



Les nuages et leur rôle dans le climat

Sandrine Bony

*Directrice de Recherche CNRS
Laboratoire de Météorologie Dynamique
IPSL, Sorbonne Université, Paris
Académie des Sciences*

Société Philomathique de Paris, 8 Avril 2026



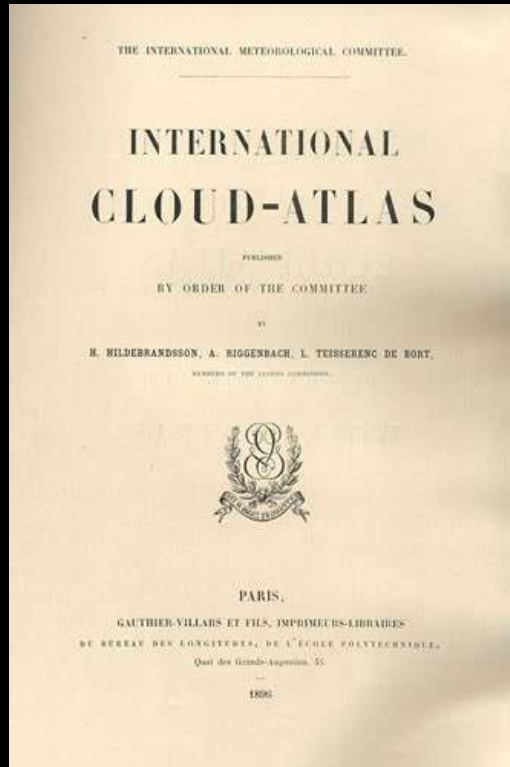
Jacob van Ruisdael (1670)

Les nuages, sources d'inspiration



Jacob van Ruisdael (1670)

Les nuages, outils de prévision



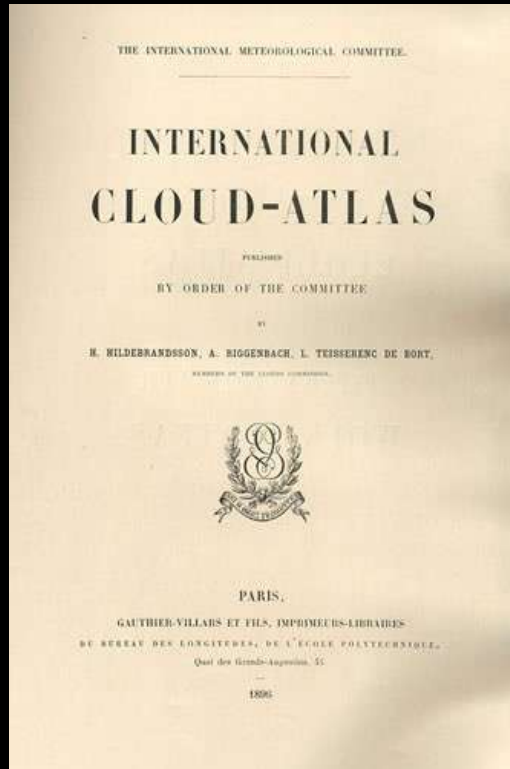
International Meteorological Committee

1896



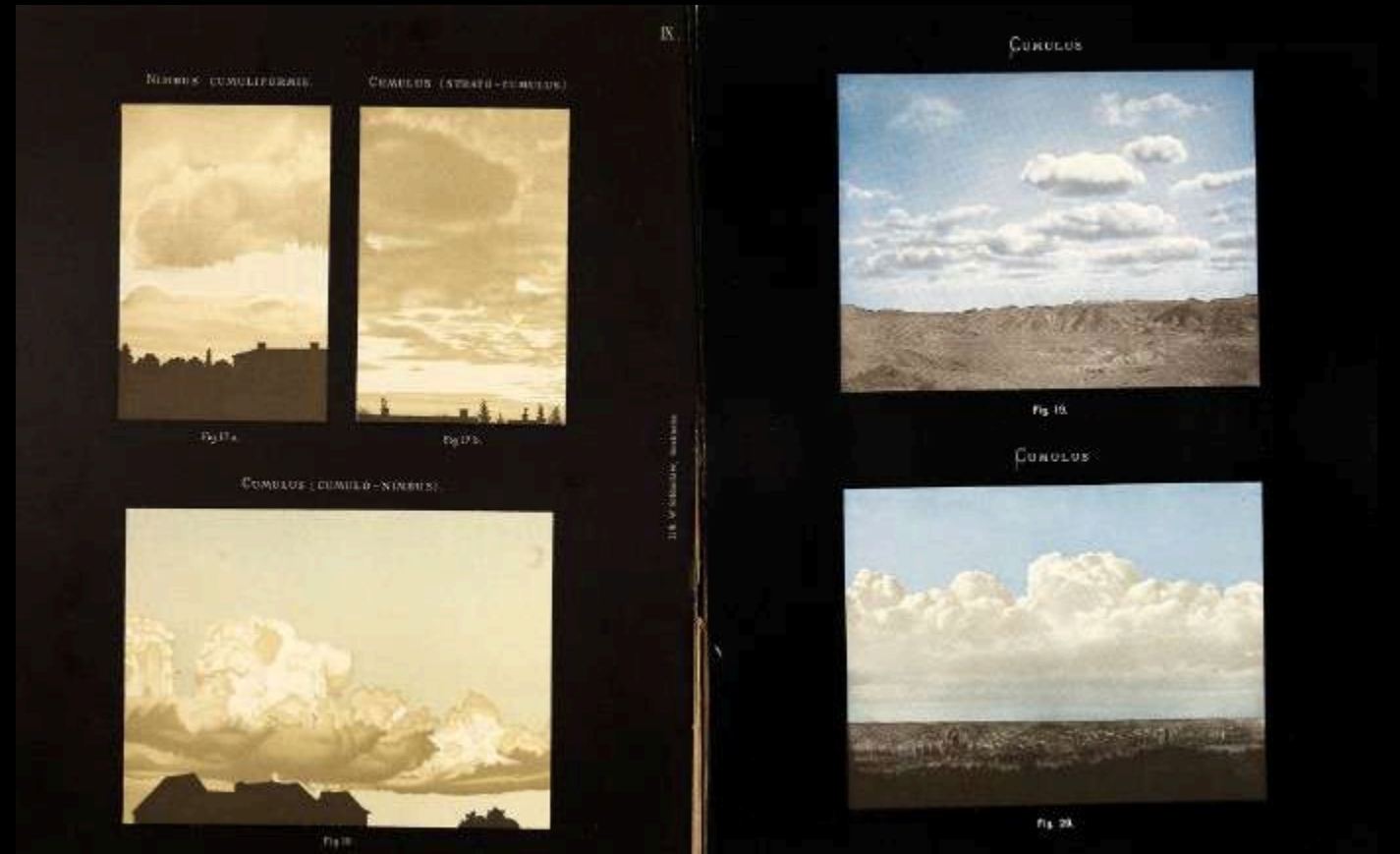
Jacob van Ruisdael (1670)

Les nuages, outils de prévision

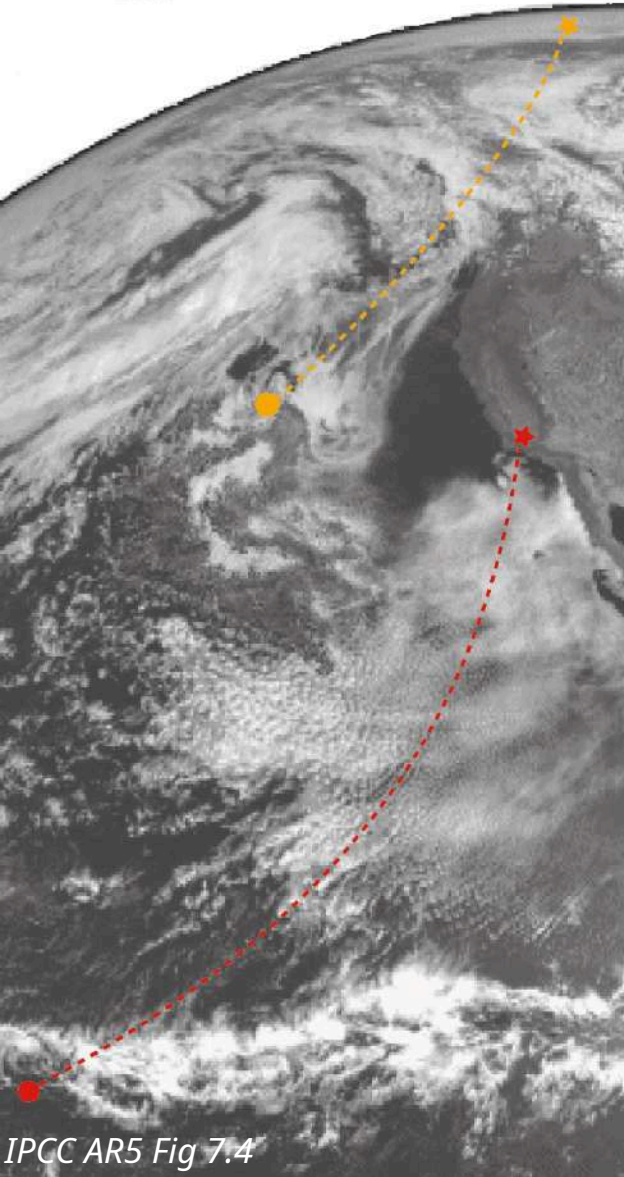


International Meteorological Committee

1896



Formation des nuages

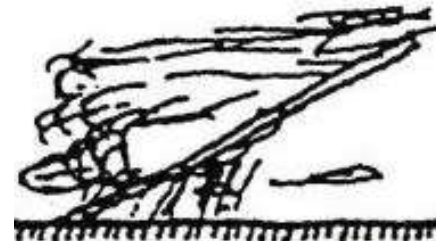


Condensation, sous forme de gouttelettes ou de cristaux de glace, de la vapeur d'eau contenue dans l'air.

Le plus souvent: lorsqu'une **masse d'air humide s'élève et se refroidit**.

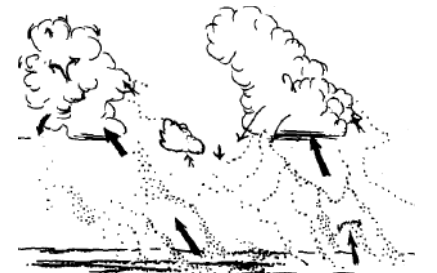


relief, ondes



fronts (moyennes latitudes)

quelques 1000 km

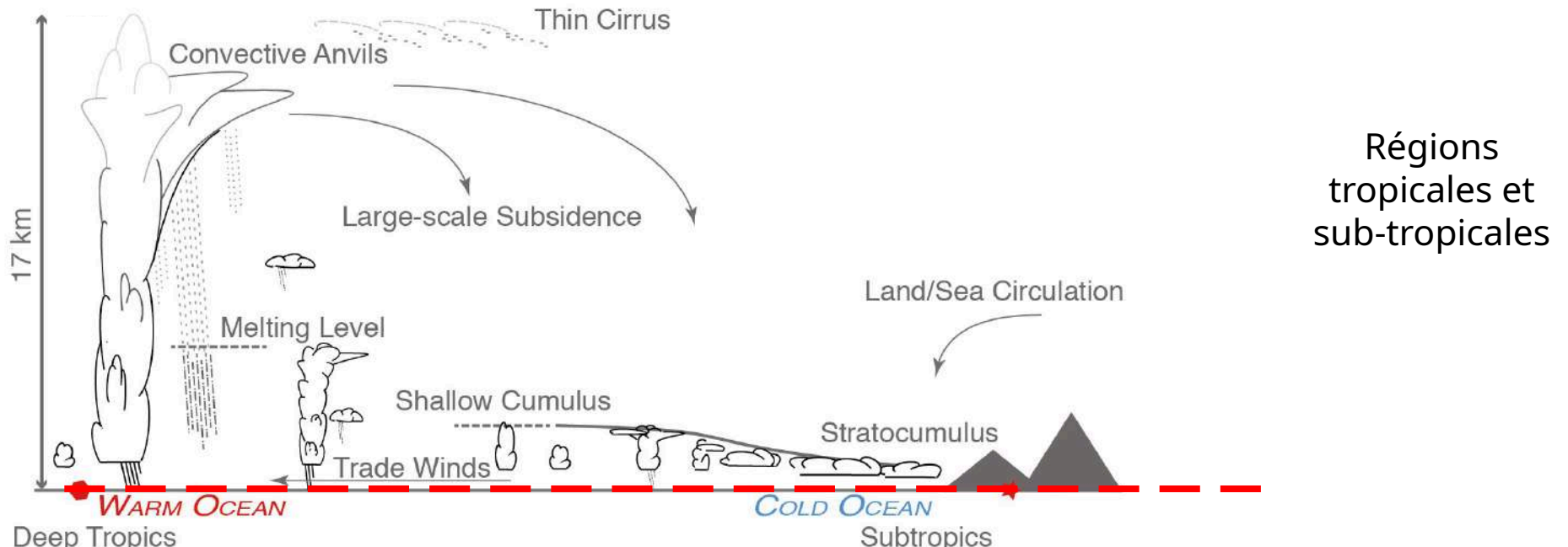
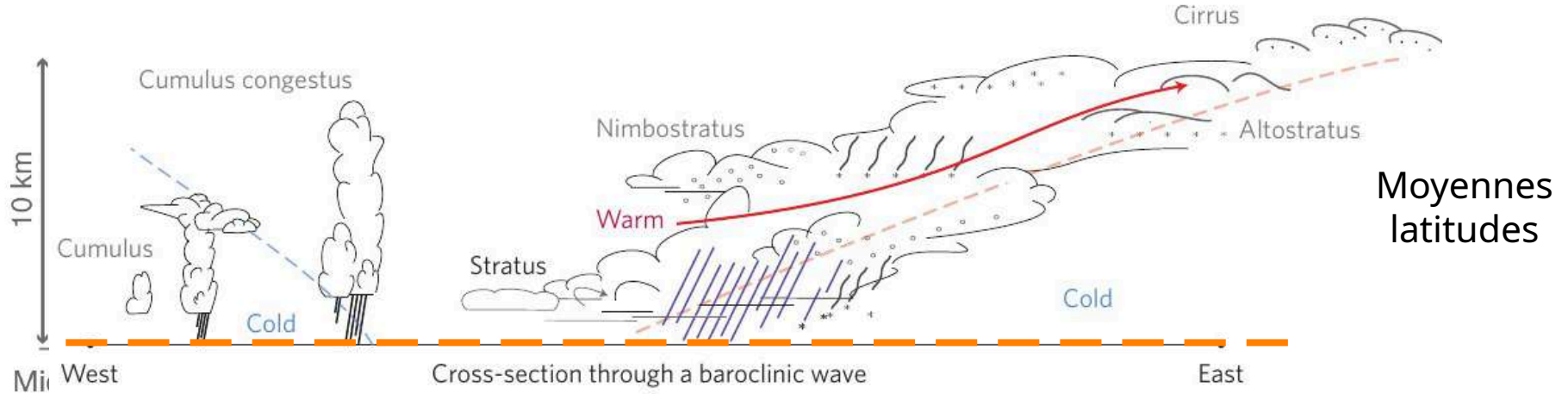
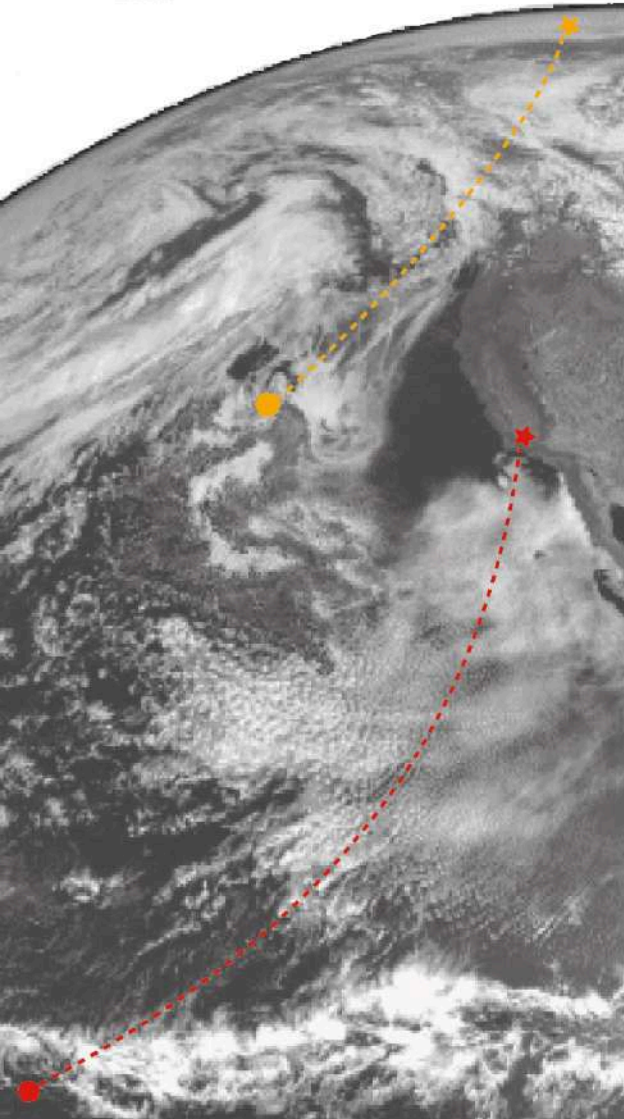


