

# Nuages, orages et changement climatique

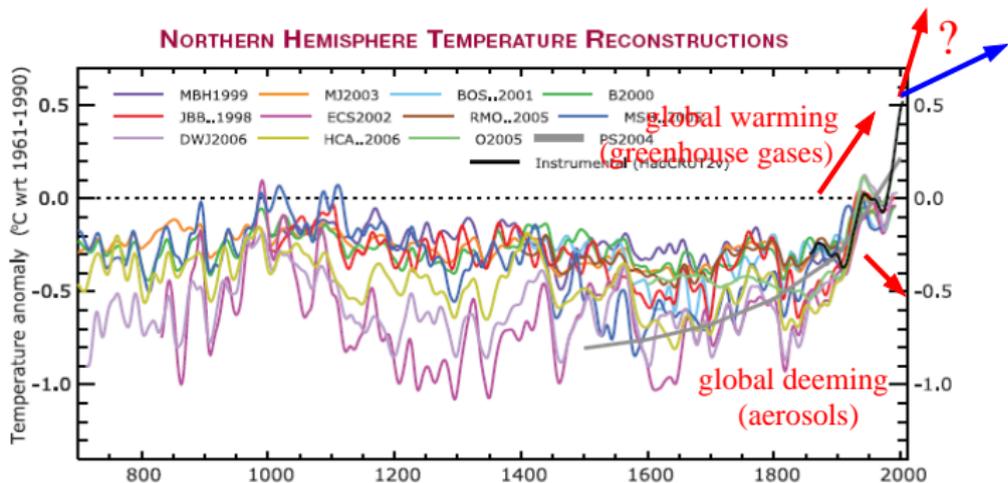
Camille Risi

Chercheuse CNRS  
au Laboratoire de Météorologie Dynamique (Paris)  
Camille.Risi@lmd.ipsl.fr

Ecole Eccoclim, Juin 2023

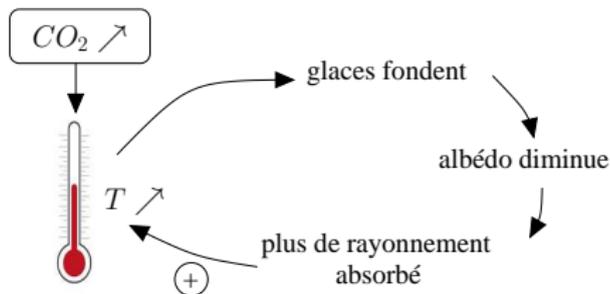
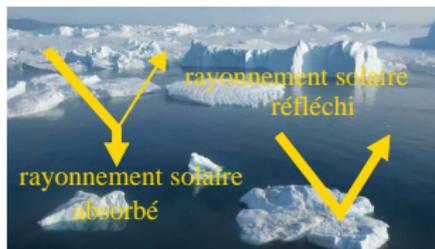


# Comment prédire le climat à venir?



- ▶ Prédiction vs Projections = prédiction conditionnée à un scénario d'évolution de concentrations
- ▶ Sensibilité climatique = réchauffement global pour  $2 \times \text{CO}_2$
- ▶ Exploiter le réchauffement historique? Les changements climatiques passés?
- ▶ Difficultés: différents forçages (aérosols, calottes) et sensibilité climatique changeante

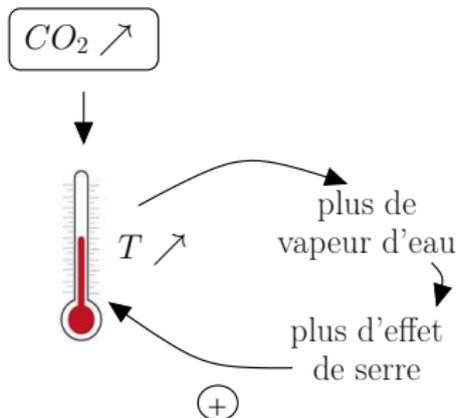
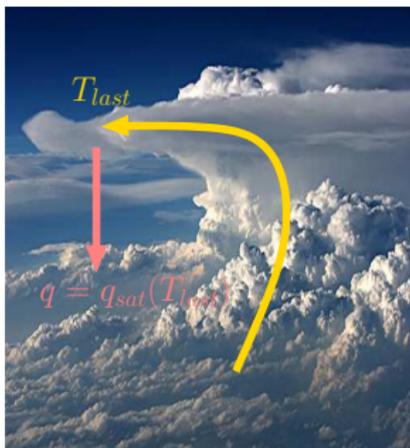
# Rétroactions climatiques: ex de la rétroaction des glaces



