



ANR



Transfert radiatif pour l'étude du climat

Jean-Louis Dufresne¹, Quentin Libois²

¹Laboratoire de Météorologie Dynamique

²Centre National de Recherches Météorologiques

Atelier TRATTORIA, 26 – 28 mai 2025, Rennes

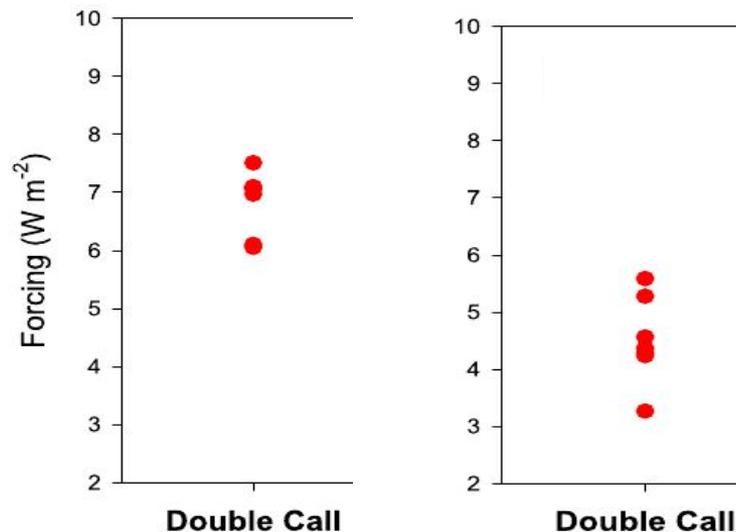
Avant-Propos

- Codes radiatifs **rapides** pour les modèles atmosphériques
- Codes radiatifs de référence pour les **flux**
- Utilisations des **mesures satellitaires** pour l'étude du climat
 - longues séries temporelles, stables
 - calcul radiatif sur de très gros volumes de données
- **Modèles théoriques**, de compréhension: effet de serre, rétroaction vapeur d'eau

Avant-Propos

- Les questions radiatives étaient considérées comme réglées (car références exactes supposément connues)... en fait non
- Dans beaucoup de modèles de climat, les codes radiatifs ou les propriétés spectrales sont (très) anciens
- Il reste beaucoup à faire sur les mesures hyperspectrales (à exploiter) et sur les effets 3D

forçage radiatif calculé par des GCMs pour 4xCO₂ avec (gauche) et sans (droite) ajustement stratosphérique

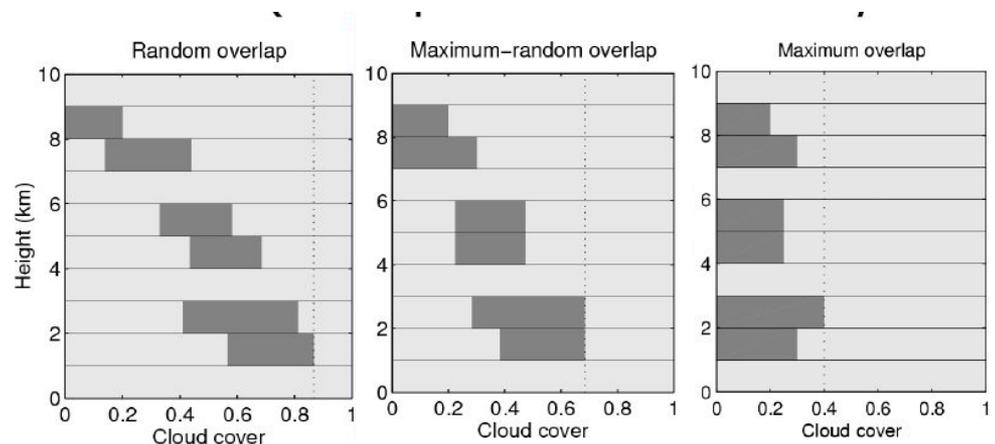
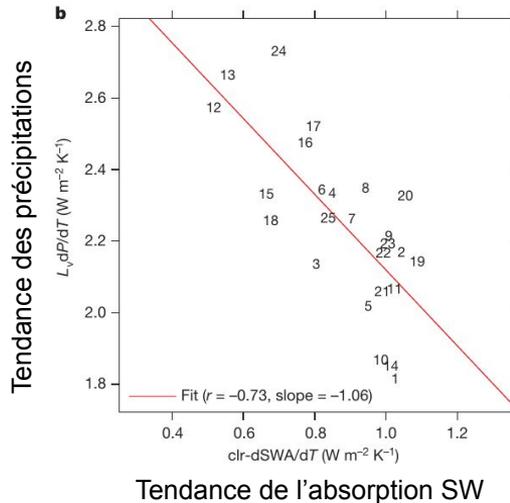


Plan de la présentation

- 1) **Avant-propos**
- 2) **Spécificité des codes radiatifs pour le climat**
- 3) **Avancées récentes**
 - a) *Paramétrisations*
 - b) *Efficacité*
 - c) *Simulations rayonnement 3D couplées*
 - d) *Evaluation des modèles*
 - e) *Planétologie*
 - f) *Calculs de référence pour les flux*
- 4) **Défis à venir**
 - a) *Revisiter les fondamentaux*
 - b) *Assurer la cohérence*
 - c) *Questionner le besoin*
 - d) *Exploiter les observations satellite*
- 5) **Conclusions**

Spécificités des codes radiatifs pour le climat

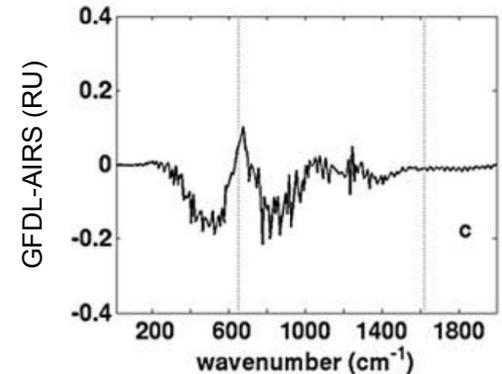
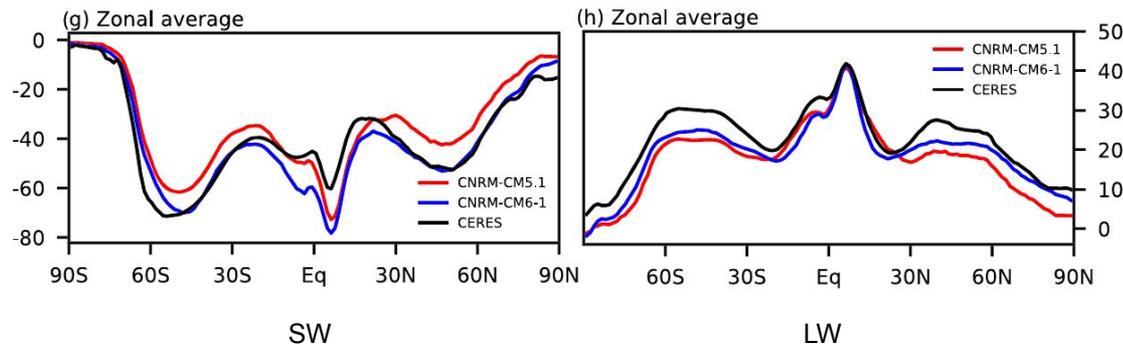
- Codes **efficaces** (simulations très coûteuses, appel au rayonnement $\sim 35\%$ de la physique), **précis et non biaisés** (1 W m^{-2} = beaucoup, cf forçage CO_2 actuel ou du bilan de l'atmosphère)
- Hypothèses **sous-maille** (distribution verticale des nuages, horizontale de la vapeur d'eau)
- Variables d'intérêt pour bilans d'énergie = flux **broadband (UV \rightarrow FIR)**
 - Absorbé à la surface + dans chaque couche (heating/cooling rates)
 - Au sommet de l'atmosphère (bilan radiatif équilibré + évaluation observations satellite)



credits: R. Hogan

Spécificités des codes radiatifs pour le climat

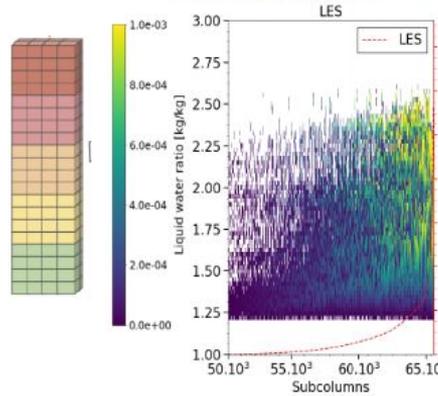
- Approximation des **colonnes indépendantes** et hypothèse **plan-parallèle** (acceptable à 100 km de résolution, mais critique à quelques centaines de m)
- Modèles **2-flux** (ok pour épaisseurs optiques importantes et pour flux totaux, pas pour direct/diffus), **résolution spectrale limitée** (*k*-distributions, modèles par bandes)
- **Calibration** des modèles (tuning) largement basée sur confrontation des **flux broadband SW/LW** aux observations satellite (CERES principalement)
 - Ajustement des paramètres ayant un impact radiatif direct (vitesse de chute des cristaux de glace pour temps de vie des cirrus, hétérogénéité sous-maille des nuages, rayon effectif des gouttelettes nuageuses...)
 - Possible compensation spectrale d'erreurs



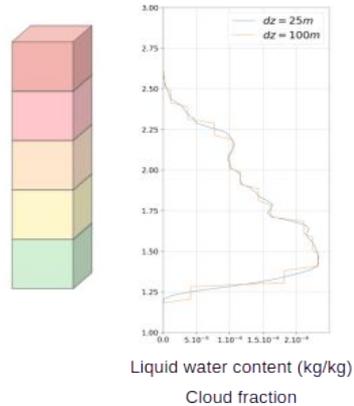
Avancées récentes - Paramétrisation nuages sous maille

Prise en compte de la structure 3D des nuages (mais avec hypothèse ICA)

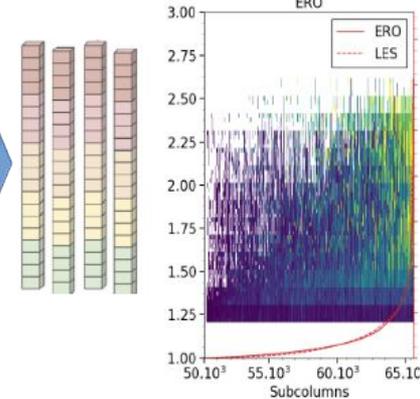
LES output on high resolution vertical and horizontal grids



In GCM : Single column with a coarse vertical grid



Ensemble of **sub-columns** with a high resolution vertical grid



Génération statistique de sous-colonnes représentatives du nuage 3D à partir d'un seul paramètre clef: **longueur de décorrélation**

