :
 - le sommet de l'atmosphère : c'est qu'il est en train de monter et s'échappe dans l'espace. On arrête l'algorithme, le photon ne retouchera plus jamais le capteur
 - un côté du domaine : il est transposé de l'autre côté du domaine (conditions aux limites périodiques sur les bords du domaine)
 - la surface : on tire un nombre aléatoire uniforme pour savoir s'il va être réfléchi ou absorbé par la surface, la probabilité de réflexion étant égale à l'albédo de la surface.

S'il est absorbé on arrête l'algorithme, s'il est réflechi on continu en changeant sa direction de propagation, que l'on tire aléatoirement suivant la fonction de distribution des directions réfléchies par la surface (BRDF)

- le capteur virtuel, en arrivant du haut : on compte ce photon (on ajoute 1 au compteur) et on continue l'algorithme
- Etape 3 : Le photon rencontre une particule (molécule de gaz ou gouttelette d'eau nuageuse). Un tirage est effectué pour savoir si le photon sera diffusé par la particule ou absorbé, connaissant la probabilité d'être absorbé (resp., diffusé) qui est au pro-rata du coefficient d'absorption (resp., de diffusion) sur le coefficient d'extinction total.
 - Si le photon est absorbé alors son chemin s'arrête ici et on arrête l'algorithme
 - Si le photon est diffusé, alors on effectue un tirage pour savoir quel type de particule le photon a rencontré, en fonction de leur concentration relative locale (à l'endroit de la diffusion). Puis la direction dans laquelle il est diffusé est tirée suivant la loi de probabilité angulaire ou fonction de phase, qui dépend du type de particule rencontré (diffusion de Rayleigh pour les gaz, diffusion de Mie si c'est une goutte d'eau liquide), de la longueur d'onde du photon et de l'angle incident du photon sur la particule. Puis l'algorithme est repris à partir de l'étape 2, avec cette nouvelle direction.

Cet algorithme décrit le chemin parcouru par un photon dans le milieu atmosphérique, depuis sa source jusqu'à son capteur. Cet algorithme est répété n fois, décrivant le chemin de n photons et comptant à chaque fois qu'un photon passant par le capteur (un même photon peut passer plusieurs fois). Le flux radiatif hémisphérique est alors égal à

$$\text{Constante solaire} \times \frac{\text{Nombre de passage de photon par le capteur au total}}{\text{Nombre de photons simulés} = n}$$

. L'incertitude de l'estimation décroît en \sqrt{n} . On voit que si l'atmosphère est transparente, alors tous les photons passent exactement une fois par le capteur, et le flux radiatif hémisphérique descendant sur le capteur sera alors exactement la constante solaire.

Les images physiquement réalistes de LES sont réalisées avec le code htrdr (Villefranque et al., 2019), dont le principe est le même que celui des calculs de références mais dont l'implémentation est différente. htrdr peut faire des calculs Monte Carlo dans le spectre solaire et dans le spectre infrarouge. La recherche concernant les méthodes de Monte Carlo concerne à la fois la formulation intégrale des équations qui permet de travailler formellement sur les algorithmes (en modifiant par exemple les lois de tirages pour améliorer la convergence des estimateurs), mais aussi toutes les questions d'implémentation permettant de réduire le coût de calcul. La nature très hétérogène de l'atmosphère en présence de nuages a nécessité des développements spécifiques pour permettre aux calculs d'être réalisables même sur des données de champs nuageux extrêmement détaillées (de l'ordre du milliard de mailles pour décrire un champ). Le résultat de ce travail est que le temps associé au suivi des photons est insensible à la complexité (détail, raffinement) de la donnée d'entrée.

L'algorithme de Monte Carlo fournit donc une estimation non biaisée (étant donné le modèle et les données décrivant le système) de la luminance ou du flux radiatif dont l'incertitude est connue grâce au théorème central limite. Typiquement, avec cent mille photons simulés, on a une estimation du flux solaire incident en surface sous des cumulus avec une incertitude autour de un pour mille (0.1%). Pour les calculs de référence, on simule plutôt 10 millions de trajectoires, pour avoir une incertitude autour de un pour dix mille (0.01%). L'incertitude est donc très faible relativement au flux total (plusieurs centaines de $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), mais quand on regarde par exemple des différences entre flux 3D et 1D estimés par Monte Carlo, la différence des deux peut être petite, de quelques $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ seulement, mais les incertitudes des estimateurs se cumulent donc

il est nécessaire que chaque estimateur soit bien convergé pour avoir des estimations fiables de leurs différences.

I.1.2.2 Utiliser les calculs de référence Monte Carlo pour évaluer et tuner les modèles de transfert radiatif de ecRad

Villefranque et al. (2021) propose une expérience de tuning des paramètres libres du solveur SPARTACUS de ecRad en visant les références radiatives Monte Carlo sur une ensemble de scènes issues de simulations LES de cumulus continentaux (cas ARMCU et SCMs) et océanique (cas RICO et BOMEX). Cette expérience repose sur la comparaison des flux radiatifs calculés par SPARTACUS, tourné en mode diagnostique sur un profil vertical issu des scènes tridimensionnelles simulées par la LES, et d'un calcul par Monte Carlo réalisé directement sur le champ tridimensionnel de la LES avec 10 millions de tirage. Les flux radiatifs sont comparés en ayant vu le même profil moyen nuageux. Cette expérience ajuste les paramètres libres de SPARTACUS de manière à ce qu'il soit capable de simuler les bons flux radiatifs si le profil nuageux qui lui est fourni est correct. La mise en place de cette comparaison à nécessité de traiter la question de la conversion des champs et profils de LES en propriétés optiques pour le rayonnement ; et celle de la conversion des champs tridimensionnels de LES en profils verticaux équivalents.

Dériver les propriétés optiques des champs issus de simulations LES

Dans les deux cas, le milieu atmosphérique simulé par la LES doit être converti en propriété optiques, c'est-à-dire en champs ou en profil spectraux de coefficient d'absorption, de diffusion et de fonction de phase. Pour la partie ciel-clair, ce sont les k-distributions du modèle RRTMG-IFS (Iacono et al., 2008) inclus dans ecRad qui sont utilisées, à la fois pour le calcul Monte Carlo et pour le calcul avec ecRad. La question des aérosols n'est pas abordée : toutes les simulations sont faites sans aérosols (bien que les différents modèles radiatifs que l'on utilise soient prêts à prendre en compte les aérosols). Pour la partie nuageuses, seule la question des nuages d'eau liquide est traitée car les cas de cumulus étudiés ne sont constitués que d'eau liquide.

Pour le calcul de référence par Monte Carlo, une description des propriétés optiques du milieu peut être déduite de la théorie de Mie. On fait l'hypothèse que les gouttes sont sphériques et uniquement constituées d'eau pure. Connaissant la distribution en taille des rayons des gouttes, les sections efficaces pour l'absorption et pour la diffusion peuvent être calculées précisément par la théorie de Mie en fonction de la longueur d'onde. Ces sections efficaces sont multipliées par la masse d'eau fournie par la LES pour ensuite calculer les coefficients d'absorption et de diffusion. Notons que le calcul des sections efficaces nécessite de connaître la distribution en taille des rayons des gouttelettes nuageuses, une donnée qui n'est pas fournie par les LES utilisées. Une première hypothèse doit donc être formulée ici. On tabule donc des données de Mie pour une hypothèse de distribution de taille lognormale, paramétrée par un rayon effectif des gouttes (le rapport des moments d'ordres 3 et 2 des distributions de rayon des gouttes d'eau liquide, représentant un rayon effectif des gouttes pour le transfert radiatif) égale à $10 \mu\text{m}$.

Dans ecRad, on a deux options pour calculer les propriétés optiques d'un profil atmosphérique nuageux : soit à partir des données optiques du modèle SOCRATES (Manners et al., 2017), assez grossièrement discrétisées sur le spectre ; soit à partir de tables de Mie plus fines spectralement. Les sections efficaces pré-tabulées dans ces fichiers, en fonction du spectre et des rayons effectifs, sont de nouveau multipliés par les rapport de mélange en eau liquide fournies en entrée d'ecRad. De la même manière que pour le calcul de référence, une hypothèse sur la distribution de taille des gouttes est sous-jacente à la création des tables de données optiques. Ici, on ne contrôle pas l'hypothèse qui a été faite pour créer ces données.

Ensuite, dans les modèles à deux flux, deux approximations sont faites sur la diffusion du rayonnement solaire par l'eau liquide. Tout d'abord, la fonction de phase n'est pas décrite dans

son entier, mais c'est son facteur d'asymétrie qui est utilisé pour la caractériser et en déduire la proportion du flux rétrodiffusé par la couche. Ensuite, l'approximation de δ -Eddington (Joseph et al., 1976) est utilisée afin de corriger l'approximation précédente en rajoutant la partie du rayonnement diffusé dans un petit angle solide autour de la direction du flux directe dans le flux solaire direct (donc transporté vers l'avant). Ces deux approximations sont inhérentes au calcul du transfert radiatif par méthode à deux flux.

Toutes les approximations classiquement faites par ecRad pour passer d'un profil atmosphérique à un profil de propriétés optiques peuvent être utilisées pour transformer le champ 3D d'une LES en propriétés optiques pour le calcul du transfert radiatif de référence par Monte Carlo. La cohérence des approximations faites pour les deux transformations dépend de ce que l'on souhaite comparer, évaluer et/ou tuner. Les choix faits dans l'étude sont les suivants :

- le calcul de référence utilise une description détaillée de la fonction de phase, alors que le calcul fait avec ecRad utilise une description utilisant un facteur d'asymétrie et l'approximation de δ -Eddington. Ces hypothèses sont considérées comme intrinsèques aux schémas radiatifs à deux flux, et on souhaite les évaluer lors de la comparaison et du tuning.
- le rayon effectif des gouttes est fixé à $10 \mu\text{m}$ partout dans les deux calculs, ce qui est vu comme une donnée d'entrée pour les modèles de transfert et n'ont donc pas de raison d'être différents d'un modèle à l'autre. Le modèle utilisé pour dériver les propriétés optiques de gouttes d'eau liquide est celui de Mie dans les deux cas, mais les données utilisées ne sont pas exactement les mêmes. La différence entre les deux a un impact très faible sur les flux calculés, et fait partie de l'incertitude inhérente aux paramétrisations radiatives qui sont souvent livrées avec leurs données de propriétés optiques dont on ne contrôle pas toujours la précision en tant qu'utilisateur. Le tuning de ecRad fournira donc un modèle simulant des flux radiatifs corrects à condition que les rayons effectifs soient bons, mais ne sera pas sur-calibré de façon à ce que si les hypothèses de forme de distribution de taille de goutte changent, on trouve encore des configurations du modèle qui soient acceptables.

L'influence de ces choix sur les flux radiatifs simulés dans des nuages plan parallèle homogènes sont documenté dans l'annexe de Villefranque et al. (2021).

Création des profils verticaux à partir de LES tridimensionnelles

Les profils verticaux atmosphériques utilisés sont des profils de température, pression, vapeur d'eau, eau liquide et fractions nuageuses issus des moyennes horizontales des champs simulés par la LES à chacun de ses niveaux verticaux, excepté pour les fractions nuageuses qui sont calculées comme la fraction des mailles contenant de l'eau liquide à chaque niveau. L'atmosphère n'est simulé que jusqu'à 4 km par la LES. Les profils atmosphériques utilisés au dessus du domaine de la LES sont issus des profils atmosphériques moyens des cumulus de moyenne latitude d'été de I3RC (Cahalan et al., 2005) distribués notamment avec le logiciel ecRad, dans lesquels il n'y a pas de nuage au dessus de 4 km. Ce raccordement est également fait pour le calcul des références radiatives par Monte Carlo.

Choix des configurations radiatives pour les comparaisons SCM / LES

Jusque là, on a comparé des flux radiatifs simulés par ecRad sur des profils nuageux issus de LES — on note ces flux ecRad(LES) ; avec les flux radiatifs de référence calculés sur la LES de référence, notés MC(LES). On souhaite désormais comparer les flux radiatifs simulés par ecRad sur les nuages issus de la version unicolonne du GCM, notés ecRad(SCM), avec les flux de référence MC(LES). Ce faisant, on élargit le cadre de comparaison 1D/LES existant à la comparaison des flux radiatifs solaires avec ecRad tourné en mode diagnostique sur les profils atmosphériques simulés par le GCM. Pour l'instant, les rétro-actions du transfert radiatif sur la

physique atmosphériques restent coupées. On remplace seulement les profils nuageux des LES par ceux simulés par le SCM.

Les questions de propriétés optiques soulevées dans le travail de Villefranque et al. (2021) se posent de la même manière ici, et ses choix ont été suivis. La question du traitement de l'atmosphère ciel-clair se pose également dans la comparaison ecRad(SCM) vs. MC(LES). Notre objectif ici est de traiter de la question des flux radiatif solaires associés aux nuages. Le choix est alors fait de remplacer les profils atmosphériques ciel-clair du SCM par ceux de la simulation LES utilisée pour faire le calcul de référence Monte Carlo. Dans cette comparaison, on enlève donc les différences dues aux profils de pression, température et vapeur d'eau sur les flux radiatifs. Dans le solaire, ces effets sont faibles comptant pour quelques W.m^{-2} au plus. En pratique, les profils de température, pression et vapeur d'eau issus de la LES utilisée pour les calculs de référence radiatives sont interpolées sur la grille du SCM jusqu'à 4km. Au-dessus du domaine de la LES, les profils issus de I3RC (Cahalan et al., 2005) représentant les profils ciel-clair typiques de nuages de cumulus de moyennes latitudes d'été sont utilisés à la fois pour le calcul de Monte Carlo et pour le ciel-clair de la SCM. Ainsi, les différences entre les flux MC(LES) et ecRad(SCM) viennent essentiellement des profils de contenu en eau liquide et fraction nuageuses simulées par le SCM, et de la modélisation du transfert radiatif lui-même (2 flux dans ecRad vs. Monte Carlo).

La question du traitement du ciel-clair dans l'infrarouge est plus sensible car les flux dans l'infrarouge dépendent au premier ordre de la température de l'atmosphère et des lieux d'émission et d'absorption, qui dépendent eux même fortement de la concentration en vapeur d'eau, en plus des nuages. Le découpage choisi pour le solaire ne paraît pas pertinent pour l'infrarouge. Cette question n'est pas abordée dans cette thèse et pourra faire l'objet de travaux futurs.

La question de la moyenne temporelle utilisée pour la comparaison se pose également dans la comparaison. En effet, le pas de temps de calcul de la LES est de une seconde et peut raisonnablement être considérée comme instantanée, contrairement à celui de la physique des GCM qui est autour de 15 min. On peut sortir des profils instantanés des simulations SCM mais il ne paraît pas évident que l'on veuille contraindre les flux radiatifs (et donc les nuages) du SCM à être en phase à la seconde près avec ceux du LES. On fera donc plutôt des comparaisons de flux moyennés sur une heure pour ne pas sur-constrainer le SCM.

Ce cadre de comparaison pour les flux radiatifs solaires à été mis à disposition dans l'outil de tuning hexplo. Il est désormais possible de tuner les paramètres libres de ecRad et/ou du GCM en visant les flux radiatifs solaires des calculs de référence et/ou les sorties classiques de la LES (variables météorologiques et nuageuses).

Des premières expériences exploitant ce nouveau cadre expérimental ont été réalisées pour éclairer la question des compensations d'erreurs au sein du modèle radiatif et entre les paramétrisations de rayonnement et de nuages. Cette étude a fait l'objet d'un article soumis à JAMES et présenté en Section I.2

Du brouillon à partir de la :

L'influence de ces choix sur les flux radiatifs des scènes nuageuses de cumulus sont documentés dans l'annexe de ?.

La description du milieu atmosphérique est fait via la simulation LES, qui fournit en sortie les champs tridimensionnels de concentration en eau condensée (uniquement liquide dans les cas étudiés) et en mélange de gaz. Les aérosols ne sont pas pris en compte dans ces calculs de références. Les propriétés optiques nécessaire à la description du milieu atmosphérique sont les coefficients d'absorption et de diffusion (ou de manière équivalent l'albédo de diffusion simple et le coefficient d'extinction) ainsi que la fonction de phase pour la diffusion.