turbulence et convection

100 m à quelques km

→ nuages étroitement liés aux mouvements de l'atmosphère

Formation des nuages

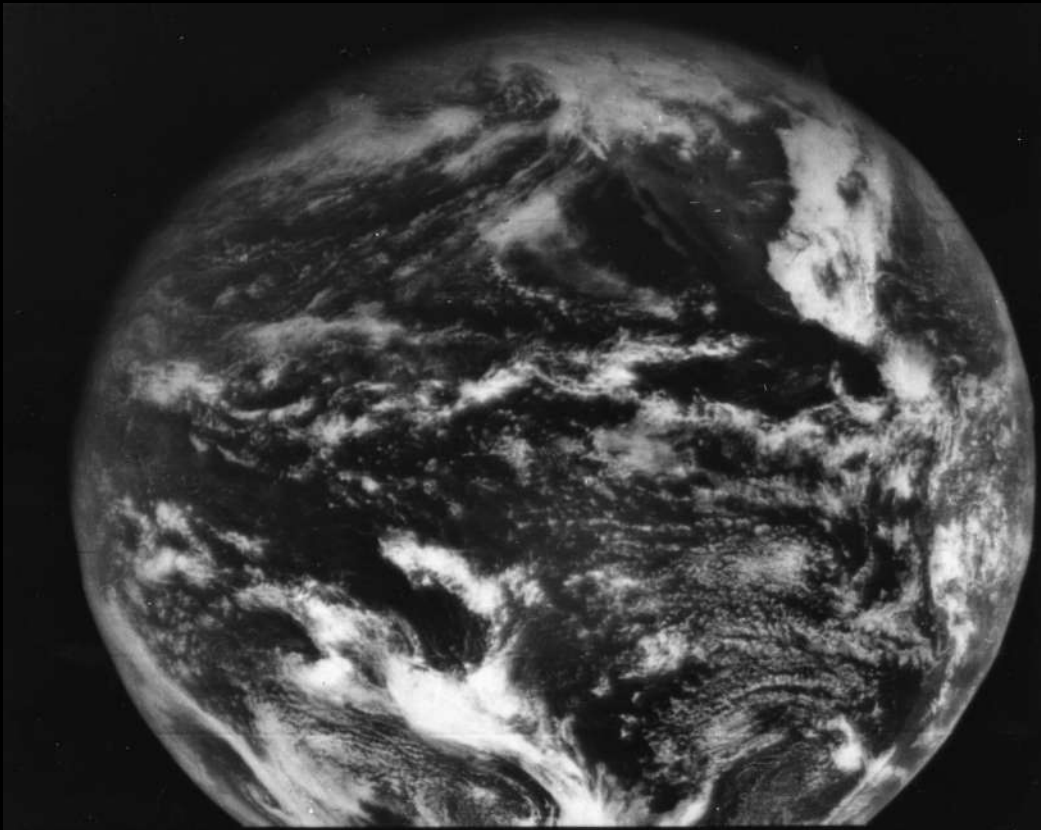


Les nuages, traceurs des circulations atmosphériques

TIROS IX (NOAA), 13 February 1965: The first complete view of the world's weather



Les nuages, traceurs des circulations atmosphériques



*ATS-1, December 11 1966 (NASA)
(first full disk image of Earth taken from a geostationary orbit)*



"The principal features of these pictures are the cloud patterns, with their intricate structure on almost every scale. The facts revealed by these pictures are leading us to revise our ideas concerning the organization of the tropical atmosphere."

Edward Lorenz ("The Global Circulation of the Atmosphere", 1969)

Les nuages, traceurs des circulations atmosphériques



Les nuages, traceurs... et acteurs des circulations atmosphériques

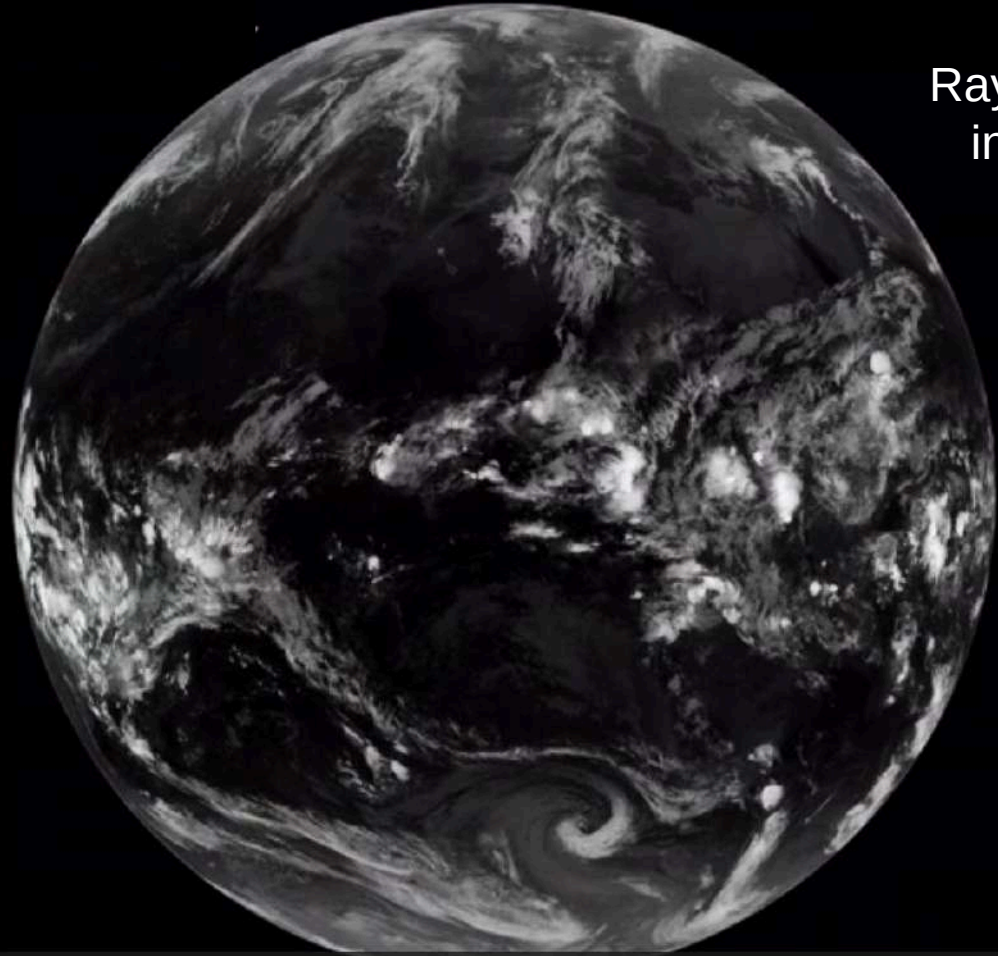


Les nuages, modulateurs du bilan radiatif de la Terre

Rayonnement
visible



Rayonnement
infrarouge



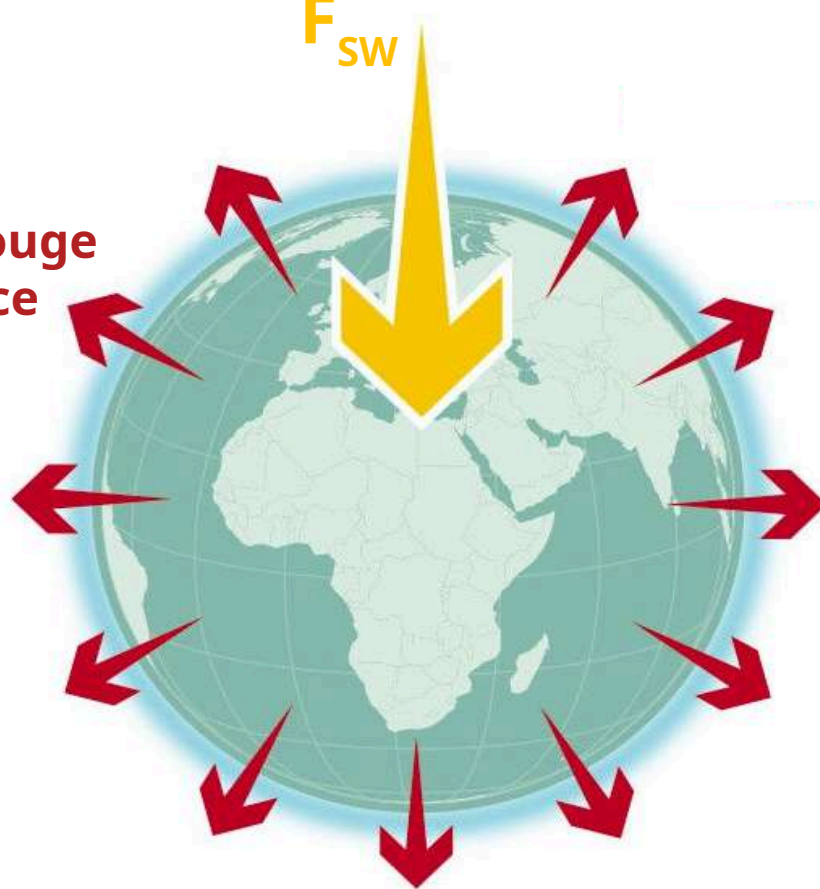
Equilibre énergétique de la Terre

flux d'énergie solaire absorbée
(flux incident - réfléchi)

F_{sw}

flux d'énergie infrarouge
réemis vers l'espace

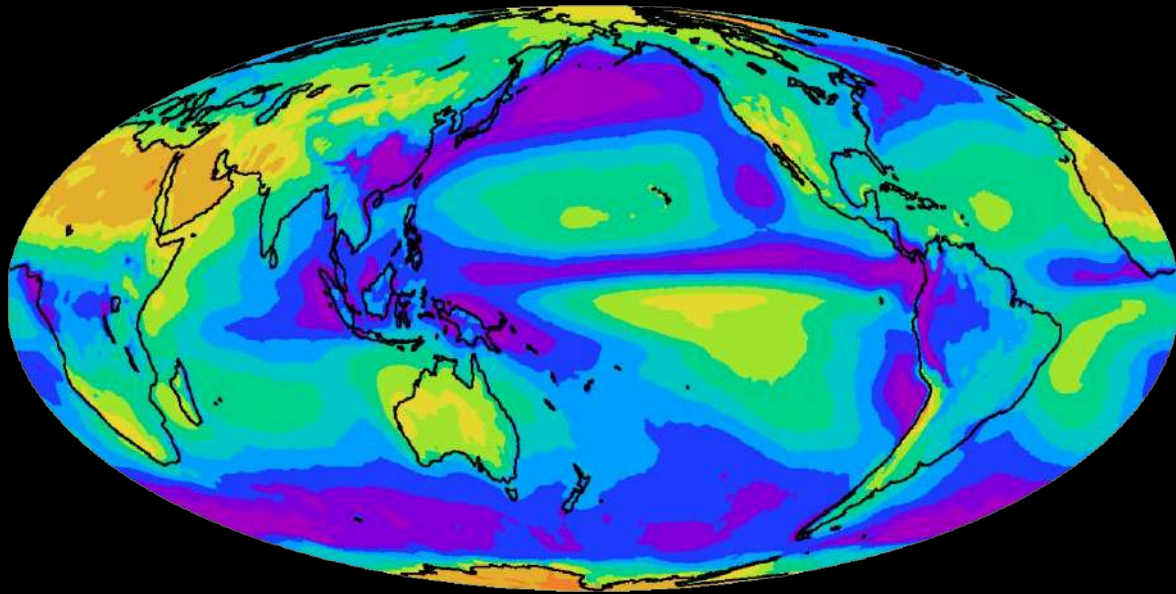
F_{LW}



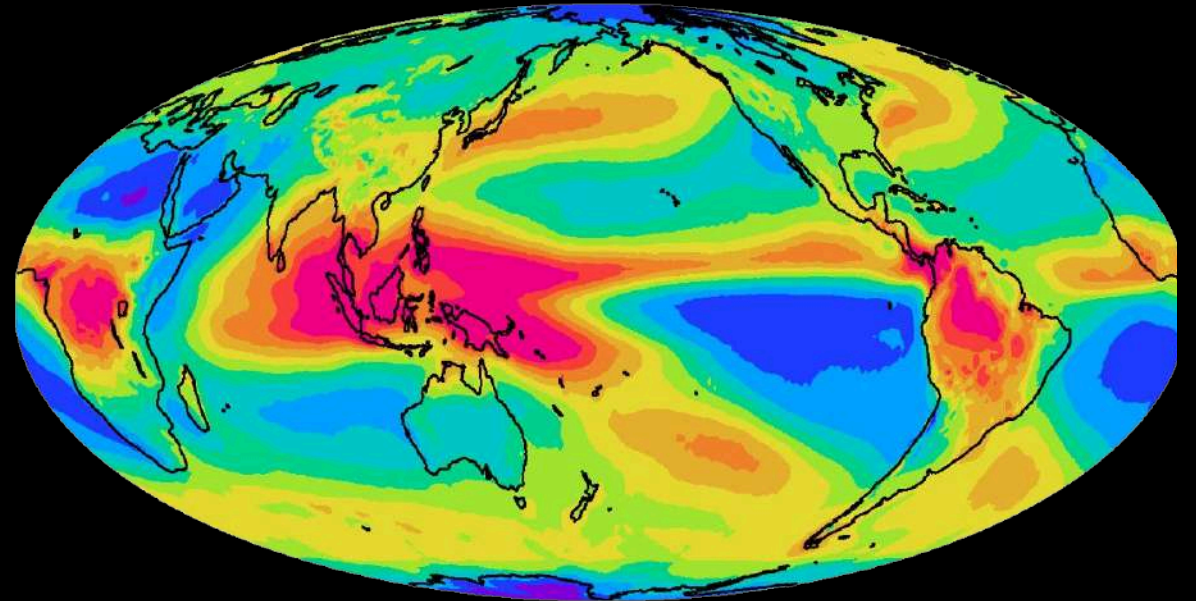
Les échanges d'énergie entre la Terre et l'espace contrôlent les variations de la température moyenne de la Terre

Les nuages, modulateurs du bilan radiatif de la Terre

Rayonnement visible:
Effet parasol des nuages (-47 W/m^2)



Rayonnement infrarouge:
Effet de serre des nuages (26 W/m^2)

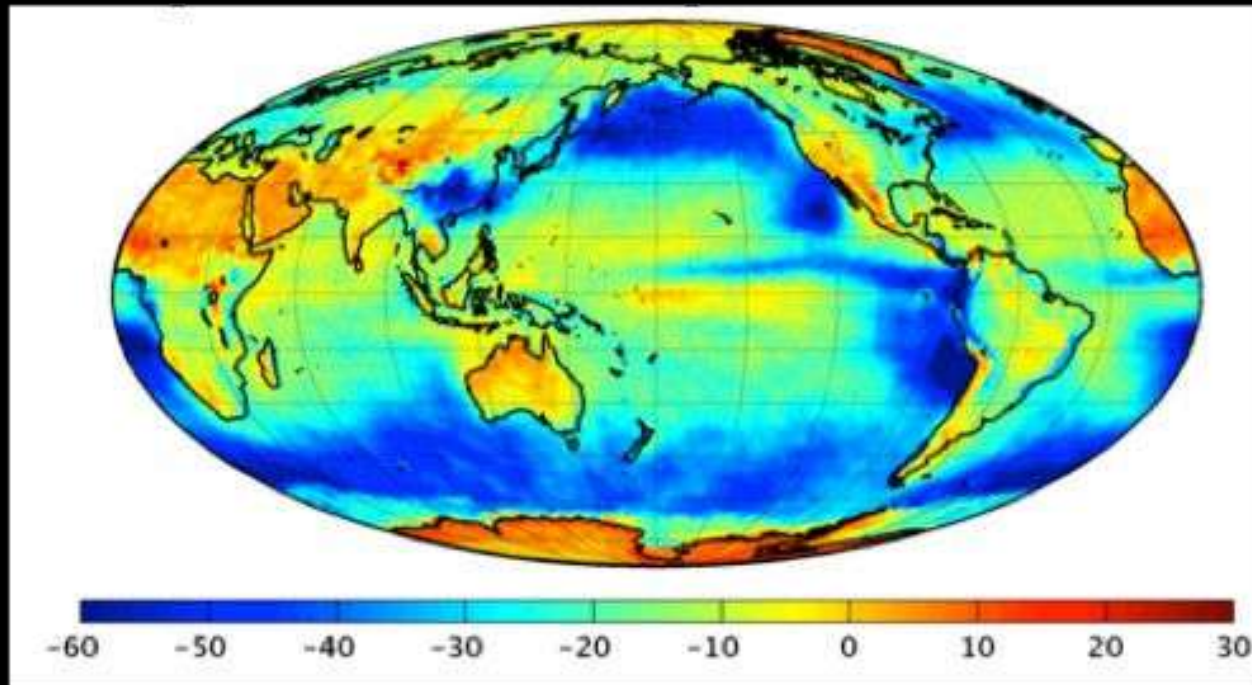


Observations CERES (NASA)

Effet parasol > Effet de serre nuageux (-21 W/m^2 dans le climat présent)

Les nuages, modulateurs du bilan radiatif de la Terre

Effet NET des nuages sur le bilan radiatif
(-21 W/m² dans le climat présent)



Observations CERES (NASA)

Effet parasol > Effet de serre nuageux

Rôle des nuages dans le changement climatique

Global surface temperature: increase above pre-industrial

Reference period: pre-industrial (1850–1900) • Credit: C3S/ECMWF



*Other sources comprise JRA-3Q, GISTEMPv4, NOAA GlobalTempv6, Berkeley Earth and the HadCRUT5 ensemble mean. Shading shows the range of the HadCRUT5 ensemble.

