

L'observation des nuages par télédétection passive : du nuage homogène vers le nuage tridimensionnel ?

+

Couverture nuageuse, précipitations et villes

4 décembre 2025

Céline Cornet - Nicolas Ferlay

Laboratoire d'Optique Atmosphérique/Université de Lille

avec plusieurs étudiant.e.s et collègues qui sont indiqué.e.s dans les publications citées.

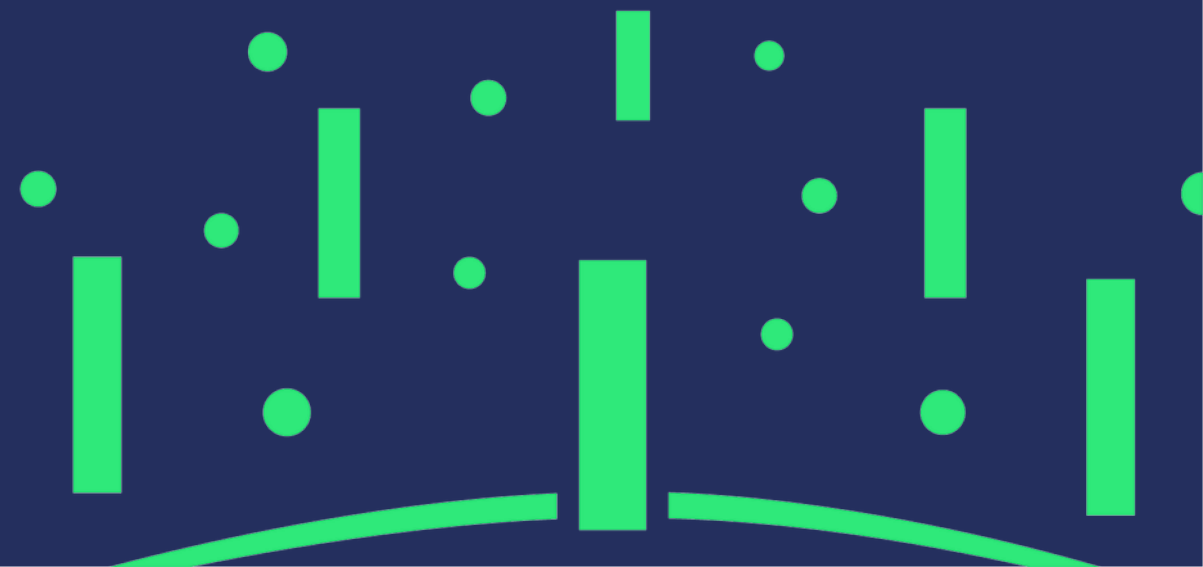


LOA
LABORATOIRE D'OPTIQUE
ATMOSPHÉRIQUE

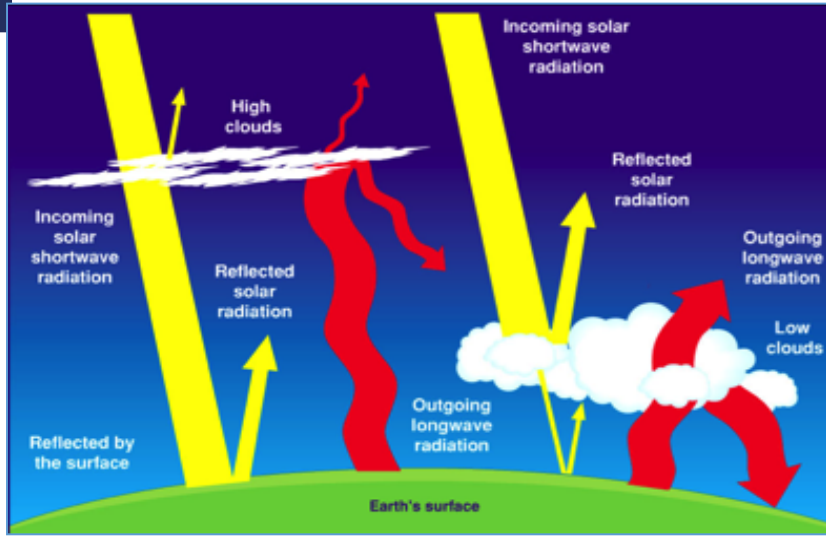
 **Université
de Lille**



Introduction - Contexte

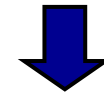


L'effet radiatif des nuages dans le système climatique



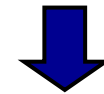
Paramètres clés d'origine anthropique :

- 1- Augmentation de la température globale (GES)
- 2- Variation de la quantité d'aérosols



Rétroactions nuageuses sur le bilan radiatif :

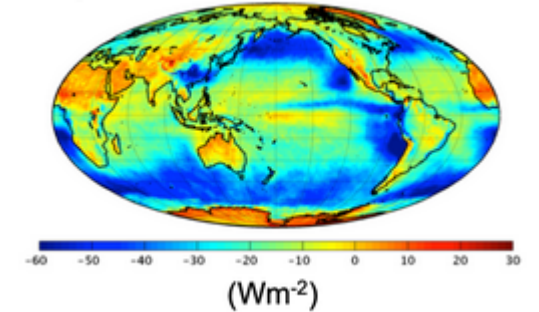
- 1- Rétroaction vraisemblablement > 0
- 2- Entre 1750 et 2010, forçage radiatif semble < 0



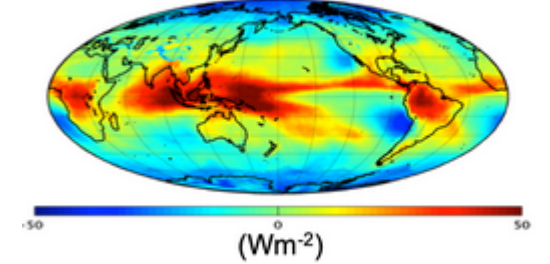
Incertitudes importantes (GIEC, 2021)

Evolution de la couverture nuageuse et de ses caractéristiques

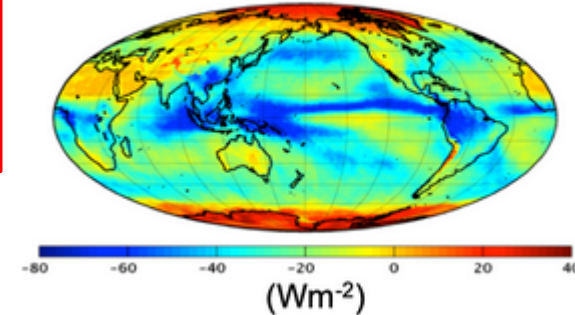
Top-of-Atmosphere Net CRE



Within-Atmosphere Net CRE



Surface Net CRE



Nuages bas = effet parasol = effet radiatif négatif



Nuages haut = effet de serre = effet radiatif positif

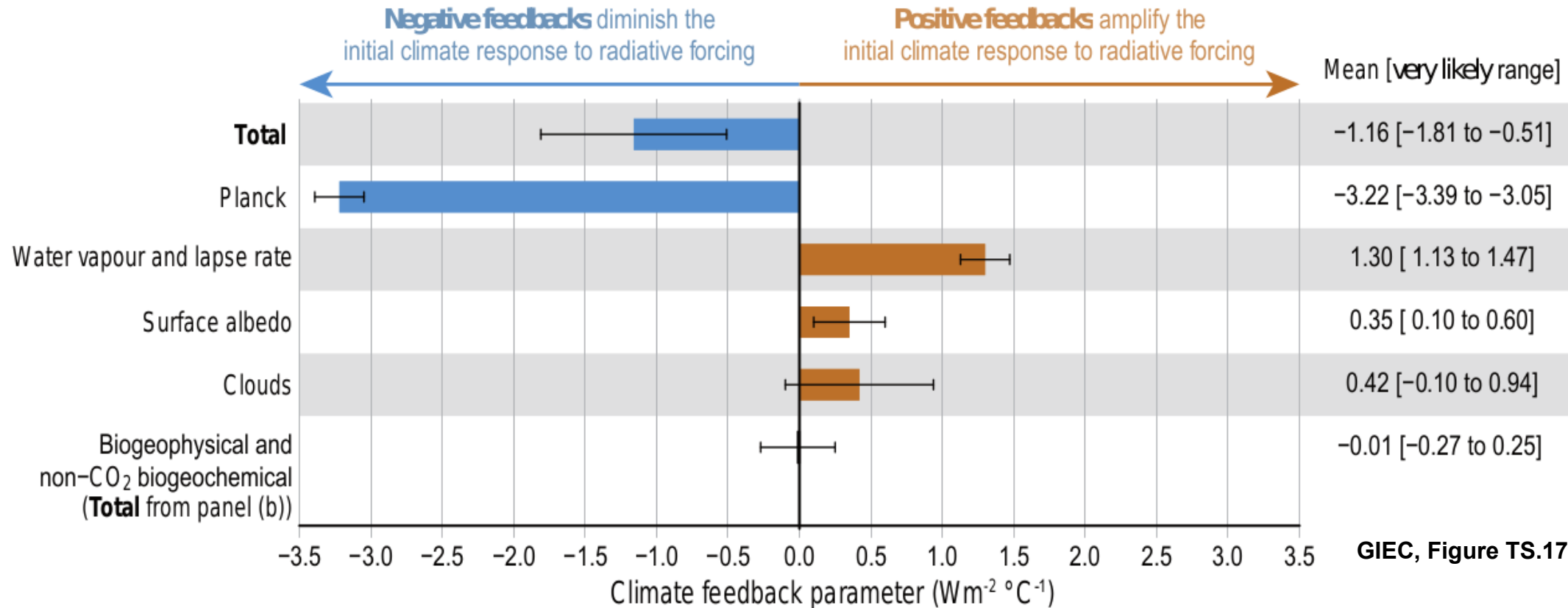
Globalement, les nuages ont un effet radiatif négatif $\approx -18W/m^2$

(CERES Loeb et al. , 2018)

Le bilan radiatif des nuages dans le système climatique

Rétroaction climatique de de différents paramètres pour une variation de 1°C

(a) Feedbacks in the climate system



GIEC, Figure TS.17 , 2021

+ Incertitudes sur l'évolution des précipitations (Chap 8, GIEC 2021)

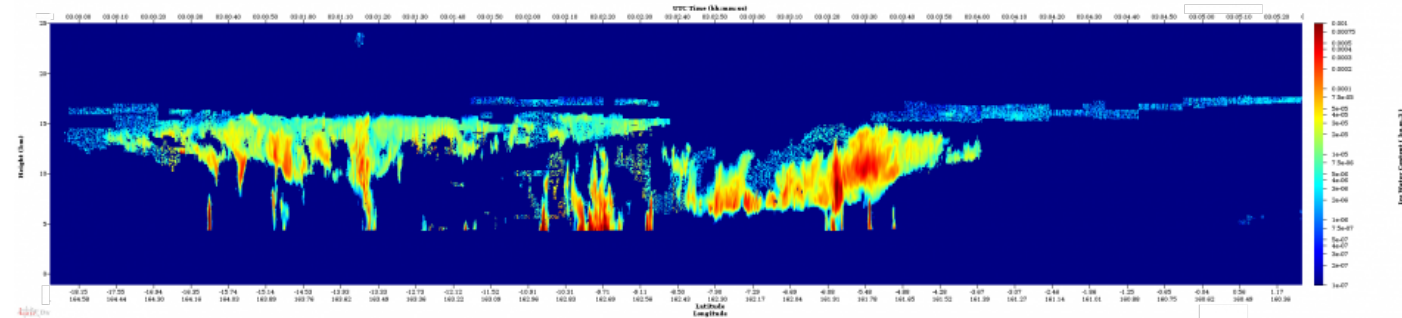


Observation des nuages par télédétection satellite

Radiomètres actifs (CALIPSO, CLOUDSAT 2005-2024 et Earthcare, depuis 2024) :