Les propriétés optiques de l'eau liquide sont dérivées de la théorie de Mie, où les gouttes d'eau sont supposées parfaitement sphérique et constituées d'eau pur. Cette théorie fourni une estimation de la fonction de phase des gouttes ainsi que de la section efficace pour l'absorption S_{abs} et la diffussion S_{diff} , en fonction de la longueur d'onde et de la distribution de taille des gouttes. La LES utilisée pour produire les références radiatives ne simule pas ces tailles des gouttes. Les calculs de leur propriétés optiques sont fait en supposant que les rayons des gouttes suivent une distribution lognormale de paramètre μ et σ les espérances et écart-type du logarithme du rayon des gouttes. Avec μ représentant le rayon effectif des gouttes supposé homogène et égal à $10 \mu\text{m}$, et σ également pris constant égale à $0,1 \mu\text{m}$. Les sections efficaces son utilisées pour calculer les coefficient d'absorption et de diffusion de la maille située en \vec{x} contenant une masse $m_{liq}(\vec{x})$ d'eau liquide avec les équations I.10 et I.11.

$$k_{abs}(\vec{x}, \lambda) = m_{liq}(\vec{x})S_{abs}(\lambda) \quad (\text{I.10})$$

$$k_{diff}(\vec{x}, \lambda) = m_{liq}(\vec{x})S_{diff}(\lambda) \quad (\text{I.11})$$

Les propriétés optiques des gaz sont calculées en utilisant les k-distributions du modèle RRTMG-IFS inclu dans ecRad.

Les incertitudes d'un calcul de flux radiatifs par Monte Carlo sur un champ de LES résultent de la simulation LES en elle même et des hypothèses nécessaires au calcul des propriétés optiques à partir des champs de la LES.

I.1.2.3 Tuning des paramètres libres de ecRad avec hexplo

Ces calculs de références radiatives sont utilisée pour tuner les paramètres libres du solver SPARTACUS de ecRad dans le spectre solaire, dans l'expérience de Villefranque et al. (2021), en utilisant l'outil de tuning hexplo et quatre cas de cumulus la bibliothèque 1D/LES : ARMCU et SCMs pour les cumulus continentaux, RICO et BOMEX pour les cumulus océaniques. Un certain nombre de choix on été fait dans cette étude, concernant la comparaison entre les références radiatives et le modèle de transfert radiatif, ainsi que dans le choix des métriques.

Dans cette étude, ecRad est tourné en mode diagnostique sur des profil atmosphériques verticaux instantannés de température, pression, vapeur d'eau, eau liquide et fraction nuageuse. Ces profils sont issus des moyennes horizontales des champs simulés par la LES à chacun de ses niveaux. Les fractions nuageuses de chaque niveau sont calculées comme la fraction de maille contenant de l'eau liquide. L'atmosphère n'est simulé que jusqu'à 4 km par la LES. Les profils atmosphériques utilisés au dessus de 4 km sont issu des profils atmosphériques moyen de cumulus de moyenne latitude d'été de I3RC Cahalan et al. (2005) fourni par ecRad, dans lesquels il n'y a pas de nuage au dessus de 4 km. Les profils de mélanges de gaz atmosphériques autre que l'eau sont également ceux de I3RC pour toute la colonne atmosphérique. Les propriétés optiques utilisées sont celles du modèle RRTM-G pour les gaz Iacono et al. (2008) et celle du modèle SOCRATES pour les nuages Manners et al. (2017). La LES ne fournissant aucune information

sur la taille des gouttes et leur distribution, celle-ci est supposé lognormale de paramètre μ le rayon effectif des gouttes fixé à $10 \mu\text{m}$ et $\sigma = 0.1 \mu\text{m}$. L'intégration spéctrale est faite dans l'intervalle $0,2 - 12,2 \mu\text{m}$. Une méthode est proposée dans l'étude pour dériver des scènes de cumulus simulées par la LES, les trois paramètres libres choisis pour le tuning de SPARTACUS.

Les flux radiatifs ainsi calculés sont comparés aux flux radiatifs calculés par Monte Carlo sur les mêmes scènes nuageuses, en utilisant les mêmes modèles de propriétés optiques pour les gaz et les nuages, et le même intervalle spectral. 10 million de chemin sont lancés pour calculer les flux radiatif au sommet de l'atmosphère et à la surface, conduisant à une incertitude de l'estimation par Monte Carlo autour d'environ 0,1% du flux. [Question : comment est traité l'atmosphère au dessus de 4 km dans les calculs Monte Carlo ?]. La comparaison est faite sur des scènes instantanées de nuage avec un angle solaire fixé (0° , 44° ou 77°).

Le tuning est fait en faisant varier trois paramètres libres de SPARTACUS :

- la longueur de décorrélation des nuages ℓ_0 du modèle de recouvrement vertical exponentiel-aléatoire, variées entre 50 et 500 m, dont la valeur moyenne dérivée des LES est 189 m
- le paramètre d'intensité des hétérogénéités horizontales des épaisseurs optiques nuageuses **FSD**, en supposant une distribution gamma pour les épaisseurs optiques, varié entre 0,1 et 2, dont la valeur moyenne dérivée des LES est 0,704
- le paramètre de taille effective des nuages **Cs** inversement proportionnel à la densité de bord des nuages donc aux effets radiatifs 3D liés aux bords des nuages, varié entre 50 et 1000 m, dont la valeur moyenne dérivée des LES est 249 m

Les métriques choisies sont des métriques de flux radiatif solaire instantané réfléchi au sommet de l'atmosphère, absorbé par l'atmosphère et descendant à la surface, pour trois angles solaires (0° , 44° et 77°). Les tolérances à l'erreur sont choisis comme le troisième quartile de la distribution des erreurs relatives entre la référence et SPARTACUS sur l'ensemble des scènes nuageuses, dans une expérience où les paramètres libres de SPARTACUS sont fixés à leurs valeurs dérivées dans les LES.

La méthodologie de tuning proposée ici permet de régler les paramètres libres liés à la prise en compte des nuages par le modèle de transfert radiatif à deux flux SPARTACUS, ayant vu les profils de référence des nuages et utilisant les mêmes hypothèses pour dériver les propriétés optiques atmosphériques que celles utilisées par le calcul de référence. Cela signifie que ce sont uniquement les hypothèses intrinsèquement liées à la résolution du transfert radiatif à deux flux (c'est-à-dire l'approximation de la fonction de phase par un facteur d'asymétrie unique, l'approximation de δ -Eddington, et l'approximation d'un champ d'eau nuageuse complexe tridimensionnel par un profil vertical) qui peuvent être compensées par les paramétrisations de prise en compte des nuages pour le transfert radiatif, dans cette expérience de tuning. Autrement dit, à l'issue de cette expérience, SPARTACUS est calibré pour renvoyer des flux radiatifs corrects dans le solaire pour des profils atmosphérique d'entrées correcte de cumulus et en utilisant les mêmes hypothèses sur les propriétés optiques atmosphériques (gaz et eau liquide).

- tourner ecRad offline sur des profils 1D constitués à partir des champs 3D issues des LES

I.1.3 Diagnostique radiatif sur des simulations uni-colonne de LMDZ

I.1.4 Brouillon

Mon travail de thèse sur le rayonnement s'inscrit dans la suite du travail effectué lors de l'ANR HighTune et de la thèse de Najda Villefranche. Un objectif fort de l'ANR était de pouvoir tuner les paramètres libres du GCM en mode uni-colonne, sur des cas pré-existants pour lesquels des simulations hautes résolutions LES pouvaient être utilisées comme référence

HighTune et dans le cadre de la thèse de Najda Villefranque. Un des objectifs de l'ANR était de pouvoir tuner les paramètres libres du GCM en mode uni-colonne, en utilisant la bibliothèque de cas 1D existantes pour lesquels des simulations hautes-résolutions (LES) en utilisant comme référence des simulations hautes résolutions (LES), sur des variables météorologiques, nuageuse et radiative. Une partie du travail de thèse de Najda Villefranque a consisté à développer des codes de transferts radiatifs tridimensionnels utilisés.

ecRad avait été inclus dans l'outil de tuning htexplo au moment de l'ANR HighTune dans le cadre de la thèse de Najda Villefranque, afin d'explorer et de tuner ses paramètres libres à partir de flux radiatifs diagnostiquer sur des profils de LES, et en utilisant des références ra

Le travail d'utilisation de ecRad en mode diagnostique sur des sorties de cas 1D de LMDZ a été effectué au cours de ma thèse ecRad a aussi pu être utilisé en mode diagnostique (dit aussi offline) sur des sorties de cas 1D de LMDZ. ecRad avait déjà été intégré dans l'outil de tuning htexplo afin de tuner ses paramètres à partir de profil de LES Villefranque et al. (2021).

ecRad peut être utilisé en mode diagnostique et dans des modèles : GCM pour le climat ou la prévision du temps, LES, modèles régionaux (article de MAR en preprint) etc. IFS = Integrated Forecasting System c'est le modèle du centre européen Biblio : ecRad dans les modèles : Modèles régionaux : Mar : Inclusion of the ECMWF ecRad radiation scheme (v1.5.0) in the MAR (v3.14), regional evaluation for Belgium, and assessment of surface shortwave spectral fluxes at Uccle Méso-NH : Thèse : Erfan Jahangir Amélioration de la paramétrisation des propriétés optiques des nuages d'eau liquide dans le spectre solaire RACMO :OK First Results Of The Polar Regional Climate Model Racmo2.4 van Dalum et al. (2024)

Modèles globaux : - ICON : - LMDZ, ARPEGE : PNT : AROME

LES : - MesoNH

la suite c'est la version précédente du texte en cours de changement !

Toutes les lois de probabilités permettant les tirages décrit dans l'algorithme sont déterminées à partir de la formule de la luminance, décomposées en intégrale d'intégrales ou de sommes. Ces lois de probabilité dépendent du milieu et de ses propriétés optiques.

Pour aboutir à la figure Figure ?? ou aux figures de stratocumulus Figure I.4 [*qu'est-ce qu'on a fait en plus ?*]. Cet algorithme est aussi utilisé pour estimer directement des valeurs intégrées de la luminance. Ajouter une intégration est facile dans un algorithme de Monte Carlo. Cela revient à rajouter un tirage. Par exemple, si l'on souhaite évaluer la luminance intégrée sur le spectre solaire, on rajoute à l'étape 1 de l'algorithme un tirage de la longueur d'onde du photon émis par le soleil, dont la loi est déterminée par son spectre d'émission. [*Pour estimer un flux arrivant sur le capteur, on va compter tous les photons qui vont arriver sur le capteur, peut importe leur angle solide*]. De la même manière, on peut calculer le flux radiatif arrivant sur toute la surface de la LES en comptant chaque photon arrivant sur la surface. Cette intégration spatiale permet d'ailleurs de diminuer l'incertitude de l'estimation par l'algorithme et de faire des calculs plus rapides [*mettre un ordre de grandeur ?*].

En pratique, l'algorithme implémenté dans htrdr utilisé pour faire les calculs de référence est un algorithme inverse : il part du capteur et remonte les chemins de photons jusqu'aux sources. Ce choix a été fait pour être capable d'utiliser htrdr dans l'infrarouge, où les sources d'émissions des photons sont partout dans l'atmosphère et à la surface [?]. La nature très complexe et hétérogène du milieu atmosphérique en présence de nuage, tel que décrit par des LES, a nécessité des développements informatiques spécifiques permettant de rendre les algorithmes de Monte Carlo accessible en terme de temps de calcul et de précision. [*ordre de grandeurs ?*]

I.2 Experience compensation d'erreur rayonnement - nuage

I.3 Paramétrisation FSD

I.3.1 Recap du 25 septembre 2024

Recap de ce que l'on a fait :

- DEPHY 2023
- DEPHY 2024
- Point avec Fred en juin

DEPHY 2023 :

Calcul du FSD à partir des PDF du déficit à la saturation (= cas où les thermiques sont actifs)

- sans seuil (on prend en compte toute la PDF de l'eau liquide) = surestimation
- avec un seuil fixe pour "enlever les grosses gouttes" = sous-estimation, seuil trop brutal

DEPHY 2024 :

Je me souviens plus trop des échanges de l'atelier. Question : de quel précision dans cette paramétrisation a-t-on besoin pour améliorer la représentation des choses ?

J'étais sortie de l'atelier avec l'idée qu'on gardait notre param de FSD sans seuil, avec un fudge factor à tuner.

D'un point de vue pratique, on a une vieille version de LMDZ dans laquelle est codé le FSD. J'avais commencé à adapter l'outil de tuning pour pouvoir lire FSD dans les sorties de LMDZ et le donner à ecrad offline. Mais c'était fait à l'arrache donc il faut revoir ça sérieusement (côté codage FSD dans LMDZ et côté adaptation des scripts de tuning).

Point Fred juin :

On était parti sur une revisite des paramétrisations je crois, avec un modèle en puit de précip. J'ai plus les images en tête.

Si $q_c > q_{seuil}$:

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} = -\frac{q_c}{\tau} \quad (\text{I.12})$$

- On cherche $\frac{\partial Q_{inc}}{\partial t}$
- On cherche FSD $\Leftrightarrow P(q)$

Idée de le tester avec un modèle d'advection 1D.

Les questions pour aujourd'hui (25/09) :

- Dans quoi on se lance compte tenu du temps qu'il me reste ?
- Est-ce qu'on pourrait pas se dire que déjà faire le travail identifié **DEPHY2024** ce serait déjà pas mal, même si on sait que c'est pas parfait ? Ca développe quand même tout le cadre technique qui pourra nous servir avec une paramétrisation plus poussée.
- Ou alors on se dit que c'est de la perte de temps de travailler avec une paramétrisation dont on sait qu'on veut pas la garder.

Investigating cloud–radiation error compensations stemming from climate model calibration

M. Coulon-Decorzens¹, F. Hourdin¹, N. Villefranque²

¹Laboratoire de Meteorologie Dynamique, Sorbonne Université/IPSL/CNRS, Paris, France

²Centre National de Recherches Météorologiques, Météo-France, CNRS, Toulouse, France

Key Points:

- Ensembles of perturbed-parameter simulations of single column models are used to investigate cloud–radiation compensating errors
- We find that structural errors in radiative transfer models due to lack of 3D effects are compensated by overestimated cloud fractions
- Radiative transfer models with and without 3D effects should not be used with the same overlap and heterogeneity parameters

Corresponding author: M. Coulon-Decorzens, maelle.coulon-decorzens@lmd.ipsl.fr

Abstract

Compensating errors are an obstacle to the development of climate models. We wonder if systematic errors in simulated cloud properties might result from forced error compensation due to targeting top-of-atmosphere radiative fluxes in the tuning process while using an inaccurate radiative transfer parameterization. Here, we investigate parametric and structural errors in state-of-the-art radiative transfer models and ask if these errors might be compensated by errors in cloud properties, to what extent and in which circumstances. Convection and cloud parameters of two versions of a Single-Column version of a climate Model (SCM), with and without a parameterization of 3D radiative effects of clouds, are tuned targeting reference solar fluxes calculated on Large-Eddy Simulation cloud fields. When 3D effects are neglected, accurate fluxes are obtained only at the expense of overestimated cloud fractions, compensating underestimated cloud reflectivity at low sun. Targeting mean solar-angle fluxes instead of detailed ones removes this mechanism entirely.

Plain Language Summary

Global climate models are used to understand the climate system and anticipate the consequences of global warming. They are based on a set of equations that represent the various aspects of the system. Among these, cloud physics and radiative transfer (light propagation) play a major role. The equations, called parameterizations, are based on our understanding of the physics, complexity–accuracy compromises, and include parameters that need to be calibrated against observations. Satellite-observed radiative fluxes are often targeted in this calibration process, with the risk of obtaining the right fluxes (close to the observed ones) for the wrong reasons, and in particular for the wrong cloud properties. In this study, we show that the radiative transfer models currently used in climate models present structural errors that could, through the calibration process, be balanced by introducing additional errors in cloud properties. This implies that persistent systematic biases in clouds simulated by global models could be partly due to structural errors in the radiative transfer model, rather than to inadequate modeling of cloud physics. We use a History Matching approach based on machine learning to shade light on these questions and study error compensations in details, albeit in an idealized framework.

1 Introduction

General circulation models (GCM) used for climate projections, are, like any model, imperfect representations of the climate system. Their behaviour depends on free parameters that need to be adjusted, which is achieved through calibration.

When calibrating numerical models as complex as GCMs, it is very difficult, if not impossible, to remove compensating errors. The issue of reducing compensating errors and finding ways to better characterize and control them remains a major challenge in climate modeling, one that we hope to address more effectively thanks to increased computing power and machine learning algorithms. This issue is crucial for the reliability of climate change projections.

Hourdin et al. (2017) report that a common practice in calibrating (tuning) climate models is to target observed top-of-atmosphere (TOA) radiative fluxes by adjusting parameters associated with the most uncertain processes controlling these fluxes: those related to clouds. In so doing, accurate TOA fluxes are often obtained at the expense of cloud-related compensating errors: between cloud properties and e.g. surface albedo or jet position (Hourdin et al., 2013), between low-, middle- and high-level clouds (Webb, Senior, Bony, & Morcrette, 2001; Nam, Bony, Dufresne, & Chepfer, 2012) or even be-

tween physical, optical and radiative properties of a given cloud regime (Konsta et al., 2022).