La Terre se réchauffe

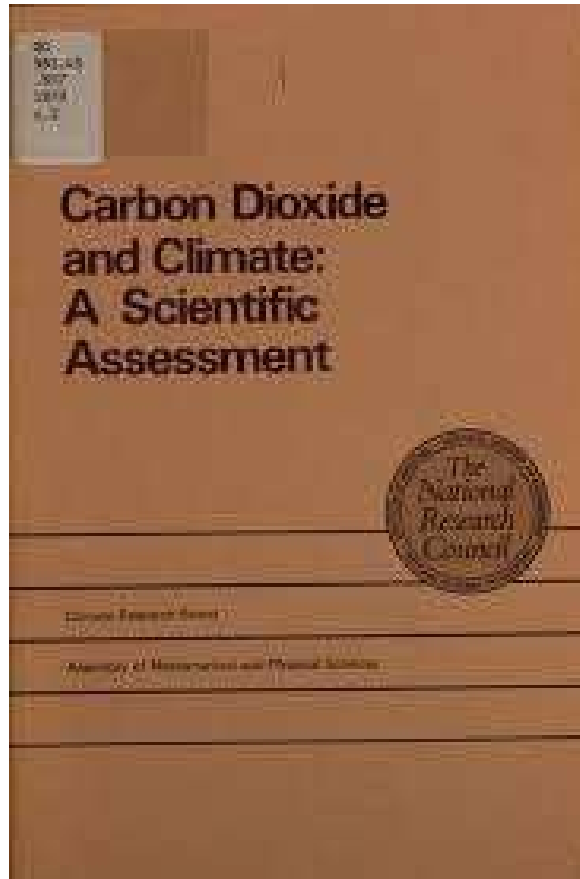
sous l'effet de l'augmentation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄..)

Quel réponse des nuages ?

Amplification ou atténuation du réchauffement global ?

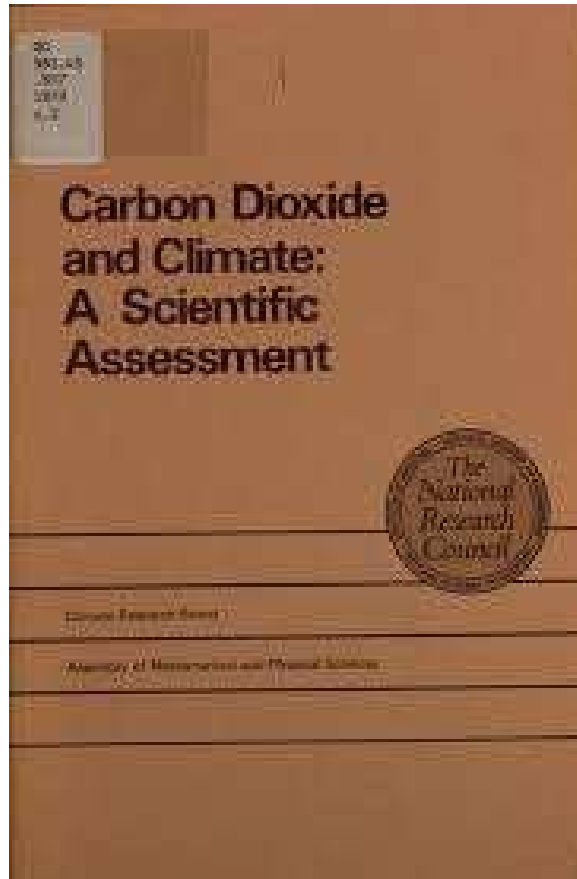
Changements de précipitation?

Impact d'une augmentation du CO₂ atmosphérique sur le climat



Rapport de Charney
(National Academy of Sciences, 1979)

Impact d'une augmentation du CO₂ atmosphérique sur le climat



Rapport de Charney
(National Academy of Sciences, 1979)

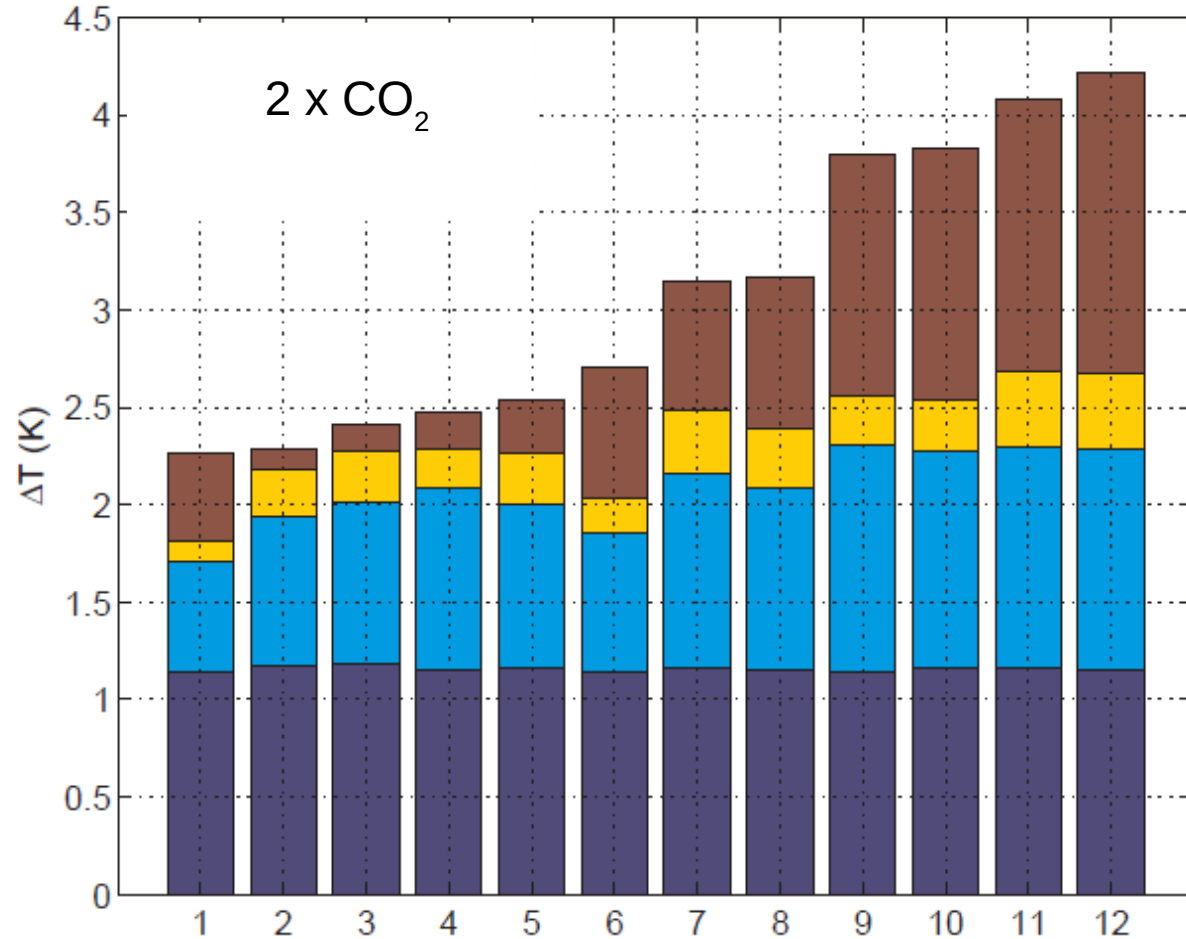
Impact d'un 2 x CO₂ ?

→ Réchauffement global mais amplitude incertaine
(entre 1.5 °C et 4.5 °C)

- Incertitude principalement due à la réponse des nuages
et son impact sur le bilan radiatif de la Terre

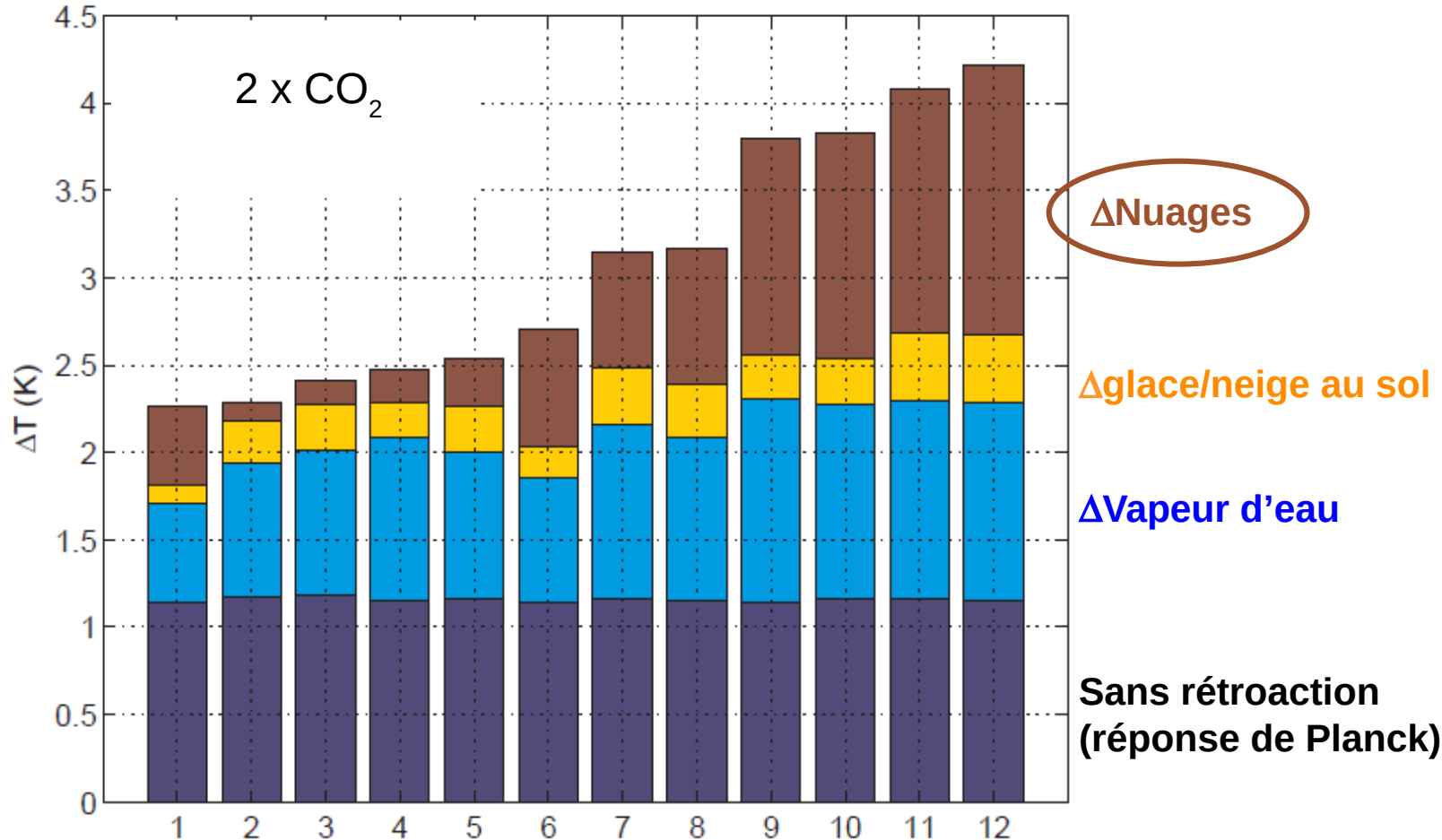
Sensibilité climatique estimée par les modèles climatiques

Réchauffement global prédit par différents modèles



Sensibilité climatique estimée par les modèles climatiques

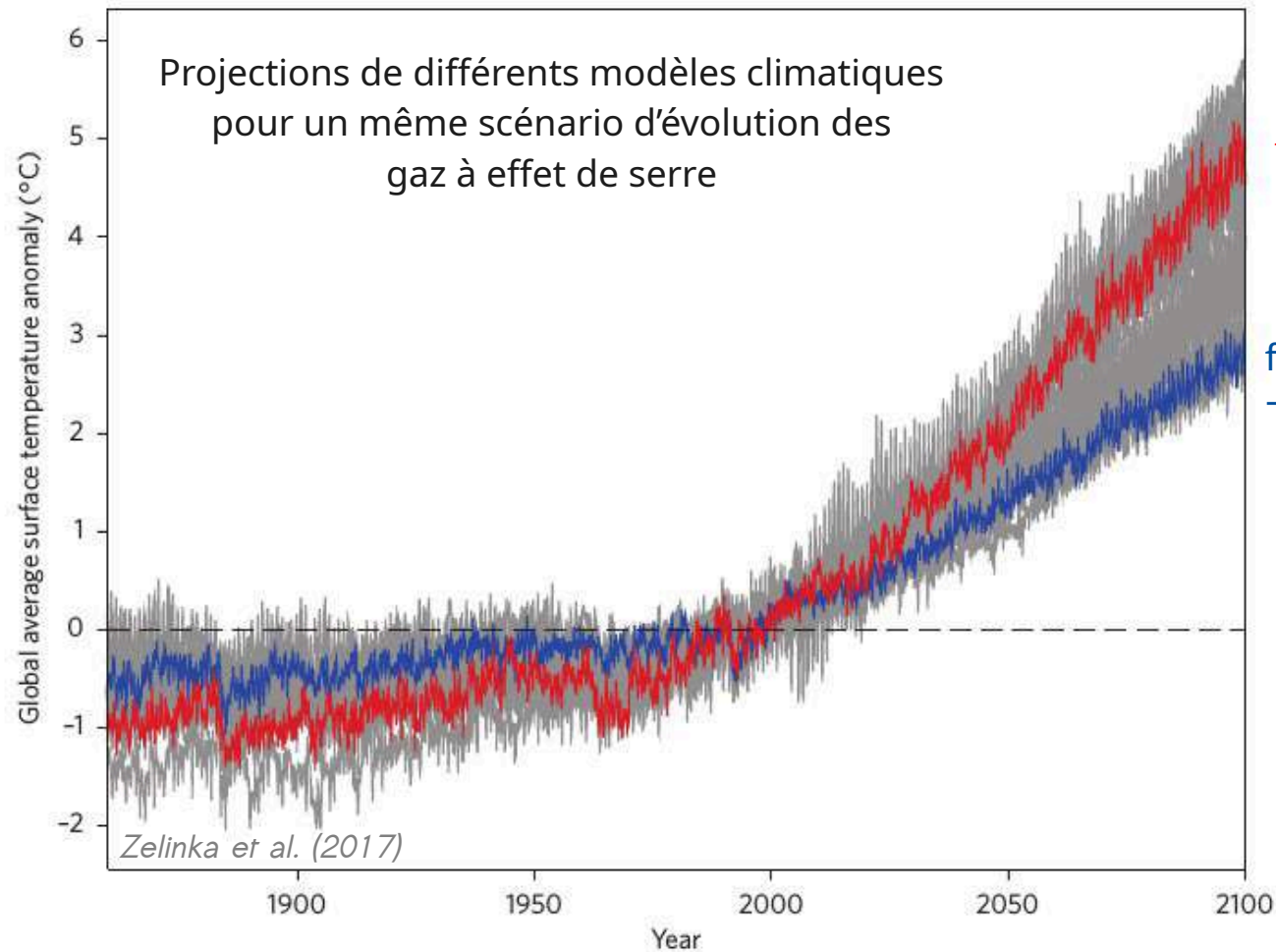
Réchauffement global prédit par différents modèles