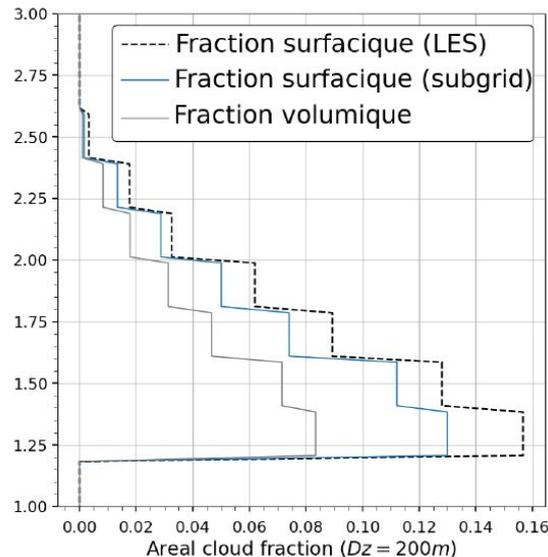
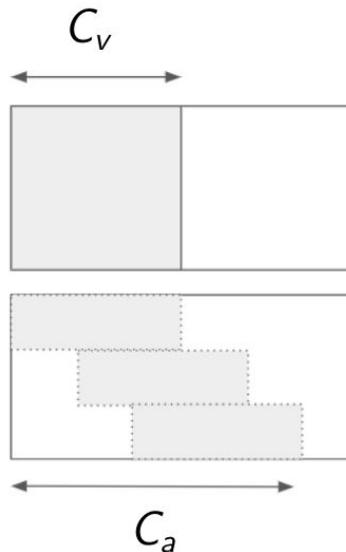
- très bonne reconstruction des propriétés statiques
- recouvrement "classique" (max-rnd) sous-estime de 50% la couverture nuageuse
- la longueur de corrélation varie d'un facteur 10 entre estimation par satellite et par modèles LES
- l'importance relative des effets sous-maillages et inter-maille dépend de la résolution verticale

Avancées récentes - Paramétrisation nuages sous maille

Prise en compte de la structure 3D des nuages (mais avec hypothèse ICA)

Importance de bien différencier:

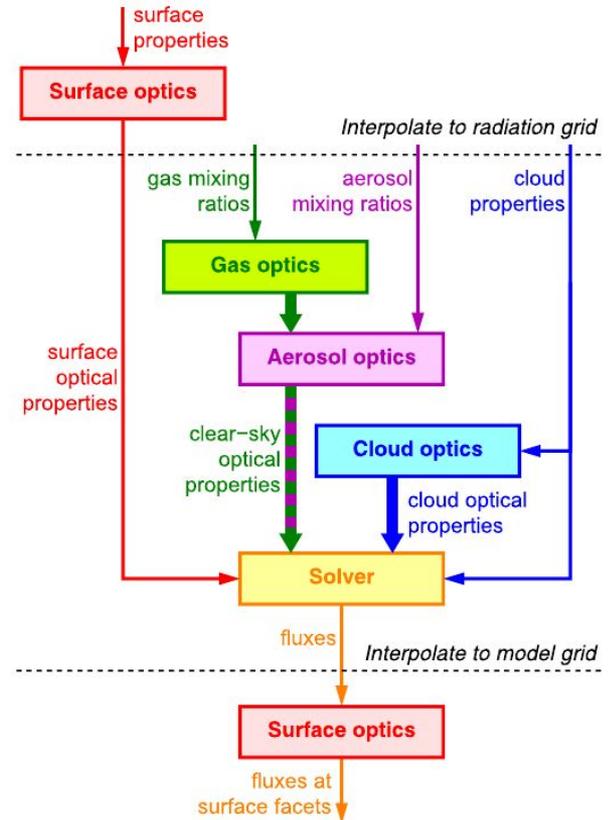
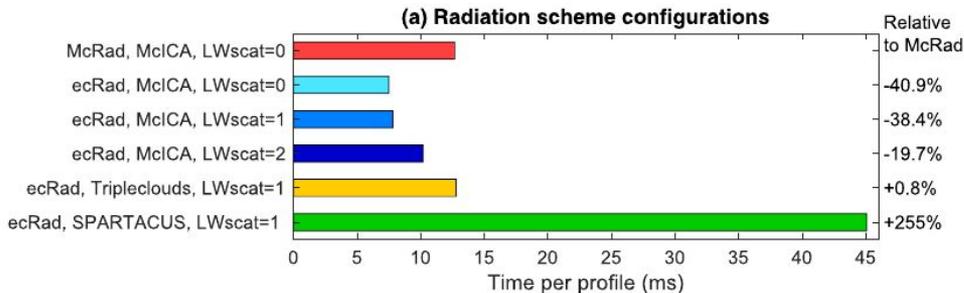
- **fraction volumique** = volume du nuage/volume total (diagnostic schéma de nuage)
- **fraction surfacique** (area) = surface couverte par le nuage/surface totale



Avancées récentes - Paramétrisation effets 3D

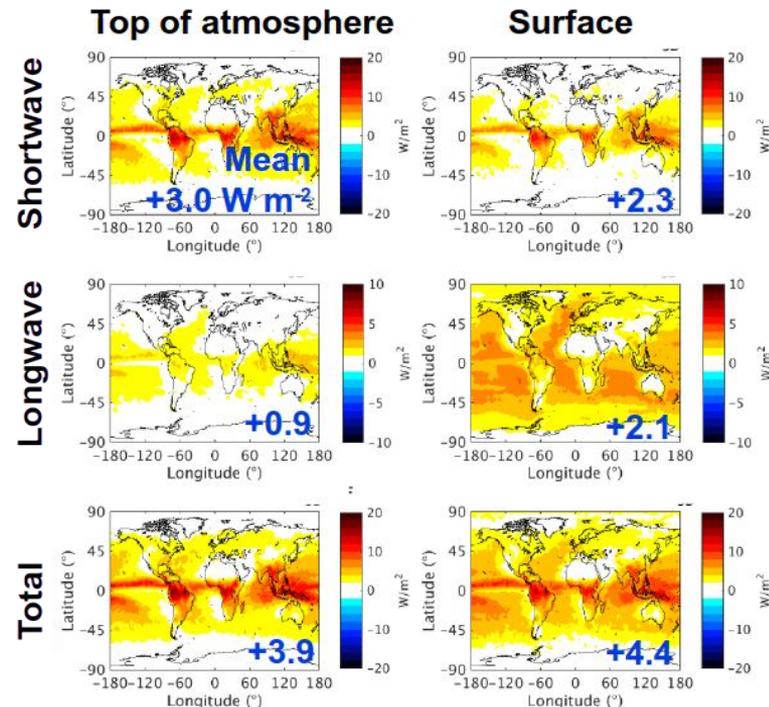
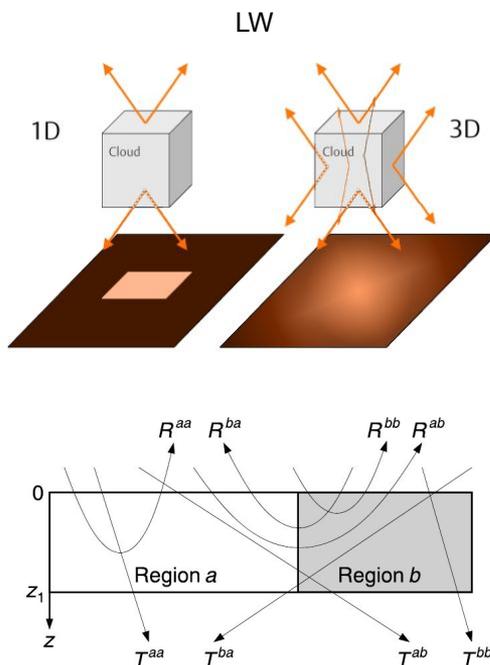
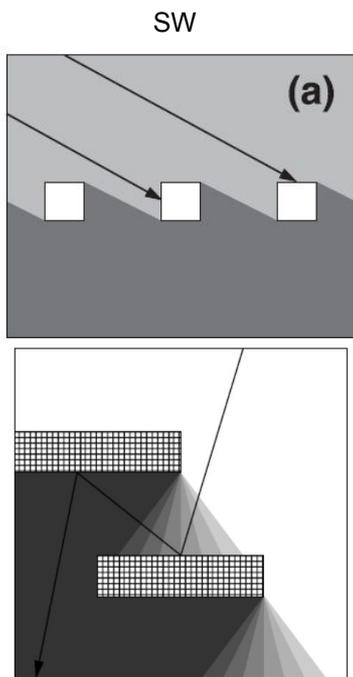
Code ecRad (modulaire, user-friendly)

- Implémenté dans IFS, AROME/ARPEGE, CNRM-CM, LMDZ, ICON
- Plusieurs solveurs 2-flux (McICA, TripleClouds, SPARTACUS)
- Activation de la diffusion dans le LW pour les aérosols et/ou les nuages
- Ajout possibles de propriétés optiques (nuages, aérosols)
- Plusieurs options pour absorption gazeuse
- Version offline disponible



Avancées récentes - Paramétrisation effets 3D

SPARTACUS (effets 3D sous-maille pour les nuages, les immeubles, la végétation)



Avancées récentes - Paramétrisation effets 3D

SPARTACUS

- Nouveaux paramètres nuageux à fournir (longueur des bords = taille/nombre des nuages)
- Calibration des paramètres nuageux de SPARTACUS (hétérogénéité, longueur de décorrélation, longueur des bords), pour coller à simulations 3D (htrdr)
- Différence entre paramètres réels (dérivés des LES) et optimaux pour SPARTACUS

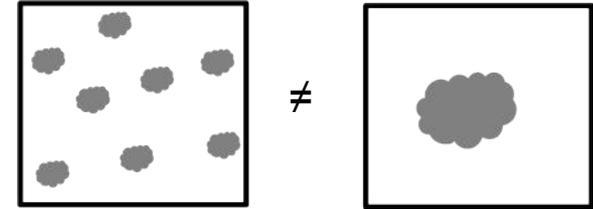
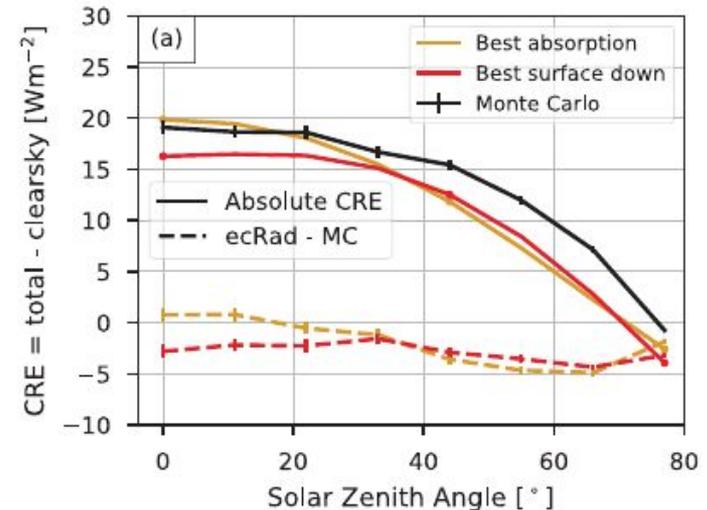