To understand these errors, and in particular those involving cloud physics and radiative transfer (RT), it is necessary to disentangle model errors stemming from each parameterization.

Cloud parameterizations typically provide vertical profiles of cloud fraction and water condensate in each atmospheric column. They result from complex non linear interactions between the various processes taken into account in the GCM. Having the “right clouds” in a GCM means simulating these profiles accurately. Additional assumptions concerning clouds can or must be made to compute RT from these profiles, such as their vertical overlap, horizontal inhomogeneity or size. These assumptions are usually made inside the RT scheme and their first-order effects on TOA fluxes are quite well known (see e.g., McKee and Cox (1974); Barker, Stephens, and Fu (1999); Várnai and Davies (1999); Shonk, Hogan, Edwards, and Mace (2010); Hogan, Fielding, Barker, Villefranque, and Schäfer (2019)): The widely used maximum overlap assumption for low clouds tends to underestimate total (vertically integrated) cloud cover, and consequently, TOA fluxes. Neglecting in-cloud optical-depth inhomogeneity systematically leads to overly reflective clouds. Assuming infinite cloud size means neglecting 3D radiative effects, which produces either too-bright or too-dim clouds depending on solar zenith angle. To remove these errors, radiative transfer models that are able to treat “cloud geometry” (overlap, heterogeneity and size) in a more sophisticated way than maximally-overlapped homogeneous slabs have been developed in the last decades (e.g., Shonk and Hogan (2008); Hogan and Shonk (2013); Hogan et al. (2019); Pincus, Barker, and Morcrette (2003)). The development of the ecRad code at ECMWF (Hogan & Bozzo, 2018), which implements these new radiative transfer models (solvers) in the same software, has remarkably facilitated the investigation of cloud-geometry effects in radiative transfer models.

A now standard way to improve the representation of atmospheric physics in GCMs is to isolate one column, working on physics parameterizations without interaction with large scale dynamics. In this approach, Large Eddy Simulations (LES, i. e. 3D simulations with resolution of a few tens of meters on domains of a few tens of km) of a cloud scene are used as a reference for evaluation of simulations run with the Single Column Model (SCM) version of a GCM. Radiation is still often poorly represented in LES, but reference fluxes associated with the 3D cloud scenes can now be computed using offline 3D radiative codes based for instance on Monte Carlo methods (Villefranque et al., 2019). In recent years, the SCM/LES approach has also been empowered by machine learning and automatic tuning procedures (Couvreux et al., 2021) based on the history matching approach proposed by Williamson et al. (2013). This approach performs global sensitivity experiments to separate parametric from structural errors in the model, thus providing new perspectives to the long-lasting issue of compensating errors. This framework has led to significant advances in the parameterizations of boundary layer convection and associated cumulus and stratocumulus clouds (see e.g. Hourdin et al. (2019)). It is at the heart of the hierarchical tuning process promoted by Couvreux et al. (2021), Hourdin et al. (2021) and Villefranque et al. (2021), upon which the present work builds.

In Couvreux et al. (2021) and Hourdin et al. (2021), parameters of an SCM boundary-layer parameterization are tuned targeting LES cloud properties. In Villefranque et al. (2021), cloud-geometry parameters of an RT scheme are tuned by running offline radiation upon mean LES vertical profiles, targeting reference solar fluxes obtained from 3D Monte Carlo simulations on the 3D LES clouds. Here, we begin with an extension of the Villefranque et al. (2021) study, and we then present a new type of tuning experiments, specifically designed to study cloud-radiation compensations.

This work was originally motivated by the practical need to tune atmospheric radiation and clouds after the introduction of ecRad in the LMDZ GCM (Hourdin et al.,

2020), the atmospheric component of the IPSL coupled model IPSL-CM, used in particular for CMIP exercises (Boucher et al., 2020). One particular question was to activate or not the **Spartacus** solver of ecRad, which is numerically more expensive than its 1D counterpart **Tripleclouds**, but allows for the first time to account for 3D radiative effects of clouds in the atmosphere. With this question in mind, we designed cheap, idealized, column experiments, to mimic what may occur when tuning cloud parameterizations in a climate model while targeting TOA radiative fluxes observed by satellites (as is the common practice reported by Hourdin et al. (2017)). In these experiments, we focus on two kinds of compensating errors: those that occur within the RT scheme itself, and those that occur between cloud parameterizations and the RT scheme. Under the pretext of addressing our own specific questions, we also mean to show how History Matching can be used to guide model development, and in particular to evidence and investigate compensating errors.

The first part of the study follows that of Villefranque et al. (2021). History Matching is applied to the calibration of cloud-geometry parameters of an RT scheme. PPEs are produced by running the RT scheme on horizontally-averaged cloud profiles output from LES (“perfect cloud” experiments). The reference targets in the calibration exercise are 3D solar fluxes computed using Monte Carlo methods on the 3D LES cloud fields. In this approach, ecRad and MC computations thus “see” the same average cloud scenes. Three ecRad parameters relative to cloud geometry are varied in these experiments: overlap decorrelation length, degree of in-cloud inhomogeneity, and cloud size. In Villefranque et al. (2021), ecRad was run using the **Spartacus** solver. Ranges of parameters were identified that give a very good agreement with MC computations, including a good representation of the dependency of reflected radiation to solar zenith angle, which requires a representation of 3D effects. A more systematic investigation is done here, comparing tuning experiments with the **Spartacus** and **Tripleclouds** solvers.

The second part of the study investigates error compensations between radiative transfer (including the representation of cloud geometry) and cloud physics (which provides vertical profiles of temperature, cloud fraction and liquid water content). To that end, cloud-physics parameters of the SCM are tuned, as in Hourdin et al. (2021), but targeting reference radiative metrics computed on the LES rather than targeting directly the cloud fraction and thermodynamic profiles of the LES. That is, clouds are adjusted to get the right radiative fluxes, for a given version of the RT model. In these experiments, ecRad uses either **Tripleclouds** or **Spartacus**, with their free parameters set to values identified as “best” values in the “perfect cloud” ecRad tuning experiments. We find that when radiative fluxes at various solar zenith angles are simultaneously targeted in the tuning process, experiments using **Tripleclouds** produce wrong cloud profiles to compensate for errors in the RT scheme. Then, using more appropriate ecRad parameters for **Tripleclouds** (instead of best **Spartacus**), and targeting one SZA-averaged flux (instead of three SZA-dependent fluxes), we show that both clouds and radiative fluxes can be reasonably well simulated in the experiments using **Tripleclouds**.

The rest of the paper is organized as follows: Section 2 describes the data, tools and models that are used in the study; Section 3 investigates compensations that are internal to the radiation scheme; Section 4 investigates compensations that arise between clouds and radiation schemes; Section 5 presents the conclusions of the study, and points out that, beyond these specific results, this work also shows how History Matching can be used to go deeper into the understanding of climate models.

2 Data, models and tools

To implement tuning experiments, three ingredients are needed: reference data (simulated or observed) that will serve as targets for the tuning; a model, which includes free

Table 1. Cloud properties in four scenes extracted from ARMCU and RICO LES.

Case, hour	ARMCU, 8h	ARMCU, 12h	RICO, 5h	RICO, 12h
Cloud cover (%)	26.07	6.99	13.43	20.12
Maximum cloud fraction (%)	11.11	3.09	5.45	5.96
Cloud layer depth (km)	1.625	1.20	1.25	1.675
Cloud cov. / max. cloud frac.	2.346	2.26	2.462	3.379

parameters that will be adjusted in the tuning process; a tuning tool (methodology and software) that will make part of the protocol objective and automatic.

In this study, two different kinds of tuning experiments are implemented. Both use the same tuning tool, described in Section 2.4, and the same reference data: radiative fluxes computed using a 3D Monte Carlo code, run on 3D cloud fields output from LES. These are described in Section 2.1. The difference between the two types of experiments is the model that is tuned. In the first type of experiments, the models are the `Tripleclouds` and `Spartacus` solvers of the radiative transfer scheme ecRad, run on horizontally-averaged LES cloud profiles. In the second type of experiments, the model is the SCM version of LMDZ. They are respectively described in Section 2.2 and Section 2.3. All experiments are made using idealized cumulus cases, following Villefranque et al. (2019).

2.1 Reference data

Two typical cumulus cloud cases are used from the set of idealized cases that are distributed in a standardized format by Dephy (*Développement et Evaluation PHYsiques des modèles atmosphériques*, Dephy (2020)). The ARMCU case (Brown et al., 2002) is typical of the development of boundary-layer clouds over continent during the day, while the RICO case (vanZanten et al., 2011) is typical of trade-wind cumulus developing over a stationnary ocean. LES of these two cases are run with the Meso-NH model (Lafore et al., 1998; Lac et al., 2018) at 25 metres horizontal and vertical resolutions on a $12.8 \times 12.8 \times 4 \text{ km}^3$ domain. Large scale dynamics, radiative heating and surface conditions are imposed. These simulations provide reference values for the thermodynamic and cloud variables, and their uncertainties are quantified running sensitivity experiments to numerical and physics options as described in Couvreux et al. (2021). The reference simulations are presented in Figure 1. Four scenes from these two simulations will be used as constraints in the tuning experiments. They are documented in Table 1.

Reference solar fluxes are computed using a 3D Monte Carlo (MC) code run on 3D cloud fields extracted every hour from the LES, as described in Villefranque et al. (2019). 3D fields of liquid water content are taken from the LES and cloud-droplet effective radius is homogeneously set to $10 \mu\text{m}$. Cloud optical properties are obtained from Mie theory. Gas optical properties are calculated using the k-distribution model RRTMG-IFS included in the ecRad radiation scheme (Hogan & Bozzo, 2018), for temperature, pressure and humidity profiles corresponding to the LES horizontal mean below 4 km, and to Standard Mid-Latitude Summer profile above. The solar constant is set to 1368 W.m^{-2} and the surface albedo to 0.08. For each 3D cloud field, additional MC calculations are made under the Independent Columns Assumption (ICA), by computing 3D radiation independently in distinct columns of the 3D LES cloud field and taking the average. This assumes independent columns, as in the MCICA model of Pincus et al. (2003), which removes 3D radiative effects from the calculation. Differences between 3D and ICA MC fluxes yield estimates of 3D radiative effects.

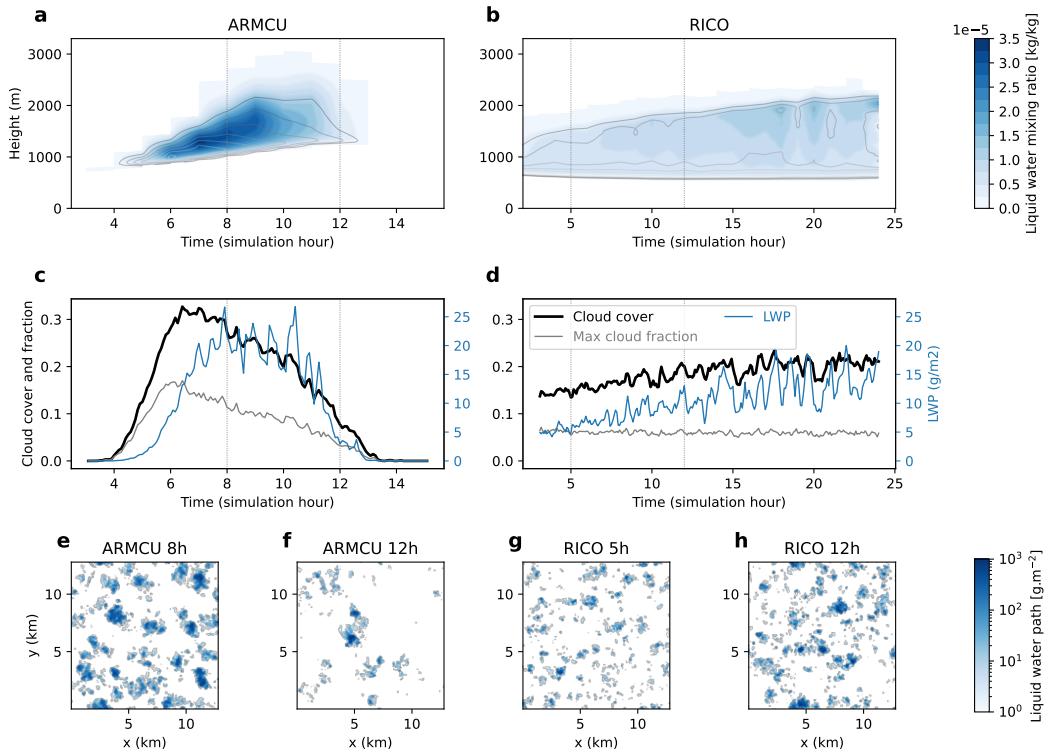


Figure 1. Reference simulations of the ARM CU (left) and RICO (right) cases used in this study. All variables are computed from LES 3D cloud fields. a-b: time evolution of vertical profiles of cloud fraction (contour lines, 0 to 0.16 every 0.02 in ARM CU, 0 to 0.07 every 0.01 in RICO) and cloud water mixing ratio (blue shading). c-d: time evolution of total (vertically integrated) cloud cover, maximum cloud fraction and domain-mean liquid water path. e-h: liquid water path maps at the two hours retained for tuning (ARM CU 8th and 12th hours, RICO 5th and 12th hours, identified by vertical lines in a-d plots).

2.2 Radiation parameterization

The radiative models under investigation in this study are the **Tripleclouds** and **Spartacus** solvers implemented in ecRad, the radiative transfer model developed at European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Hogan & Bozzo, 2018). ecRad provides a flexible interface that allows users to configure various aspects of the radiation model. Cloud droplet effective radius, gas optics, clear-sky profiles (gas concentrations, temperature and pressure) and radiative boundary conditions are set as in the MC simulations so that they are excluded from causes of possible differences between parameterized and reference fluxes. In “perfect clouds” experiments, input liquid water content and cloud fraction profiles are taken from horizontally averaged LES 3D fields and are hence also excluded from potential causes of differences between parameterized and reference fluxes. In SCM experiments, liquid water content and cloud fraction profiles input to ecRad are taken from SCM simulation outputs.

Cloud optics are interpolated from a Mie look-up table provided with ecRad, similar to, but slightly different from, the one used in the Monte Carlo simulations. The difference between optical properties taken from the two tables are typically less than a change of 1 μm in the effective radius of clouds (not shown).

The RT models at the heart of **Tripleclouds** and **Spartacus** are modified versions of the two-stream model (Meador & Weaver, 1980), which directly integrate the effects of cloud geometry on radiation transport through assumptions on vertical overlap, horizontal heterogeneity and, in **Spartacus** only, cloud size.

In our configurations of both **Tripleclouds** and **Spartacus**, vertical overlap is represented using the exponential-random model parameterized by its decorrelation length ℓ (Hogan & Illingworth, 2000), and a two-region cloud representation (the **Tripleclouds** model of Shonk and Hogan (2008)) is used to account for in-cloud water sub-grid heterogeneity, whereby layer-wise optical depths in thin-cloud and thick-cloud regions are calculated according to the fractional standard deviation (*FSD*) parameter. In the **Tripleclouds** solver, no 3D effects are taken into account, whereas in **Spartacus** (Hogan, Schäfer, Klinger, Chiu, & Mayer, 2016; Schäfer, Hogan, Klinger, Chiu, & Mayer, 2016; Hogan et al., 2019), intensity of 3D effects is proportional to cloud-side perimeter length (Hogan & Shonk, 2013), itself a function of cloud fraction and cloud effective scale (C_s). It was shown previously that 3D effects in cumulus clouds remove around $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ from TOA solar upward (reflected) flux when the sun is high (solar zenith angle close to zero), and account for about $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ at low suns, compared to 1D radiation (see e.g. Villefranque et al. (2019)).

2.3 LMDZ Single-Column Model

LMDZ-6A (Hourdin et al., 2020) is the atmospheric component of the IPSL-6A General Circulation Model, which participated in the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6). Here, its single-column version is used with a refined 95-level grid as in Hourdin et al. (2019, 2021) to simulate ARM CU and RICO cases. The same large-scale dynamics, radiative trends and surface conditions are imposed as in the LES so that physical parameterizations are the only active part of the model.

More specifically, the parameterizations that are active here are the boundary-layer transport and cloud schemes. The parameterization of vertical sub-grid transport is based on an Eddy-Diffusivity and Mass-Flux approach. The Eddy-Diffusivity model parameterizes the effects of small-scale turbulence on the mean state using the Turbulent Kinetic Energy prognostic equation formulated by Yamada (1983) with a 1.5-order closure. The Mass-Flux model parameterizes the effects of organized convective cells or rolls on the mean state using an effective thermal plume model. The plume transports air and state variables from the surface to the boundary-layer top. Exchanges with the environ-

ment are modeled through lateral entrainment and detrainment formulations (Hourdin et al., 2019). Water condensate and cloud fraction profiles are computed using a bi-Gaussian probability density function of the saturation deficit, with one mode accounting for saturation deficit in the thermal plume and one mode in the environment (Jam, Hourdin, Rio, & Couvreux, 2013). This combination of Eddy-Diffusivity-Mass-Flux scheme with a bi-Gaussian cloud scheme provides a unified framework that has been shown to accurately represent both dry and cloudy convective boundary layers with cloud regimes ranging from cumulus to stratocumulus (Hourdin et al., 2019). The conversion of cloud water into precipitation and the evaporation of precipitation are detailed in Madeleine et al. (2020).