Profils verticaux : positionnement des couches d'aérosols/nuages, profils d'extinction

= > Couverture globale 2D selon vertical



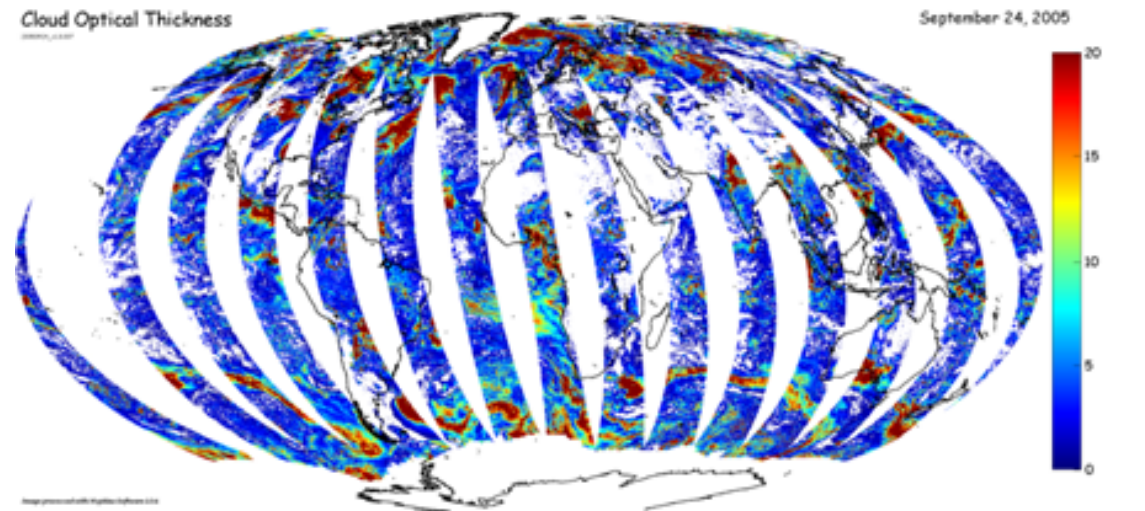
Browse of the DARDAR-CLOUD Ice Water Content retrieval – Orbit subset

<https://www.icare.univ-lille.fr/dardar/>

Radiomètres passifs polaires (MODIS, POLDER, VIIRS, 3MI/EPS-SG en 2025 ...) et géostationnaires (1 obs toutes les 15 min) :

- Observation à différentes longueurs d'onde (UV -> IR selon les satellites)
- Couverture nuageuse, phase des nuages
- Quantités intégrées ou au sommet des nuages: Épaisseur optique (COT), contenu en eau, rayon effectif, ..
- Quantités radiatives : flux radiatifs montants

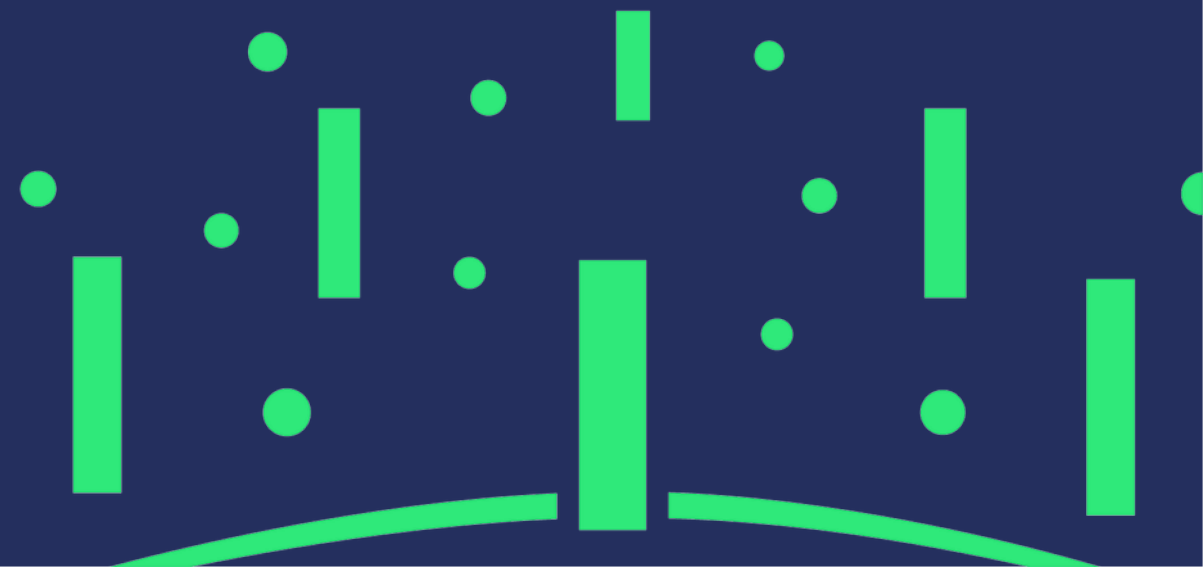
=> Couverture globale 2D selon horizontal



POLDER3 Cloud optical Thickness:

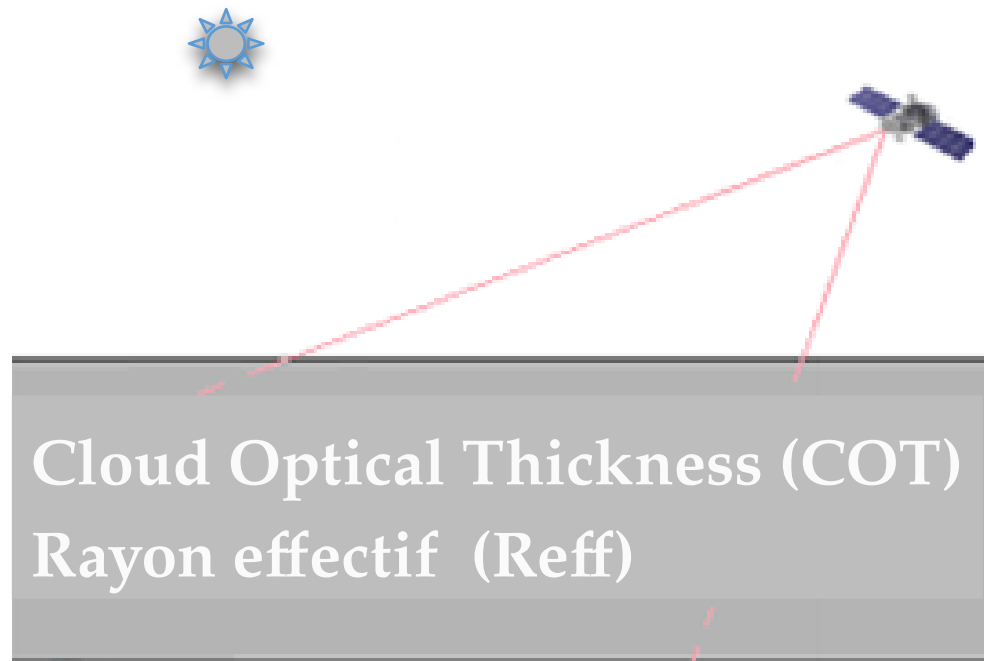
<https://www.icare.univ-lille.fr/parasol/products/scientific-illustration/>

Téledétection passive : le modèle de nuage plan-parallèle homogène et ses limites

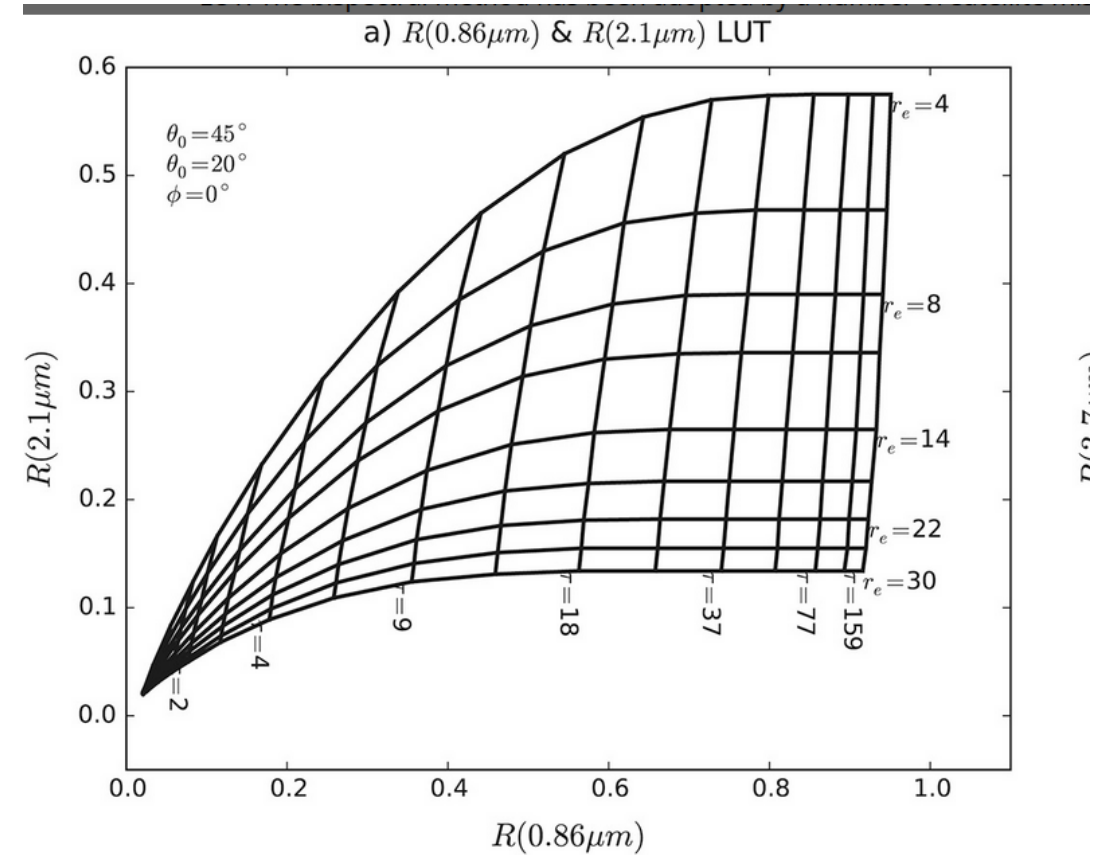


Téledétection passive des nuages : le modèle plan-parallèle homogène

Restitution de paramètres nuageux par télédétection:
Hypothèse du nuage homogène, plan-parallèle et infini



Méthode bi-spectrale, utilisation de 2 luminances : une à longueur d'onde visible et une à une longueur d'onde proche infrarouge



Nakajima et King 1990



Téledétection passive des nuages : le modèle plan-parallèle homogène



Oblique image looking eastward toward the sunlight of dawn was taken by an External High Definition Camera (EHDC) on the International Space Station