Table 3
Parameter Values for the “Best” Configurations of ecRad

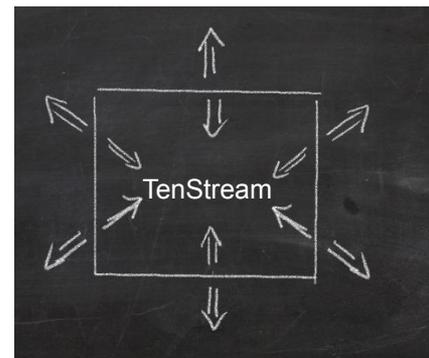
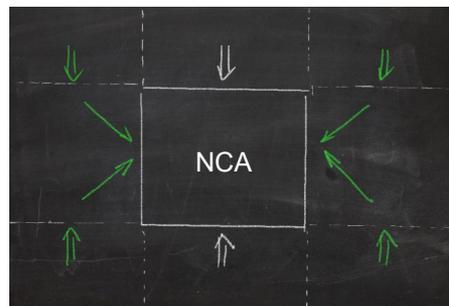
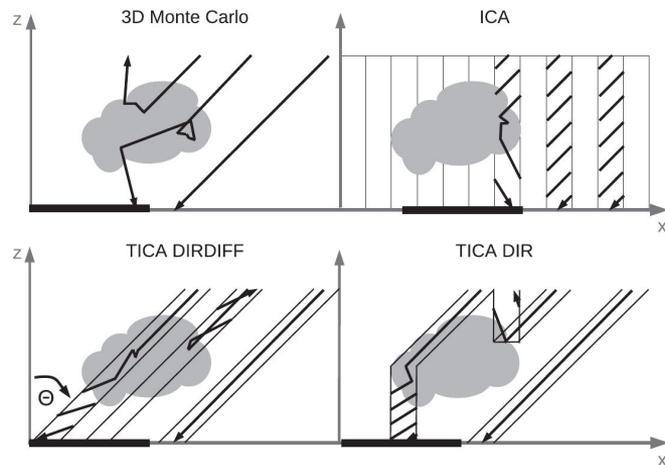
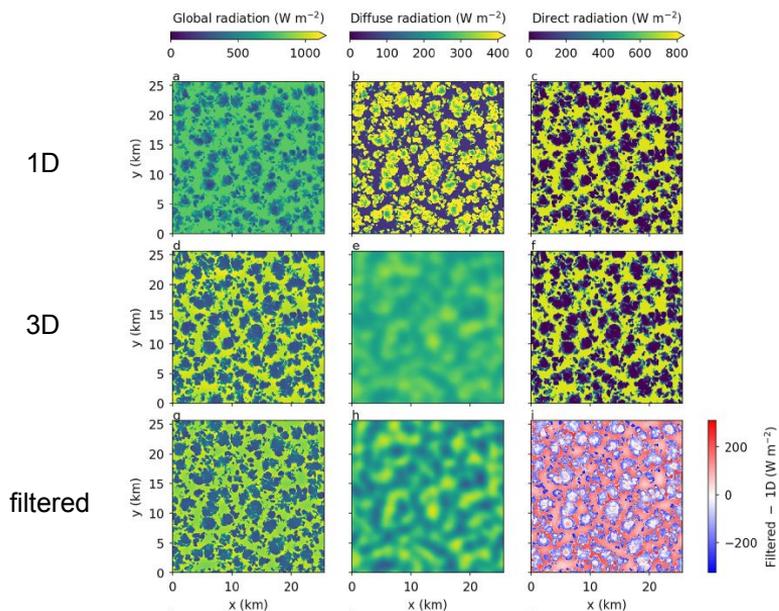
Parameters	FSD	z_0 (m)	C_s (m)
Mean LES-derived	0.705	187	247
Best global	1.079	436	155
Best TOA up	1.646	493	119
Best absorption	0.102	294	821
Best surface down	1.469	374	113



Avancées récentes - Paramétrisation effets 3D

Effets 3D entre colonnes (ex: "cloud enhancement")

- TICA
- NCA (LW), (dynamic) TenStream
- NTICA (smoothing diffuse field), paNTICA, filtering



Avancées récentes - Propriétés optiques des nuages

Propriétés optiques (PO = g , ω , τ) des nuages liquides

→ 2 étapes

- $$r_{\text{eff}} = \left(\frac{1}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{3\text{LWC}}{4\rho_w\pi N} \right)^{1/3}$$

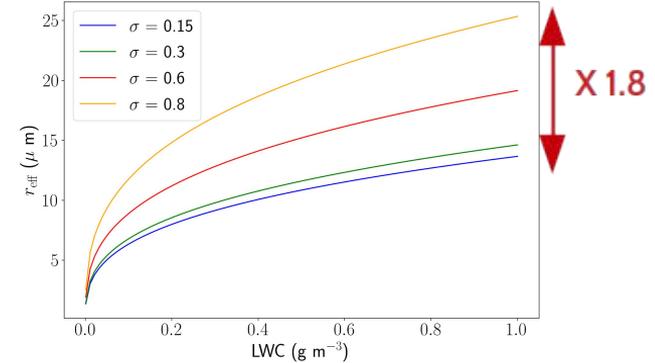
dépend de la forme de la distribution

- $$\tau_i = \text{LWP} \left(a_i + \frac{b_i}{r_e} \right)$$

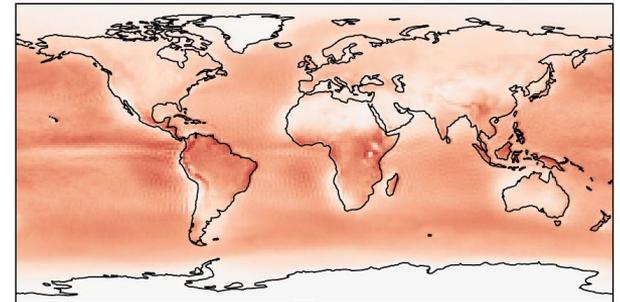
$$1 - \tilde{\omega}_i = c_i + d_i \cdot r_e$$

$$g_i = e_i + f_i \cdot r_e$$

Distribution function	k
Lognormal	$e^{-3\sigma^2}$
Gamma	$\frac{\Gamma(\nu + 2/\alpha)^3}{\Gamma(\nu)\Gamma(\nu + 3/\alpha)^2}$
Gamma ($\alpha = 1$)	$\frac{(\nu^2 + \nu)}{(\nu + 2)^2}$



Overall uncertainty (CRE₀₆₅₀₆₅ - CRE₀₂₀₂) - Mean difference = 6.2 W m⁻²



Forçage radiatif des nuages

Cohérence → tests avec distribution lognormale

- Nuage idéalisé LWC variable
- Simulations offline sorties de modèle de climat
- Impact le plus important sur r_{eff}

Avancées récentes - Propriétés optiques des nuages

Propriétés optiques des nuages de glace

- r_{eff} mal défini (variable d'un papier à l'autre) et souvent diagnostiqué à partir de IWC et T
- Forme des cristaux variable (cf ANR ICCARE)

$$r_{eff} = \frac{3}{4} \frac{a}{\rho_{ice} \gamma} \frac{\Gamma(\frac{b}{\alpha} + \nu)}{\Gamma(\frac{\delta}{\alpha} + \nu)} \left(\rho_{air} a \frac{\Gamma(\nu + \frac{b}{\alpha})}{\Gamma(\nu)} \frac{N}{IWC} \right)^{\frac{\delta-b}{\delta}}$$

$$r_{eff} = \frac{3 \int V(D)n(D)dD}{4 \int A(D)n(D)dD}$$

dépend des lois $m(D)$ et $A(D)$ (importantes aussi pour la microphysique) et de la forme de la distribution

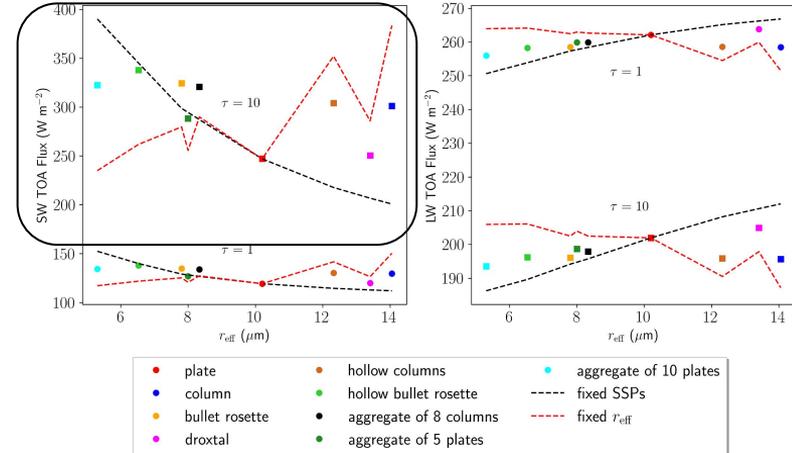
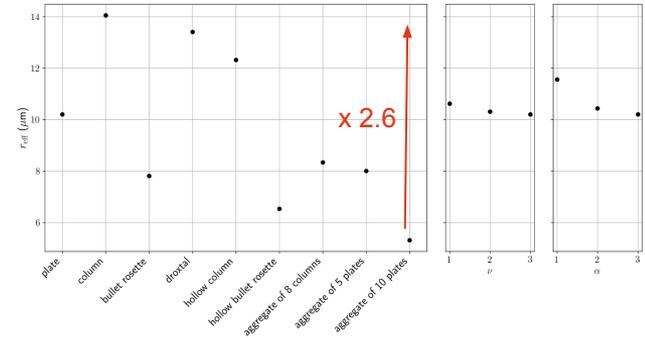
- $$\beta_e = IWC(a_0 + a_1/D_e),$$

$$1 - \omega = b_0 + b_1 D_e + b_2 D_e^2 + b_3 D_e^3,$$

$$g = c_0 + c_1 D_e + c_2 D_e^2 + c_3 D_e^3,$$

Cohérence → une seule forme et une seule distribution

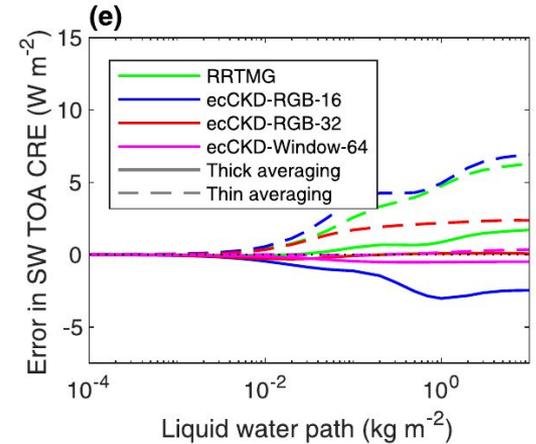
- r_{eff} très variable d'une forme à l'autre
- impact r_{eff} et PO équivalents



Avancées récentes - Efficacité

ecckd

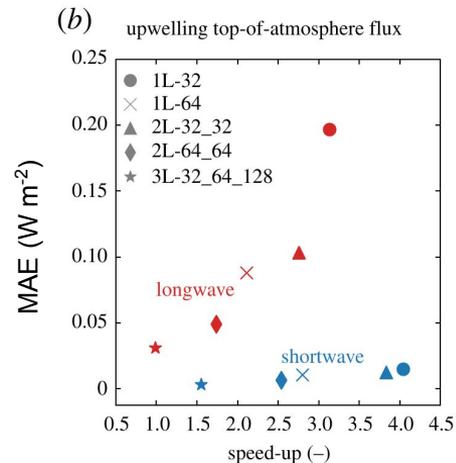
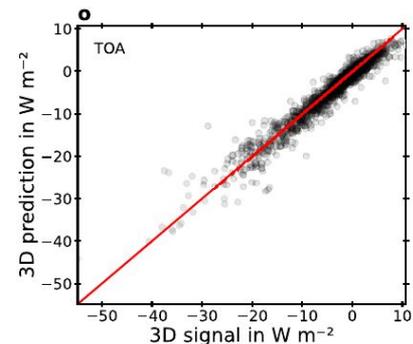
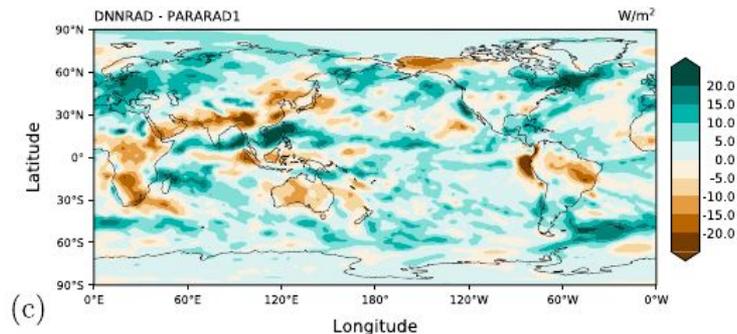
- Outil automatique pour générer des k -distributions
- Sélection judicieuse des bandes spectrales
- Optimisation sur des métriques définies par l'utilisateur
- Équilibre efficacité/précision “à la demande”
- Utilisé dans IFS (ecRad), plus efficace et plus précis que RRTM