As for radiation, ecRad was recently implemented in LMDZ and will be part of the forthcoming versions of the GCM. However, in this study, it is the offline version of ecRad that is run on the SCM output profiles. It calculates the radiative fluxes associated with the SCM cloud profiles and ecRad cloud-geometry parameters. The offline version was used to make more robust comparison, focused on cloud radiative effects. In particular it allows to use the same clear-sky profiles as in the MC simulation. This was done in practice by replacing the clear-sky profiles in the SCM outputs by the profiles of the LES averaged horizontally. Note that in the two cumulus cases that are used as constraints, surface fluxes and radiative cooling are prescribed as forcings: radiation is not interactive in the simulations and thus does not affect the clouds (consistently in the LES and SCM).

2.4 The High-Tune:Explorer tuning tool

High-Tune:Explorer is a tuning tool based on History Matching with iterative refocusing (Vernon, Goldstein, & Bower, 2010; Williamson et al., 2013). It aims at finding the subspace of model free parameters that match a set of constraints. To that end, the parameter space hypercube, $[\lambda_{min}^1, \lambda_{max}^1] \times [\lambda_{min}^2, \lambda_{max}^2] \times \dots \times [\lambda_{min}^N, \lambda_{max}^N]$, with $\lambda^1, \dots, \lambda^N$ the N free parameters to tune, is iteratively reduced by ruling out parameter vectors for which the model's predictions, for a set of user-defined metrics, do not match reference values within the range of user-defined tolerance to error.

To accelerate the exploration of the hypercube, emulators based on Gaussian Processes are built for each metric. These emulators are trained on metrics computed from an ensemble of model runs (with typically $10 \times N$ members), to then provide rapid predictions of metric values for huge sets of free parameter vectors¹. Prediction uncertainty is added to tolerance-to-error in order to avoid ruling out parameter vectors that might be far from the target because of bad emulators but actually acceptable configurations of the model. To this end, implausibility is defined for any parameter vector $\boldsymbol{\lambda}$ as

$$I(\boldsymbol{\lambda}) = \max \left\{ \frac{|r_1 - \mu_1(\boldsymbol{\lambda})|}{\sqrt{\sigma_1^2(\boldsymbol{\lambda}) + T_1^2}}, \dots, \frac{|r_p - \mu_p(\boldsymbol{\lambda})|}{\sqrt{\sigma_p^2(\boldsymbol{\lambda}) + T_p^2}} \right\}, \quad (1)$$

with r_i the reference (target) value and T_i its tolerance to error.

The parameter vector $\boldsymbol{\lambda}$ is ruled out if its implausibility $I(\boldsymbol{\lambda})$ is greater than an arbitrary value Γ , which represents the size of the confidence interval (reference $\pm \Gamma$ times

¹ Training an emulator means characterizing the law of the Gaussian Process $G \sim \mathcal{GP}(m, k(., .))$, that is, specifying its expectation function m and variance kernel $k(., .)$. This is done by fitting standard analytic functions to the simulated data for metric i , $\{f_i^j\}_{j \in 1..10N}$ obtained from model runs at $10N$ points $\{\boldsymbol{\lambda}^j\}_{j \in 1..10N}$ sampled in parameter space. Then, for any new $\boldsymbol{\lambda}^*$ in parameter space, the i -th emulator provides a prediction of the i -th metric as the expectation μ_i and standard deviation σ_i of the conditional random variable $G_i^* = G_i(\boldsymbol{\lambda}^*) | \{G_i(\boldsymbol{\lambda}^j) = f_i^j, \forall j \in [1, 10N]\}$; and $G_i^* \sim \mathcal{N}(\mu_i, \sigma_i)$.

uncertainty), typically chosen between 2 and 3. At the end of each iteration, the new Not-Ruled-Out-Yet (NROY) space of parameters is determined using this implausibility condition. The next iteration starts by sampling a set of parameter vectors in the NROY space of the previous iteration. Then a new ensemble is run, metrics are evaluated, emulators are built, etc.

As the iterative process progresses, the NROY space narrows down, mostly because emulators uncertainty decreases, which is due to denser information being collected for training (same amount of points in a smaller NROY space). The tuning experiment is considered to have strictly converged when emulator uncertainties are significantly smaller than tolerances to error for every metrics. In that case, the final NROY space is exactly the subspace of free parameters that matches the user-defined constraints and emulators can be considered reliable models for the metrics (inside the final NROY space).

In practice, emulator uncertainties rarely fall one order of magnitude under tolerances to error for all metrics and hence the experiment rarely strictly converges. We therefore find it useful to define weak convergence: The experiment is considered to have weakly converged when adding new iterations does no longer significantly reduce NROY space. In that case, the final NROY space is larger than the sought parameter subspace.

Importantly, during the tuning experiment, many simulations will have been run, constituting a Perturbed-Parameter Ensemble (PPE). For each metric i and each simulation j , its distance to reference value can be calculated as $\frac{|r_i - f_i^j|}{T_i}$, where $f_i^j = f_i(\boldsymbol{\lambda}^j)$ is the actual model output for metric i and parameter vector $\boldsymbol{\lambda}^j$. The score of a simulation j is then defined as its worst-metric score:

$$S(\boldsymbol{\lambda}^j) = \max \left\{ \frac{|r_1 - f_1(\boldsymbol{\lambda}^j)|}{T_1}; \dots; \frac{|r_p - f_p(\boldsymbol{\lambda}^j)|}{T_p} \right\}, \quad (2)$$

where emulator predictions and uncertainties no longer appear, contrary to the implausibility defined in Equation (1). Keeping only simulations whose scores are under a given threshold provides, independently from the emulators convergence status, constrained PPEs that can be studied to learn about the quality of the model. Of course, if the emulators convergence is bad, the NROY space might remain too large and model configurations sample might not be dense enough, so low-probability, acceptable model behaviours might be absent from the PPEs.

3 Internal compensations between parts of the radiative transfer model

First, we examine ecRad PPEs in a “perfect cloud” framework. “Perfect clouds” means that ecRad is run on horizontally-averaged LES cloud profiles. The 3D cloud fields from the same LES were used as inputs for the reference Monte Carlo radiative simulations. Errors in ecRad fluxes can thus not be attributed to wrong cloud fractions or mean liquid contents, unlike in cases where cloud fraction and liquid content are taken from boundary-layer parameterizations of a climate model, as discussed in the following section. We use these PPEs to investigate compensating effects between various aspects of cloud geometry. In `Tripleclouds` and `Spartacus`, the effect of cloud geometry on radiation (i.e. the fact that clouds are not horizontally infinite homogeneous slabs isolated from their environment) is taken into account by adding state variables and source terms to the two-stream model of Meador and Weaver (1980). Cloud geometry includes vertical overlap, heterogeneity of in-cloud water, and cloud size. Free parameters associated with these new terms are overlap decorrelation length ℓ , fractional standard deviation FSD , and cloud effective scale C_s . In the present “perfect cloud” experiment, they are the only parameters that are calibrated in order to obtain fluxes as close as possible as those computed using Monte Carlo methods on the 3D cloud fields.

Here, we look for the parameter values that provide an accurate description of ARMCU and RICO cumulus cloud geometry *from a radiative transfer model perspective*. This approach is fundamentally different from trying to extract estimates of these parameter values directly from the simulated 3D cloud fields. Here, we accept that cloud geometry parameters are *effective parameters* that make sense *in the context of a particular model* (here the RT solver), rather than in the absolute.

3.1 Where we find that `Tripleclouds` and `Spartacus` should not use the same cloud-geometry parameter values

First, we look at two experiments: one where `Tripleclouds` targets Monte Carlo 1D (ICA) fluxes and one where `Spartacus` targets Monte Carlo 3D fluxes. Using 1D MC fluxes as targets for `Tripleclouds` avoids forcing the model to compensate for a structural error that we know is present in the solver, namely the absence of 3D radiative effects. Comparing 1D MC computation is a classical way of evaluating two-stream RT models that do not take 3D effects into account (e.g., Barker et al. (1999)).

The MC fluxes targeted as tuning metrics are taken at three solar zenith angles. Simulation ensembles are produced varying the three radiative parameters (ℓ , FSD and C_s , only the first two being active in `Tripleclouds`) under the constraint that targets are reached within three times the tolerance to error, which is set to $3.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

For each of these two experiments, ten waves (iterations) of history matching are produced, each consisting in 101 simulations. In total, for each experiment, 1010 configurations of the solver (either `Tripleclouds` or `Spartacus` depending on the considered experiment) are sampled and run. Among these configurations, the 300 simulations with the lowest scores are selected. Figure 2 shows the location of these 300 best configurations per experiment in parameter space. The first three lines and columns of the subplot matrix are relative to parameter values, while the last line and column is relative to the score $S(\lambda)$ of each configuration, as per Equation (2). Since the RAD_CS parameter is not used in `Tripleclouds`, the red points corresponding to `Tripleclouds` configurations spread randomly along the RAD_CS axis.

First, we note that all configurations in the `Tripleclouds` experiment have scores below 1, while all those of `Spartacus` have scores above 1. Of course it does not mean that `Tripleclouds` is better than `Spartacus` in an absolute sense, since the scores for `Tripleclouds` are computed against referenced intentionally biased by not accounting for 3D effects. It just means that `Tripleclouds` is closer to reference 1D fluxes than `Spartacus` is close to reference 3D fluxes. It might not be too surprising for a modified two-stream model to perform better at simulating 1D radiation than 3D, especially when considering the many years spent on the 1D problem (i.e., how to account for vertical cloud structure and horizontal heterogeneity in vertical light propagation) compared to the relatively short time dedicated to modelling horizontal transport within a the two-stream framework.

The next thing one can notice is that the 10 best configurations of each experiment are located in distinct regions of the $\ell \times FSD$ space. The best `Tripleclouds` simulations, highlighted by large red symbols in Figure 2, have small ℓ and large FSD , while the best `Spartacus` simulations (large blue symbols) correspond to larger ℓ values, for approximately the same range of FSD values. The best `Tripleclouds` simulations exhibit a strong negative correlation between ℓ and FSD .

In 1D radiation, this is easy enough to understand: with a smaller decorrelation length, clouds are more randomly (or less maximally) overlapped, leading to a larger cloud cover and smaller cloud optical thickness in regions covered by clouds. The radiative effect of increasing cloud cover dominates that of decreasing cloud optical thickness, be-

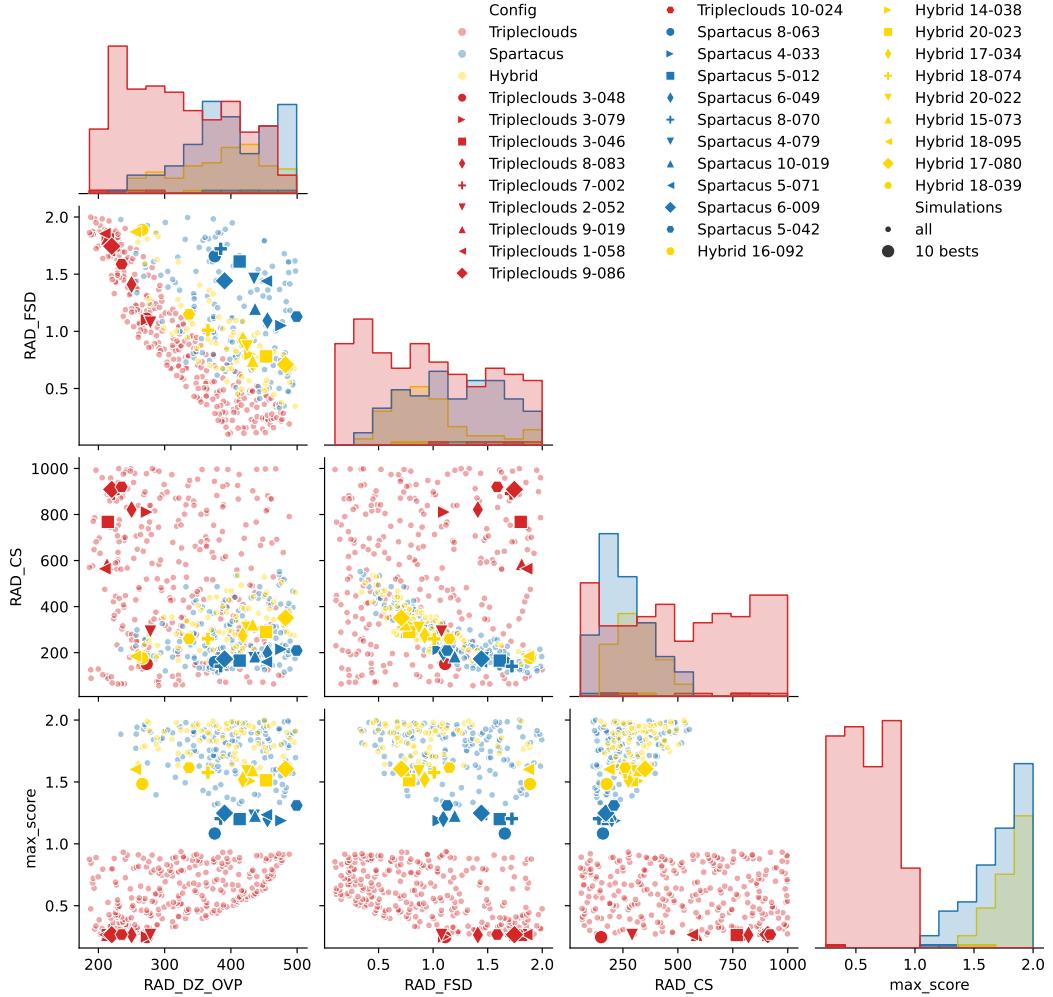


Figure 2. Parameters of 300 best simulations for three “perfect-cloud” ecRad tuning experiments: Tripleclouds (red), Spartacus (blue) and Hybrid (gold). RAD_DZ_OVP is the vertical overlap decorrelation length parameter ℓ , RAD_FSD is the relative in-cloud inhomogeneity parameter FSD , RAD_CS is the cloud size parameter C_s . The max_score is $S(\lambda)$. Each column corresponds to one parameter. The top subplot of each column shows histograms of the parameter values for the 300 best configurations, for each experiment. Then, each line corresponds to a second parameter, and subplots show the location of the configurations in the 2D space of the column \times line parameters.

cause reflectivity is an exponential function of optical thickness τ ,

$$R \sim 1 - \exp(-\tau).$$

The optical thickness at a given location on the horizontal is the sum of the optical thicknesses if the cloudy layers above. Distributing the individual optical thicknesses of the cloud layers horizontally on a wider area (large cloud cover with clouds of moderate optical thickness) leads to a larger reflectivity than when cloudy layers overlap, because of the saturation of the exponential term.

The same reasoning can be applied to in-cloud water horizontal heterogeneity: because of the exponential function, horizontally homogeneous clouds are more reflective than heterogeneous clouds that have the same horizontally-averaged optical depth. Thus, decreasing ℓ leads to more reflective clouds, and increasing FSD leads to less reflective clouds. This explains why the tuning algorithm selects smaller values of the FSD to compensate for larger values of ℓ in order to simulate the right fluxes.

In **Spartacus**, the relationship between ℓ and FSD also seems to exist, but the 10 best configurations of the **Spartacus** experiment show more dispersion than the 10 best **Tripleclouds** ones. Our first guess was that horizontal transport, driven by the third parameter C_s , modulates reflectivity in **Spartacus** while it has no effect in **Tripleclouds**, which means that, in **Spartacus**, a given value of ℓ can be associated with various values of FSD and still produce the same fluxes. For instance a larger FSD could be compensated by more intense 3D effects.

However, C_s does not vary much between these 10 best configurations so this explanation might not be sufficient. Moreover, 3D effects tend to decrease reflectivity when the sun is close to zenith and increase it otherwise; so we need to consider our three metrics, which correspond to three different solar zenith angles, in order to understand if significantly larger FSD can indeed be compensated by slightly smaller clouds.