Décomposition du réchauffement:

$$\Delta T_s = \Delta T_{s,P} + \sum_{x \neq P} \Delta T_{s,x}$$

Projections de température



forte diminution de l'effet Parasol des nuages:
→ forte amplification du réchauffement

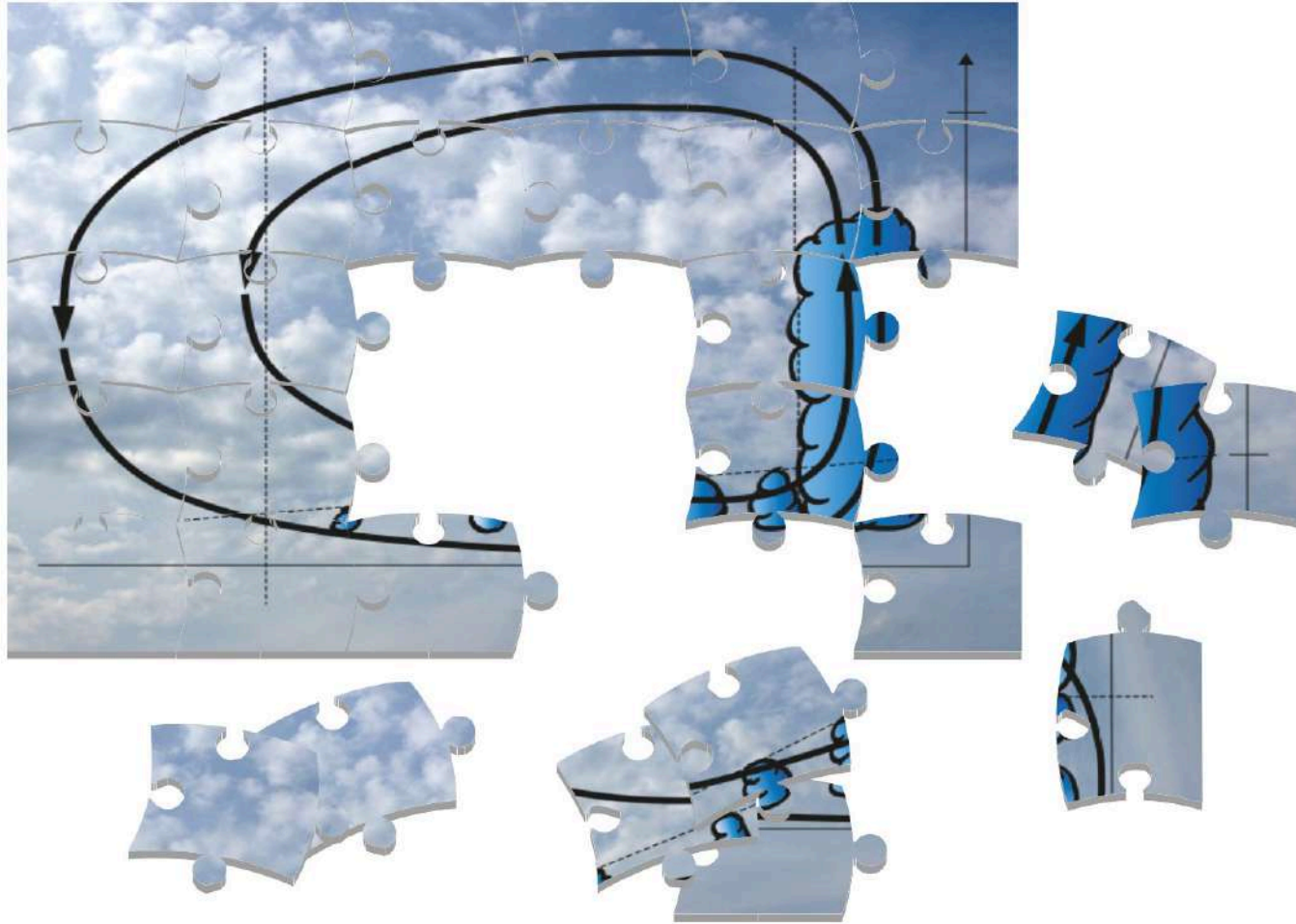
faible changement nuageux :
→ moindre amplification du réchauffement

La réponse des nuages au réchauffement climatique peut être à l'origine de fortes rétroactions climatiques

Quelle réponse des nuages au changement climatique?



Quelle réponse des nuages au changement climatique?



Guide:

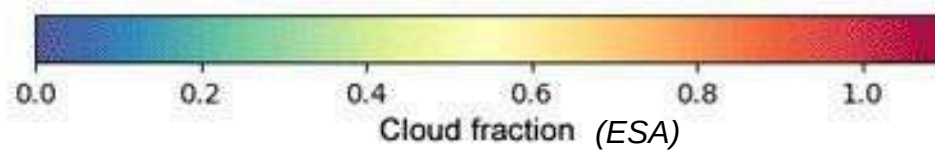
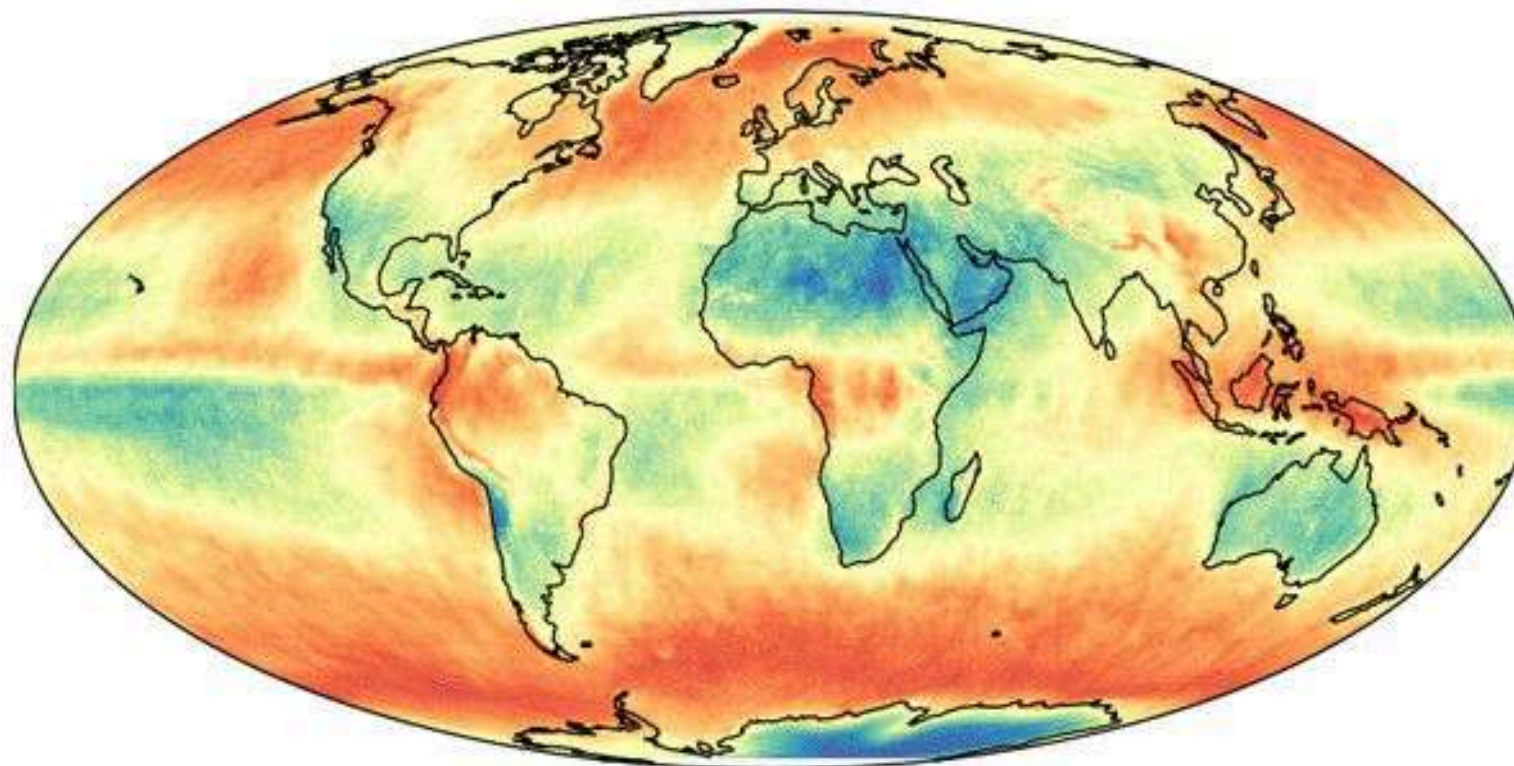
Compréhension physique

(observations, modélisation, théorie)

- décomposition du problème
- choix des outils les plus appropriés
- identification des réponses les plus robustes
- identification des principales incertitudes
- implications pour le changement climatique

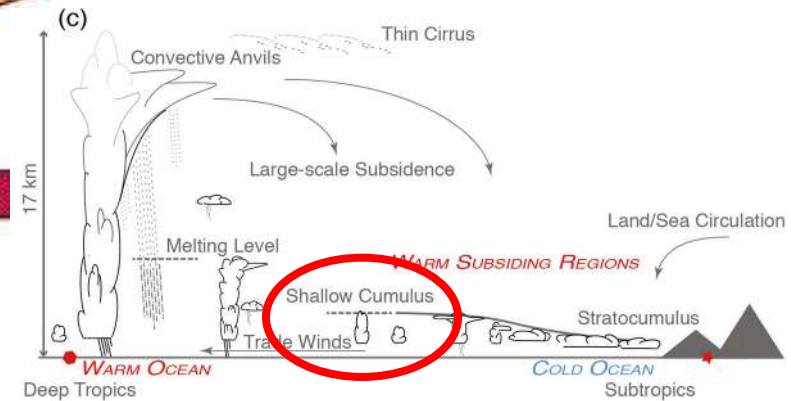
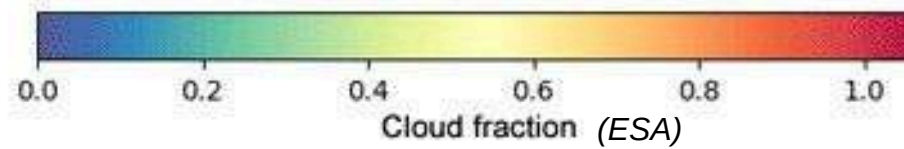
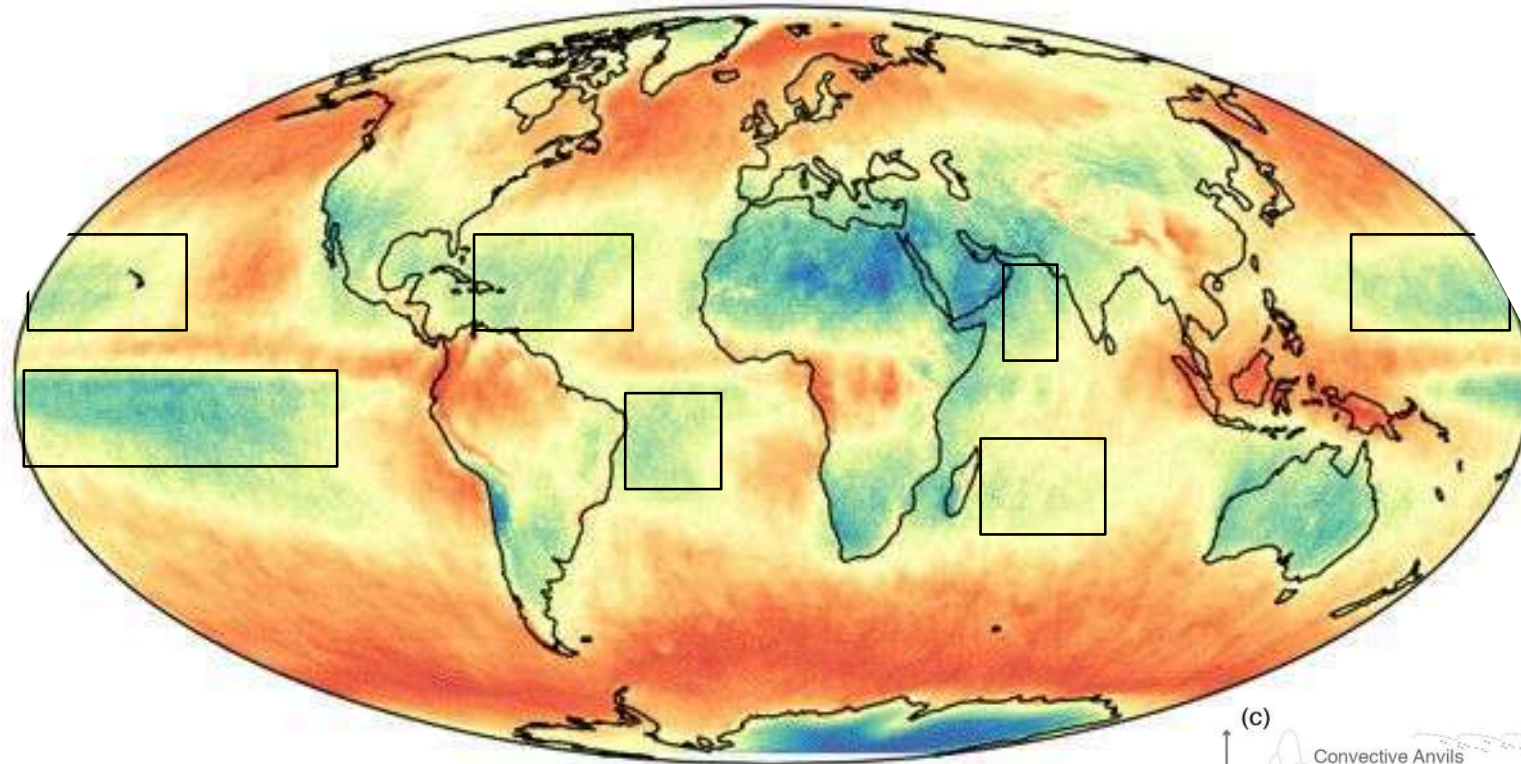
|

Nuages & Incertitudes sur la sensibilité climatique



Nuages & Incertitudes sur la sensibilité climatique

- Petits Cumulus



Petits cumulus



Petits cumulus



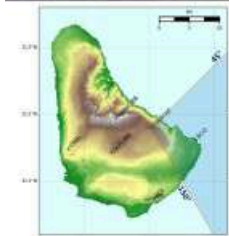
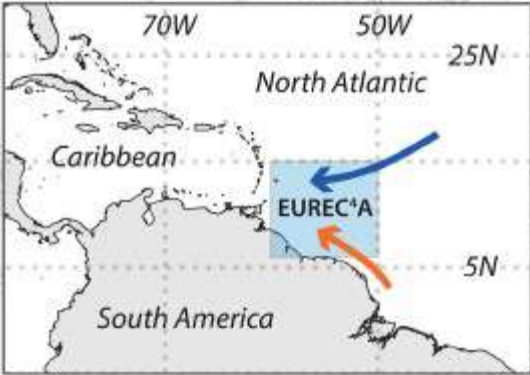
L'une des principales sources d'incertitude pour la prédiction de l'amplitude du réchauffement global

Réponse à un changement de leur environnement?