Avancées récentes - Efficacité

Emulation par réseaux de neurones

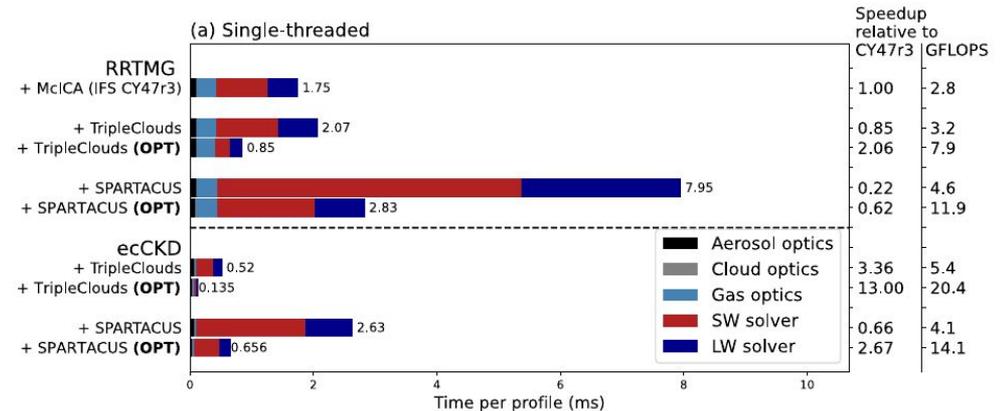
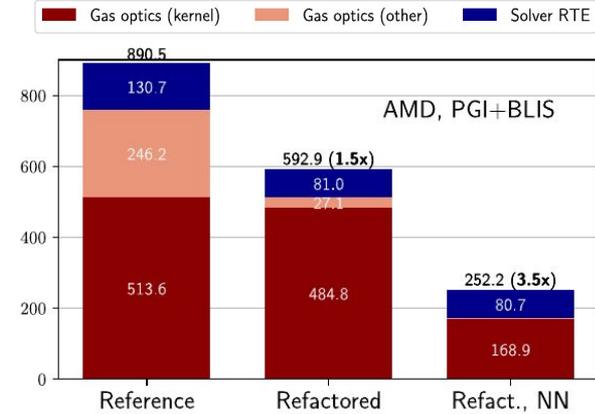
- SPARTACUS (effets 3D comme incrément du 1D)
- Absorption gazeuse (RRTM-G, RTTOV), plus précis qu'émulation complète
- Flux



Avancées récentes - Efficacité

Optimisation des codes

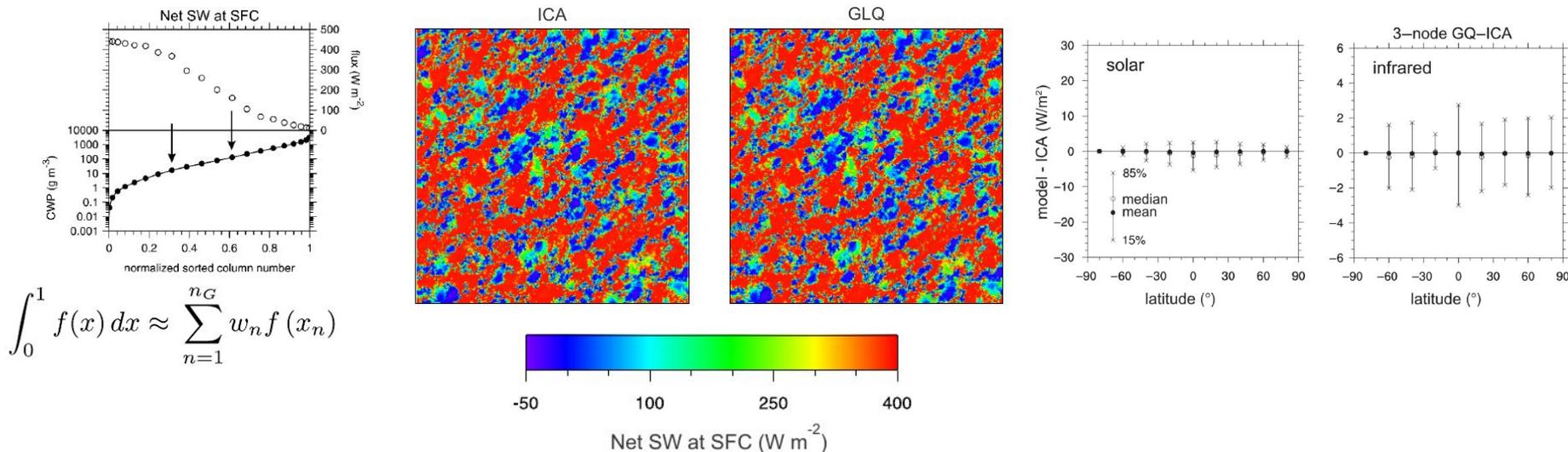
- refactorisation (gestion des boucles)
- simple précision
- accélération x 12 (avec ecckd)



Avancées récentes - Efficacité

Échantillonnage des colonnes

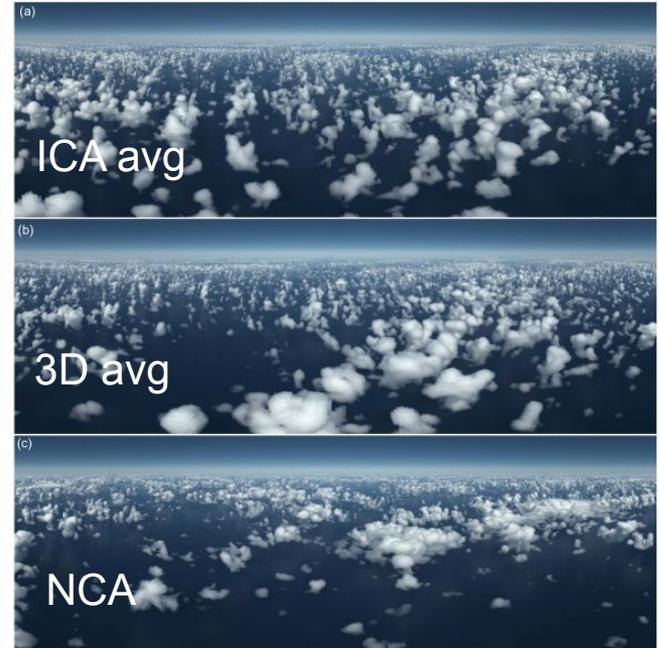
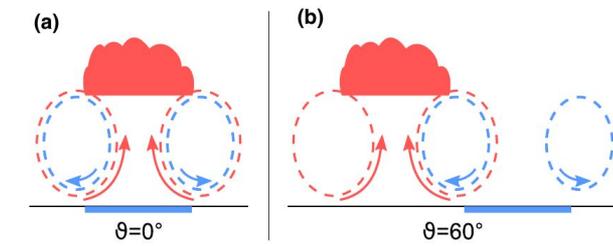
- trier les colonnes par IWV ou CWP
- calculer les flux uniquement pour des colonnes “représentatives” et associer chaque colonne à colonne représentative
- calculer des valeurs moyennes (grand domaines ou générateur de sous-colonnes) par quadrature
- accélération x ~1000



Avancées récentes - Rayonnement 3D couplé

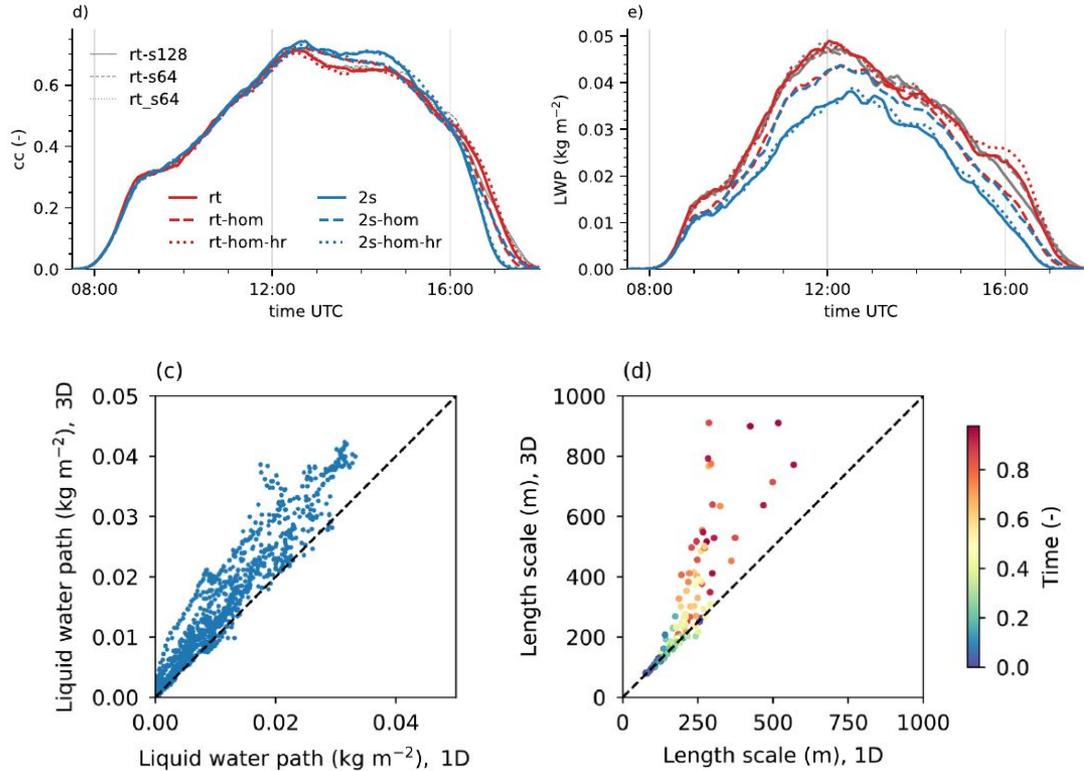
LES avec rayonnement "3D" : TICA, NCA, TenStream

- circulations locales induites
- organisation des nuages (sans vent synoptique)