All things considered, the internal dispersion of the best **Spartacus** configurations might be a detail compared to the fact that best **Spartacus** configurations can be found in the “large ℓ , large FSD ” corner of the parameter space, where none of the best **Tripleclouds** simulations can be found. This is an important result, as it means that finding the best **Spartacus** configuration and removing 3D effects (e.g., using **Tripleclouds** with the same (ℓ, FSD) values, or setting C_s to infinity in **Spartacus**), will produce wrong fluxes compared to the 1D Monte Carlo reference. Indeed, none of these “large ℓ , large FSD ” configurations leads to 1D fluxes closer to the reference than $2 \times 3.5 = 7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (figure not shown).

The **Spartacus** solver was built upon the **Tripleclouds** solver by adding terms to represent 3D effects. So one could wish **Spartacus** to simulate both 3D radiation and 1D radiation accurately when 3D effects are removed. In this view, the results shown here suggest that compensation errors are at work between the **Tripleclouds** solver and 3D effects in **Spartacus**. However, when running **Spartacus**, there is no real distinction between non-3D and 3D effects. It is the full radiation which is computed and affected by the parameterization of 3D effects. Another, less stringent but probably more sensible view is to accept that free parameters are only *effective parameters* and hence that there is no objective reason to set them to (often only loosely equivalent) observed values.

To illustrate this point further, let us look at cloud covers calculated by the exponential-random overlap model, for the ten decorrelation length values considered as “best” values in **Tripleclouds** and **Spartacus** experiments. The upper panel of Figure 3 presents a comparison of true cloud covers diagnosed in the 3D fields of ARM CU and RICO LES simulations, with those calculated by the overlap scheme. Note that covers calculated in ecRad, when using **Tripleclouds** or **Spartacus** solvers, do not enter directly in the flux equations. They are only computed as a diagnosis. Rather, the overlap model is used

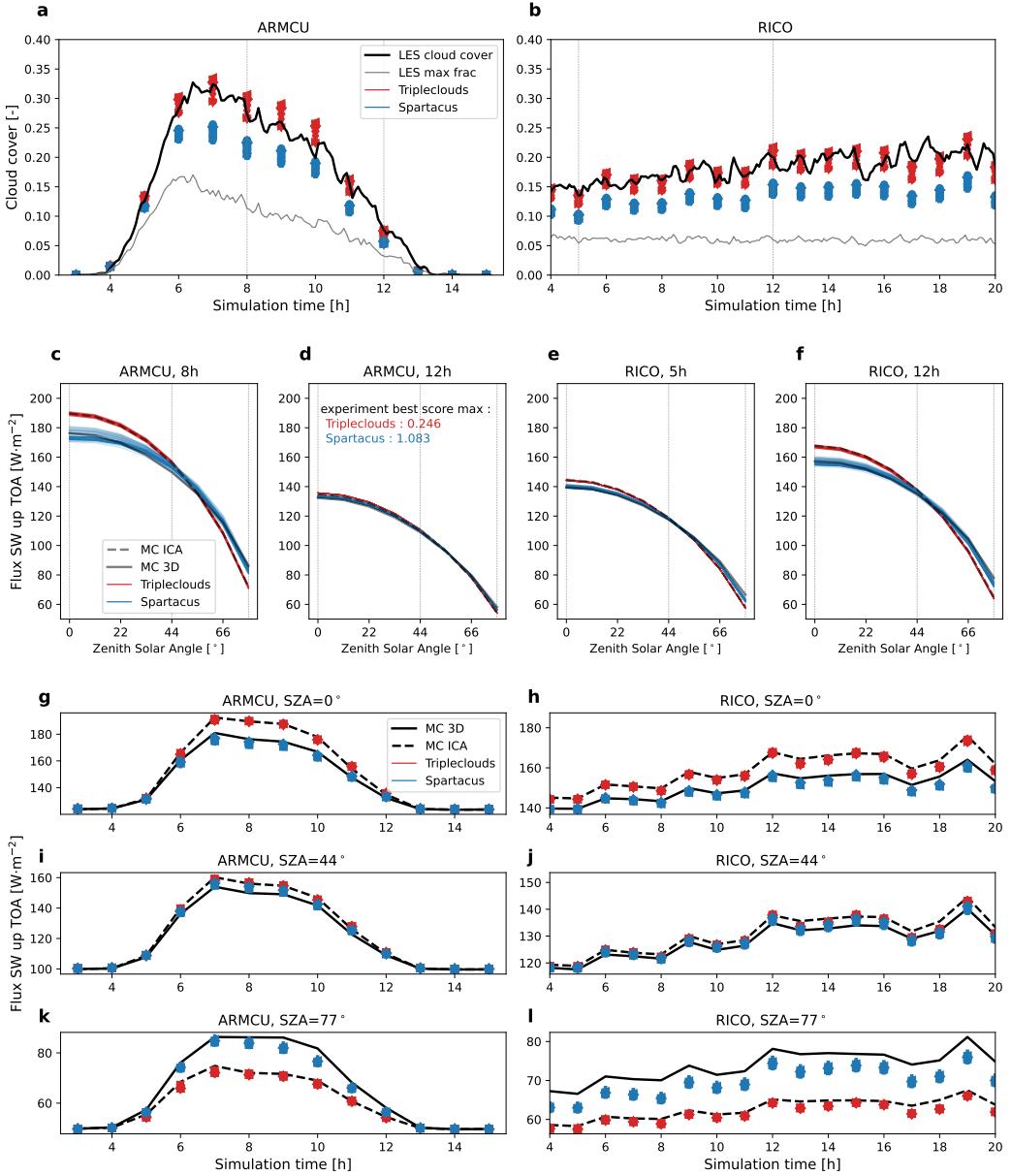


Figure 3. Cloud and radiation variables for the 10 best simulations of two perfect-cloud experiments (Tripleclouds in red, Spartacus in blue), compared to reference. Left column: ARM CU. Right column: RICO. a-b: cloud cover (black) and maximum cloud fraction (gray) in LES fields, and cloud cover computed by ecRad (color points) using input cloud fraction profiles calculated from LES cloud fields, and the exponential-random overlap model parameterized by various decorrelation lengths (RAD_DZ_OVP values in Figure 2). c-l: Fluxes simulated by Monte Carlo 3D (black full lines) and 1D (black dashed lines), Tripleclouds (red) and Spartacus (blue). c-f: upward TOA fluxes as a function of solar zenith angle, for the 4 cloud scenes used as constraints in the tuning experiments: ARM Cu 8th (c) and 12th (d) hours, RICO 5th (e) and 12th (f) hours. g-h: upward TOA fluxes, calculated at every hour of the two LES simulations, each time for three solar angles. g-h: SZA=0°, i-j: SZA=44°, k-l: SZA=77°.

locally, at each interface between layers, to distribute fluxes from cloudy and clear regions of a given layer, to cloudy and clear regions of the next layer. These plots show that covers corresponding to the best **Tripleclouds** simulations are very close to those of the LES. It is tempting to conclude that **Tripleclouds** fluxes are right *for the right reasons*, i.e., the right cloud geometry. In comparison, cloud covers corresponding to the best **Spartacus** simulations are systematically smaller than those of the LES (in agreement with the fact that ℓ values are larger). Yet, **Spartacus** fluxes are globally accurate. Is it for wrong reasons, i.e. the wrong cloud geometry? Does this fall under the “compensating error” category? Do we want to eliminate this behaviour or shall we accept, and even expect, that “cloud cover” (most often, a vertically integrated quantity), does not have the same meaning, and does not play the same role, in 1D vs. 3D radiative transfer models? These are open question that the modelers should have in mind when using, evaluating and tuning their models.

What fundamentally shows the improvement of the **Spartacus** solver compared to **Tripleclouds** is its ability to well capture the angular dependency of the “true” reflected radiation (3D MC reference) as clearly seen in the second line of panels in Figure 3. The **Tripleclouds** is able to well simulate 1D radiative reference computations but it will always underestimate the reflected radiation at high solar angle compared to zenith.

3.2 Where we look for a compromise between **Tripleclouds** and **Spartacus** preferred regions of cloud-geometry parameter space

We rather focus here on finding a configuration that is acceptable for both **Tripleclouds** and **Spartacus** models. Because best **Spartacus** configurations are bad choices for **Tripleclouds**, it implies that **Spartacus** simulations, set with a compromise configuration, will be less accurate than the previously examined best **Spartacus** simulations. To that end, we design a Hybrid tuning experiment, in which we target both 1D MC fluxes with the **Tripleclouds** solver and 3D MC fluxes with **Spartacus** at the same time. This means that for every sampled parameter vector (ℓ, FSD, C_s) , we run both **Tripleclouds** and **Spartacus** on the four clouds scenes (two hours from ARM CU et two hours from RICO) and three solar zenith angles (0, 44 and 77 degrees). The score associated with each configuration is the worst (metric-wise) score over all the **Tripleclouds** and **Spartacus** metrics.

The 300 best configurations are presented in Figure 2 (yellow points). The scores obtained are generally worse than for previous experiments (mostly, above 1.5). The location of the best configurations in the (ℓ, FSD) space best illustrates the compromise that was found: for a given choice of FSD , the 10 best simulations of the Hybrid experiment correspond to ℓ values between best **Tripleclouds** and best **Spartacus** values. Note that relatively small values of FSD of around 0.75, associated with relatively large C_s of around 400 m, yield scores that are among the ten smallest ones, which was not the case in any of the previous experiments.

The very best configuration in the Hybrid experiment corresponds to large FSD and small ℓ values, close to the best **Tripleclouds** simulations. Accordingly, in the upper panel of Figure 4, this best Hybrid configuration corresponds to the points that are closest to the 3D LES cloud cover. Comparing fluxes in Figure 4 with those of Figure 3, we can see that **Tripleclouds** fluxes, which were previously extremely accurate, are now less so: most of the ten best configurations from the Hybrid experiment lead to smaller cloud cover than in the 3D LES field, which negatively impacts **Tripleclouds** performances. As for **Spartacus**, it seems to perform better or equally at SZA=0, and to be slightly worse than before at large solar zenith angles. If we look at the “large ℓ , small FSD ” configurations of the Hybrid experiment, we note that, for a given ℓ value, FSD is smaller than in the pure **Spartacus** experiment, which should lead to more reflective clouds than before, if nothing else changed. However, these configurations are also as-

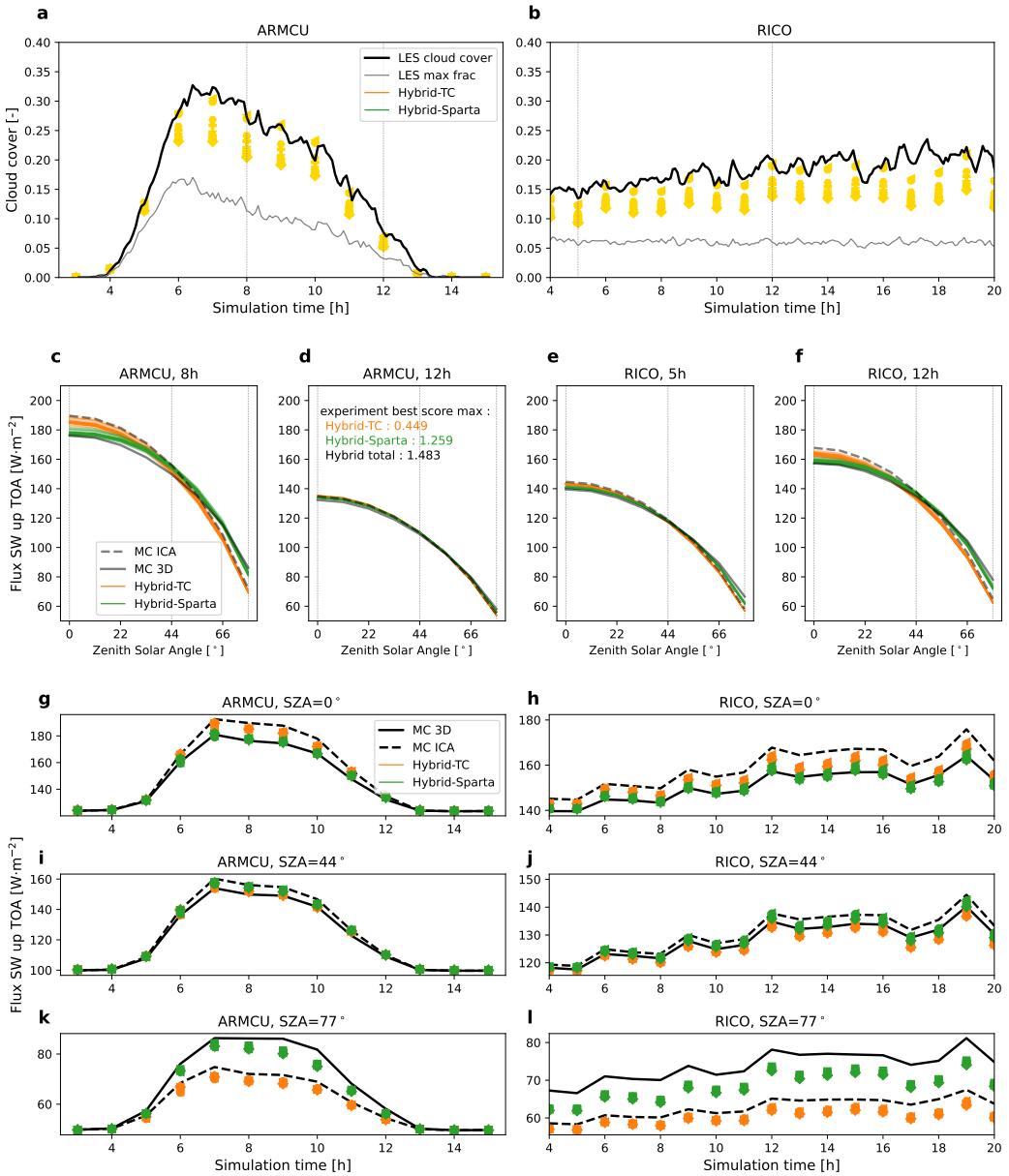


Figure 4. Cloud and radiation variables for the 10 best configurations of the Hybrid experiment, compared to reference. As in Figure 3 except that: in a-b, decorrelation length parameters used to compute cloud cover are those of the 10 best simulations from the Hybrid experiment; in c-l, **Spartacus** (green) and **Tripleclouds** (orange) are both configured with the same 10 best Hybrid configurations (instead of their own best configurations in Figure 3).

sociated with larger C_s values than the ten best of the pure **Spartacus** experiment, which means less intense 3D effects, which means more reflective at small SZA and less reflective at large SZA. The fact that smaller C_s values would not be chosen for these “large ℓ , small FSD ” configurations, despite the fact that it would systematically improve fluxes at SZA=77, seems to indicate that fluxes at SZA=0 would be too large (more intense 3D effects would decrease reflectivity at SZA=0) and would become the limiting metrics.

Finally, we find that the very best configuration of the Hybrid experiment, that is, simulation number 16-092, is a good candidate for being our “unique” ecRad configuration in LMDZ, as far as cumulus cloud geometry is concerned.

4 Compensations between radiative transfer and cloud models

Here, we examine PPEs run with the single column version of LMDZ for the same two cumulus cases, under radiative constraints. Using both **Tripleclouds** and **Spartacus** solvers, with configurations from the previous section, and testing two sets of radiative metrics, we investigate the conditions that lead to cloud–radiation compensating errors.

4.1 Experimental design

We design experiments to mimic the tuning protocol often followed in GCMs when targeting top-of-the-atmosphere (TOA) radiative metrics from satellite observations. In our idealized 1D version of the protocol, simulations with both **Spartacus** and **Tripleclouds** target the same MC 3D radiative computations (“true” radiative fluxes). Tuning is performed using either **Tripleclouds** or **Spartacus**, in order to investigate in particular how convection and cloud physics could compensate for the structural error consisting in not accounting for 3D radiative transfer in **Tripleclouds**. The metrics are hourly-mean radiative fluxes at fixed solar angles. The reference ones are averaged from MC fluxes computed every 5 min on the LES clouds. In the SCM, they are the fluxes calculated on hourly-averaged cloud profiles.

Thirteen parameters that control boundary-layer and cloud parameterizations in LMDZ are varied as in Hourdin et al. (2021) and Hourdin et al. (2023) (see details in Table S1 of Supporting Information).

Each tuning experiment consists in 30 iterations. At each iteration, 130 free-parameter vectors are sampled in the NROY space and ARMCU and RICO are simulated using these 130 configurations of LMDZ. ecRad is then run offline for the two chosen times of the two cases and each of the 130 LMDZ configurations, to compute solar reflected fluxes at three solar zenith angles each; in total, 1560 ecRad runs per iteration. Then one emulator is built for each of the 12 metrics, using their 130 evaluations as a learning database. Finally, implausible free-parameter vectors are ruled out using a threshold that varies from 3 in the first 5 iterations to 2.5 in iterations 6 to 10, to 2 in iterations 11 to 30. The NROY space is thus efficiently narrowed down.