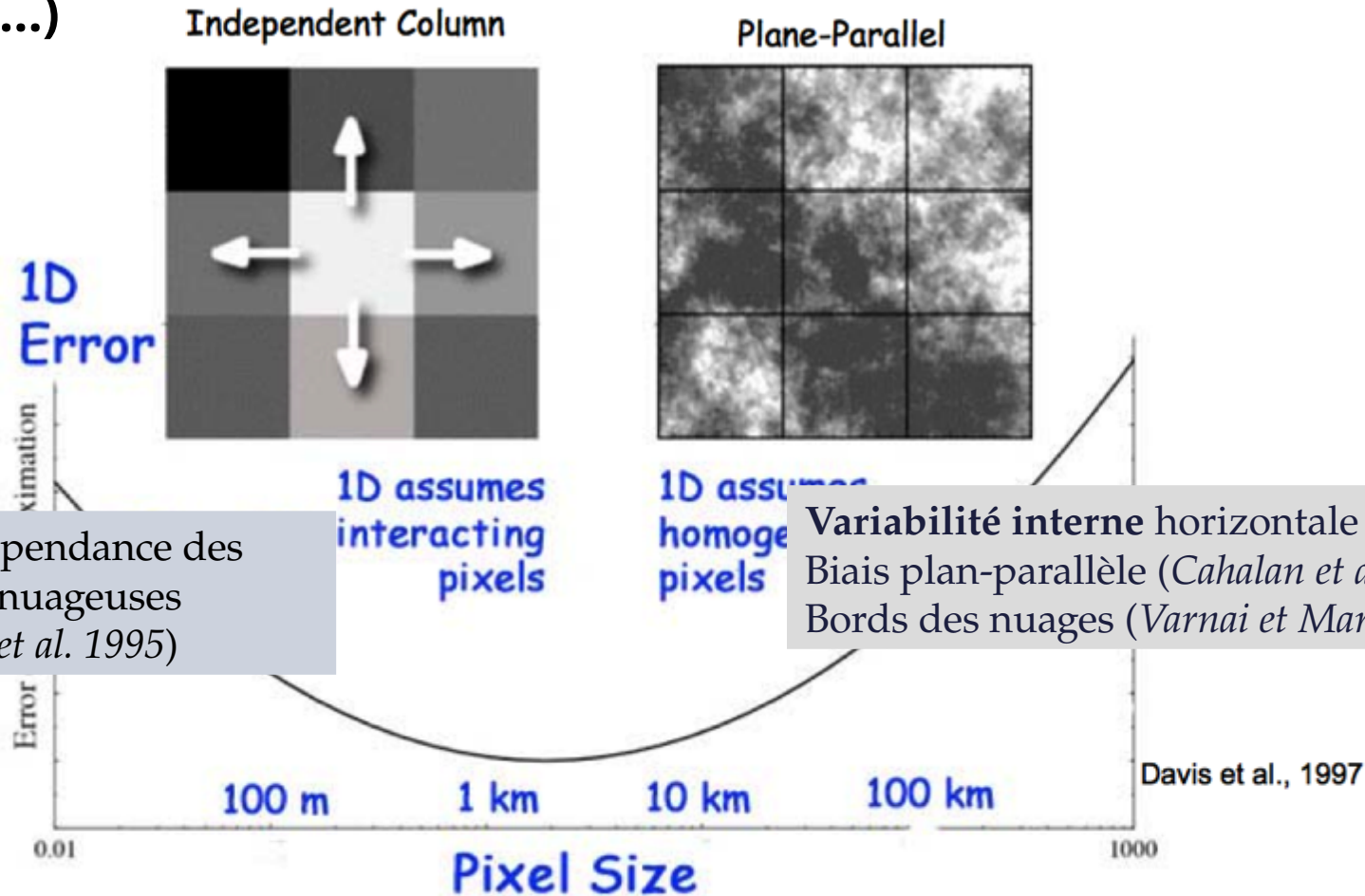
<https://earthobservatory.nasa.gov/images/149490/cloudscape-at-dawn-northwest-atlantic>

Hypothèse du nuage homogène, plan-parallèle et infini , valide ?



Effet des hétérogénéités et structures nuageuses

Erreurs dépendantes de la taille du pixel d'observation (Davis et al., 1997; Zinner et Mayer, 2006,...)



Non-indépendance des colonnes nuageuses (Marshak et al. 1995)

Variabilité interne horizontale et verticale
Biais plan-parallèle (Cahalan et al. 1994)
Bords des nuages (Varnai et Marshak, 2007)

Schéma emprunté dans une présentation de Warren Wiscombe

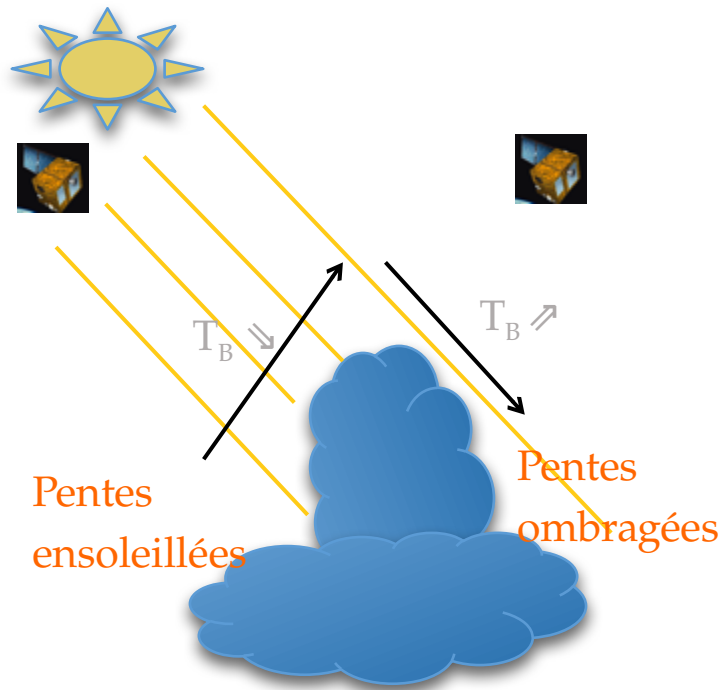
+ Effets de surbrillance et d'ombrage (Loeb et Davies, 1996, 1997, 1998; Varnai et Davies, 1999)



Effet des hétérogénéités et structures nuageuses

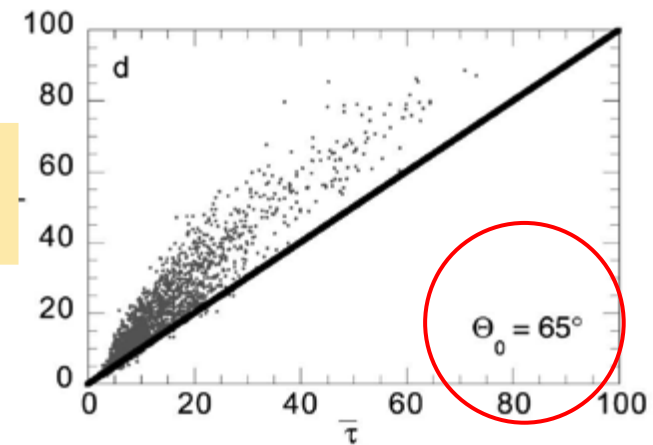
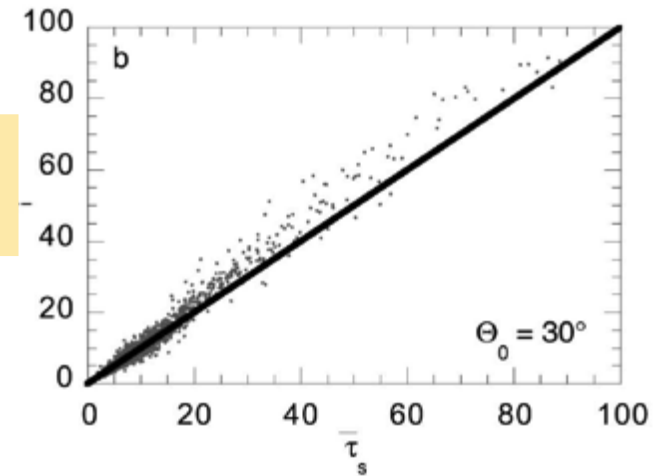
A partir de MODIS ($\Delta x = 1\text{km}$): Varnai et Marshak, 2002

Détection des pentes nuageuses ensoleillées ou ombragées
grâce aux températures de brillance IR



COT
ensoleillées

COT
ensoleillées



COT ombragées

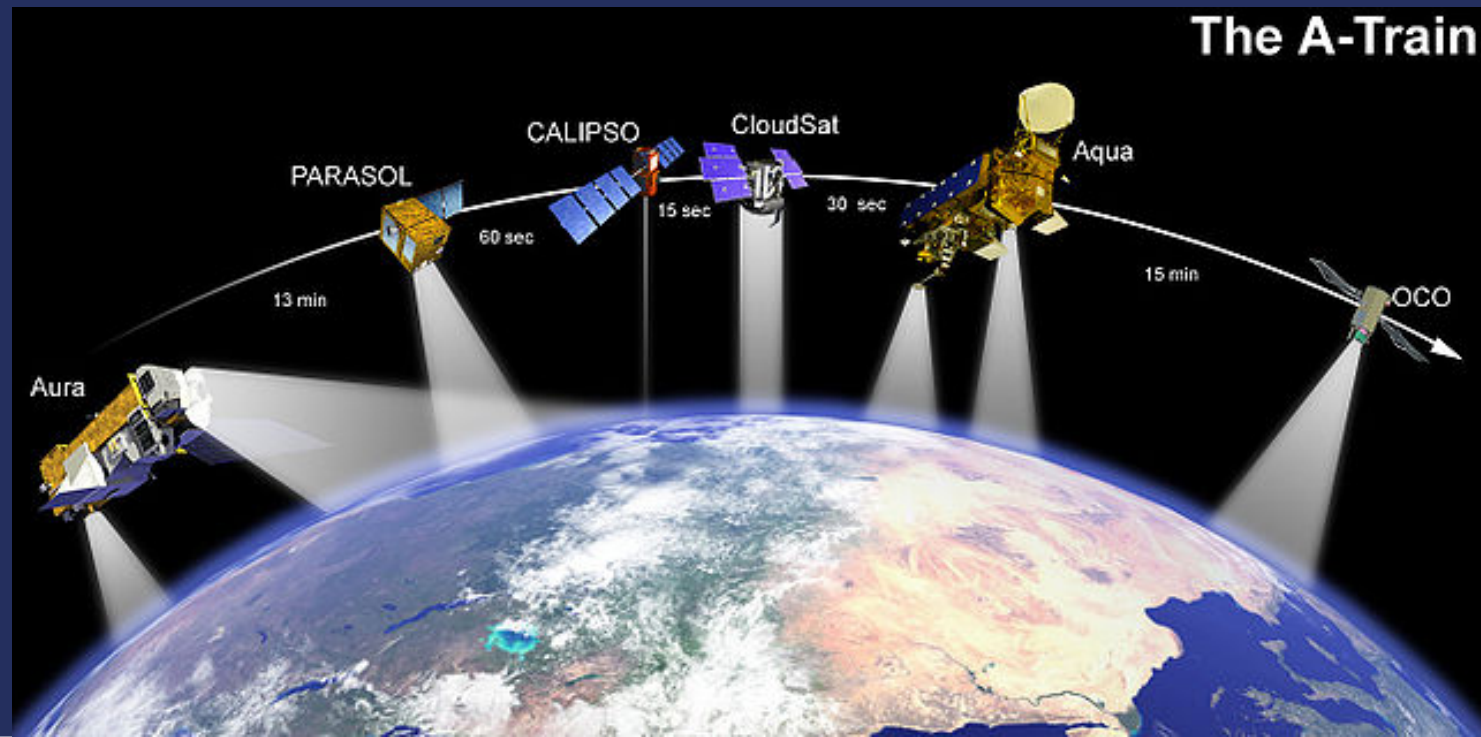
Note : Effets similaires existent pour le rayon effectif



Évaluation des erreurs liées au modèle du nuage plan-parallèle homogène : application à POLDER/PARASOL (6-7km)