Avancées récentes - Rayonnement 3D couplé

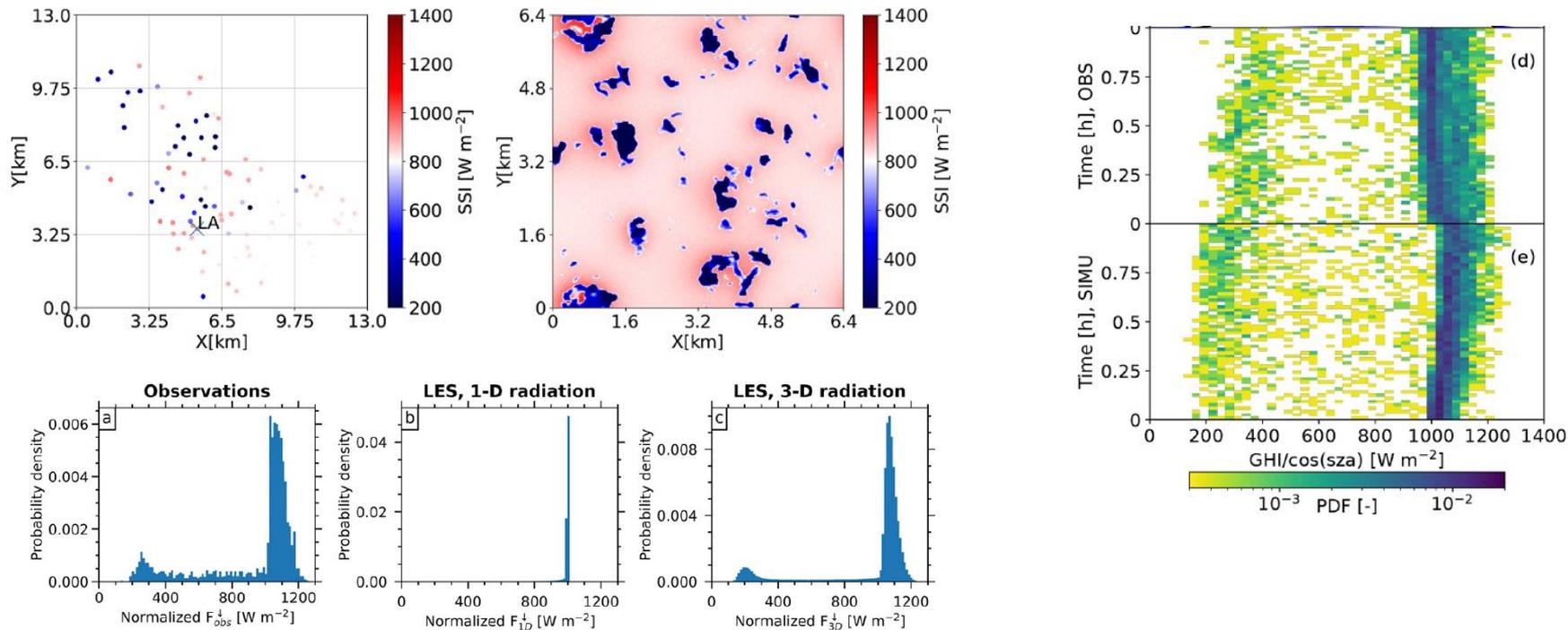
LES avec rayonnement Monte Carlo 3D → Géométrie et contenu en eau liquide des nuages modifiés



Avancées récentes - Evaluation des modèles

Evaluation des champs nuageux à partir des distributions de rayonnement SW à la surface

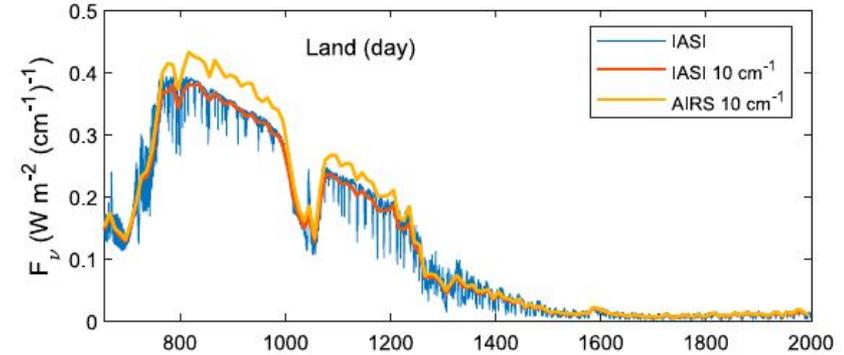
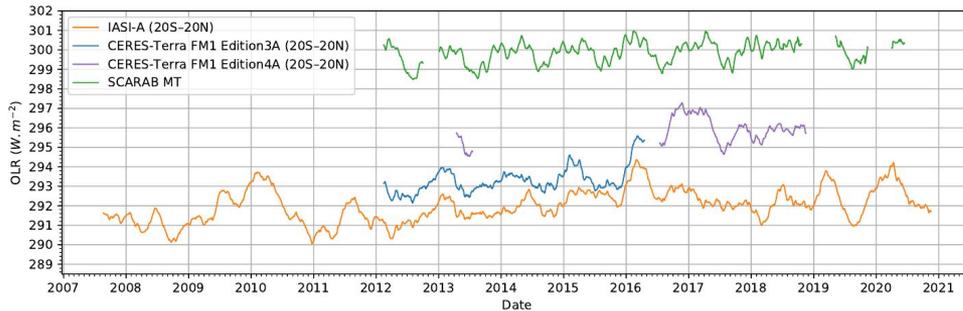
→ Reproduire la distribution nécessaire d'avoir les bons nuages (propriétés physiques et géométriques)



Avancées récentes - Evaluation des modèles

Evaluation des flux spectraux

- Produits satellite flux spectraux ciel clair (ULB et Huang ADM, LMD NN, IASI, AIRS)
- Extraction des flux spectraux des modèles (ex: bandes RRTM)

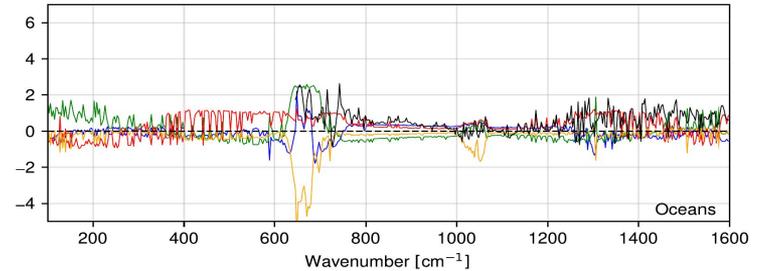


Avancées récentes - Evaluation des modèles

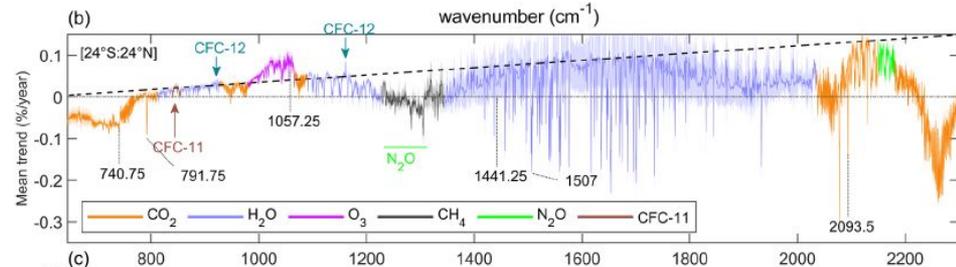
Evaluation des luminances hyperspectrales

- Erreurs de température de surface, température, humidité de l'atmosphère
- Spectres moyens, tendances (signature spectrale du CC)
- Cf posters L. Leonarski et F. Schmitt

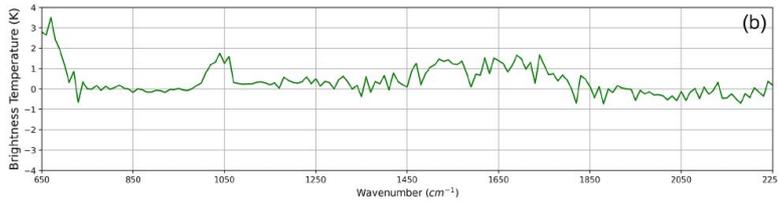
Spectre moyen océan tropical Nord - différences inter-modèles



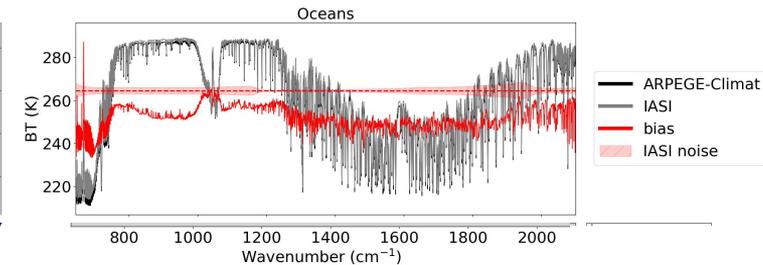
Tendance spectrale IASI



EC-Earth - IASI



BT difference (K)

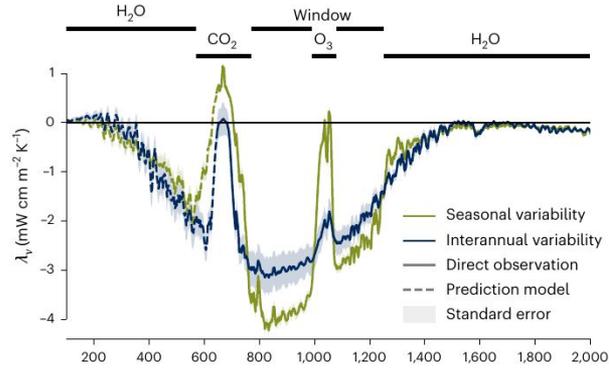


Avancées récentes - Evaluation des modèles

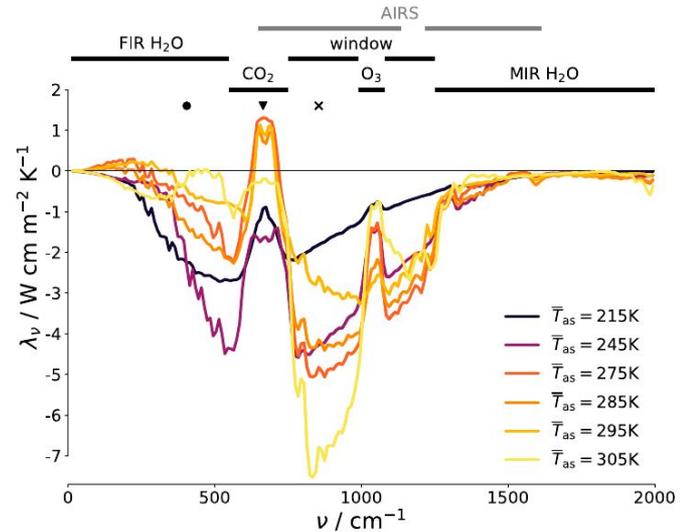
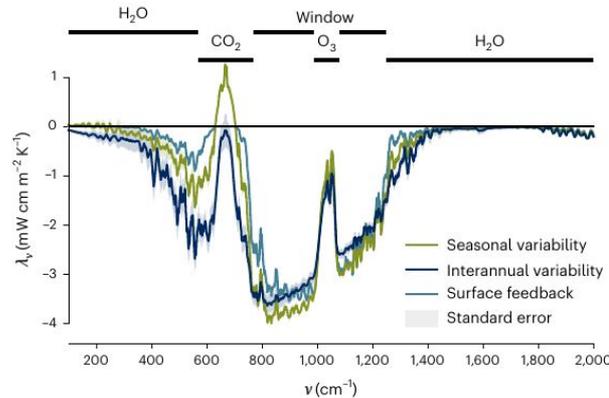
Evaluation de la rétroaction climatique LW spectrale

$$\lambda_v = -\frac{d\mathcal{L}_v}{dT_s}$$

IASI



MPI-ESM1



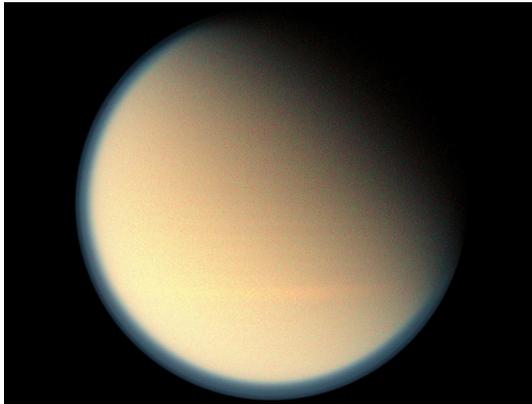
AIRS

Avancées récentes - Planétologie

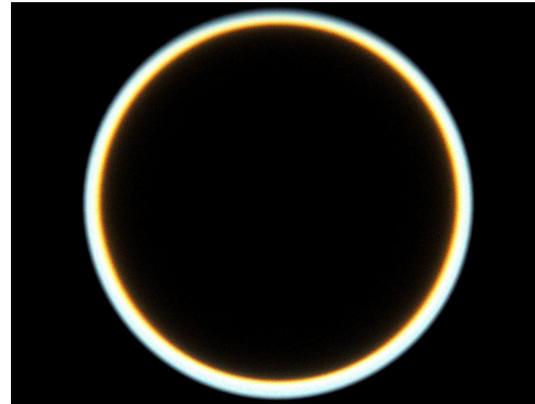
Lien avec les études sur les **autres planètes et les exo-planètes**, notamment:

- propriétés spectrales des gaz dans des conditions extrêmes
- extension de htrdr pour la prise en compte de la nature 3D de la surface et de la sphéricité des planètes

Simulation du rayonnement pour “Titan”, satellite de Saturne, avec htrdr, avec géométrie 3D de la planète, sa surface, son atmosphère, nuages et aérosols, etc...