First, the 30-iterations **Spartacus** experiment is repeated following a trial and error process that seeks the smallest tolerance-to-error value yielding non-empty NROY space without falling below $3.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, which is the minimum estimated structural error of **Spartacus** (see Supporting Information Text S1). The resulting tolerance to error is $3.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Then, the **Tripleclouds** experiment is run once using the same tolerance to error. As this tolerance-to-error value is smaller than **Tripleclouds** structural error on the same metrics, this experiment stops after 5 iterations with empty NROY space. The tolerance to error for **Tripleclouds** is then rescaled by the minimum score found in the aborted experiment. The resulting tolerance to error is $9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. A 30-iterations experiment is run with this new value.

Table 2. Maximum and average absolute errors in **Spartacus** (Sparta) and **Tripleclouds** (TC) fluxes for the various tuning experiments presented in Section 4

Experiment	Shown in	Max. abs. err. ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	Ave. abs. err. ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
Sparta-08-3ang	Fig. 5	3.6480	2.4931
TC-08-3ang	Fig. 5	14.2253	8.2945
Sparta-16-3ang	Fig. 6	3.7890	2.8047
TC-16-3ang	Fig. 6	14.2117	8.3226
Sparta-16-1ave	Fig. 7	0.4360	0.2976
TC-16-1ave	Fig. 7	1.2210	0.7972
TC-16-2ang	Fig. S1	12.6082	8.7031
TC-best	Fig. S1	11.2147	7.4093

4.2 Where we suspect compensations between cloud fraction and 3D effects

We start by comparing experiments using either **Spartacus** or **Tripleclouds**, with ecRad cloud-geometry parameters set to the values of the best simulation in the tuning of **Spartacus**, i.e. configuration 8-063 in Figure 2. The idea in this experiment is to use the best possible version of **Spartacus** as a perfect model, and to introduce a structural error by removing 3D effects, using **Tripleclouds** instead of **Spartacus**.

For each experiment, maximum and average absolute errors (metrics-wise) of the best-score simulation are retained as a measure of the accuracy of the model. They are presented in Table 2. Note that **Spartacus** fluxes are as accurate as when **Spartacus** was run on reference cloud profiles. On the other hand, flux errors in the **Tripleclouds** experiment are about four times larger than those of **Spartacus**. This means that even with the possibility of compensating radiation error with wrong clouds, **Tripleclouds** could not produce fluxes as accurate as **Spartacus** in these experiments. Note that **Tripleclouds** scores are much larger than in perfect cloud experiments but this is partly because in previous experiments it was compared to 1D MC fluxes, whereas it is now compared to 3D MC fluxes.

Features of the 30 best simulations of each tuning experiment are analyzed in Figure 5. The top panel presents temporal evolutions of layer-wise maximum cloud fraction for ARMCU and RICO test cases. The bottom panel shows, for cloud scenes when radiative constraints were applied (8th and 12th hour of ARMCU, 5th and 12th hour of RICO), errors on the TOA upwelling fluxes as a function of solar zenith angles. Errors due to neglecting 3D effects in the MC calculations, and errors made by **Spartacus** and **Tripleclouds** on LES mean cloud profiles are also represented on these plots. It shows that although **Tripleclouds** simulations were constrained to be as close as possible to 3D MC fluxes, they still closely follow the 1D MC fluxes. Fluxes computed in the **Spartacus** experiment however match the MC reference for almost every angles, including those that were not constrained (not shown). In the upper plots, we see that, in addition to better simulating solar radiation, the 30 best **Spartacus** simulations exhibit cloud fraction evolutions that are compatible with reference values for ARMCU, and close to the LES ones for RICO. Conversely, the 30 best **Tripleclouds** simulations persistently overestimate maximum cloud fraction for both cases.

We interpret this as a sign of compensating errors. Plots in the lower row of Figure 5 show that the **Tripleclouds** simulation run on LES mean cloud profiles (red stars) systematically underestimate reflected solar radiation at $\text{SZA}=77^\circ$. The absolute error is the largest for the 8th hour of ARMCU where it reaches $-20.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. The tuning pro-

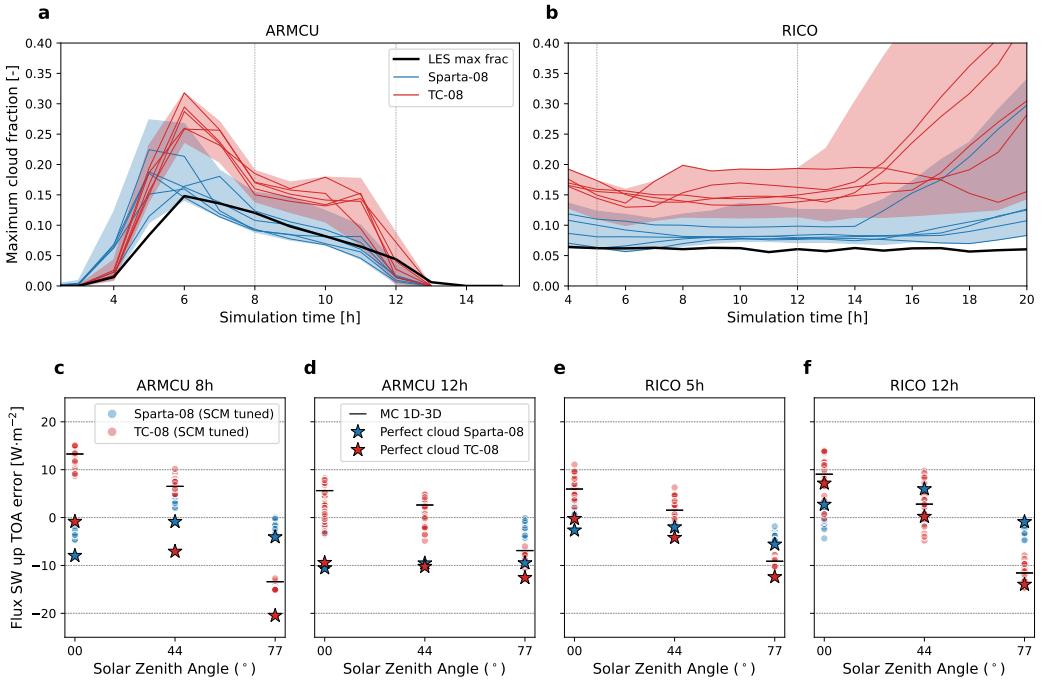


Figure 5. Clouds and radiation for the 30 best simulations for two experiments calibrating LMDZ parameters under radiative constraints using either **Tripleclouds** (red) or **Spartacus** (blue). Both solvers use parameters of the best **Spartacus** configuration from Section 3.1 (**Spartacus** 8-063). Left: ARMCU. Right:RICO. a-b: maximum cloud fraction (shadings represent the 30 best enveloppe, lines show the 5 best). c-f: error in upwelling TOA fluxes as a function of solar zenith angle, compared to MC 3D, for the four cloud scenes: ARMCU 8h (c), ARMCU 12h (d), RICO 5h (e), RICO 12h (f).

tocol, which rejects simulations when the metric-wise maximum error is too large, systematically selects simulations where the error at SZA=77° is smaller than for “perfect clouds”, thanks to an increase of cloud fraction that compensates lack of 3D effects. This increase of cloud fraction is limited by the enhancement of the reflected radiation at SZA=0°. The tuning finally selects simulations for which the bias shows the same absolute value for the maximum underestimation (about $-15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ for SZA=77° at the 8th hour of ARMCU) and maximum overestimation (about $15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ at SZA=0W·m $^{-2}$, especially for the 8th hour of ARMCU and 12th hour of RICO).

Overestimated cloud fraction probably also compensates in part for the fact that the radiative parameters are not optimal for **Tripleclouds**. Indeed, we saw in Figure 3 that for this configuration of ecRad, the overlap parameter leads to underestimating cloud cover (blue points) even with perfect vertical profiles of cloud fraction.

For **Spartacus**, angular dependence of reflected radiation is much better represented, avoiding compromises between errors at high and low zenith angles. Furthermore, 3D effects partially compensate for underestimated effective cloud cover. Overall, there is no sign of systematic cloud–radiation compensating errors with **Spartacus**. The best simulations obtained with a radiation-based tuning produce, at the same time, (i) radiation that is on average as good as in the perfect-cloud experiments, and (ii) maximum cloud fractions that correspond reasonably well to those of the LES.

4.3 Where we remove cloud fraction vs. 3D effects compensating errors

To verify our hypothesis, that part of the radiative error that is compensated by clouds in TC-08 experiment is related to 3D effects, we do two more pairs of experiments. First, we change the ecRad configuration, to use the best Hybrid one instead of the best **Spartacus** one of Section 3. Indeed, the best Hybrid configuration used on LES cloud profiles led to cloud cover estimates closer to the LES than the best **Spartacus** one, which is more favourable to **Tripleclouds**. We expect the remaining **Tripleclouds** flux errors to be smaller than before and hence, if our hypothesis is right, cloud fraction overestimation to be less pronounced.

This is verified in Figure 6, which is the same as Figure 5 but with both solvers using the best Hybrid configuration of ecRad instead of best **Spartacus**. The score of the **Spartacus** experiment is a little bit larger than before, suggesting that the degradation introduced in changing ecRad configuration is not compensated by clouds. The time evolution of maximum cloud fractions in the **Spartacus** experiments resembles those of Figure 5, which confirms that changing cloud-geometry parameters to a slightly less good configuration does not impact **Spartacus** too much. In the **Tripleclouds** experiment, the radiative score was not improved by much. Yet, the evolution of maximum cloud fraction is closer to LES and **Spartacus** ones than before: To reach the same radiative accuracy with **Tripleclouds**, in this experiment, cloud fractions did not have to be as large as before.

Maximum cloud fraction is still overestimated in the TC-16 experiment, compared to Sparta-16. It might be for two reasons: in the best Hybrid configuration, overlap parameter is similar to best **Tripleclouds** values, but the associated FSD is larger (for the same ℓ) which means that clouds are less reflective; again, in **Spartacus**, this overlap-heterogeneity combination is balanced by 3D effects, but in **Tripleclouds** a large *FSD* leads to an underestimated cloud reflectivity. Hence, maximum cloud fraction might be overestimated in compensation. The second reason is that, independently of heterogeneity, accurate 3D fluxes cannot be obtained simultaneously for all solar angles, for the right clouds, if 3D effects are not represented in the model. In TC-16 experiment, cloud fraction is not overestimated as much as in TC-08. Our interpretation is that the error in cloud reflectivity that is compensated by increasing cloud fraction is smaller: perfect-

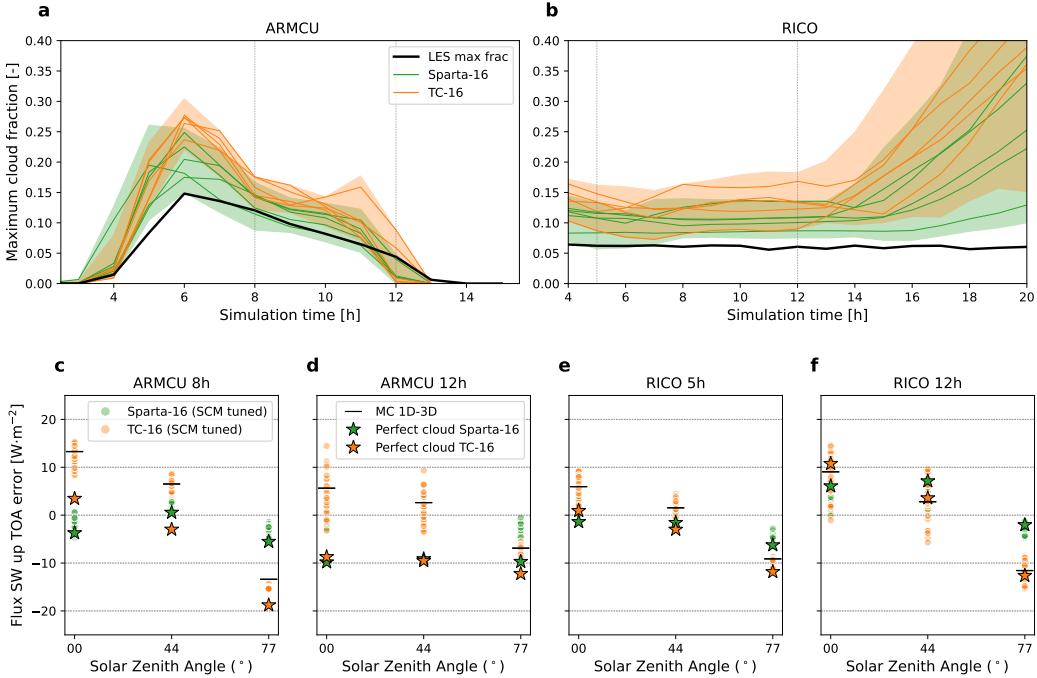


Figure 6. Clouds and radiation for the 30 best simulations for two experiments calibrating LMDZ parameters under radiative constraints using either **Tripleclouds** (orange) or **Spartacus** (green). Same as Figure 5 except that both solvers now use parameters of the best Hybrid configuration from Section 3.2 (Hybrid 16-092).

cloud **Tripleclouds** errors at SZA 77° are smaller with this ecRad configuration, around $-18.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (against -20.5) at the 8th hour of ARM CU.

A final test is done in which we change the target metrics to an average over eight solar zenith angles, from 0° to 77° with step 11° . As 3D effects change sign when sun zenith angle increases, they partially cancel each other out when averaged. If lack of 3D effects is the error that is compensated by clouds in the **Tripleclouds** experiment, it should be less pregnant when targeting an average flux in which the expression of 3D effects is almost null. It is the unweighted arithmetic average that is considered here, as the simplest way to test our assumption; more complex averages that better represent solar angle distributions on Earth might be more relevant in a real GCM tuning exercise.

Results are presented in Figure 7. With the average flux metric, cloud fraction evolution is the same in the two experiments, using **Spartacus** or **Tripleclouds**. It means that **Tripleclouds** errors (FSD too large or lack of 3D effects) are no longer compensated by cloud fractions. Looking at the detailed flux errors, we see that **Tripleclouds** flux at 77° are more negatively biased compared to previous experiments, in agreement with the fact that this particular value is no longer constrained. It confirms that maximum cloud fractions were previously overestimated to compensate for lack of 3D effects in particular at this large solar zenith angle; because increasing cloud fraction also increases reflected flux at all other angles, in **Tripleclouds**, flux errors could not be entirely compensated by clouds: increasing cloud fraction too much would have led to even larger flux overestimation at $\text{SZA}=0^\circ$, which was not acceptable given the tolerance-to-error set in these experiments. To support this statement, a complementary experiment

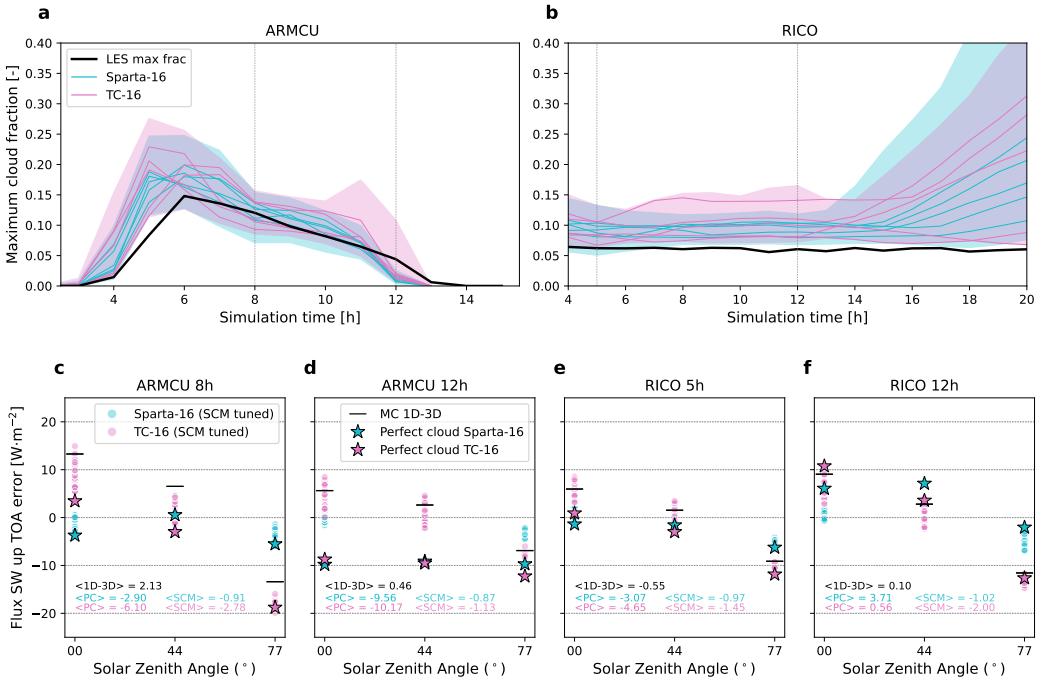


Figure 7. Clouds and radiation for the 30 best simulations for two experiments calibrating LMDZ parameters under radiative constraints using either **Tripleclouds** (pink) or **Spartacus** (cyan). Same as Figure 6 except that the radiative constraint is now the flux averaged over solar zenith angles, instead of flux values taken at three different SZA. c-f: In addition to flux errors as a function of SZA (markers), SZA-mean flux errors are written: $\langle 1D\text{-}3D \rangle$ is the average 3D effects, $\langle PC \rangle$ is for Perfect Cloud experiments (associated with star markers), $\langle SCM \rangle$ is for SCM-tuned experiments (associated with bullet markers).

where **Tripleclouds** was tuned using only constraints at SZA=77° is presented in Supporting Information (Figure S1).