EUREC⁴A field campaign

(Elucidating the role of couplings between clouds, convection and climate)

Barbados, Jan-Feb 2020

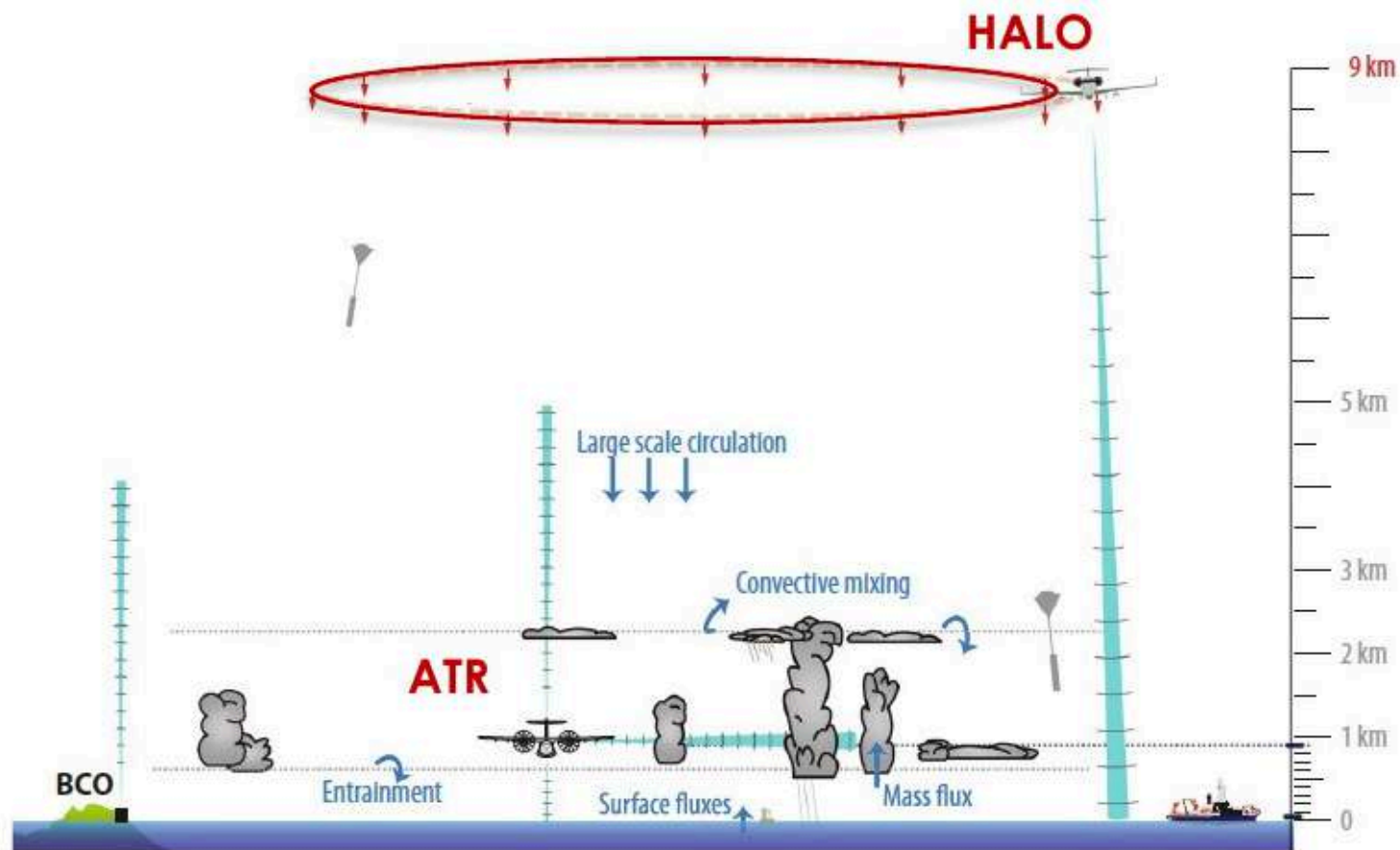
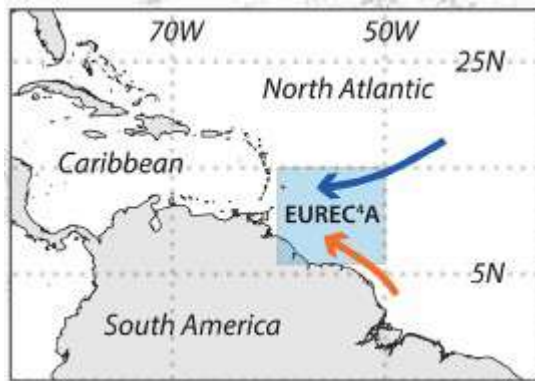


Bony et al. (2017), Stevens et al. (2021)

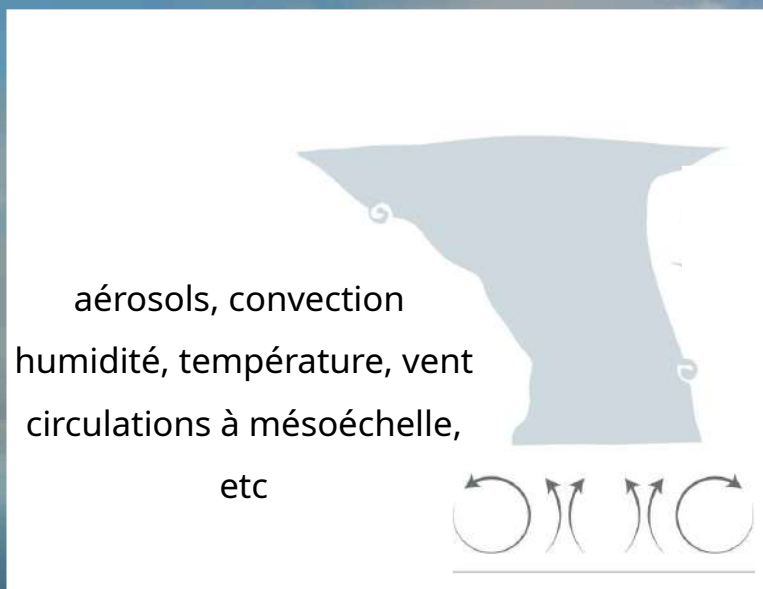
EUREC⁴A field campaign

(Elucidating the role of couplings between clouds, convection and climate)

Barbados, Jan-Feb 2020



Petits cumulus

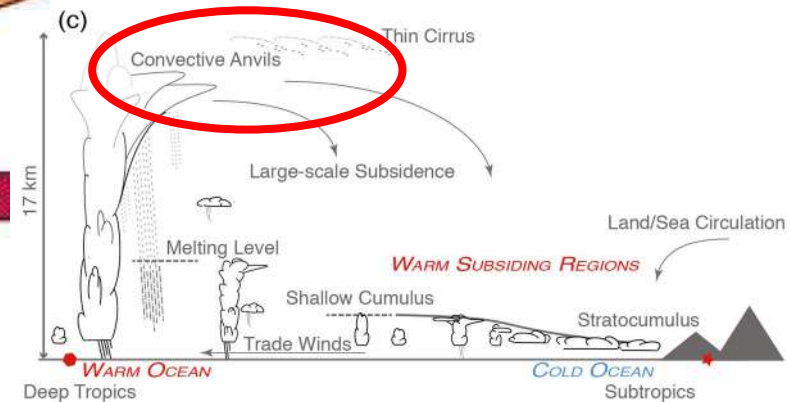
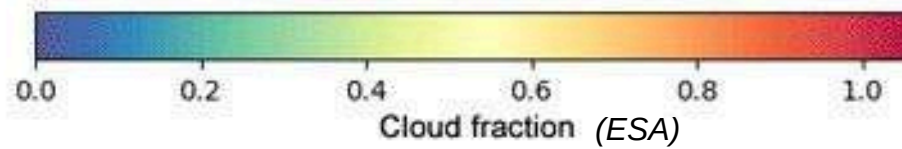
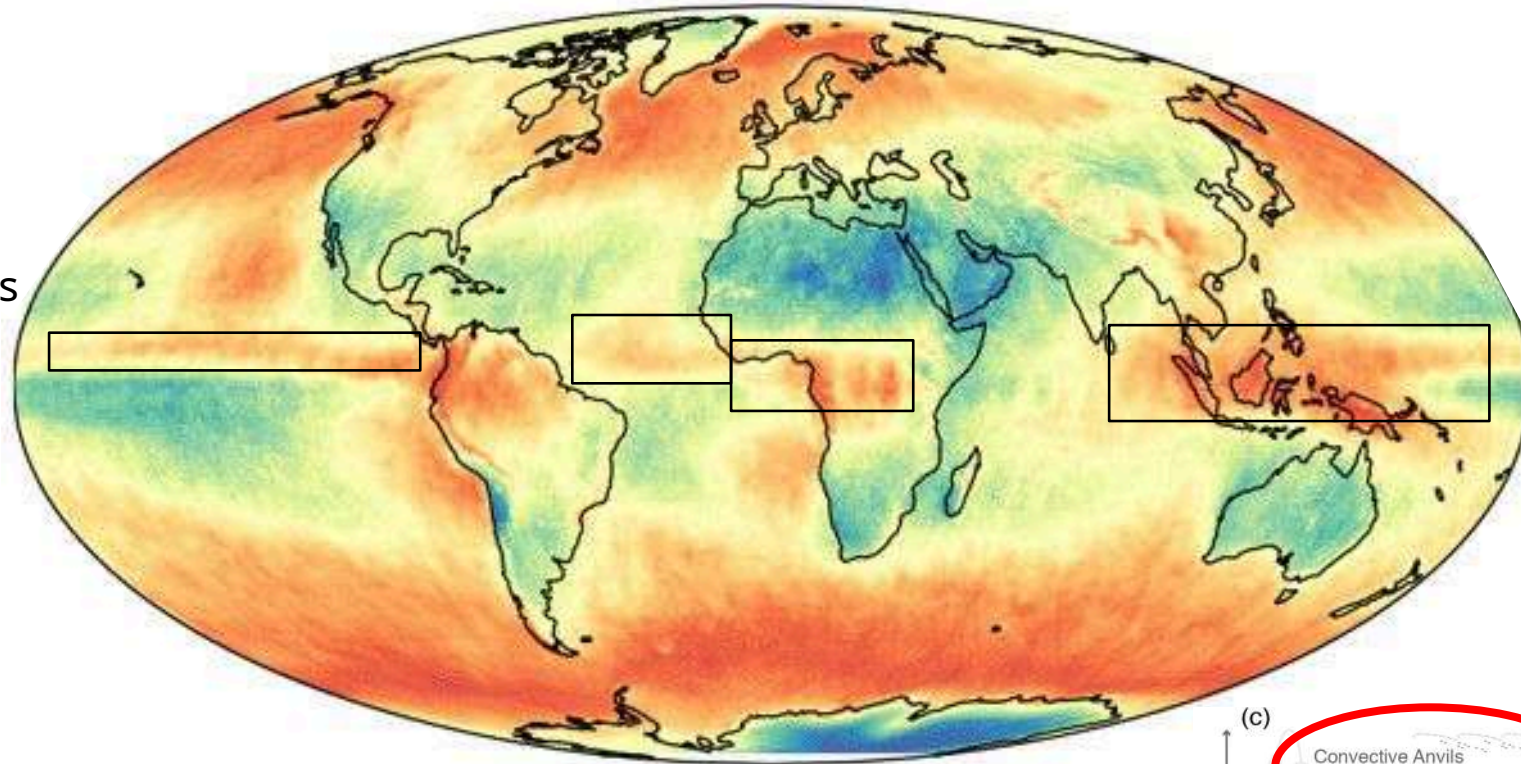


Les cumulus d'alizés sont essentiellement contrôlés par la dynamique atmosphérique (e.g. thermiques, convection)

Les modèles qui prédisent les plus fortes diminutions des petits cumulus en changement climatique représentent le couplage entre nuages et humidité mais pas entre nuages et convection

Nuages & Incertitudes sur la sensibilité climatique

- Petits Cumulus
- Enclumes convectives



Nuages d'enclume



Réponse des nuages d'enclume au réchauffement global?

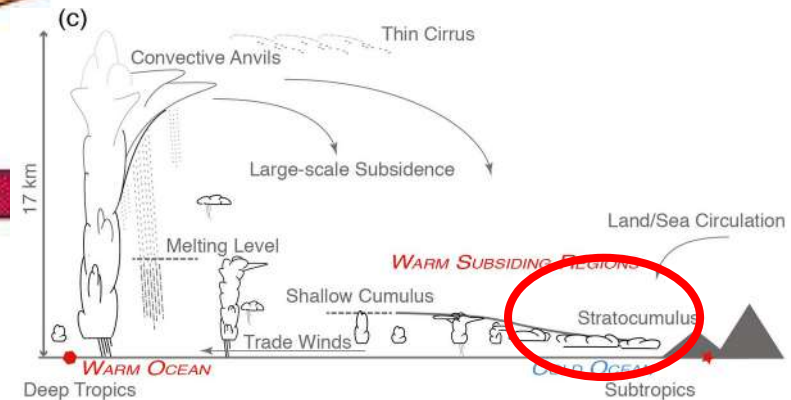
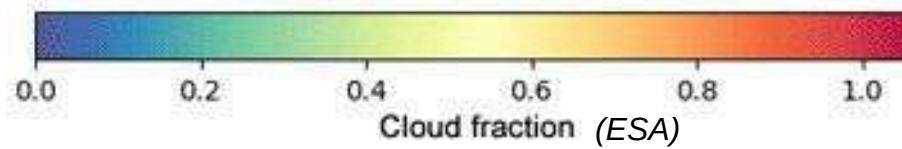
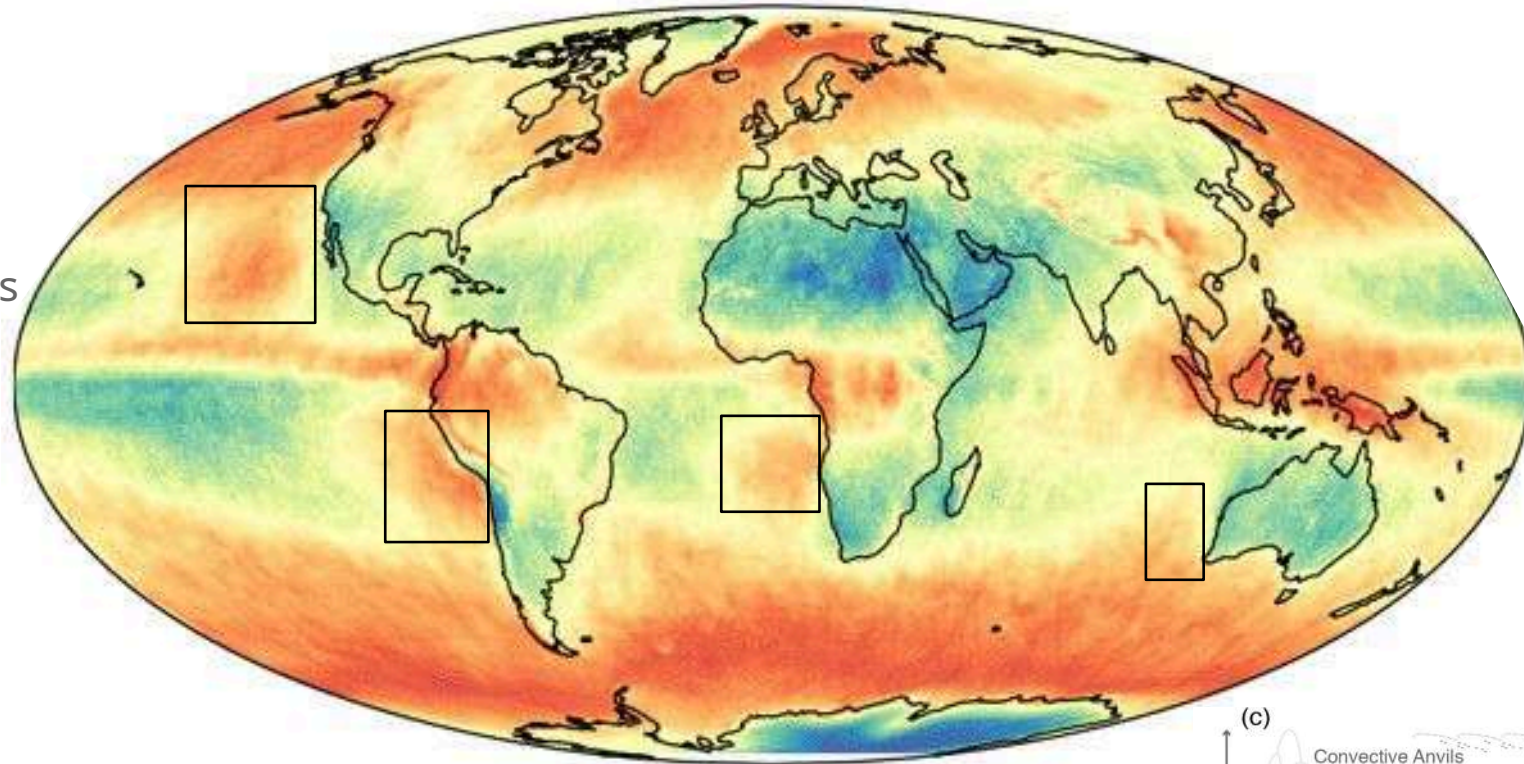


Réponse des nuages d'enclume au réchauffement global?