éclairage par dessous

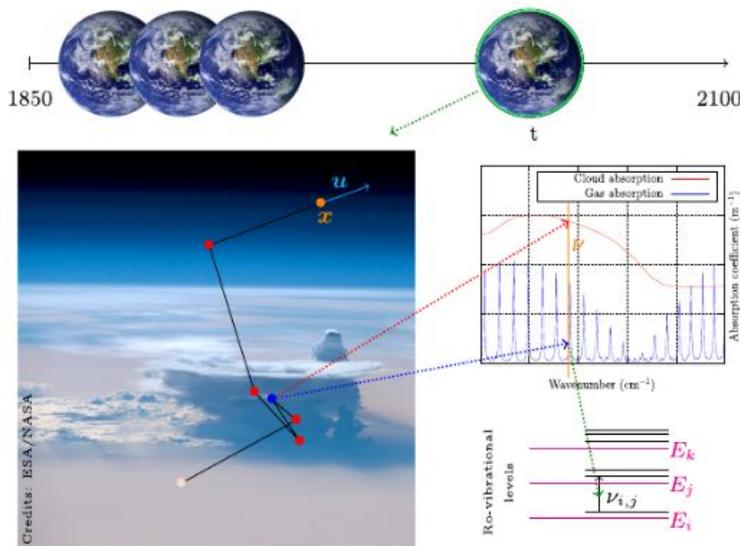


configuration en transit

Avancées récentes – Calcul de références pour les flux

- 4A-Flux (thèse Y. Tellier)
- Flux globaux avec RadForce (projet MCG-Rad)

Calcul très rapide des flux et des forçages radiatif, à l'échelle globale, par méthode de Monte-Carlo, avec un modèle "raie-par-raie" (échantillonnage des transitions) (collab. LMD, Laplace, IRIT, Meso-star)

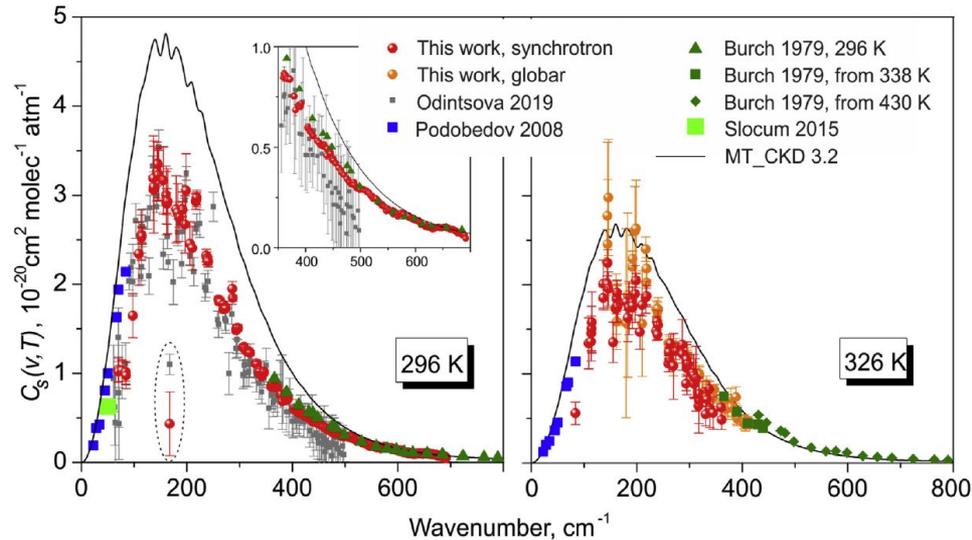


- « Couplage de modèles » par Monte-Carlo. Sensibilité au modèle de profil de raie (Yanniss Nyffenegger)
- Nuages verticalement hétérogènes (thèse R. Lebrun)
- Calcul de sensibilité (thèse Nada Mourtaday)
- Perspectives pour les exoplanètes
- ...

Défis à venir – Revisiter les fondamentaux

Continuum de vapeur d'eau

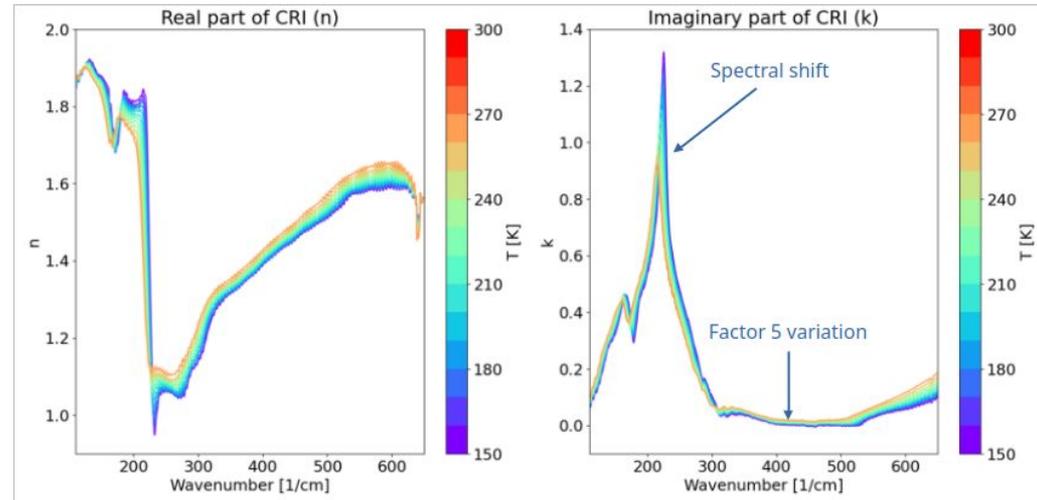
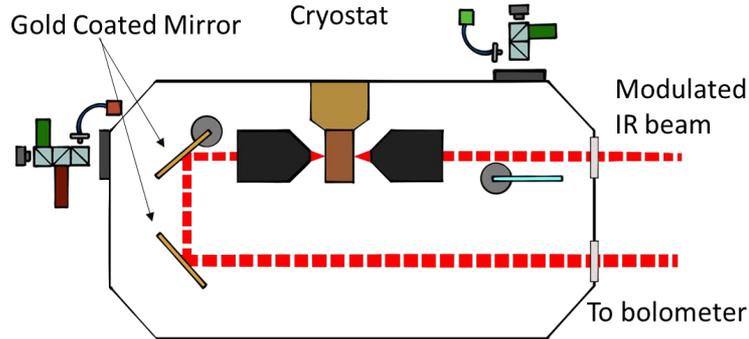
- (Presque?) tous les codes radiatifs LW reposent sur une version du modèle MT-CKD
- Impact très important sur les flux: plusieurs W m^{-2} au sommet de l'atmosphère, plusieurs dizaines W m^{-2} à la surface
- Différences très significatives entre versions de MT-CKD
- Quelle critique, validation externe de ce modèle?



Défis à venir – Revisiter les fondamentaux

Indice optique de la glace dans l'IR et dépendance en température (PhD C. Taverna)

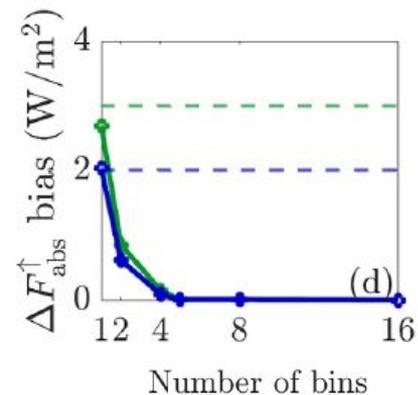
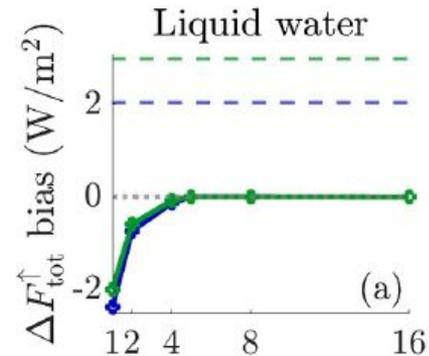
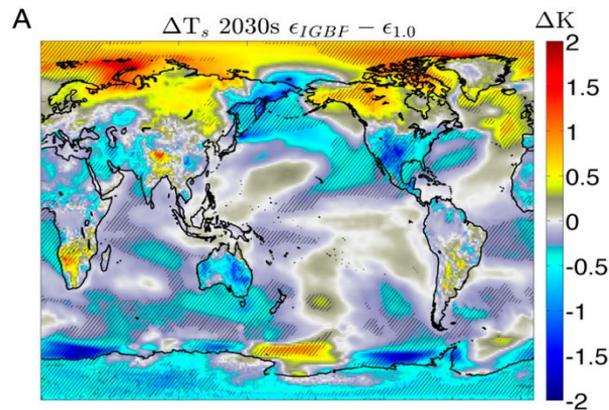
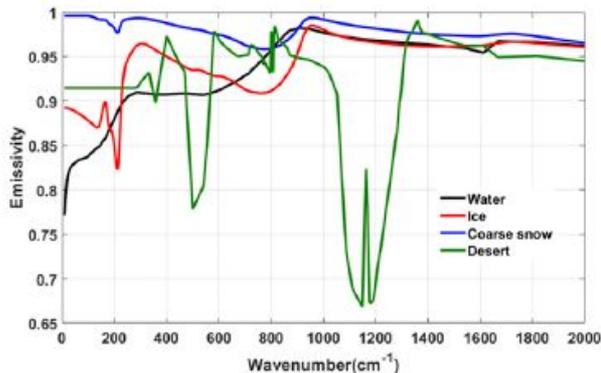
- Indice de Warren et Brandt (2008) très utilisé correspond à 266 K
- Pour le FIR jamais de mesures au-dessus de 190 K (problème absorption vapeur d'eau)
- Mesures originales à SOLEIL, large gamme spectrale, large gamme de température
- Propriétés optiques des nuages à calculer pour chaque température
- Estimation des impacts en cours