This last experiment, targetting average flux, is an important result for climate modeling: it confirms that 3D radiative effects could, for a large part, self compensate when averaged over diurnal cycle, seasons or latitudes. It also proposes a simple compromise to tune a model with a 1D RT code, against LES/MC reference simulations. However, these results also suggest the possibility of compensating errors at high latitudes, where cloud fraction might be overestimated to compensate for lack of 3D radiative effects, if the model was tuned targetting high-latitude metrics.

5 Conclusion

We have shown that structural errors in radiative transfer models can indeed be compensated by errors in cloud properties when TOA radiative fluxes are targeted in a tuning process. Here, maximum cloud fractions are overestimated to compensate for underestimated cloud reflectivity at large zenith angles, stemming from the lack of 3D effects in the radiative model. This result provides a novel argument in favor of modelling 3D radiative effects in climate models: even if they were small on average and had a weak feedback on circulations and climate, we have shown that systematic errors in radiative transfer can generate systematic errors in other components of the model through tuning. A better radiative transfer model might remove the need for compensating errors and result in better clouds.

Here the demonstration was made in an idealized configuration, and our results should not be directly extrapolated to 3D coupled climate models. Indeed, in the SCM setup considered here, only shallow convection and cloud parameterizations can compensate structural radiative errors, whereas much more processes are at work in a 3D GCM, which can result in other compensating errors. Also, radiative fluxes were the only constraints, but Couvreux et al. (2021); Hourdin et al. (2021) claim that compensating errors can be prevented or at least limited by process-based tuning in SCM mode before tuning the full GCM. With this strategy, constraints can be set directly on cloud properties to rule out model configurations that yield wrong cloud fractions. Note however that tuning towards radiative targets while preventing clouds from compensating radiation errors might generate compensating errors elsewhere in the system.

Our work goes beyond the question of radiative transfer and clouds: We propose to see tuning as a way to investigate compensating errors and guide model development. Through tuning we explore parameter space, that is, model configurations and resulting climates, under a set of chosen constraints. This allows us to disentangle parametric from structural errors. Notably, when no set of parameters can be found for which all simulated metrics comply with user requirements, it indicates that structural errors are larger than tolerated errors, and hence that the model is incomplete. This is a powerful way to guide its development and accelerate its improvement. When simulated metrics do comply with prescribed requirements, resulting perturbed parameter ensembles of simulations (PPE) can be used to investigate compensating errors, better understand the model and its physics through global sensitivity studies, and quantify parametric uncertainty on various aspects of climate.

Finally, the tuning tool used here, High-Tune:Explorer, is based on machine learning techniques: predictive Gaussian Processes are trained on a small amount of simulated data and are then able to emulate the model's response much faster than the actual model. Thanks to this approach, the model's high-dimensional parameter space can be explored and shrunken efficiently. Machine learning is here at the service of physics; it helps saving computing time but not at the expense of the physical consistency of the model. This consistency is crucial for our confidence in climate projections and to keep

using models as tools to better understand climate. In the same spirit, we believe that research that aims at better understanding climate models and the act of modeling itself is a crucial aspect of climate sciences.

Open Research Section

High-Tune Explorer (htexplo) and LMDZ are available through the open source version control system “subversion” (svn). htexplo is distributed under the GPL-v3 license, and LMDZ is distributed under the CeCILL version 2 license. The htexplo release used in the study can be downloaded through `svn checkout http://svn.lmd.jussieu.fr/HighTune -r 568`. The LMDZ release used in the study can be configured and installed directly on Linux machines with an installation bash script `https://lmdz.lmd.jussieu.fr/pub/install_lmdz.sh` run with as `bash install_lmdz.sh -SCM -v 20250337.trunk`. The ecRad offline package is freely available under the terms of the Apache License Version 2.0. The release used in this study corresponds to commit fa642e, which is based on version v1.6-beta. A tar file of the htexplo, LMDZ and ecRad codes used as well as the data that supports this research, the results of the SCM simulations, as well as the scripts for visualization WILL BE MADE AVAILABLE ON A DOI IF THE PAPER IS ACCEPTED FOR PUBLICATION. The corresponding DOIs will be provided during galley proofs by placeholder “IPSL data catalog.”

Acknowledgments

The PhD scholarship of the first author was funded by Institut Pierre-Simon Laplace. This work was supported by the CNRS and the GDR DEPHY. The authors wish to thank the LMDZ team and the htexplo team for their investment in the development and maintenance of community tools.

References

- Barker, H. W., Stephens, G. L., & Fu, Q. (1999). The sensitivity of domain-averaged solar fluxes to assumptions about cloud geometry. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125(558), 2127–2152. Retrieved from <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.49712555810> doi: 10.1002/qj.49712555810
- Boucher, O., Servonnat, J., Albright, A. L., Aumont, O., Balkanski, Y., Bastrikov, V., ... Vuichard, N. (2020, July). Presentation and Evaluation of the IPSL-CM6A-LR Climate Model. , 12(7), e02010. doi: 10.1029/2019MS002010
- Brown, A. R., Cederwall, R. T., Chlond, A., Duynkerke, P. G., Golaz, J.-C., Khairoutdinov, M., ... Stevens, B. (2002). Large-eddy simulation of the diurnal cycle of shallow cumulus convection over land. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 128(582), 1075–1093. doi: 10.1256/003590002320373210
- Couvreux, F., Hourdin, F., Williamson, D., Roehrig, R., Volodina, V., Villefranque, N., ... Xu, W. (2021). Process-Based Climate Model Development Harnessing Machine Learning: I. A Calibration Tool for Parameterization Improvement. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(3), e2020MS002217. doi: 10.1029/2020MS002217
- Dephy. (2020). *Dephy-scm: Single-column model standards and case drivers*. Retrieved from <https://github.com/gdr-dephy/dephy-scm>
- Hogan, R. J., & Bozzo, A. (2018). A Flexible and Efficient Radiation Scheme for the ECMWF Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(8), 1990–2008. doi: 10.1029/2018MS001364
- Hogan, R. J., Fielding, M. D., Barker, H. W., Villefranque, N., & 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. doi: 10.1175/JAS-D-18-0366.1
- Hogan, R. J., & Illingworth, A. J. (2000, October). Deriving cloud overlap statistics from radar. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126(569), 2903–2909. doi: 10.1002/qj.49712656914
- Hogan, R. J., Schäfer, S. A. K., Klinger, C., Chiu, J. C., & Mayer, B. (2016). Representing 3-D cloud radiation effects in two-stream schemes: 2. Matrix formulation and broadband evaluation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(14), 8583–8599. doi: 10.1002/2016JD024875
- Hogan, R. J., & Shonk, J. K. P. (2013, February). Incorporating the Effects of 3D Radiative Transfer in the Presence of Clouds into Two-Stream Multilayer Radiation Schemes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 70(2), 708–724. doi: 10.1175/JAS-D-12-041.1
- Hourdin, F., Ferster, B., Deshayes, J., Mignot, J., Musat, I., & Williamson, D. (2023, July). Toward machine-assisted tuning avoiding the underestimation of uncertainty in climate change projections. *Science Advances*, 9(29), eadf2758. doi: 10.1126/sciadv.adf2758
- Hourdin, F., Grandpeix, J.-Y., Rio, C., Bony, S., Jam, A., Cheruy, F., ... Roehrig, R. (2013, May). LMDZ5B: The atmospheric component of the IPSL climate model with revisited parameterizations for clouds and convection. *Climate Dynamics*, 40(9-10), 2193–2222. doi: 10.1007/s00382-012-1343-y
- Hourdin, F., Jam, A., Rio, C., Couvreux, F., Sandu, I., Lefebvre, M.-P., ... Idelkadi, A. (2019). Unified Parameterization of Convective Boundary Layer Transport and Clouds With the Thermal Plume Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(9), 2910–2933. doi: 10.1029/2019MS001666
- Hourdin, F., Mauritsen, T., Gettelman, A., Golaz, J.-C., Balaji, V., Duan, Q., ... Williamson, D. (2017, March). The Art and Science of Climate Model Tuning. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(3), 589–602. doi: 10.1175/BAMS-D-15-00135.1
- Hourdin, F., Rio, C., Grandpeix, J.-Y., Madeleine, J.-B., Cheruy, F., Rochetin, N., ... Ghattas, J. (2020). LMDZ6A: The Atmospheric Component of the IPSL Climate Model With Improved and Better Tuned Physics. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(7), e2019MS001892. doi: 10.1029/2019MS001892
- Hourdin, F., Williamson, D., Rio, C., Couvreux, F., Roehrig, R., Villefranque, N., ... Volodina, V. (2021). Process-Based Climate Model Development Harnessing Machine Learning: II. Model Calibration From Single Column to Global. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(6), e2020MS002225. doi: 10.1029/2020MS002225
- Jam, A., Hourdin, F., Rio, C., & Couvreux, F. (2013, June). Resolved Versus Parametrized Boundary-Layer Plumes. Part III: Derivation of a Statistical Scheme for Cumulus Clouds. *Boundary-Layer Meteorology*, 147(3), 421–441. doi: 10.1007/s10546-012-9789-3
- Konsta, D., Dufresne, J.-L., Chepfer, H., Vial, J., Koshiro, T., Kawai, H., ... Ogura, T. (2022). Low-Level Marine Tropical Clouds in Six CMIP6 Models Are Too Few, Too Bright but Also Too Compact and Too Homogeneous. *Geophysical Research Letters*, 49(11), e2021GL097593. doi: 10.1029/2021GL097593
- Lac, C., Chaboureau, J.-P., Masson, V., Pinty, J.-P., Tulet, P., Escobar, J., ... Wautelet, P. (2018, May). Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geoscientific Model Development*, 11(5), 1929–1969. doi: 10.5194/gmd-11-1929-2018
- Lafore, J. P., Stein, J., Asencio, N., Bougeault, P., Ducrocq, V., Duron, J., ... Vilà-Guerau de Arellano, J. (1998, January). The Meso-NH Atmospheric Simulation System. Part I: Adiabatic formulation and control simulations. *Annales Geophysicae*, 16(1), 90–109. doi: 10.1007/s00585-997-0090-6

- Madeleine, J.-B., Hourdin, F., Grandpeix, J.-Y., Rio, C., Dufresne, J.-L., Vignon, E., ... Bonazzola, M. (2020). Improved Representation of Clouds in the Atmospheric Component LMDZ6A of the IPSL-CM6A Earth System Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(10), e2020MS002046. doi: 10.1029/2020MS002046
- McKee, T. B., & Cox, S. K. (1974). Scattering of Visible Radiation by Finite Clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(7), 1885–1892. doi: 10.1175/1520-0469(1974)031<1885:SOVRBF>2.0.CO;2
- Meador, W. E., & Weaver, W. R. (1980, March). Two-Stream Approximations to Radiative Transfer in Planetary Atmospheres: A Unified Description of Existing Methods and a New Improvement. , 37(3), 630–643. doi: 10.1175/1520-0469(1980)037<0630:TSATRT>2.0.CO;2
- Nam, C., Bony, S., Dufresne, J.-L., & Chepfer, H. (2012). The ‘too few, too bright’ tropical low-cloud problem in CMIP5 models. *Geophysical Research Letters*, 39(21). doi: 10.1029/2012GL053421
- Pincus, R., Barker, H. W., & Morcrette, J.-J. (2003, July). A fast, flexible, approximate technique for computing radiative transfer in inhomogeneous cloud fields. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D13), n/a–n/a. doi: 10.1029/2002JD003322
- Schäfer, S. A. K., Hogan, R. J., Klinger, C., Chiu, J. C., & Mayer, B. (2016). Representing 3-D cloud radiation effects in two-stream schemes: 1. Longwave considerations and effective cloud edge length. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(14), 8567–8582. doi: 10.1002/2016JD024876
- Shonk, J. K. P., & Hogan, R. J. (2008, June). Tripleclouds: An Efficient Method for Representing Horizontal Cloud Inhomogeneity in 1D Radiation Schemes by Using Three Regions at Each Height. *Journal of Climate*, 21(11), 2352–2370. doi: 10.1175/2007JCLI1940.1
- Shonk, J. K. P., Hogan, R. J., Edwards, J. M., & Mace, G. G. (2010, July). Effect of improving representation of horizontal and vertical cloud structure on the Earth’s global radiation budget. Part I: review and parametrization. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, n/a–n/a. doi: 10.1002/qj.647
- vanZanten, M. C., Stevens, B., Nuijens, L., Siebesma, A. P., Ackerman, A. S., Burgett, F., ... Wyszogrodzki, A. (2011). Controls on precipitation and cloudiness in simulations of trade-wind cumulus as observed during RICO. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 3(2). doi: 10.1029/2011MS000056
- Várnai, T., & Davies, R. (1999). Effects of cloud heterogeneities on shortwave radiation: Comparison of cloud-top variability and internal heterogeneity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(24), 4206–4224.
- Vernon, I., Goldstein, M., & Bower, R. G. (2010, December). Galaxy Formation: A Bayesian Uncertainty Analysis. *Bayesian Analysis*, 05(04). doi: 10.1214/10-ba524
- Villefranque, N., Blanco, S., Couvreux, F., Fournier, R., Gautrais, J., Hogan, R. J., ... Williamson, D. (2021). Process-Based Climate Model Development Harnessing Machine Learning: III. The Representation of Cumulus Geometry and Their 3D Radiative Effects. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(4), e2020MS002423. doi: 10.1029/2020MS002423
- Villefranque, N., Fournier, R., Couvreux, F., Blanco, S., Cornet, C., Eymet, V., ... 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*, 11(8), 2449–2473. doi: 10.1029/2018MS001602
- Webb, M., Senior, C., Bony, S., & Morcrette, J. J. (2001, September). Combining ERBE and ISCCP data to assess clouds in the Hadley Centre, ECMWF and LMD atmospheric climate models. *Climate Dynamics*, 17(12), 905–922. (WOS:000171263400001) doi: 10.1007/s003820100157
- Williamson, D., Goldstein, M., Allison, L., Blaker, A., Challenor, P., Jackson, L.,

- & Yamazaki, K. (2013, October). History matching for exploring and reducing climate model parameter space using observations and a large perturbed physics ensemble. *Climate Dynamics*, 41(7-8), 1703–1729. doi: 10.1007/s00382-013-1896-4
- Yamada, T. (1983, January). Simulations of Nocturnal Drainage Flows by a q2l Turbulence Closure Model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 40(1), 91–106. doi: 10.1175/1520-0469(1983)040<0091:SONDFB>2.0.CO;2

I.4 Rayonnement 3D

I.5 Brouillon d'intro et positionnement

On aura montré dans la section 1 que la modélisation des effets 3D est importante pour éviter les compensations d'erreur nuage-rayonnement sur les nuages de cumulus (on sait déjà par ailleurs que la modélisation des effets 3D est importante pour simuler le bon rayonnement "instantanné" sous des champs de cumulus (du premier ordre devant la modélisation du recouvrement vertical des nuages et de l'hétérogénéité de leur épaisseur optique).

Dans cette partie, on s'interesse à l'impact du choix de ces choix de modélisation sur la simulation du climat. Quels sont les effets d'une modélisation de l'hétérogénéité intra-nuageuse, d'un recouvrement non maximalement empilé et des effets radiatifs 3D sur la simulation des flux radiatifs dans LMDZ ?

Ces question sont particulièrement importante dans le cadre du choix de la configuration de ecRad à utiliser pour le prochain exercice CMIP. Les choix des hypothèses d'interactions nuage-rayonnement à modéliser, et la documentation de ces effets sur le modèle, fait parti des engagements de la communauté LMDZ pour le prochaine exercice CMIP. Le choix des paramètres libres à utiliser fait aussi partie de ces choix de configuration à faire. Il n'est pas tout de suite évident de prendre le solveur le plus complexe car cette complexité augmente significativement le coût de calcul [*mettre les chiffres de test de performance de Abderrahmane*].