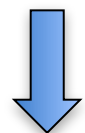
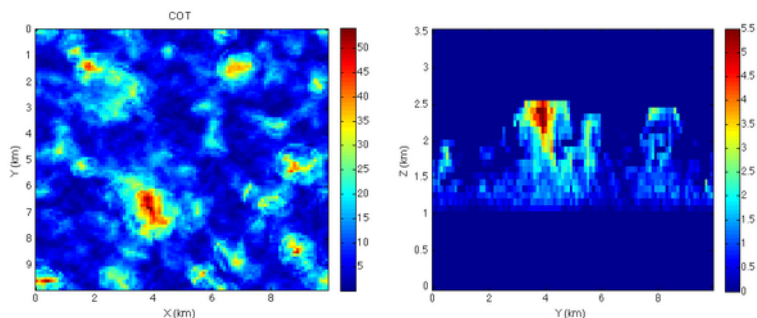
POLDER/PARASOL (CNES):

- en orbite de 2004 à 2013
- 9 canaux entre 443 et 1020 nm
- Polarisé
- Multiangulaire
- Résolution spatiale : 6x7 km



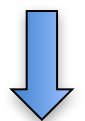
Évaluation de l'erreur due à l'hypothèse du nuage homogène plan-parallèle

Génération d'un champ nuageux (100m)
3DCLOUD - *Szczap et al., 2014*
or LES model (Meso-NH ; RAMS)



Moyenne champ nuageux + 1DRT

R1D : Luminance 1D à la résolution de l'instrument (6x7km ou 1x1km)

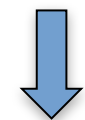
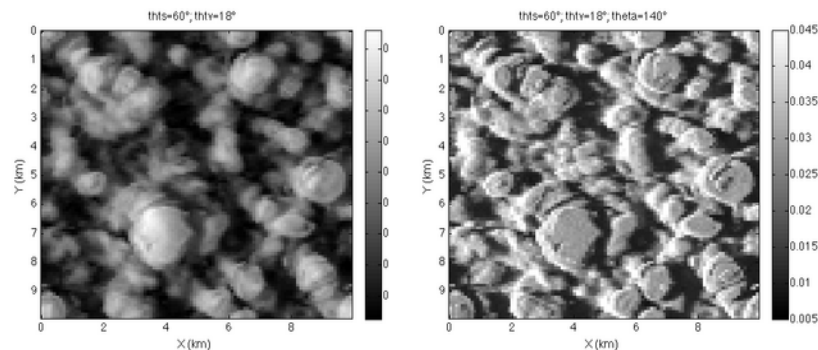


Propriétés nuageuses 1D :
COT, Reff, Veff,
Albedo

3D RT



Simulation des luminances
3DMPCOL - *Cornet et al., 2010*



Moyenne le champ de luminances

R3D : Luminance 1D à la résolution de l'instrument (6x7km ou 1x1km)



Propriétés nuageuses 3D : COT,
Reff, Veff,
Albedo

1) Comparaisons des luminances 3D et 1D

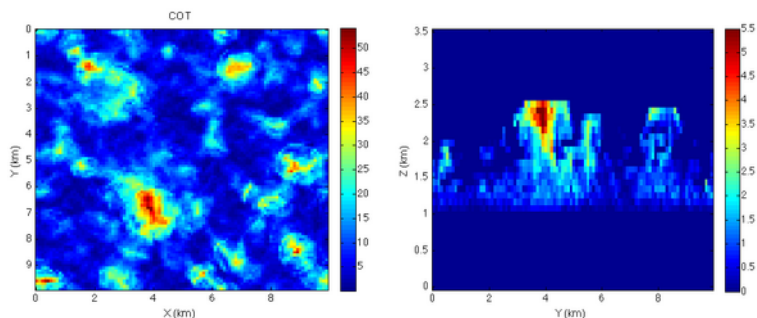
Application de l'algorithme opérationnel

2) Comparaisons des paramètres restitués



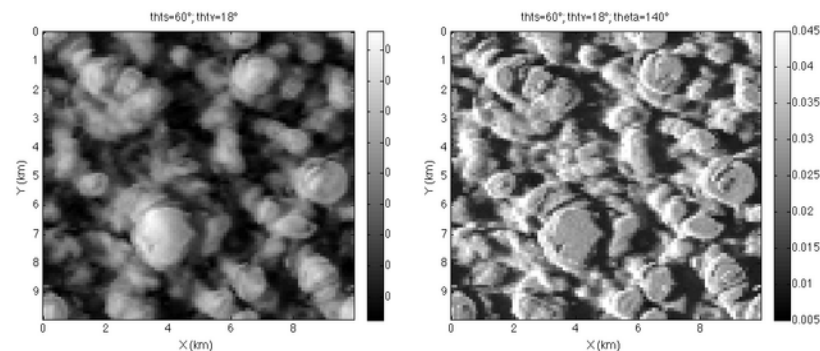
Évaluation de l'erreur due à l'hypothèse du nuage homogène plan-parallèle

Génération d'un champ nuageux (100m)
3DCLOUD - *Szczap et al., 2014*
or LES model (RAMS)



3D RT

Simulation des luminances
3DMPCOL - *Cornet et al., 2010*



Moyenne champ nuageux + 1DRT

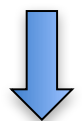


Moyenne le champ de luminances

R1D : Luminance 1D à la résolution de l'instrument
(6x7km ou 1x1km)

1) Comparaisons des luminances 3D et 1D

R3D: Luminance 1D à la résolution de l'instrument
(6x7km ou 1x1km)



Propriétés nuageuses 1D :
COT, Reff, Veff,
Albedo

Application de l'algorithme opérationnel

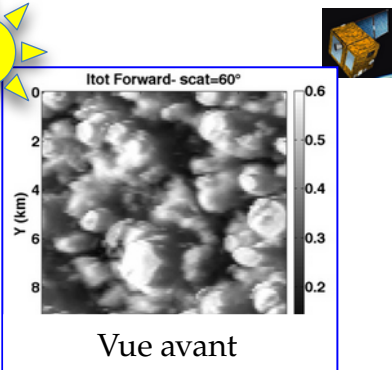
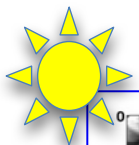
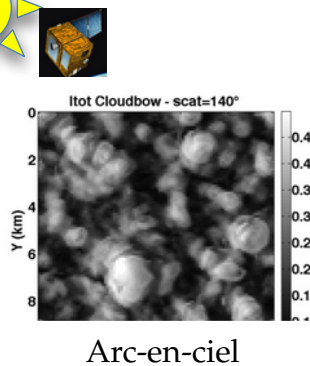
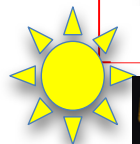
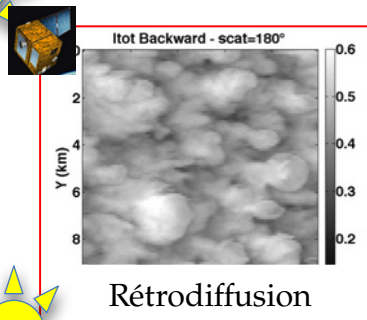
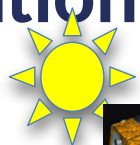
2) Comparaisons des paramètres restitués



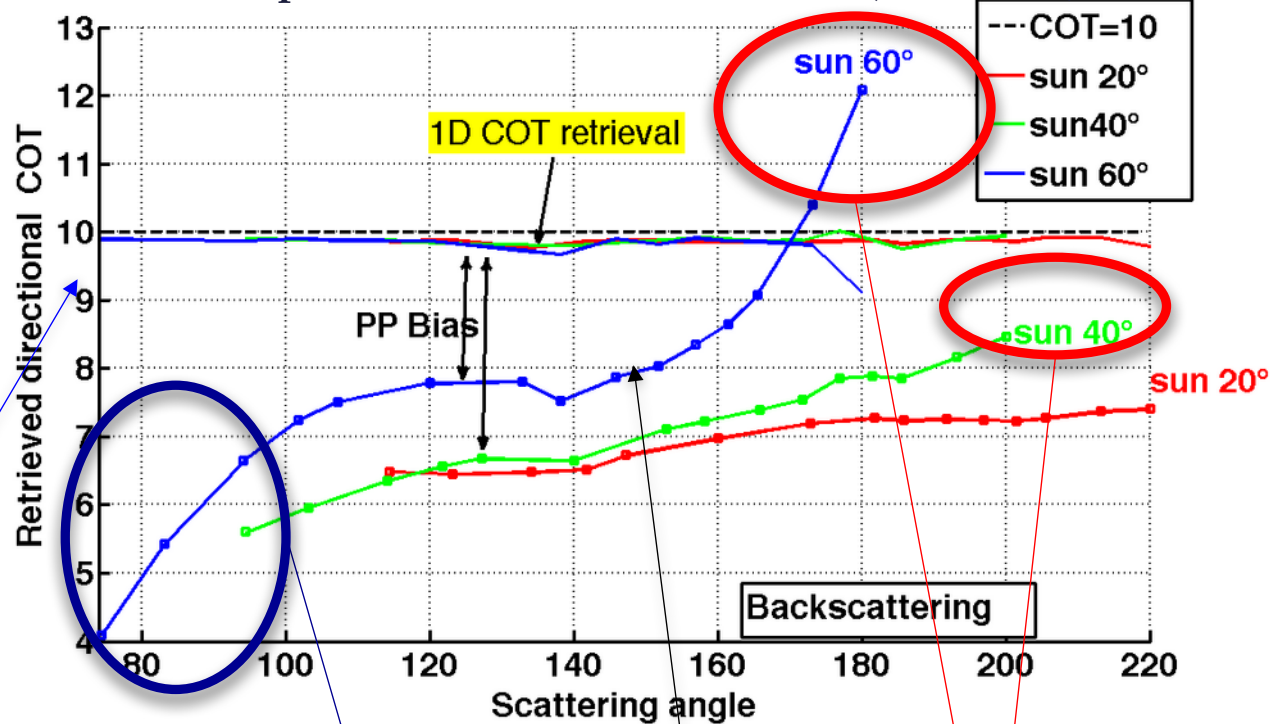
Propriétés nuageuses 3D (6x7km) :
COT,
Reff, Veff,
Albedo



Évaluation de l'erreur due à l'hypothèse du nuage homogène plan-parallèle



COT= Cloud Optical Thickness from POLDER (6kmx7km)