Défis à venir – Revisiter les fondamentaux

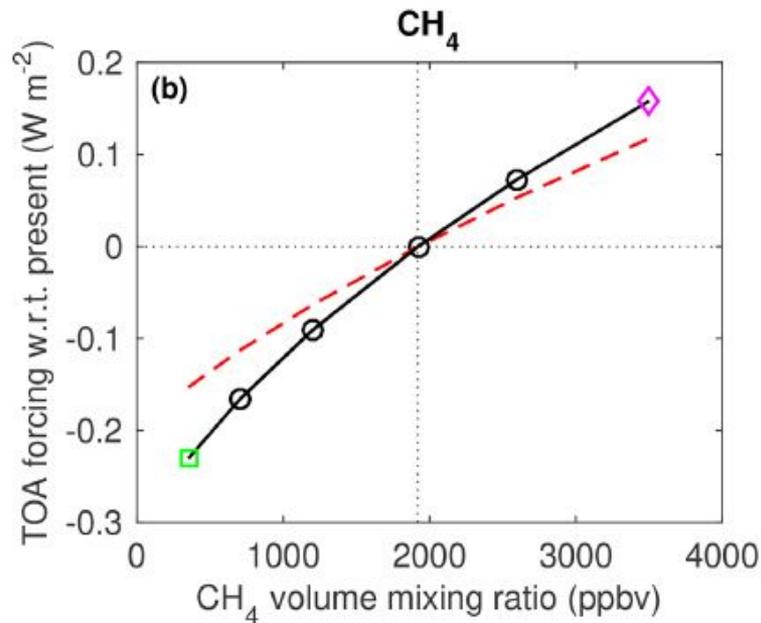
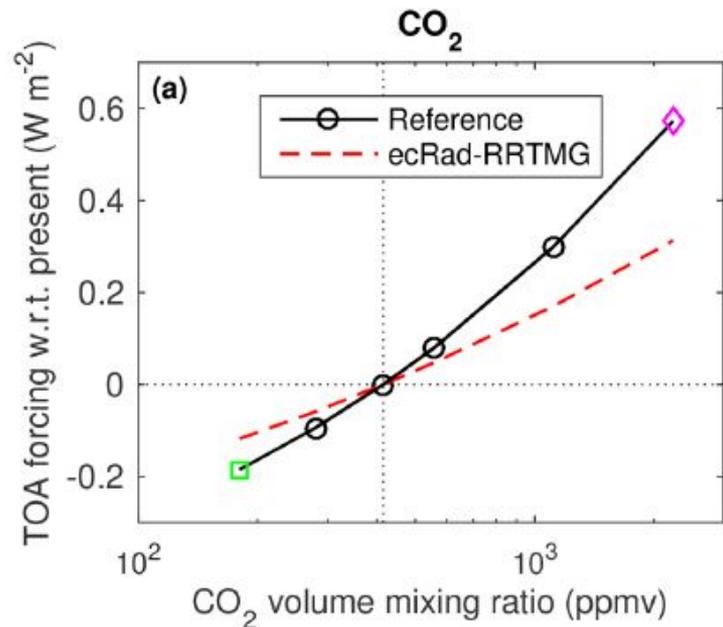
Albédo et émissivité spectraux (couplage avec la surface)

- Dans les modèles de climat, quelques bandes seulement pour le SW, souvent une seule pour le LW (ex: $\epsilon = 1$ dans LMDZ)
- Albédo spectral de la neige essentiel pour bien simuler le bilan de masse des calottes polaires
- Bases de données émissivité existent (Huang, CAMEL)
- Stage J. Daval au CNRM pour mettre émissivité spectrale dans CNRM-CM
- Observations satellite disponibles (IASI, SCIAMACHY, FORUM)



Défis à venir – Revisiter les fondamentaux

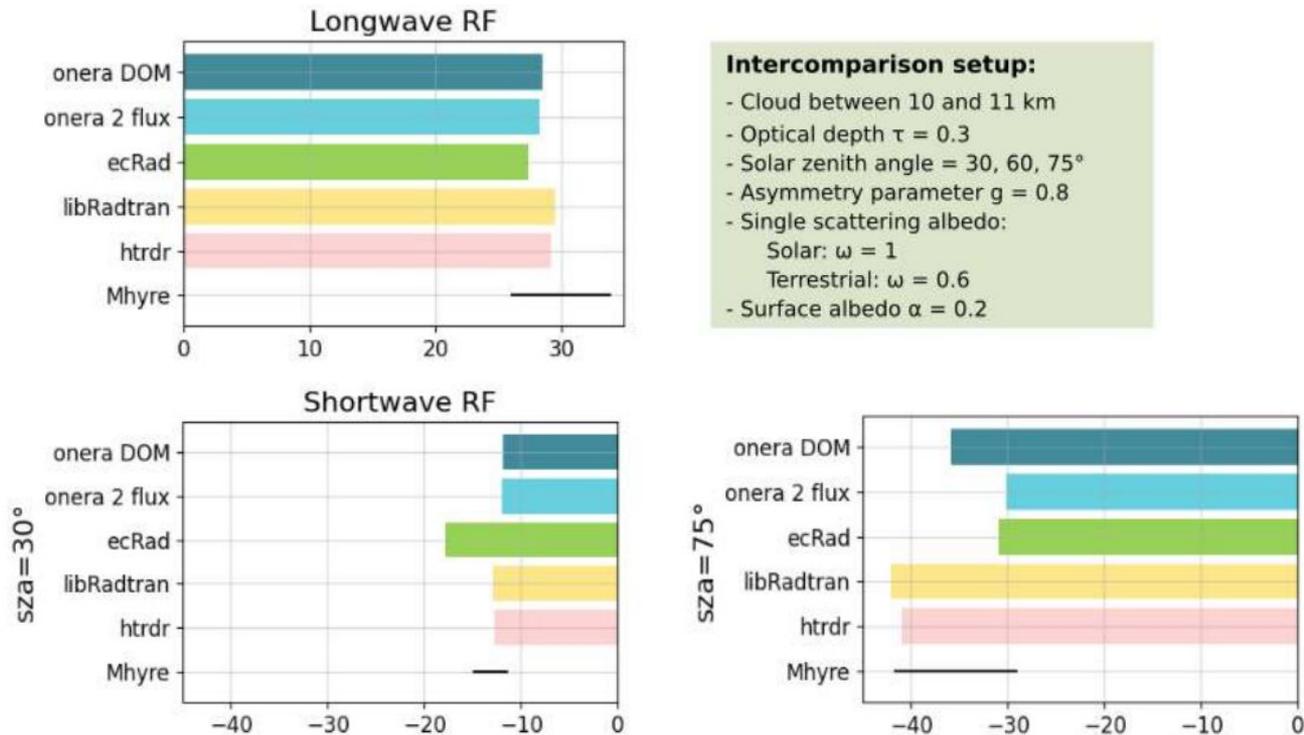
La spectroscopie et les modèles d'absorption gazeuse (ex: RRTM)



Défis à venir – Revisiter les fondamentaux

La pertinence et la validité des modèles 2-flux

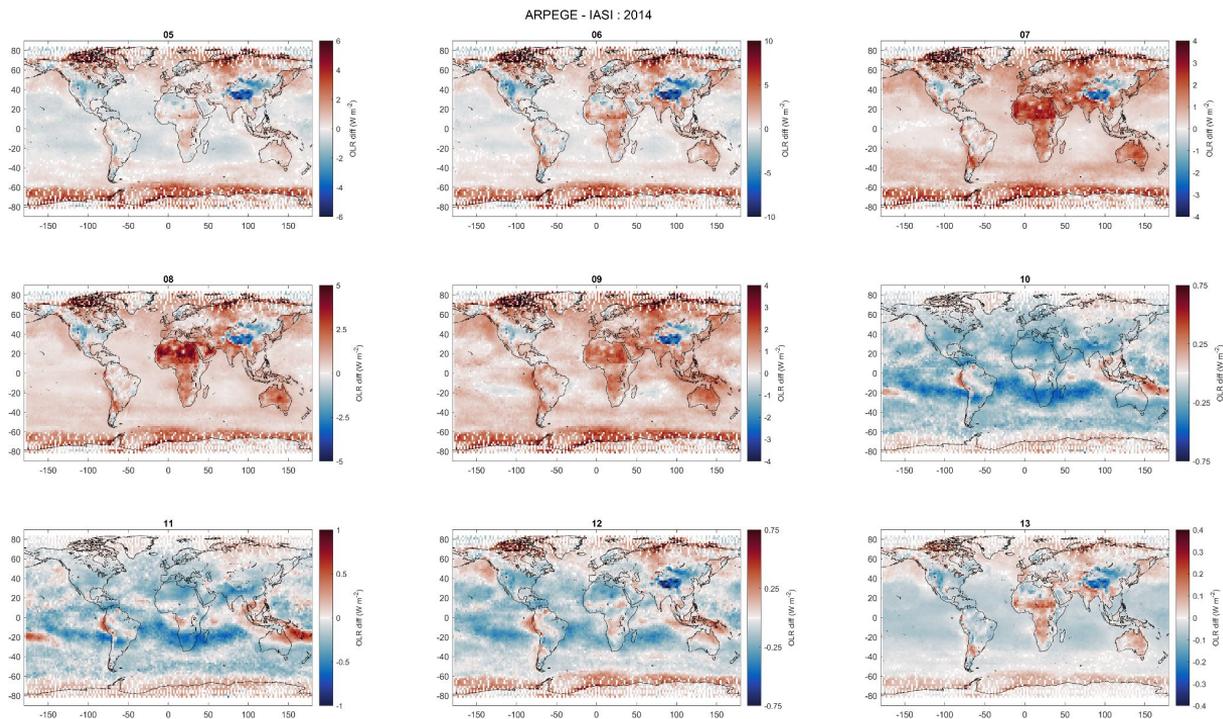
(ou comment estimer les nombreux “petits effets” radiatif, dans les modèles et les observations?)



Défis à venir – Revisiter les fondamentaux

Le tuning à partir des observations CERES

→ valorisation des observations hyperspectrales (SW, LW) pour limiter les compensations d'erreur spectrales et mieux contraindre le système

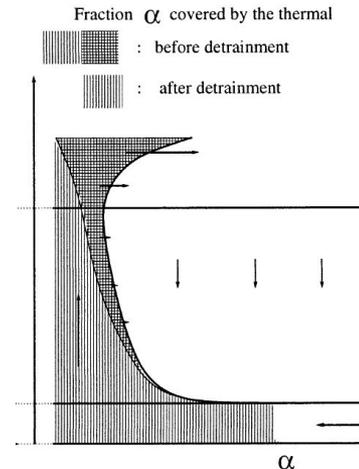
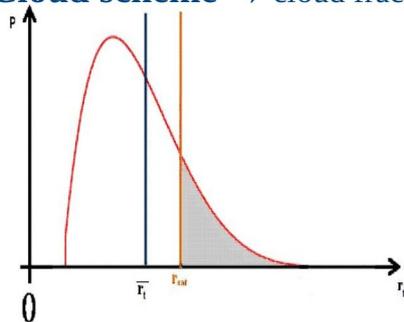


Défis à venir – Assurer la cohérence

Poursuivre la mise en cohérence avec les paramétrisations physiques

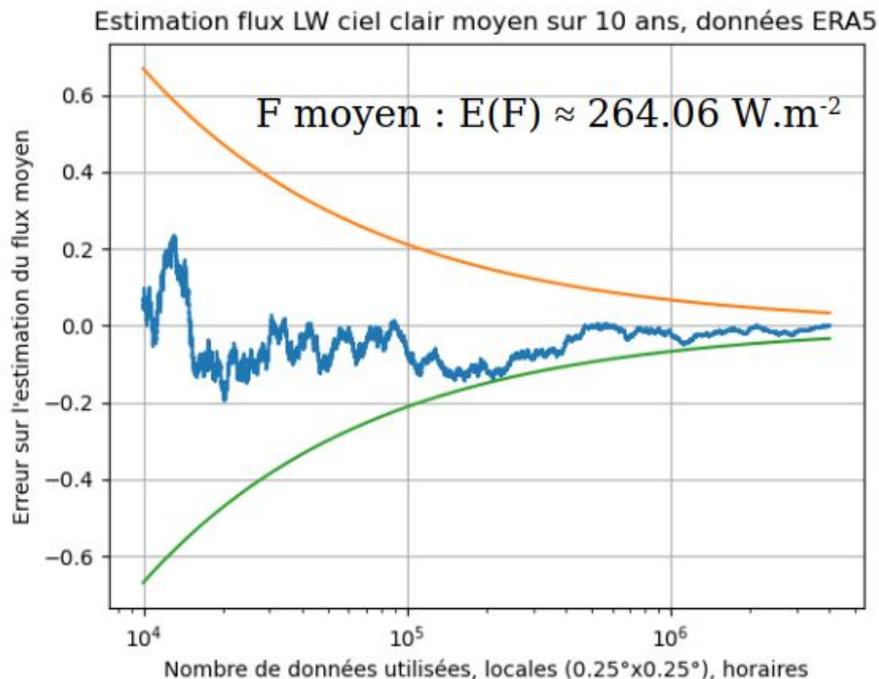
- Microphysique des nuages → bien avancé
- A faire
 - Hétérogénéité vapeur d'eau + LWC (schéma de nuage statistique)
 - Paramétrisation de la convection peu profonde (taille des thermiques/nuages)
 - Recouvrements verticaux (stratiforme vs cumuliforme)
- Réciproquement hétérogénéité sous-maille du rayonnement peut impacter les paramétrisations
- Possibilité pour LES = calculs 3D exacts sous-maille à résolution dégradée en connaissant parfaitement la géométrie des nuages