I.6 brouillon résultat

I.6.1 simulations climatiques online

Je sais que abderrahmane en a fait il y a longtemps mais j'ai cru comprendre qu'elles étaient un peu différente en terme de config de lancement que les offline qu'il nous a montré début décembre. Donc à voir mais en tout cas je vais forcément montré des simulations de rayonnement online dans ce chapitre

Bon ça date un peu ces résultats, mais en gros on voyait rien sur les effets 3D. Pour les autres solveurs je me souviens plus donc j'imagine qu'on voyait des choses cohérentes (sur les flux radiatifs du moins, ce serait cool d'aller voir les couvertures nuageuses aussi par exemple).

I.6.2 simulations climatiques offline

Simulation avec double appel de ecRad : un premier appel online avec une configuration TripleClouds, et un deuxième appel avec une autre configuration qui n'est que diagnoqtique (on coupe la rétroaction du rayonnement sur les autres composantes du modèle). Ca permet de comparer les hypothèses de calcul du transfert radiatif "toute chose égal par ailleurs" et ainsi de désintribuer les effets d'ordre 1 de leur rétroactions sur le climat. On a donc un transfert radiatif différent qui aura vu les mêmes nuages par exemple, donc on peut aussi faire des comparaison instantanées (vs climatiques).

Premiers résultats : cf compte rendu de réunion du 9 decembre par Najda.

On a toujours pas d'effets 3D significatif sur le climat. C'est contradictoire avec le message de la partie précédente en 1D. On va continuer de creser pourquoi ârce qu'on s'attendait quand même a avoir un peu d'effet non ???? Et dans une logique de modéliser les processus majeurs on aimerait quand même bien l'inclure celui-ci.

Cependant, les effets 3D pourrait avoir un impact significatif sur la répartition direct/diffus des flux radiatifs solaire. Cette répartition est importante pour un certain nombre d'application et de couplages (il y a la photosynthèse notamment car le flux direct penetra plus profondément

dans la canopé donc fait plus de photosynthèse qu'un flux diffus, pour le même flux totale bien sur).

I.7 Réunion rayonnement du 9 décembre avec Fred, Najda et Abderrahmane

Message mattermost :

I.7.1 Questions générales :

- Quelle est la sensibilité des flux radiatifs aux choix de modélisation du rayonnement dans LMDZ ?
- Qu'est ce que ça va faire de mettre des nuages hétérogènes et non maximalement empilés ?
- Les effets 3D sont ils importants et pour quelles grandeurs (globales vs spatialisées, annuelles vs saisonnières etc) ?

I.7.2 Point sur les simulations effectuées :

Abderrahmane a fait des simulations LMDZ avec ecRad online configuration de contrôle = TripleClouds, FSD=1, exp-rand avec longueur de décorrélation = 200 m en bas et 2 km en haut + des simulations de sensibilité avec d'autres configurations en double appel, donc sur la même histoire météo que pour la simul de contrôle :

- effet de l'hétérogénéité : FSD = 0
- effet de l'overlap : longueur de décorrélation = 1000000 (== max-rand)
- effet combiné
- effets 3D avec SPARTACUS, tailles des nuages varie de 600 m en bas à 14 km en haut

Pour ces simuls on a les atlas et les moyennes zonales annuelles et saisonnières ici (en commentaire) :

- On observe systématiquement des effets opposés pour les tests homogènes (nuages + opaques) et max-random (nuages moins couvrants)
- Prendre en compte l'hétérogénéité va faire + de flux sous les stratocu et le circum antarctique => augmenter les biais chauds qu'on avait déjà dans LMDZ
- Prendre en compte le recouvrement exponentiel fait + de couverture nuageuse donc - de flux en surface dans les tropiques
- Dans le LW on a des effets dans les nuages moyens et hauts dans les tropiques. Pour ces nuages, les effets d'hétérogénéité et de recouvrement se compensent.
- Dans le SW on a des effets en + dans les nuages bas qui eux ne se compensent pas entre FSD (surtout dans les stratocu) et recouvrement (dans les cumulus).
- On observe des effets 3D quasiment nuls.

I.7.3 Est ce que c'est normal que les effets 3D soient aussi faibles ?

- Pourtant sous les cumulus on sait que c'est facilement une dizaine de W/m² en instantané.
- Est ce que c'est un effet de moyenne ? Dans quelles situations peuvent-ils être forts ?
- Est ce que c'est dû au choix des paramètres de taille des nuages ?
- Est ce que c'est masqué par la présence de nuages hauts ?
- Est ce qu'on a un signal sur le direct / diffus ?

I.7.4 Analyses supplémentaires :

- deux tests de sensibilité supplémentaires avec SPARTACUS : 600 m en bas et en haut ; 200 m en bas et 14 km en haut
- diagnostics "effets 3D instantanés" => des cartes de différence entre CTRL et SPARTACUS à un instant donné (midi Greenwich) ; on s'attend à voir la tache solaire
- diagnostics "histogramme 2D" => trier les scènes par bin d'amplitude d'effet 3D (SPARTACUS-CTRL) et par bin d'angle solaire zénithal (ou cos de l'angle) et compter combien il y en a dans chaque bin

I.7.5 Analyse type too few too bright :

- On voit que les histogrammes sont assez différents en fonction de l'hypothèse de recouvrement
- Rajouter un histogramme 1D juste des couvertures nuageuses (sans trier par bin de réflectance)
- Rajouter un histogramme 1D juste des réflectances pour les cas où couverture nuageuse environ = 1 (dans le dernier bin de couverture)

I.7.6 Autres trucs à faire :

- Vérifier comment on filtre les scènes "nuages bas uniquement" dans les obs et dans le modèle
- Vérifier que les paramètres de taille de nuages sont bien utilisés dans ecRad (aller voir dans le code, ou alors lancer une simulation avec une autre taille de nuages et voir si ça change quelque chose) => OK C'EST GOOD
- Analyse plus fine, par exemple trier les scènes en bins de couverture et de cloud water path et pour chaque bin calculer la moyenne de la différence entre simulation de contrôle et simulation perturbée ?
- Faire un double appel en virant les nuages haut ! ! ? ?

I.7.7 Analyses du direct / diffus

- Rajouter des diagnostics direct / diffus et comment ça dépend du choix de modélisation du transfert ?
- Faire plusieurs résolutions du transfert radiatif en changeant le delta-scaling (avec un paramètre beta) pour avoir des flux directs qui correspondent à différentes définitions / applications (comparaison aux obs, couplage avec la végétation photosynthèse, couplage avec la ville les panneaux solaires etc)

I.8 Quelques définitions

L'épaisseur optique $\tau = \int k dl$

avec k le coefficient d'extinction et dl le chemin élémentaire parcouru par les photons.

La transmissivité est alors défini par la loi de Beer-Lambert sur le chemin 0 L :

$$T = e^{-\tau} = \frac{\mathcal{L}_L}{\mathcal{L}_0}$$

Dans l'atmosphère, entre deux couches z_1 et z_2 on aura : $\tau = \cos(\theta) \int_{z_1}^{z_2} k.dz$ (le trajet du photon faisant un angle θ avec la vertical). Dans les codes radiatifs on prend θ tel que $\frac{1}{\cos(\theta)} = 1.67$

Tout ça c'est pour les luminances. Pour traduire ça en flux, il faut intégrer sur les deux demi-sphère (vers le haut et vers le bas pour faire les flux montant et descendant).

Interprétation probabiliste :

La probabilité qu'un photon parcours une distance L sans collision est $e^{-kL} = e^{-\tau(L)}$. Cette forme vient du fait que la probabilité qu'un photon ait une collision (dans l'IR ce serait d'ailleurs un absorbtion) sur une couche d'épaisseur dl est $k dl$ et la probabilité qu'il ne soit pas absorbé est donc $1 - k dl$. Puisqu'il n'y a pas de "mémoire" entre les couches (la probabilité qu'un photon soit absorbé dans la petit couche 1 ne dépend de celle qu'il soit absorbé dans la petite couche 2) donne la forme exponentielle de la probabilité.

$$\frac{\delta \mathcal{L}}{\delta l} = -k \mathcal{L} \quad (\text{I.13})$$

Dans cette vision, le coefficient d'extinction k est le nombre de collision par unité de longueur. Donc $k.L$ est le nombre de collision après une distance L . Quand $\tau = 1$, $\bar{L} = \frac{1}{k}$ avec \bar{L} la distance moyenne parcouru par des photons avant d'être absorbé (le libre parcour moyen des photons).

Donc, quand $\tau \gg 1$, l'atmosphère est transparente car le libre parcour moyen des photon est très supérieur à la taille de l'atmosphère. L'épaisseur optique est comme une distance compté en unité de libre parcour moyen. Si par exemple $\tau = 20$, ça veut dire 20 parcours moyen donc on va avoir très peu de photons à la sortie. L'altitude équivalent d'émission z_{eq} correspond en gros à l'altitude à laquelle $\tau = 1 = \int_{TOA}^{z_{eq}} k dl$ (vu de TOA)

C'est pour ça que, dans l'IR, les nuages sous 5 km sont très peu vue à TOA, et en particulier dans les tropiques. En effet, l'atmosphère est très chargé en eau et les photons émis par les nuages sont réabsorbés plus haut par la vapeur d'eau. 5 km c'est l'ordre de grandeur de la hauteur équivalente d'émission dans ces latitudes.

Bibliographie

- Barker, H. W., Cole, J. N. S., Li, J., Yi, B., and Yang, P. (2015). Estimation of Errors in Two-Stream Approximations of the Solar Radiative Transfer Equation for Cloudy-Sky Conditions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 72(11) :4053–4074.
- Cahalan, R. F., Oreopoulos, L., Marshak, A., Evans, K. F., Davis, A. B., Pincus, R., Yetzer, K. H., Mayer, B., Davies, R., Ackerman, T. P., Barker, H. W., Clothiaux, E. E., Ellingson, R. G., Garay, M. J., Kassianov, E., Kinne, S., Macke, A., O’hirok, W., Partain, P. T., Prigarin, S. M., Rublev, A. N., Stephens, G. L., Szczap, F., Takara, E. E., Várnai, T., Wen, G., and Zhuravleva, T. B. (2005). THE I3RC : Bringing Together the Most Advanced Radiative Transfer Tools for Cloudy Atmospheres. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(9) :1275–1294.
- Couvreux, F., Hourdin, F., Williamson, D., Roehrig, R., Volodina, V., Villefranque, N., Rio, C., Audouin, O., Salter, J., Bazile, E., Brient, F., Favot, F., Honnert, R., Lefebvre, M.-P., Madeleine, J.-B., Rodier, Q., and Xu, W. (2021). Process-Based Climate Model Development Harnessing Machine Learning : I. A Calibration Tool for Parameterization Improvement. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(3) :e2020MS002217.
- Dephy (2020). Dephy-scm : Single-column model standards and case drivers.
- Fielding, M. D., Schäfer, S. A. K., Hogan, R. J., and Forbes, R. M. (2020). Parametrizing cloud geometry and its application in a subgrid cloud-edge erosion scheme. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(729) :1651–1667.
- Grailet, J.-F., Hogan, R. J., Ghilain, N., Bolsée, D., Fettweis, X., and Grégoire, M. (2025). Inclusion of the ECMWF ecRad radiation scheme (v1.5.0) in the MAR (v3.14), regional evaluation for Belgium, and assessment of surface shortwave spectral fluxes at Uccle. *Geoscientific Model Development*, 18(6) :1965–1988.
- Hogan, R. J. and Bozzo, A. (2018). A Flexible and Efficient Radiation Scheme for the ECMWF Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(8) :1990–2008.
- 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.
- Hogan, R. J. and Illingworth, A. J. (2000). Deriving cloud overlap statistics from radar. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126(569) :2903–2909.
- Hogan, R. J., Schäfer, S. A. K., Klinger, C., Chiu, J. C., and Mayer, B. (2016). Representing 3-D cloud radiation effects in two-stream schemes : 2. Matrix formulation and broadband evaluation. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 121(14) :8583–8599.
- Hogan, R. J. and Shonk, J. K. P. (2008). Radiation parametrization and clouds.
- Hourdin, F., Williamson, D., Rio, C., Couvreux, F., Roehrig, R., Villefranque, N., Musat, I., Fairhead, L., Diallo, F. B., and Volodina, V. (2021). Process-Based Climate Model Development Harnessing Machine Learning : II. Model Calibration From Single Column to Global. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(6) :e2020MS002225.

- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., and Collins, W. D. (2008). Radiative forcing by long-lived greenhouse gases : Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 113(D13).
- Jahangir, E. (2022). *Amélioration de La Paramétrisation Des Propriétés Optiques Des Nuages d'eau Liquide Dans Le Spectre Solaire*. These de doctorat, Toulouse 3.
- Joseph, J. H., Wiscombe, W. J., and Weinman, J. A. (1976). The Delta-Eddington Approximation for Radiative Flux Transfer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 33(12) :2452–2459.
- Lac, C., Chaboureau, J.-P., Masson, V., Pinty, J.-P., Tulet, P., Escobar, J., Leriche, M., Barthe, C., Aouizerats, B., Augros, C., Aumond, P., Auguste, F., Bechtold, P., Berthet, S., Bielli, S., Bosseur, F., Caumont, O., Cohard, J.-M., Colin, J., Couvreux, F., Cuxart, J., Delautier, G., Dauhut, T., Ducrocq, V., Filippi, J.-B., Gazen, D., Geoffroy, O., Gheusi, F., Honnert, R., Lafore, J.-P., Lebeaupin Brossier, C., Libois, Q., Lunet, T., Mari, C., Maric, T., Mascart, P., Mogé, M., Molinié, G., Nuissier, O., Pantillon, F., Peyrillé, P., Pergaud, J., Perraud, E., Pianezze, J., Redelsperger, J.-L., Ricard, D., Richard, E., Riette, S., Rodier, Q., Schoetter, R., Seyfried, L., Stein, J., Suhre, K., Taufour, M., Thouron, O., Turner, S., Verrelle, A., Vié, B., Visentin, F., Vionnet, V., and Wautelet, P. (2018). Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geoscientific Model Development*, 11(5) :1929–1969.
- Lafore, J. P., Stein, J., Asencio, N., Bougeault, P., Ducrocq, V., Duron, J., Fischer, C., Héreil, P., Mascart, P., Masson, V., Pinty, J. P., Redelsperger, J. L., Richard, E., and Vilà-Guerau de Arellano, J. (1998). The Meso-NH Atmospheric Simulation System. Part I : Adiabatic formulation and control simulations. *Annales Geophysicae*, 16(1) :90–109.
- Manners, J., Edwards, J. M., Hill, P., and Thelen, J.-C. (2017). SOCRATES Technical Guide Suite Of Community RAdiative Transfer codes based on Edwards and Slingo. Technical report.
- Pincus, R., Barker, H. W., and Morcrette, J.-J. (2003). A fast, flexible, approximate technique for computing radiative transfer in inhomogeneous cloud fields. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 108(D13).
- Schäfer, S. A. K., Hogan, R. J., Klinger, C., Chiu, J. C., and Mayer, B. (2016). Representing 3-D cloud radiation effects in two-stream schemes : 1. Longwave considerations and effective cloud edge length. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 121(14) :8567–8582.
- Shonk, J. K. P. and Hogan, R. J. (2008). Tripleclouds : An Efficient Method for Representing Horizontal Cloud Inhomogeneity in 1D Radiation Schemes by Using Three Regions at Each Height. *Journal of Climate*, 21(11) :2352–2370.
- van Dalum, C. T., van de Berg, W. J., Gadde, S. N., van Tiggelen, M., van der Drift, T., van Meijgaard, E., van Ulft, L. H., and van den Broeke, M. R. (2024). First results of the polar regional climate model RACMO2.4. *The Cryosphere*, 18(9) :4065–4088.
- Villefranque, N. (2019). *Les Effets Radiatifs 3D Des Nuages de Couche Limite : De Leur Simulation Explicite à Leur Paramétrisation*. These de doctorat, Toulouse 3.
- Villefranque, N., Blanco, S., Couvreux, F., Fournier, R., Gautrais, J., Hogan, R. J., Hourdin, F., Volodina, V., and Williamson, D. (2021). Process-Based Climate Model Development Harnessing Machine Learning : III. The Representation of Cumulus Geometry and Their 3D Radiative Effects. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(4) :e2020MS002423.
- Villefranque, N., Fournier, R., Couvreux, 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*, 11(8) :2449–2473.

Villefranque, N., Hourdin, F., d'Alençon, L., Blanco, S., Boucher, O., Caliot, C., Coustet, C., Dauchet, J., El Hafi, M., Eymet, V., Farges, O., Forest, V., Fournier, R., Gautrais, J., Masson, V., Piaud, B., and Schoetter, R. (2022). The “teapot in a city” : A paradigm shift in urban climate modeling. *Science Advances*, 8(27) :eabp8934.