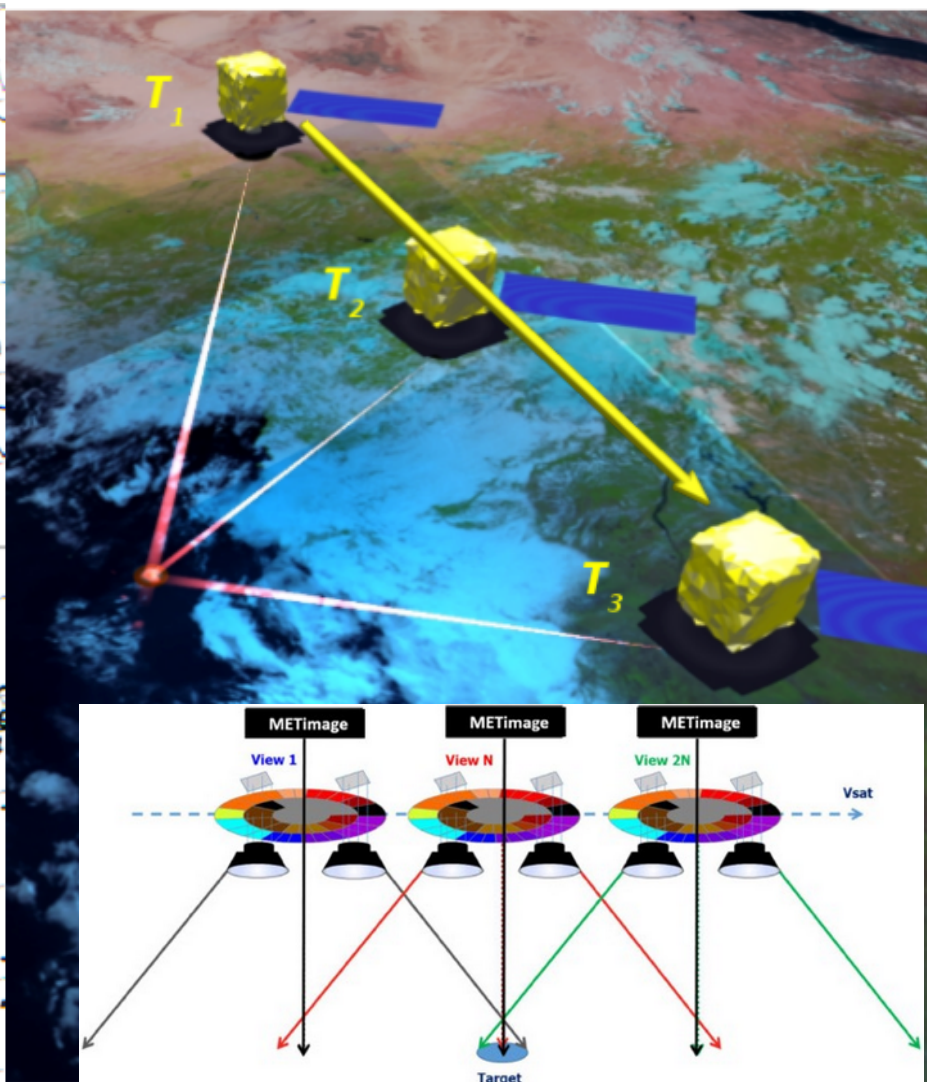
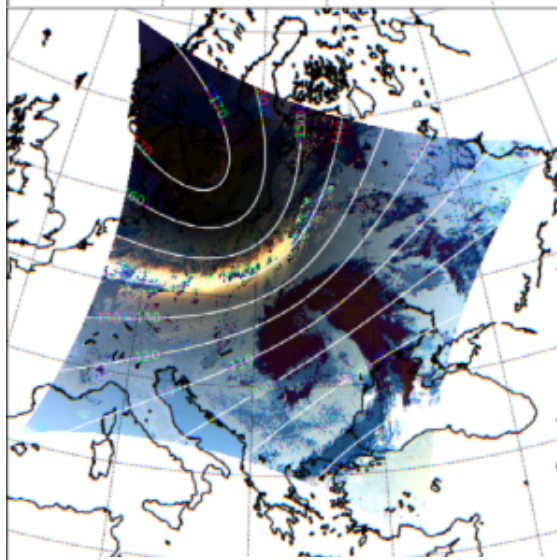
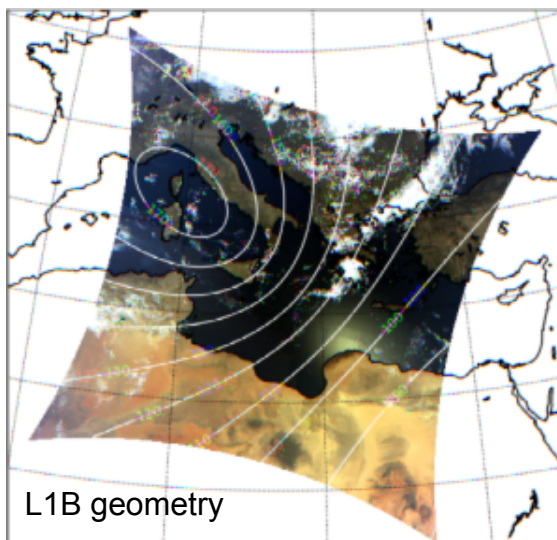
Plan-Parallel Bias
 $\Rightarrow COT_{3D} < COT_{1D}$

Shadowing
 $COT_{3D} \ll COT_{1D}$

Illumination
 $COT_{3D} \geq COT_{1D}$



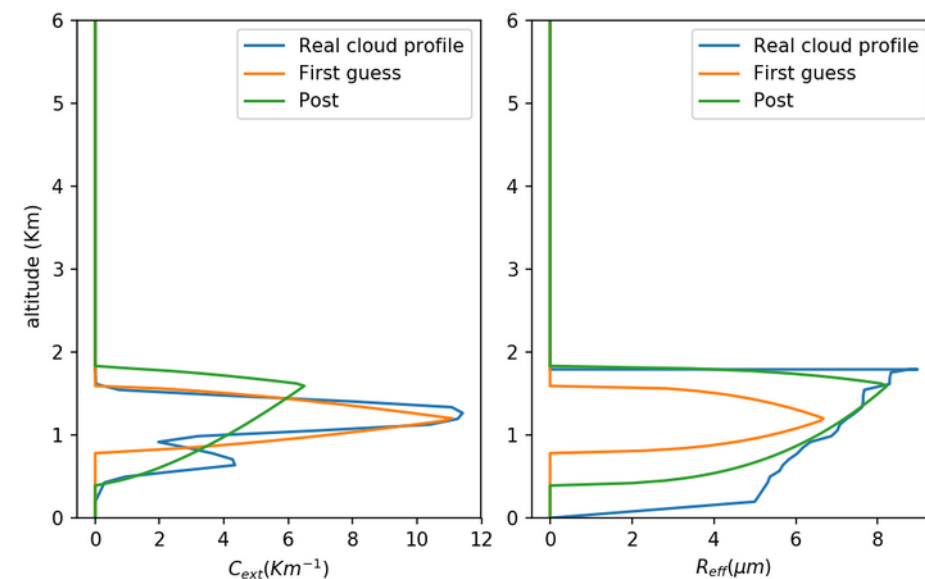
3MI/EPS-SG (Multi-spectral, Multi-directional, Multi-polarization)



Mis en orbite le 13 août 2025

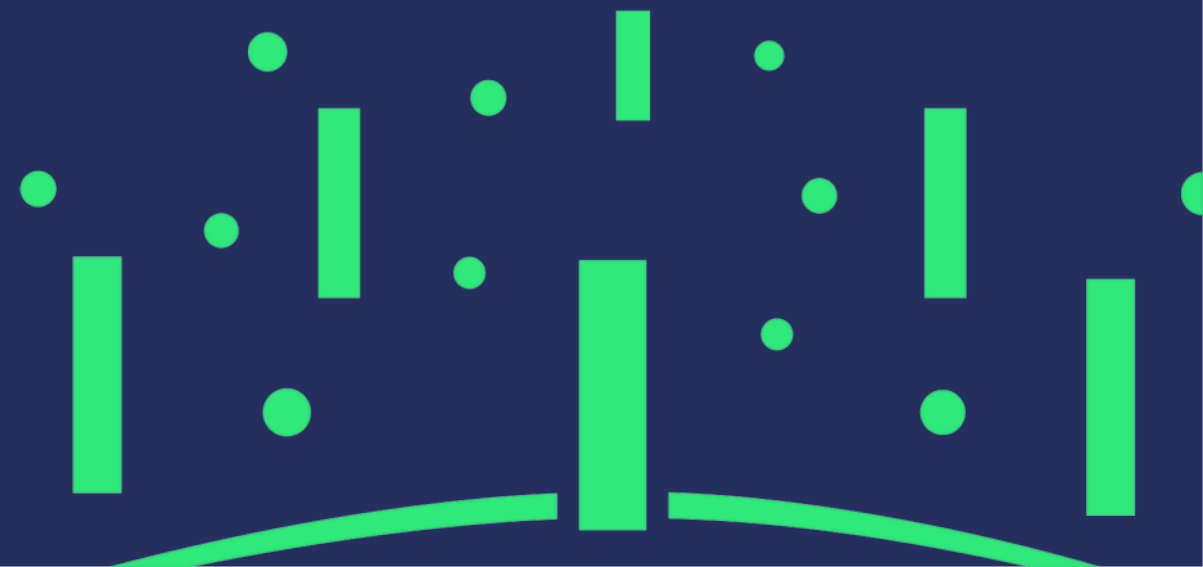
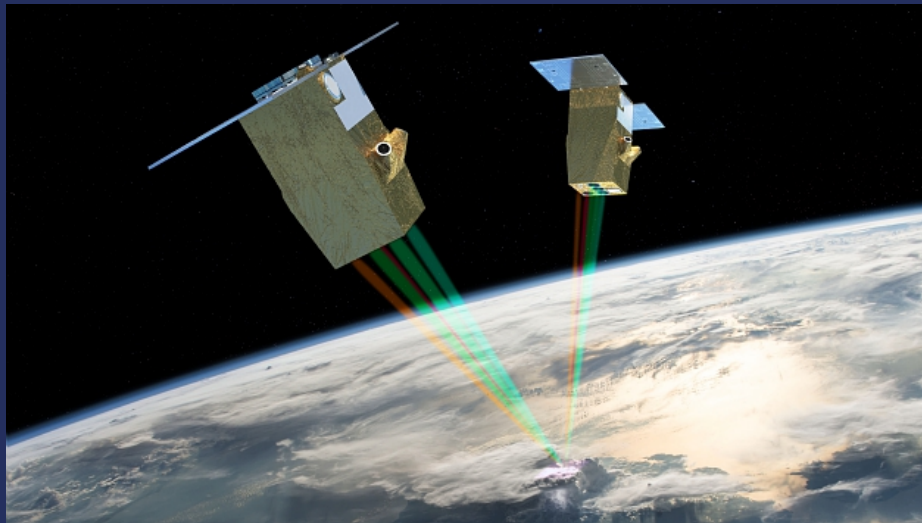
<https://www.eumetsat.int/metop-sg>

- **Lot of information => ex : possibility to retrieve cloud vertical profile** (Thèse G. Merlin , 2016) – Day 2 algorithm



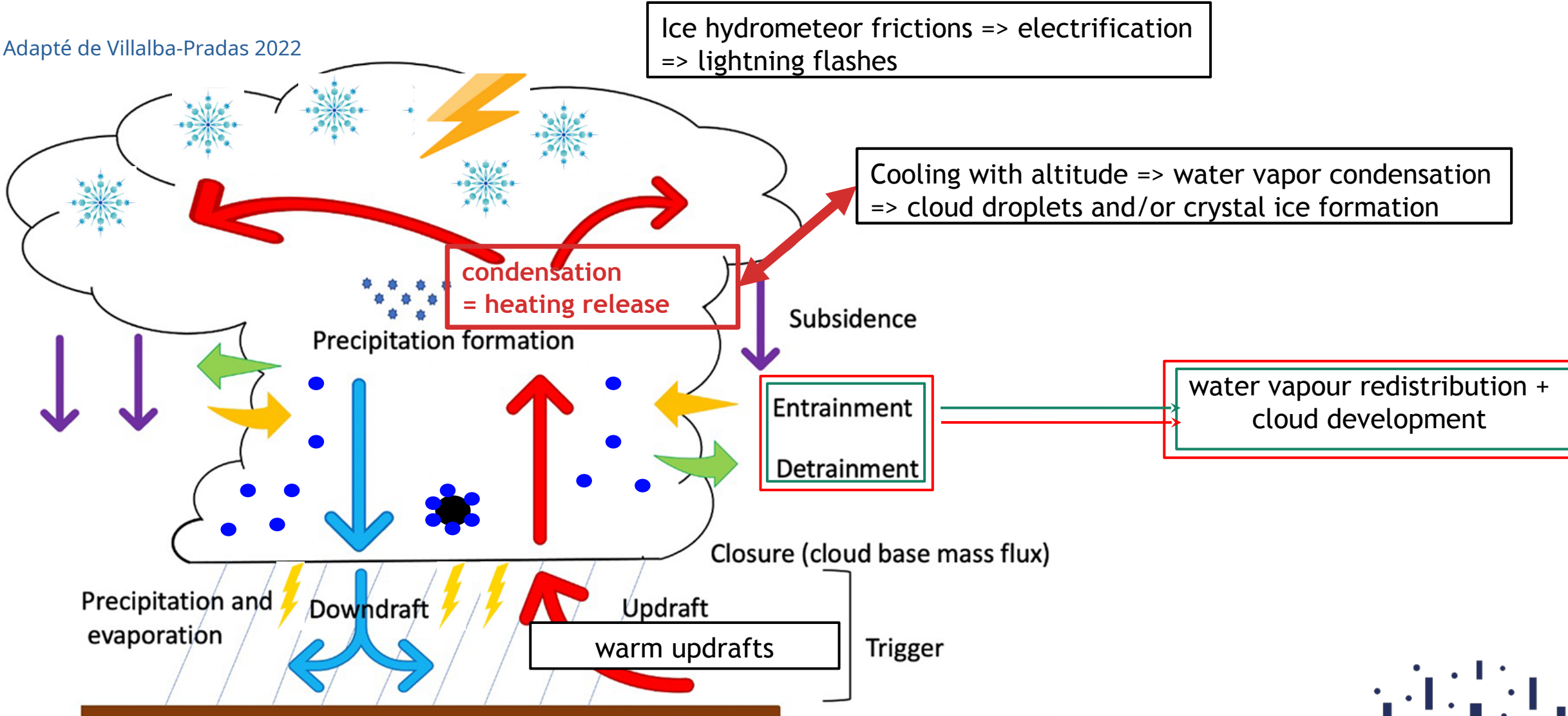
La mission C³IEL : Cluster for Cloud Climate and Lightning