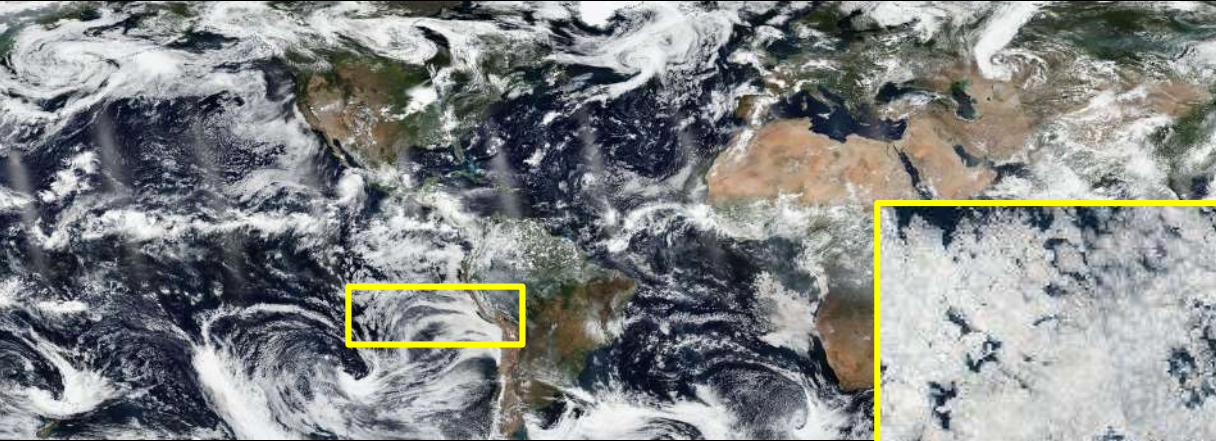
- Sommets plus haut, mais température quasi-invariable
- Moins étendus spatialement
- Faible rétroaction climatique du fait de la compensation des effets parasol/effet de serre
- Changements d'épaisseur optique?

Nuages & Incertitudes sur la sensibilité climatique

- Petits Cumulus
- Enclumes convectives
- Stratocumulus



Stratocumulus



Morphologie et albédo des Stratocumulus



Changements futurs de la morphologie des stratocumulus?

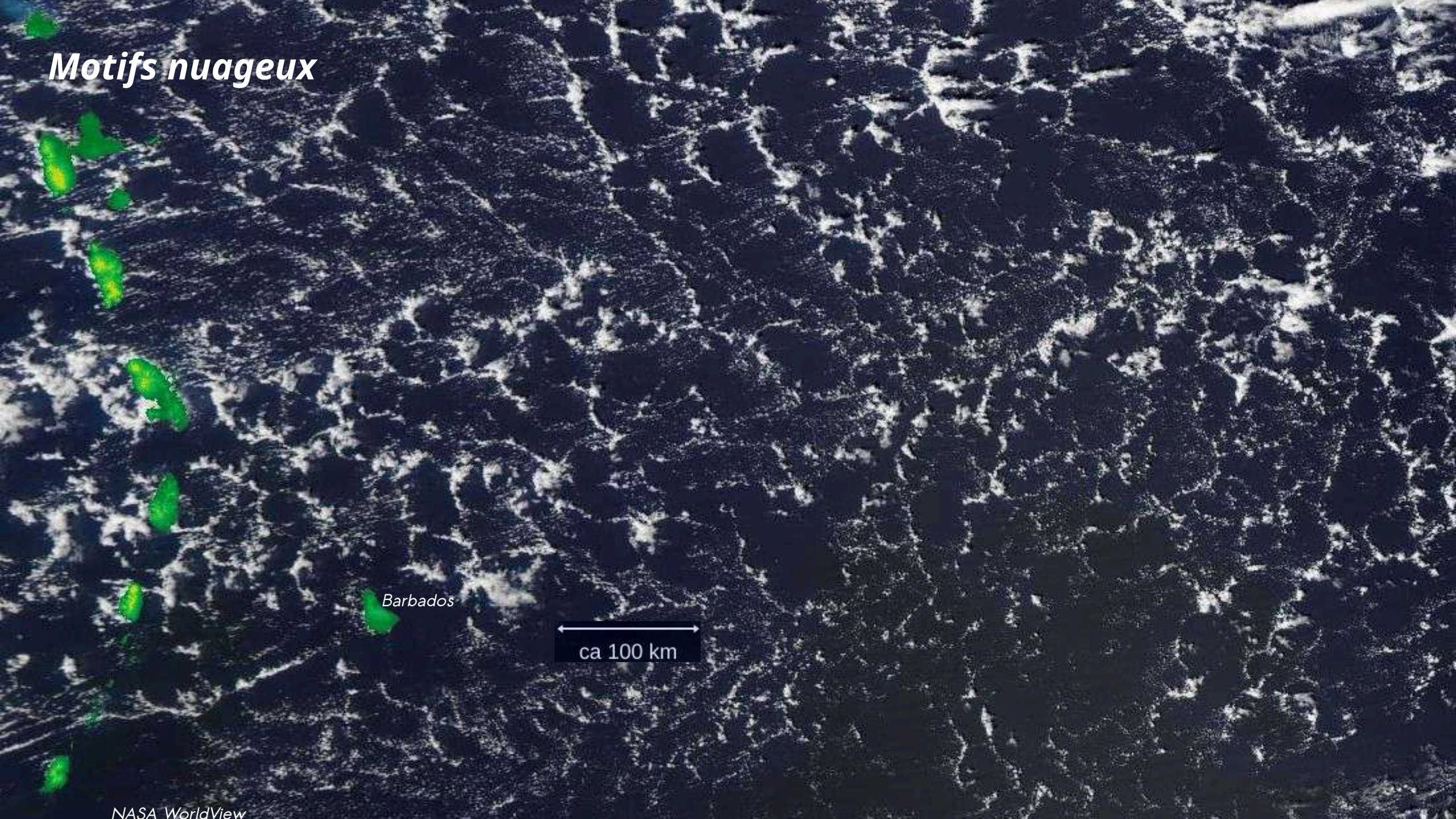
Organisation des nuages à mésoéchelle



Motifs nuageux



Motifs nuageux



Barbados

ca 100 km

Motifs nuageux



Barbados

ca 100 km

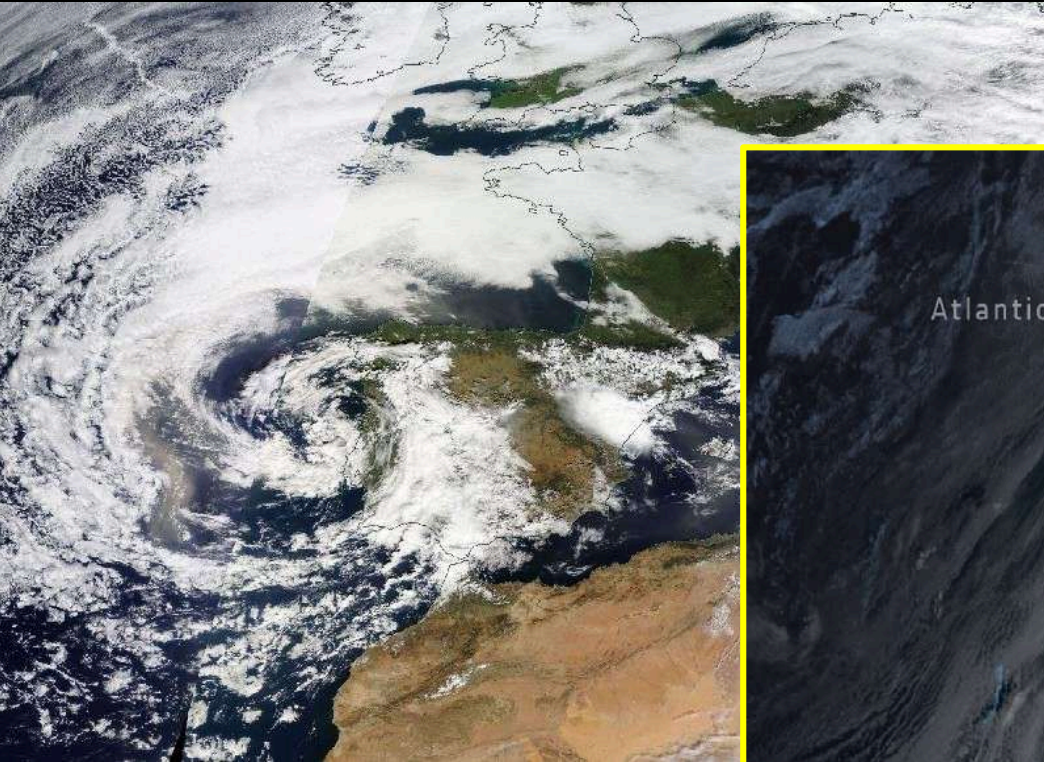
Motifs nuageux



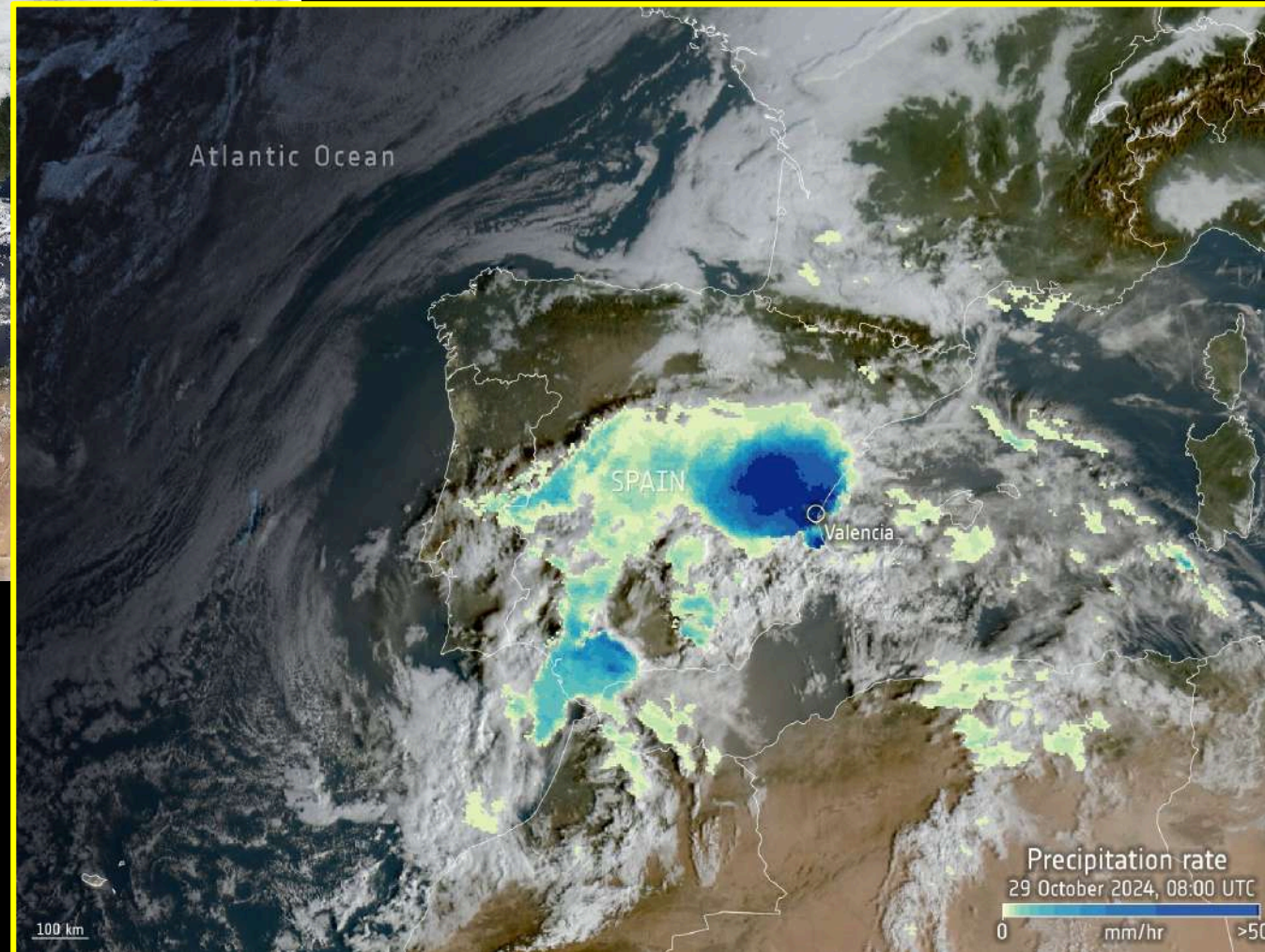
Agrégation et amas nuageux



Agrégation et amas nuageux



Influence sur les précipitations extrêmes

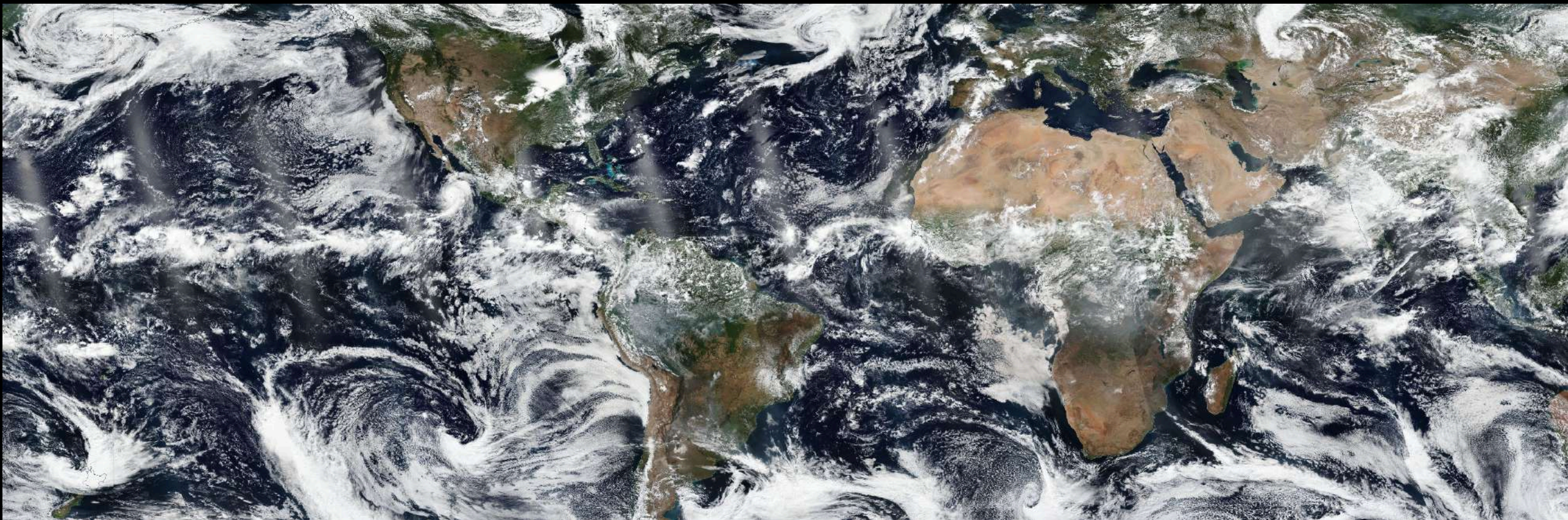


Valencia, Spain, Oct 2024

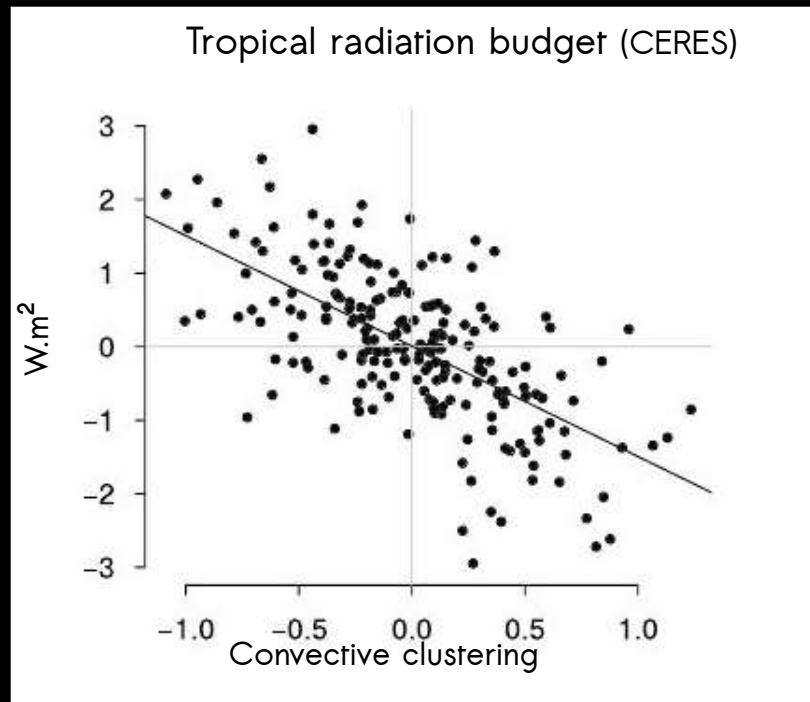
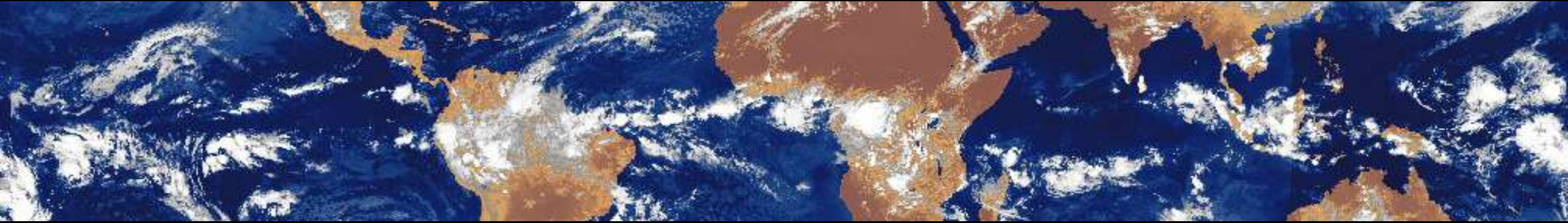