Cloud scheme → cloud fraction



Défis à venir – Questionner le besoin

Précision nécessaire



Écart type de données horaires : $\sigma(F_{hr}) \approx 33 \text{ W.m}^{-2}$

Erreur d'estimation de la moyenne pour N données tirées aléatoirement:

$$N=10^6 \Rightarrow \sigma(E(F)) \approx 0.03 \text{ W.m}^{-2} \quad \sigma(E(F)) \approx \frac{\sigma(F_{hr})}{\sqrt{N}}$$

Sur les 10^{11} valeurs horaires ($4 \times 360 \times 4 \times 180 \times 24 \times 365 \times 10$), 10^6 sont suffisantes pour estimer la moyenne avec une erreur relative de 10^{-4}

Intérêt pour l'analyse des mesures (ou simulations) à très haute résolution.

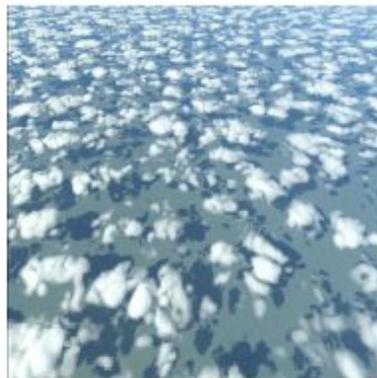
Pour l'instant l'extraction aléatoire est inefficace avec les fichiers netcdf.

Défis à venir – Questionner le besoin

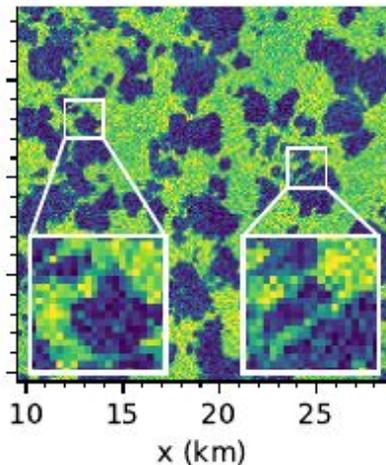
Biais vs bruit

Monte Carlo + suppression de bruit

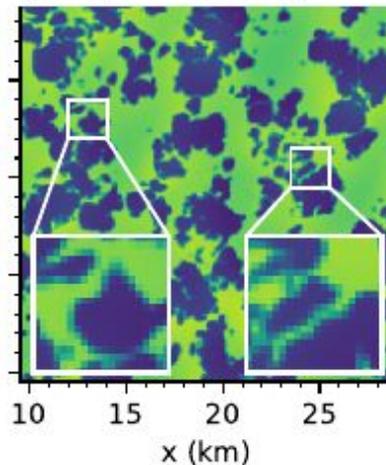
a) cloud field



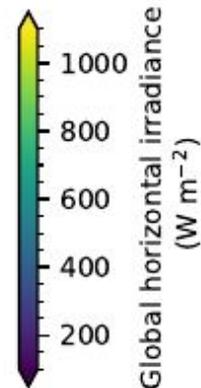
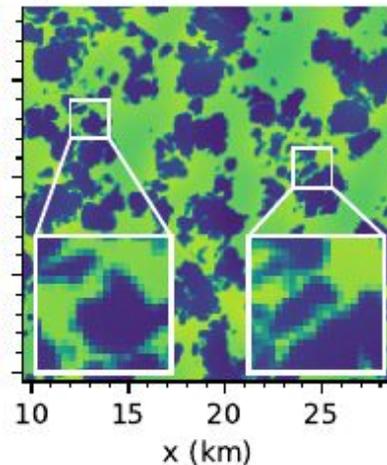
b) 1 spp



c) 1 spp + denoising



d) 4096 spp



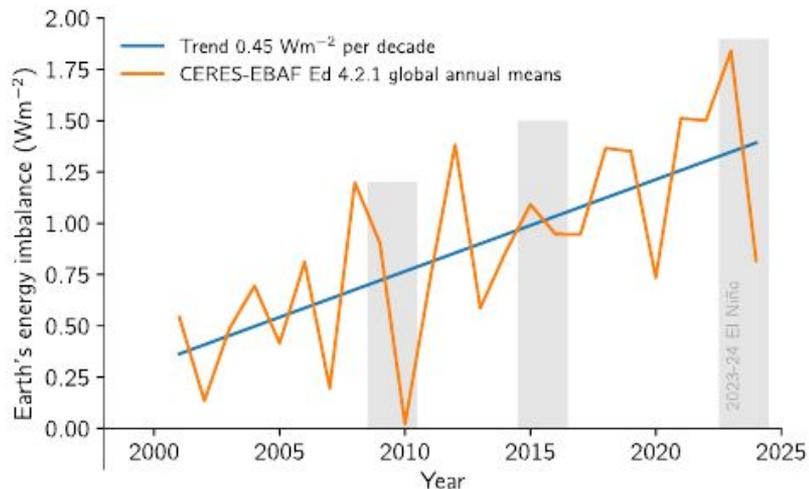
Défis à venir – Questionner le besoin

- **Résolution spatiale** de l'appel au rayonnement vs **résolution temporelle**?
 - pratique courante: appel en tout point mais pas à tous les pas de temps
 - ECMWF: grille horizontale réduite.
- **Résolution spectrale**
 - Modèle à une bande spectrale (ex: ACRANEB), méthode CKD “full-spectrum”

Défis à venir – Exploiter les observations satellite

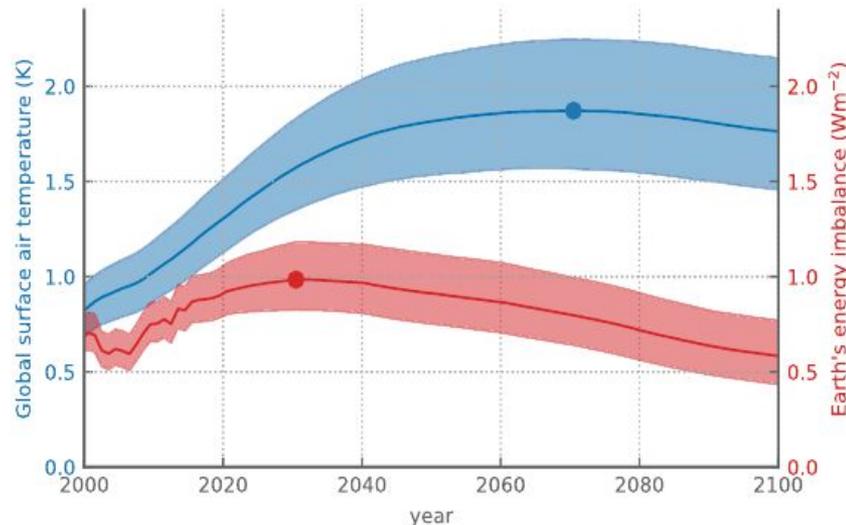
Suivi du bilan radiatif

Un accroissement inquiétant?



Bilan radiatif global annuel mesuré depuis l'espace sur la période 2001-2024 (CERES-EBAF Edition 4.2.1, Loeb et al., 2018).

Le déséquilibre radiatif précurseur du réchauffement futur



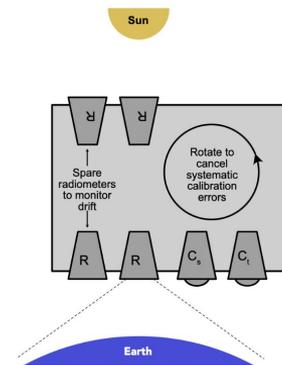
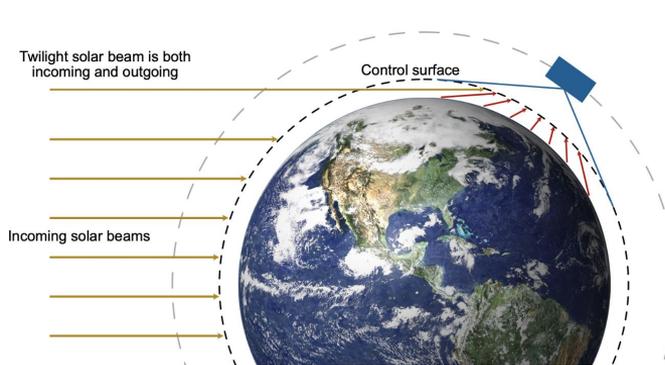
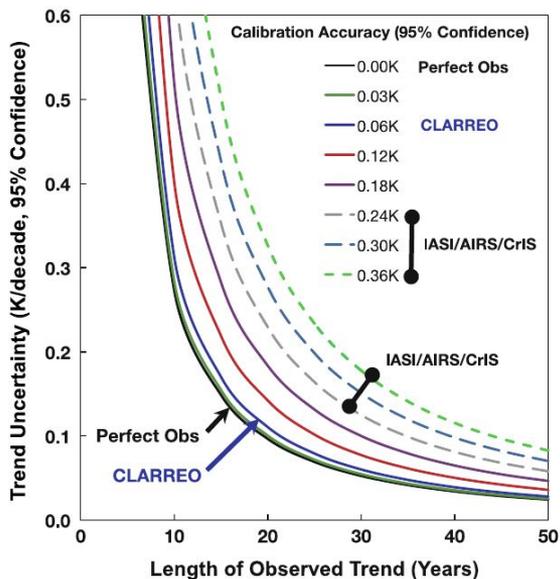
Température et bilan radiatif globaux observés (Meyssignac et al., 2023) et simulés (IPCC-AR6) pour un scénario d'atténuation forte (SSP1-2.6).

Quelles mesures continueront dans le futur? LIBERA?

Défis à venir – Exploiter les observations satellite

Futures missions

- IASI-NG (2025), IRS (2025), FORUM (2027) → Flux hyperspectraux LW
- PREFIRE (lancé 2024), AOS/TICFIRE (2031) → Flux spectraux LW
- TRUTHS (similaire CLARREO référence radiométrique en orbite, 2030), ECO (EE12 candidate)



Conclusions

- Le bilan radiatif est un élément clé du climat (et des modèles de climat)
- Observer ce bilan sans discontinuité, y compris spectralement résolu, représente un enjeu de taille dans le contexte actuel
- Apport des observations hyperspectrales pour estimer les rétroactions climatiques (faibles signaux plus facilement détectables)
- Les codes radiatifs implémentés dans les modèles de climat sont souvent en retard sur l'état de l'art. Les incertitudes liées au traitement sous-maille des nuages sont très grandes
- Importance de questionner les besoins pour adapter la performance et la précision des codes
- Apport de l'IA pour accélérer les codes
- Emergence des codes 3D couplés aux codes atmosphériques (besoin de références pour estimer le besoin)