L'observation à haute résolution spatiale et temporelle des nuages convectifs par satellite



Les nuages convectifs, des systèmes complexes

Adapté de Villalba-Pradas 2022



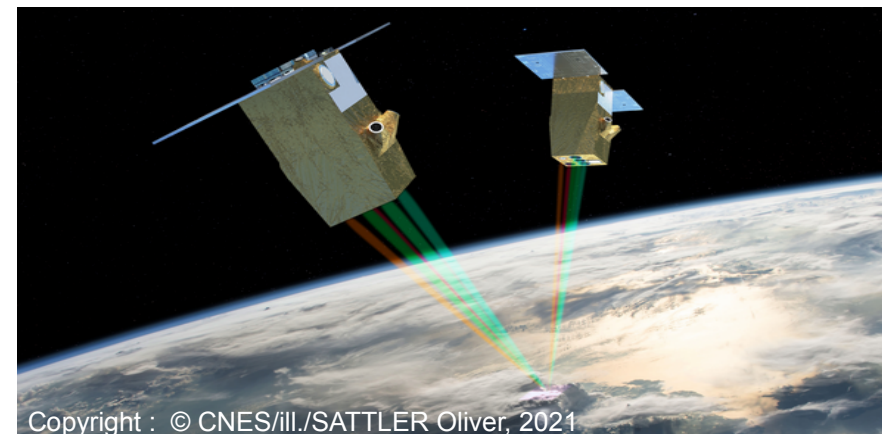
C³IEL : Principe et stratégie d'observation



Lancement prévu en 2028 !

https://videotheque.cnes.fr//index.php?urlaction=doc&id_doc=37977&rang=1

2 satellites identiques avec :



Copyright : © CNES/ILL./SATTler Oliver, 2021

Instrument	Variable documentée	Principe de restitution	Caractéristiques de l'instrument	
CLOUD	Dynamique de l'enveloppe nuageuse	Imagerie et stéréoscopie	Imageur visible centré à 670 nm <ul style="list-style-type: none"> • Résolution au nadir = 17 m / acquisition d'une image toutes les 20 secondes pendant 200 secondes • Champ de vue = 80 km x 45 km • 3 à 4 séquences de 200 secondes par orbite de jour 	
VW	Contenu intégré en vapeur d'eau au-dessus et autour des nuages	Imagerie et tomographie	Imageurs SWIR centrés à 1,04, 1,13 et 1,37 μm <ul style="list-style-type: none"> • Résolution au nadir = 125 m / acquisition d'une image toutes les 20 secondes pendant 200 secondes • Champ de vue = 80 km x 64 km • 3 à 4 séquences de 200 secondes par orbite de jour 	
LOIP	Activité électrique spatiale et temporelle	Imagerie et stéréoscopie Photométrie	Imageur visible à 777,4 nm <ul style="list-style-type: none"> • Résolution au nadir = 140 m / acquisition continue d'une image toutes les 15 ms pendant 200 secondes • Champ de vue 360 km x 302 km 	Enregistrement continu durant 200 secondes 3 ou 4 séquences de 200 secondes par orbite de jour
			Photomètre à 777,4 et 337 nm <ul style="list-style-type: none"> • Echantillonnage à une résolution temporelle de 50 μs pendant 200 secondes • Champ de vue = diamètre de ~300 km 	Enregistrement continu durant 20 minutes par orbite de nuit

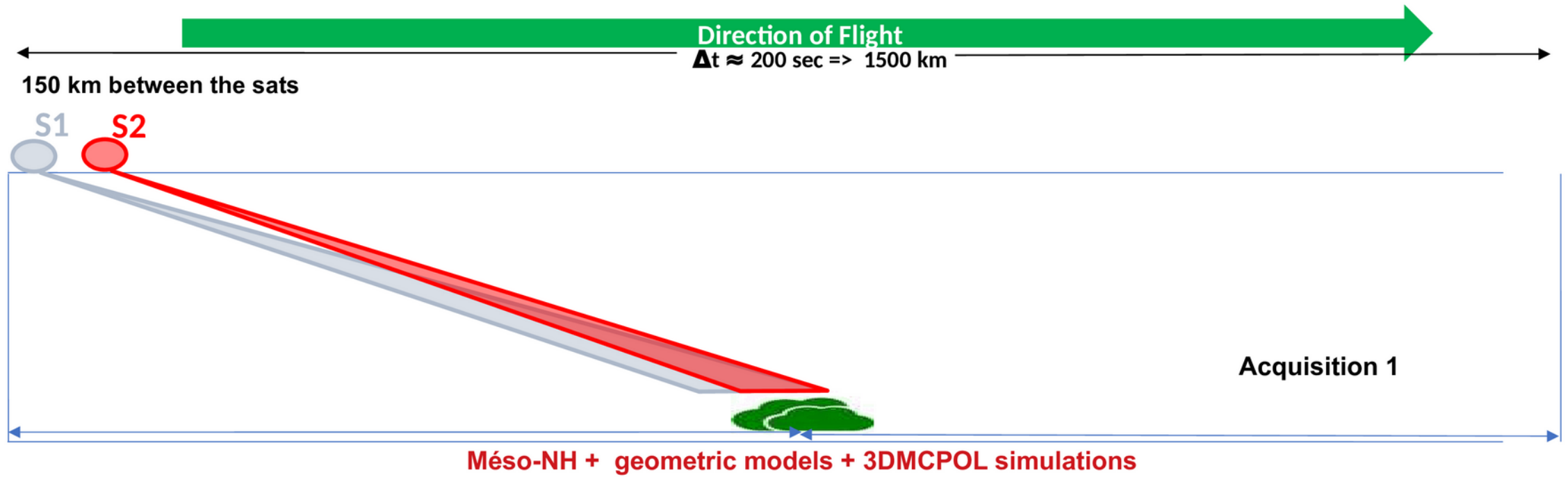
Orbite de jour : 3 à 4 séquences de 11 acquisitions de 2 scènes (images) nuageuses

Orbite de nuit (LOIP) : mesure en continu pendant 1200s (20 min)

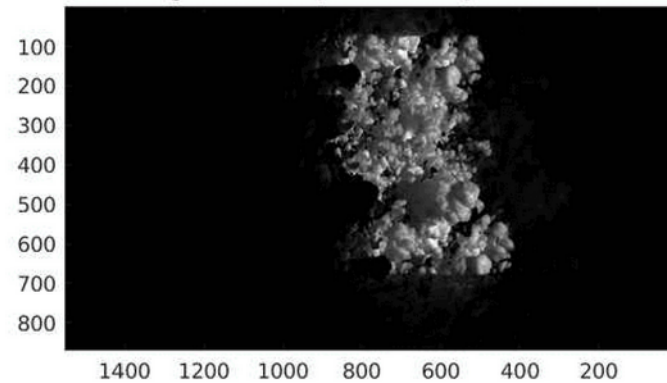
Orbite héliosynchrone avec heure passage à l'équateur entre 12h et 14h



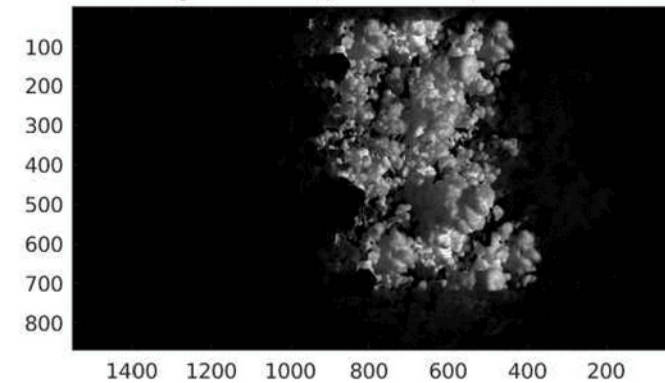
C³IEL : Simulation d'observations réalistes



$\theta_s = 13.6^\circ; \theta_v = 59.1^\circ; \phi_v = -96.5^\circ$



$\theta_s = 13.6^\circ; \theta_v = 53.6^\circ; \phi_v = -96.5^\circ$



CLOUD/C³IEL : Enveloppe 3D par stéréo-restitution et vitesse de développement des nuages

Méthode :

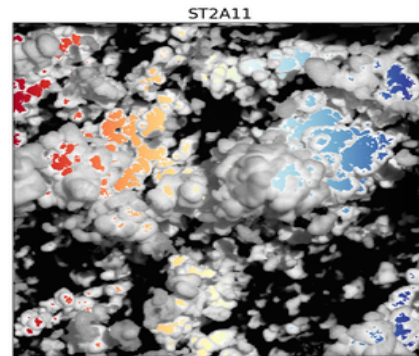
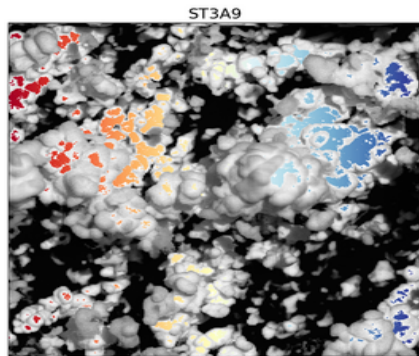
(Step 1) Recherche des points homologues sur 2 images successives séparées de 20s

(Step 2) Interpolation des coordonnées des points homologues à partir des enveloppes

(Step 3) Calcul des vecteurs vitesses

Step 1

A5 → A6

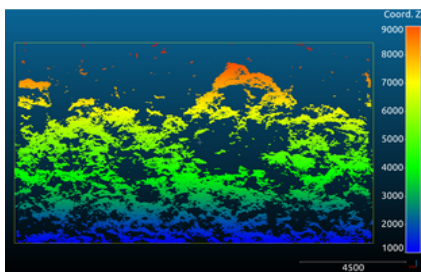


i_5, j_5

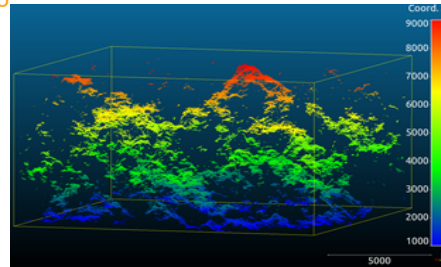
i_6, j_6

Step 2

A5



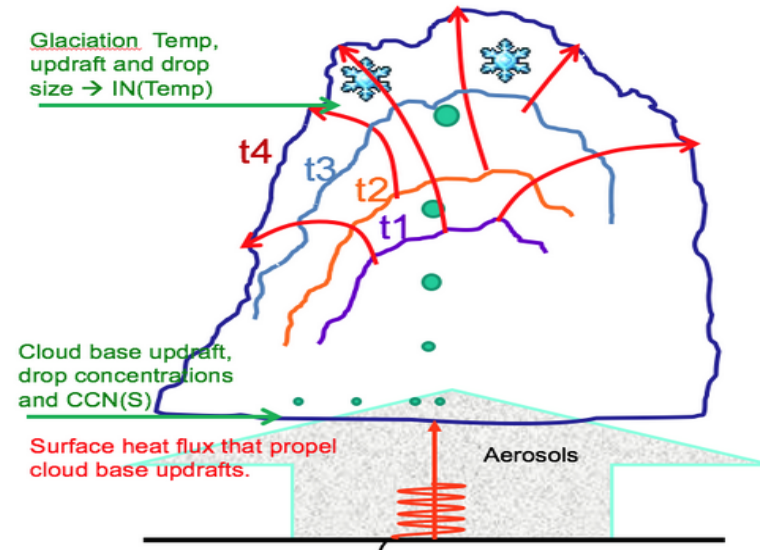
A6



x_5, y_5, z_5

x_6, y_6, z_6

Step 3



enveloppes obtenues à partir de 2 images simultanées par stéréorestitution



Pour conclure, la télédétection passive des nuages dans un futur plus ou moins proche...