Organisation des nuages à mésoéchelle: motifs, agrégation, etc

(Mésoméchelle: de quelques km à quelques 100 km)



Importance de l'agrégation des nuages pour le bilan radiatif

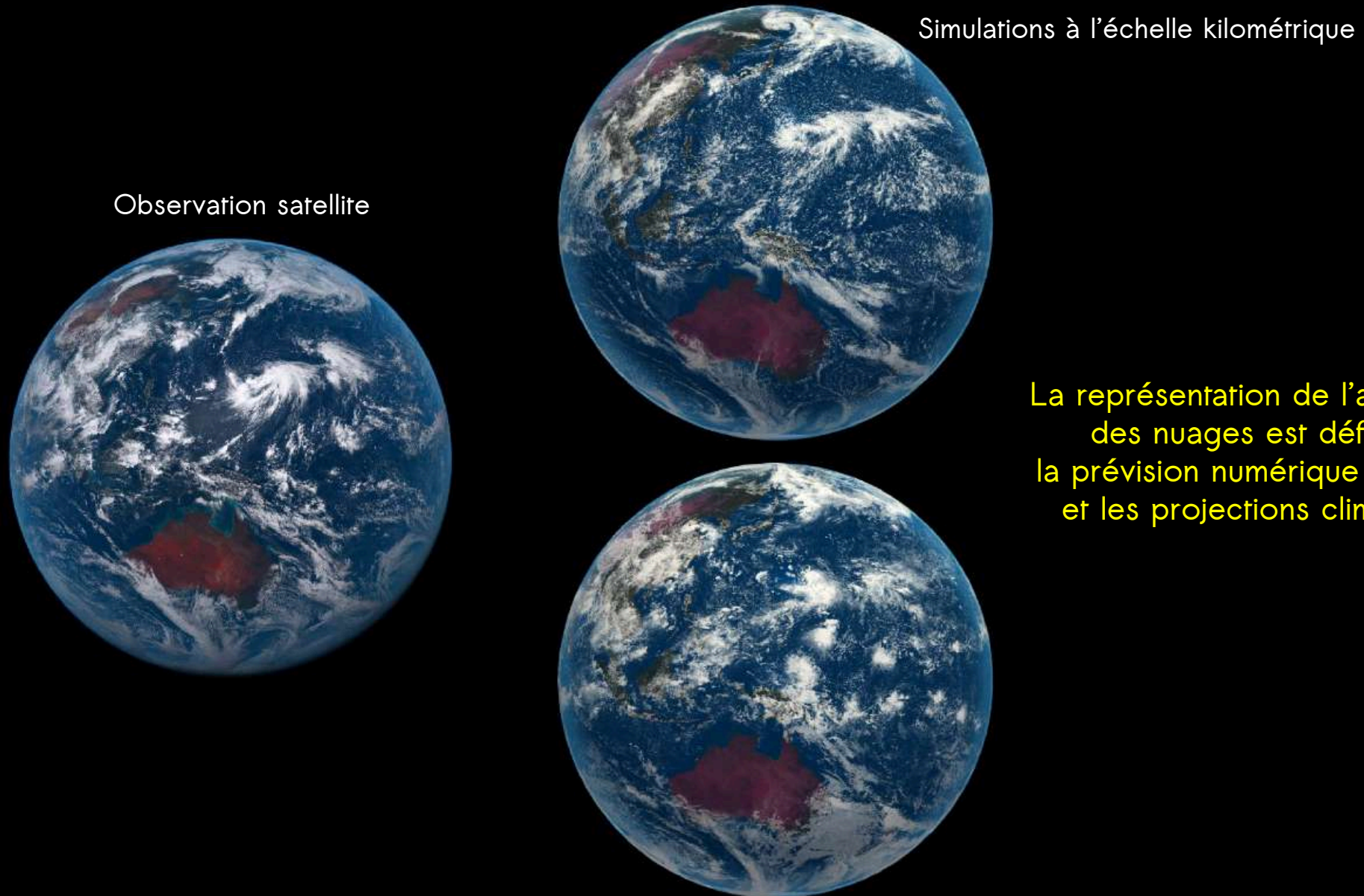


Agrégation des nuages
plus forte



Atmosphère plus sèche
&
Augmentation du refroidissement radiatif
de la Terre vers l'espace

Nouvelle génération de modèles de prévision du temps et du climat

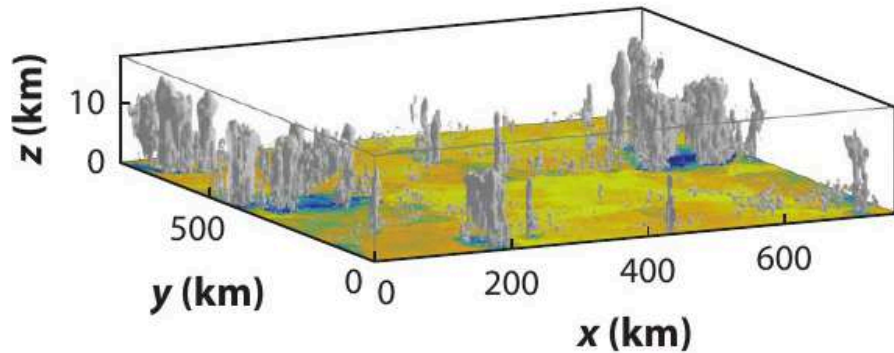


Pourquoi les nuages s'agrègent-ils?

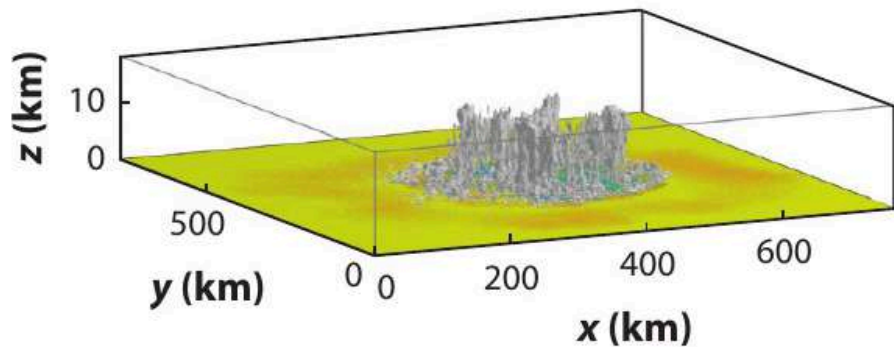


Organisation spontanée de la convection

a Random convection



b Convection aggregates



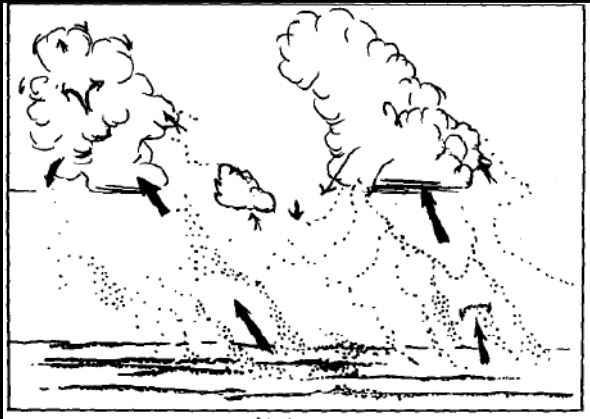
1. L'agrégation des nuages convectifs peut se produire de façon **spontanée**, du fait des **interactions entre les nuages et leur environnement**.
2. L'organisation des nuages influence l'état de l'atmosphère à grande échelle + précipitations extrêmes

→ Réponse au réchauffement climatique?

→ Processus contrôlant l'agrégation des nuages?

|

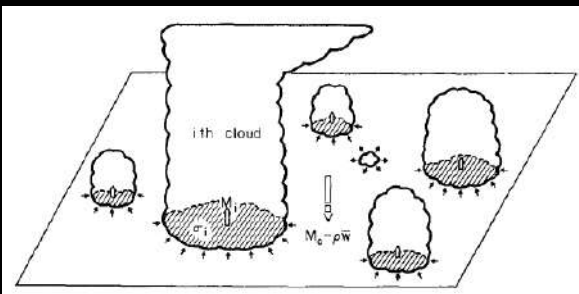
Thermiques sous-nuageux



Le Mone and Pennell (1976)

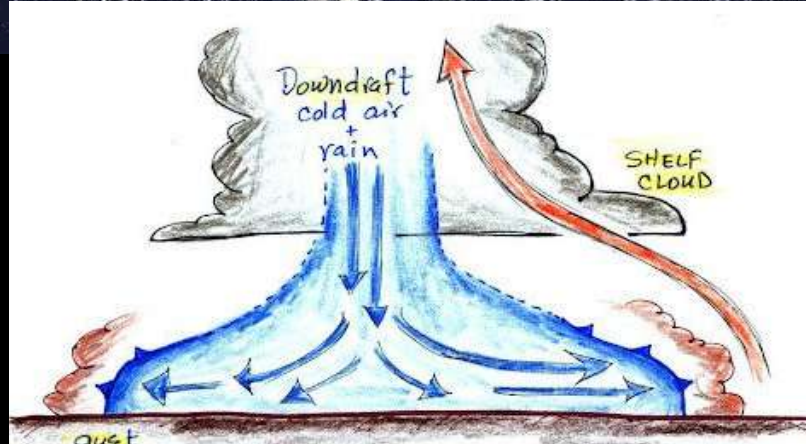
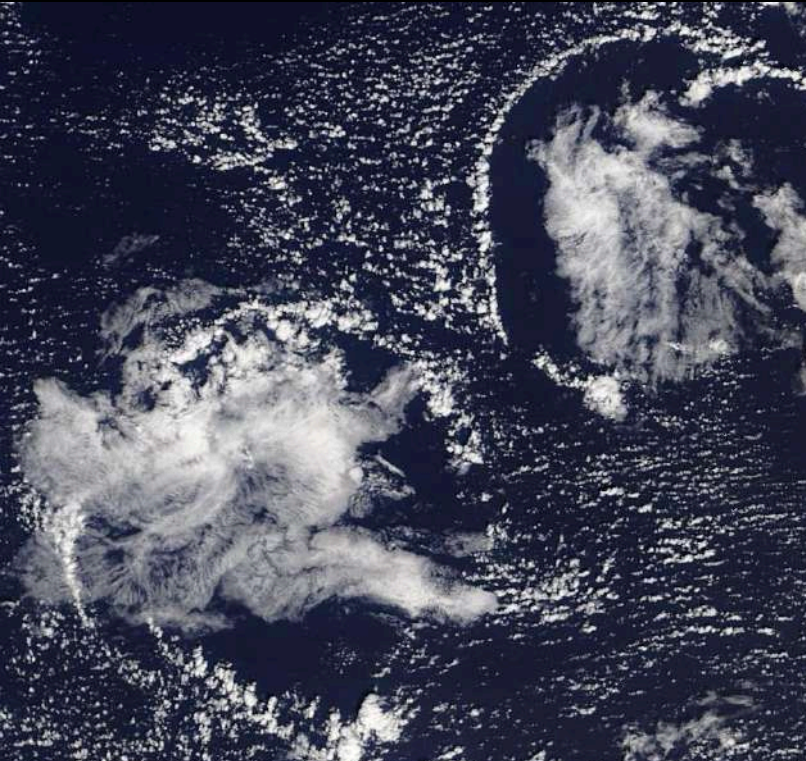
Photograph: V. Douet (ATR)

Développement

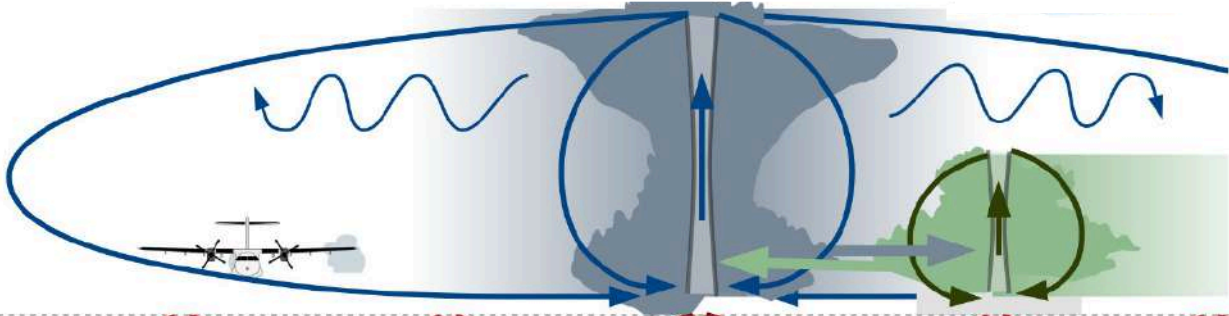


Arakawa and Schubert (1974)

Poches froides

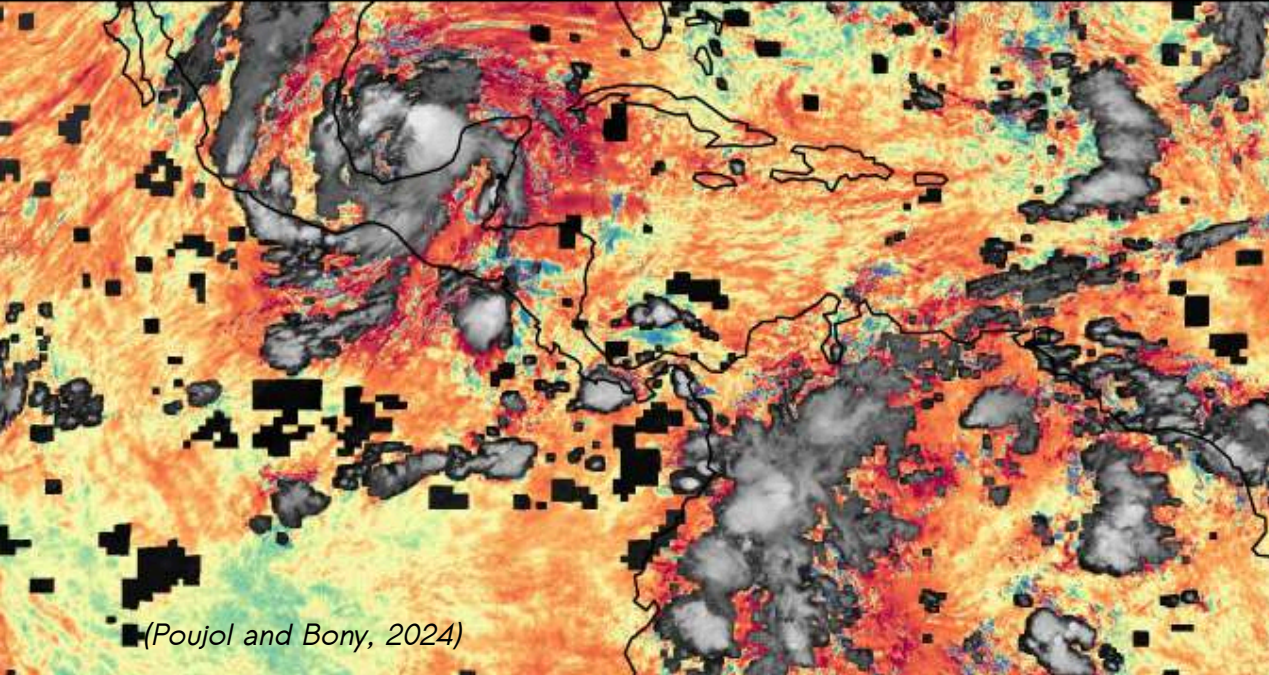


Circulations à mésoéchelle



Circulations à mésoéchelle

Mesures spatiales de la vitesse verticale de l'air en ciel clair:



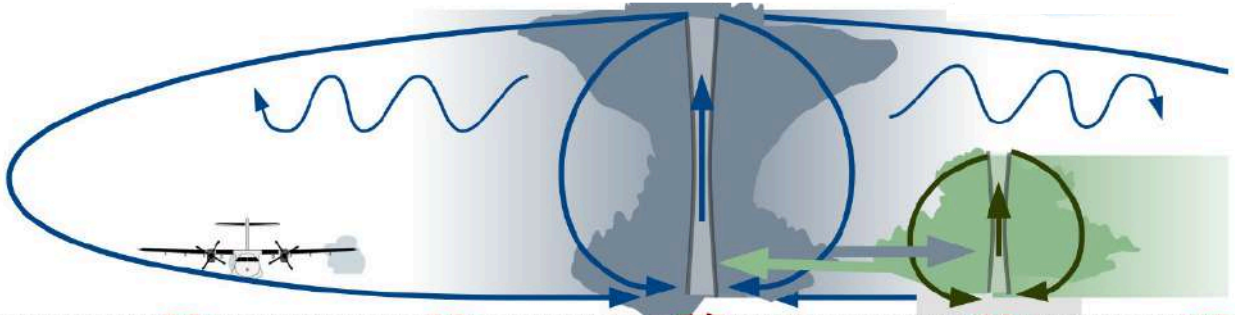
(Poujol and Bony, 2024)



- Theoretical interpretation of measurements:

$$\omega \approx f(z) \frac{Mg}{2H\sqrt{(r+R)H}} e^{-\frac{\pi(r+R)}{2H}} + \omega_{inf}$$

- decreases with the distance from cloud
- controlled by cloud width, depth and mass flux



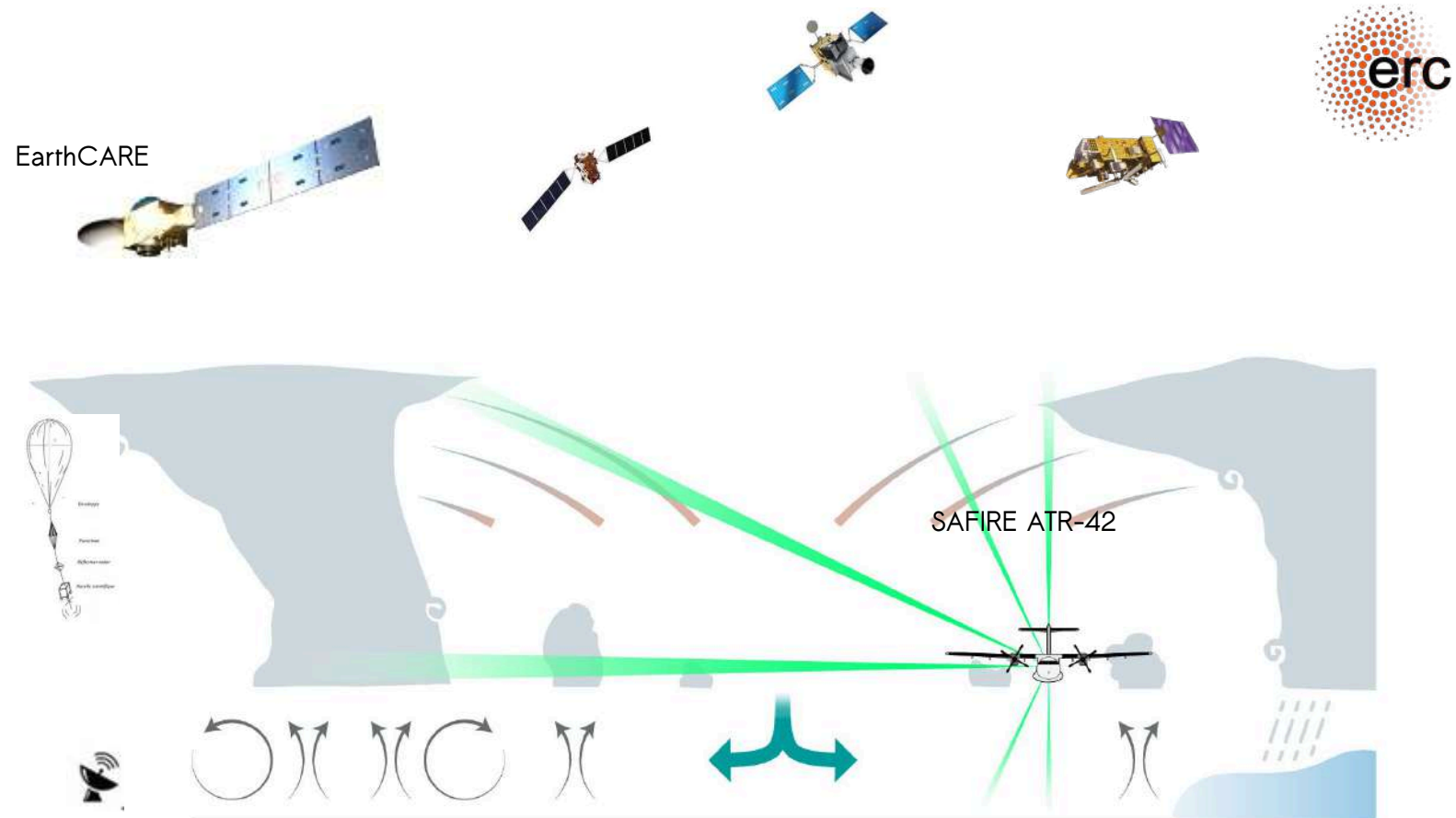
Basile Poujol (PhD thesis, 2025)

Articulation entre ces différents processus?

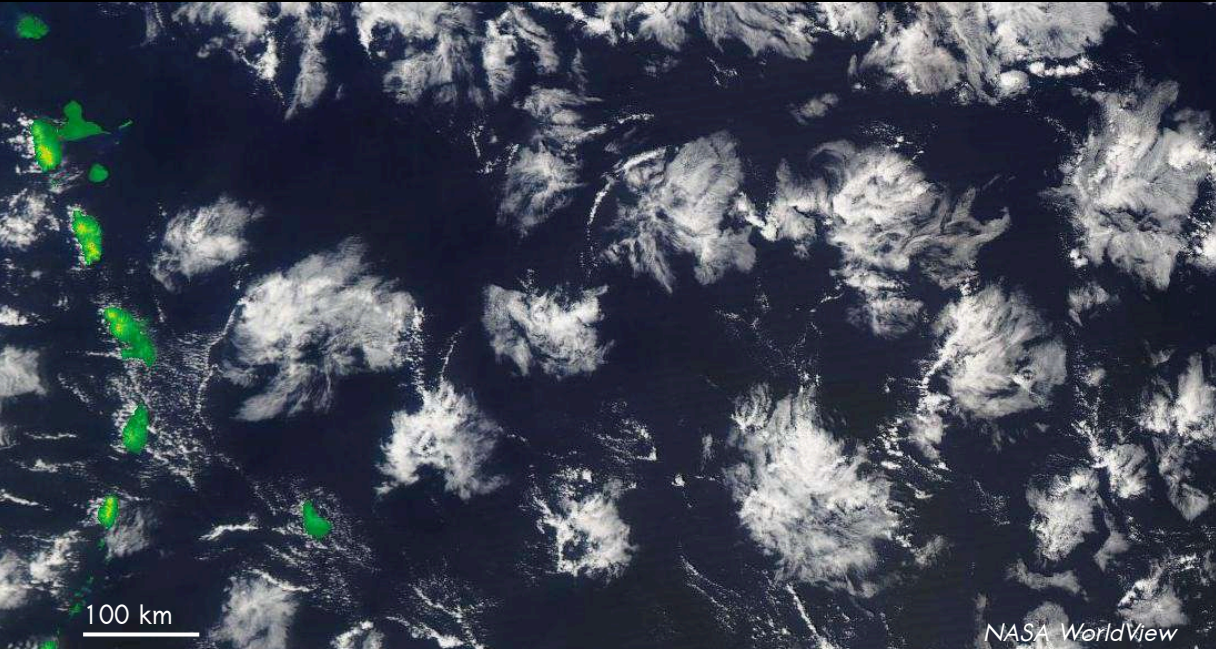
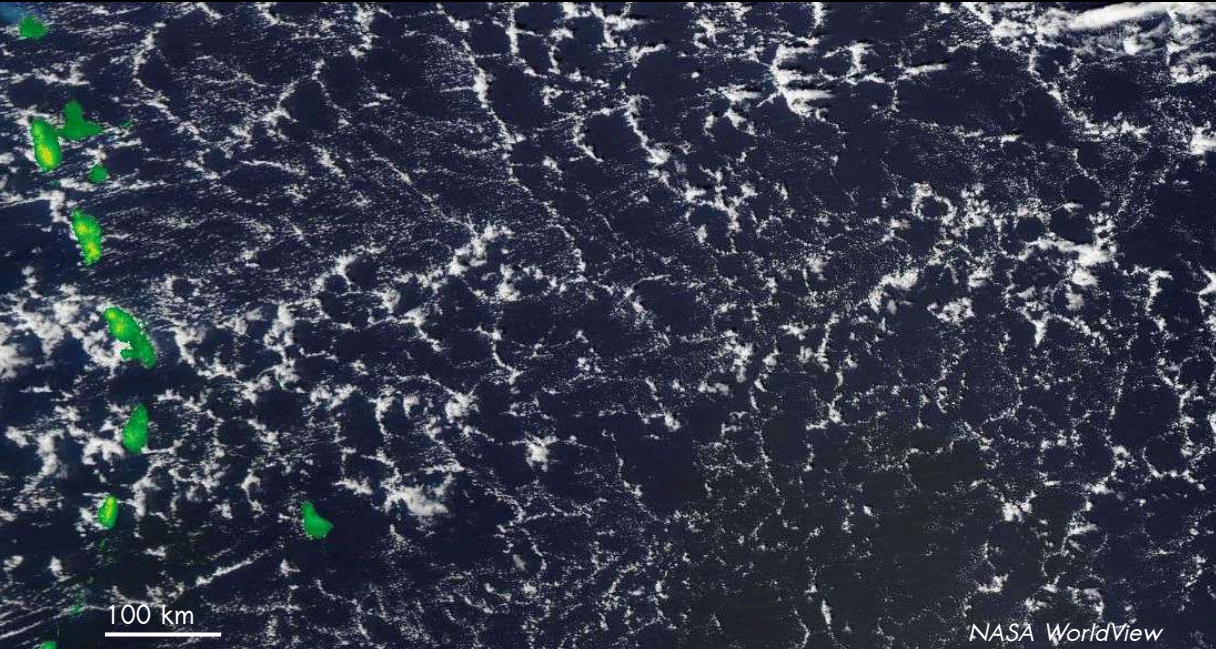


Photograph: R. Vogel (HALO)

MAESTRO/ORCESTRA field campaign
(Mesoscale organisation of tropical convection)
Cape Verde, Aug-Sep 2024

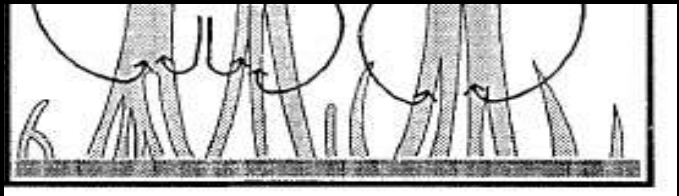


Un processus clé dans l'organisation spatiale des petits cumulus: la fusion des thermiques sous-nuageux



Weak thermal merging → High density of thermals
→ Strong cloud aggregation → Large cloud bases → Strong mass flux

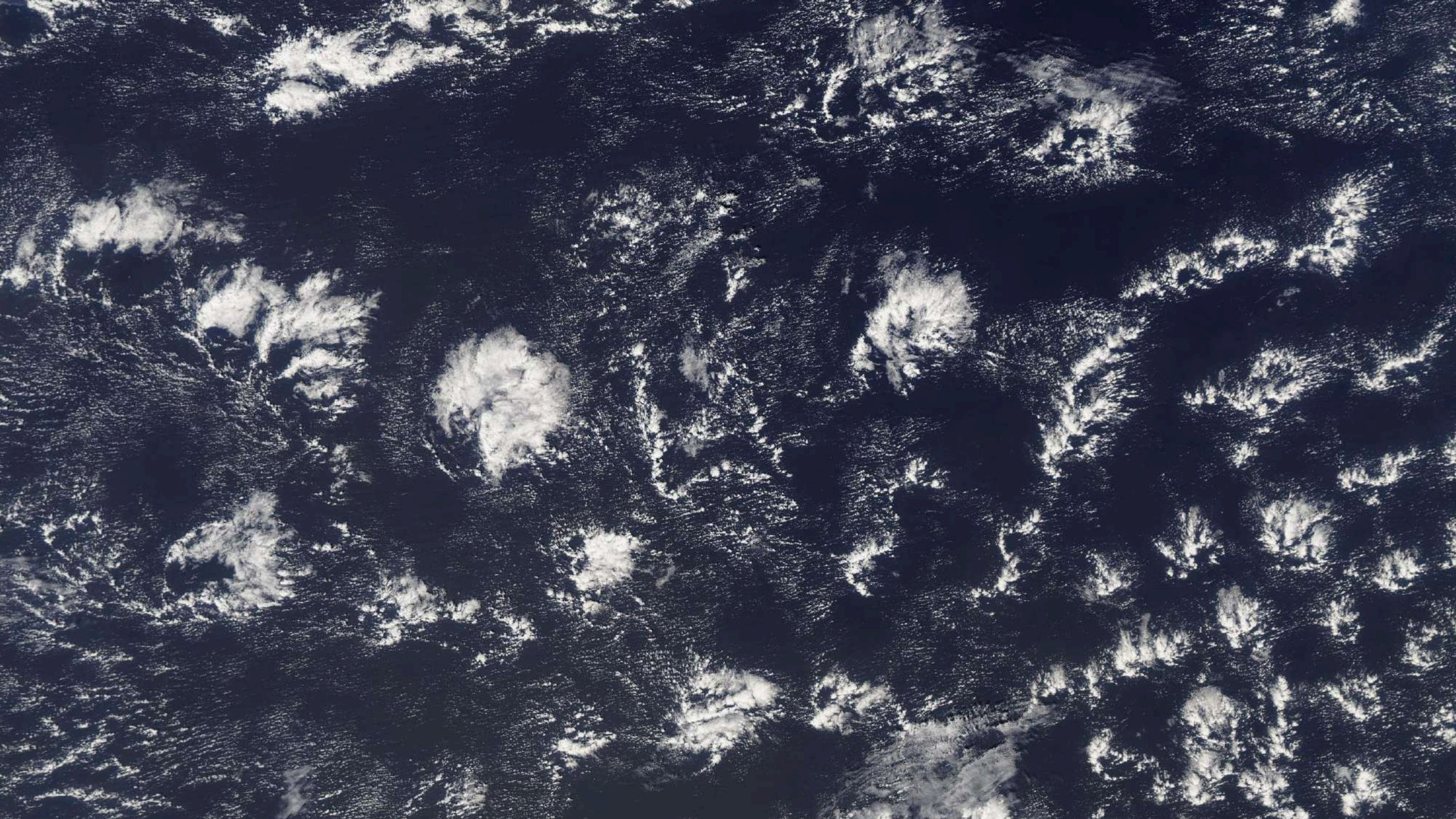
Strong thermal merging → Large but widely spaced thermals
→ Weak cloud aggregation but longer lifetime
→ Extended cloud anvil



→ Un rôle clé dans le contrôle de la géométrie des nuages, de l'agrégation des nuages et des circulations à mésoéchelle.
→ Réponse au réchauffement climatique?

Conclusion

- Les nuages jouent un **rôle majeur** dans l'énergétique du climat, la circulation atmosphérique, le contrôle des températures terrestres et la répartition des zones sèches et humides.
- Du fait de leur impact sur le bilan radiatif et leur dépendance aux conditions environnementales, ils peuvent exercer de puissantes **rétroactions climatiques**.
- La compréhension et la quantification de ces rétroactions s'améliore, mais il reste de nombreuses questions ouvertes.
- Parmi elles, le rôle de **l'organisation spatiale des nuages** dans les rétroactions climatiques et les extrêmes de pluie constitue un sujet de recherche passionnant et très actif.



Les nuages, source de précipitation

a) Distribution des pluies mesurée par TRMM