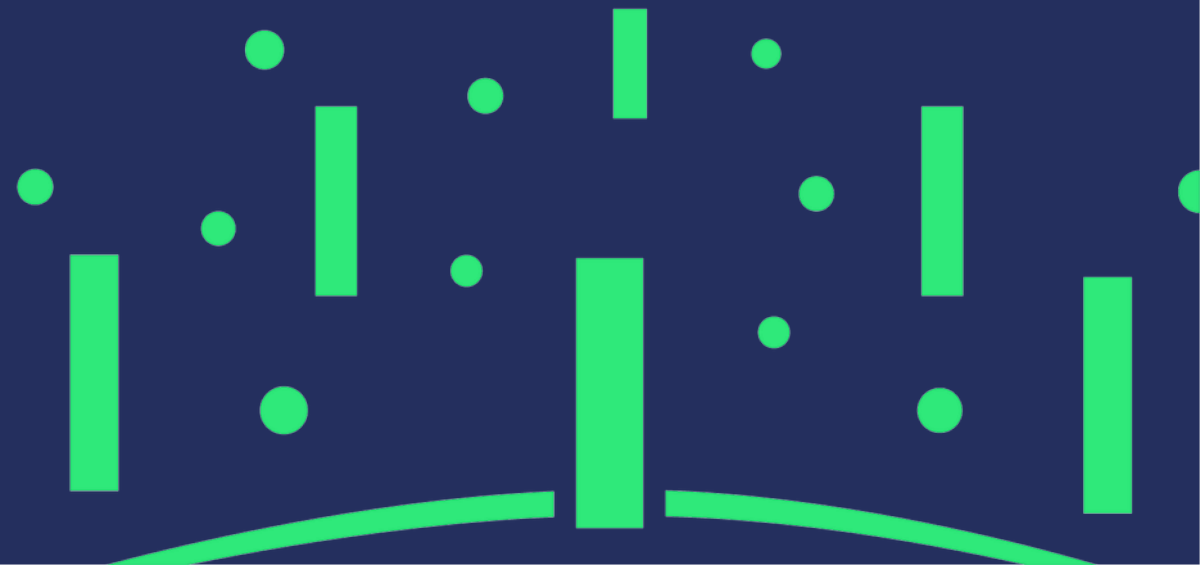
- **Nouvelles missions spatiales pour l'observation des nuages : EPS-SG (3MI, Met-Image, IASI-NG...) en 2025, INCUS en 2026-2027, C³IEL en 2028, C²OMODO/AOS en 2030,...**
- **Développement de nouveaux algorithmes d'inversion des observations :**
 - Vers la restitution de profils verticaux en utilisant les informations multispectrales, polarisées et multiangulaires des capteurs (ex. 3MI)
 - Haute résolution spatiale et observations simultanées = prise en compte de la structure des nuages....vers la restitution "3D" des propriétés nuageuses ?
 - Intervalle de temps entre 2 observations => dynamique des processus nuageux (C³IEL, C²OMODO, INCUS)



Les couvertures nuageuses en milieu urbain

- Effet des nuages sur l'urbain
- Effet de l'urbain sur la convection et les nuages

.... dans un contexte de changement climatique



Les couvertures nuageuses en milieu urbain

- Effet des nuages sur l'urbain
- Effet de l'urbain sur la convection et les nuages

Cities are becoming one of the most vulnerable environments under climate change

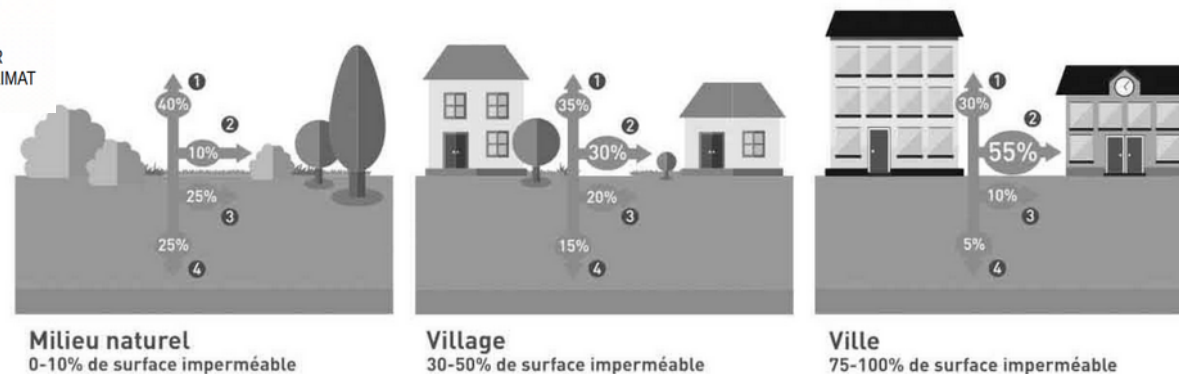
Sessions at conferences:

- Urban Climate session EGU25 CL2.3: "Urban climate: observations, modelling, science tools and climate action for cities". Conveners related to FPS: Gaby Langendijk, Rafiq Hamdi
More info: [Session CL2.3](#)
- International Conference on Urban Climate 12 (ICUC12), 7-11 July 2025,
PM6 session: "Mesoscale modelling and climate change – Interactions between urban and regional climate processes"
Conveners: Peter Hoffmann, Gaby Langendijk, Tomas Halenka, Mathew Lipson, Quang-Van Doan. More info: [Session PM6](#)



Beaucoup d'intérêt pour les précipitations ruissellement important/ risque d'inondation : *les villes sont de véritables déserts*

CLÉMENT
GAILLARD
URBANISTE & DESIGNER
CONCEPTION PAR LE CLIMAT



Légende : 1. Evaporation ; 2. Ruissellement ; 3 Eau utile ; 4 Eau infiltrée vers les nappes

• illustration : dans le futur à Paris :

VILLE DE PARIS. ACTUALISATION DU DIAGNOSTIC DE VULNERABILITÉ DE PARIS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET À LA RARÉFACTION DES RESSOURCES. CAHIER 2 : LES ÉVOLUTIONS CLIMATIQUES À PARIS

plutôt plus de précipitations

Figure 35 : Evolution passée et projections futures du cumul pluviométrique annuel (en mm/an) pour Paris

1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
551 mm	640 mm	635 mm	633mm (667-674)	679mm (658;678)	721mm (645-742)

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

plutôt légèrement moins de jours de pluie

Figure 36 : Evolution passée et projections futures du ombre de jours de pluie (cumul de précipitations ≥ 1 mm) (j/an) pour Paris

1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
104j	111j	109j	105j (108j;110j)	108j (108j;108j)	105j (106j;105j)

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

donc des précipitations plutôt plus intenses



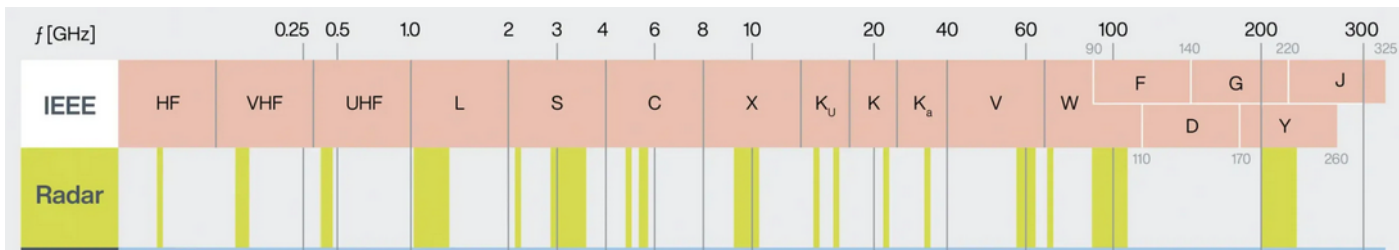
→ effet de l'urbain sur la convection et les nuages

- Projet international de modélisation en cours CORDEX FPS URB_RCC
Améliorer l'impact des villes sur la variabilité climatique locale dans les modèles à haute résolution



challenges : observation, modélisation, méthodes

- IPSL : recherche au LATMOS, observatoire SIRTA :
disdromètres; radar : X (mobile) doppler, K, W, C



objectifs :

distribution en taille des hydrométéores
contenu en eau/glace
vitesse de chute
structures horizontale et verticale
à fine résolution spatiotemporelle



→ effet de l'urbain sur la convection et les nuages

• illustration : Thèse Arnaud Forster, CNRM, 2024 :


Impact des surfaces urbanisées sur la convection en région parisienne : observations et simulations numériques hectométriques

Observation : climatologie des orages (réflectivité radar + éclair)

Modélisation : sensibilité des précipitations à l'urbanisation avec mesoNH

Capacité des villes à modifier la convection et les précipitations :

« Durant les situations propices, un renforcement de ces phénomènes peut être constaté au-dessus et en aval de la zone urbanisée, en fonction du vent dominant. »

• illustration : Thèse Morgane Lalonde, 2024 :   *Urban effects on the hydroclimate: observation and model-based analyses*

offrir des perspectives complémentaires, et répondre aux questions suivantes : Les zones urbaines modifient-elles les précipitations régionales ? Comment les zones urbaines influencent-elles les processus hydrologiques de surface et les flux d'énergie de surface ? Comment ces systèmes couplés atmosphériques et hydrologiques façonnent-ils l'hydroclimat urbain ?



→ effet de l'urbain sur la convection et les nuages

- exemple de publication sur : Urban precipitation anomalies

PNAS

RESEARCH ARTICLE

EARTH, ATMOSPHERIC, AND PLANETARY SCIENCES
SUSTAINABILITY SCIENCE

OPEN ACCESS



Global scale assessment of urban precipitation anomalies

Xinxin Sui^a, Zong-Liang Yang^b, Marshall Shepherd^c, and Dev Niyogi^{a,b,1}

Edited by Karen Seto, Yale University, New Haven, CT; received July 24, 2023; accepted June 7, 2024

cities worldwide. We find that more than 60% of the global cities and their downwind regions are receiving more precipitation than the surrounding rural areas. Moreover, the magnitude of these urban wet islands has nearly doubled in the past 20 y. Urban

RESEARCH ARTICLE | ATMOSPHERIC SCIENCE



Diurnal urban rainfall anomalies across different landscapes

XINXIN SUI, ZONG-LIANG YANG, AND DEV NIYOGI [Authors Info & Affiliations](#)

SCIENCE ADVANCES • 13 Aug 2025 • Vol 11, Issue 33 • DOI: 10.1126/sciadv.ads5046

poorly understood. Analyzing diurnal and seasonal variations of urban precipitation anomalies across 175 US cities, we found strong urban effects on precipitation especially during summer afternoons. Large, inland cities can receive 10% more summer afternoon rainfall, and the pattern varies with urban heat islands and wind conditions. Coastal cities, under the influence of sea-land breeze, experience three times amplified daily urban precipitation enhancements than inland cities.

---> effet de l'urbain sur la convection et les nuages

- exemple de publication sur : Urban cloud cover anomalies

communications earth & environment

Article


A Nature Portfolio journal

Politecnico di Milano, Department of Civil and Environmental Engineering, Milano, Italy. ✉ e-mail: carlo.demichele@polimi.it

[Communications Earth & Environment](#) | (2025)6:849

<https://doi.org/10.1038/s43247-025-02753-9>

Urban cloud coverage anomaly indicates increasing impacts mainly in developing economies

 Check for updates

framework. Using worldwide satellite observations, here we assessed cloud coverage trends at both regional (IPCC-defined regions) and local scales, focusing on 226 megacities (> 1M inhabitants) and 146 midsize cities (0.1-1M). Our findings reveal that: 1) Irrespective of the sign of significant regional trends, the local scale analysis exhibits mainly significant increasing trends of cloud coverage anomaly. 2) Developing economies exhibit the strongest signals: 55-62% of megacities and 42-44% of midsize cities with demographic growth show significant upward trends, particularly coastal cities in tropical climates, underscoring the interaction between urbanization and background climate. 3) Seasonal analyses highlight a stratification of trends by climatological zone, with 64% of megacities exhibiting at least one significant seasonal trend compared to 47% for annual trends.



→ effet de l'urbain sur la convection et les nuages

- exemple de publication sur : Urban cloud cover anomalies

PNAS

RESEARCH ARTICLE

EARTH, ATMOSPHERIC, AND PLANETARY SCIENCES
ENVIRONMENTAL SCIENCES

 OPEN ACCESS

Urban effects on local cloud patterns

Thuy Trang Vo^a , Leiqiu Hu^{a,1} , Lulin Xue^b , Qi Li^c, and Sisi Chen^b

Edited by J. Marshall Shepherd, University of Georgia, Athens, GA; received September 30, 2022; accepted March 24, 2023

to clouds' formation and dynamics. Cloud is one of the critical components in regulating urban hydrometeorological cycles but remains less understood in urban-atmospheric systems. We analyzed satellite-derived cloud patterns spanning two decades over 447 US cities and quantified the urban-influenced cloud patterns diurnally and seasonally. The systematic assessment suggests that most cities experience enhanced daytime cloud cover in both summer and winter; nocturnal cloud enhancement prevails in summer by 5.8%, while there is modest cloud suppression in winter nights. Statistically linking the cloud patterns with city properties, geographic locations, and climate backgrounds, we found that larger city size and stronger surface heating are primarily responsible for summer local cloud enhancement diurnally. Moisture and energy background control



→ effet du changement climatique sur rayonnement et contenu de l'atmosphère

• exemple de travaux au LOA

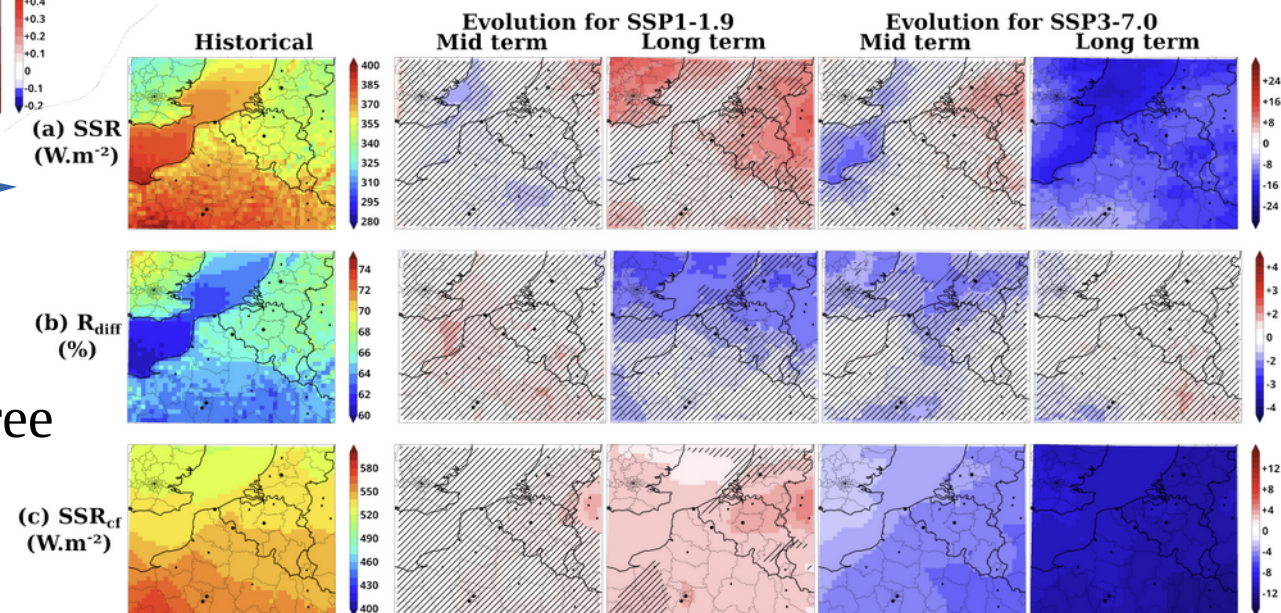
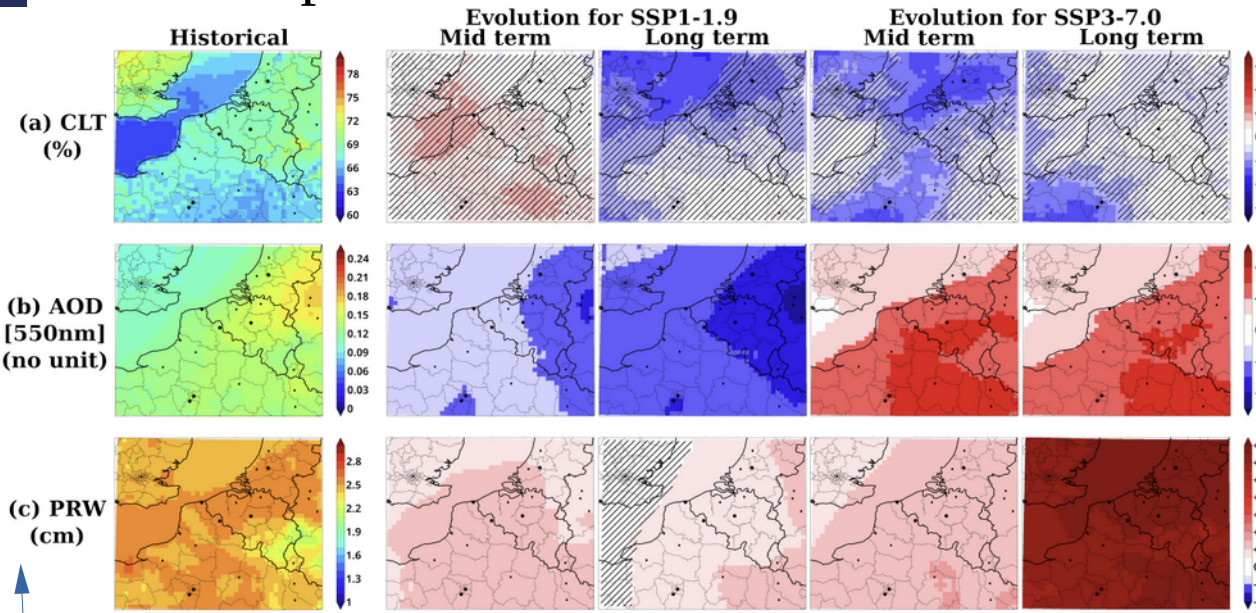
sortie du modèle climatique régional

ALADIN-CLIMAT (CNRM)

résolution : 12 km

simulation climats 2050 et 2100 (moy. de 30 ans)

cas été



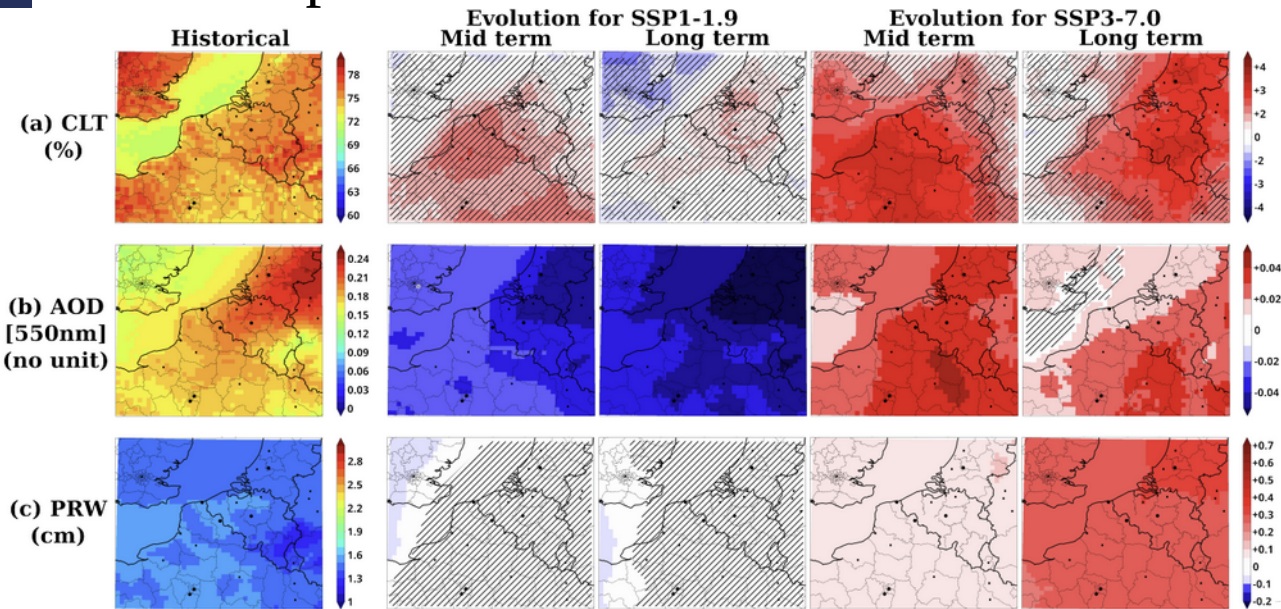
couverture nuageuse
AOD
Colonne vapeur d'eau
Chesnoiu et al (2025)

Surf. Solar Radiation
% de Diffus
Rayonnement cloud free

→ effet du changement climatique sur rayonnement et contenu de l'atmosphère

• exemple de travaux au LOA

sortie du modèle climatique régional
ALADIN-CLIMAT (CNRM)
résolution : 12 km
simulation climats 2050 et 2100 (moy. de 30 ans)
cas printemps



couverture nuageuse
AOD
Colonne vapeur d'eau
Chesnoiu et al (2025)

Surf. Solar Radiation
% de Diffus
Rayonnement cloud free