- ▶ Assez faible jusqu'à présent car fonte encore limitée
- ▶ importante pour les variations glaciaires-interglaciaires
- ▶ Les tropiques entre  $30^{\circ}S$ - $30^{\circ}N$  couvrent 50% de la surface terrestre

# La vapeur d'eau, principale rétroaction

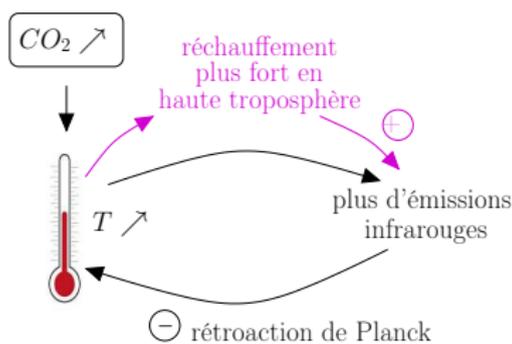
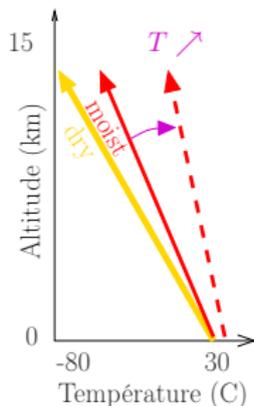
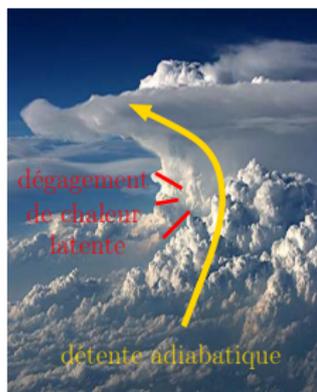
- ▶ vapeur d'eau  $\sim 2/3$  de l'effet de serre naturel
- ▶ Sa concentration n'est pas contrôlée par l'évaporation en surface, mais par la convection (vidéo)
- ▶  $q_{sat}(T)$  fonction exponentielle d'après Clausius-Clapeyron



⇒ Rétroaction positive

# La rétroaction du lapse rate

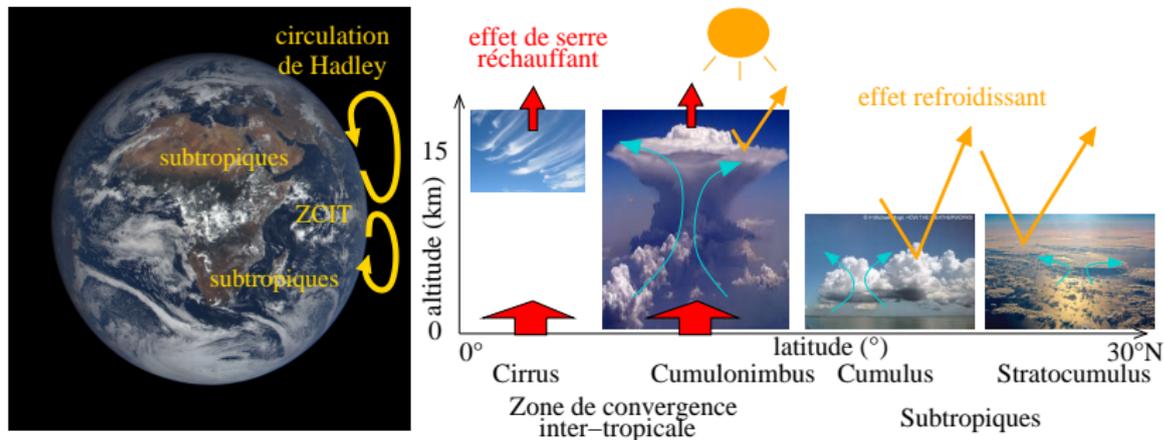
- ▶ lapse rate = gradient thermique dans la troposphère



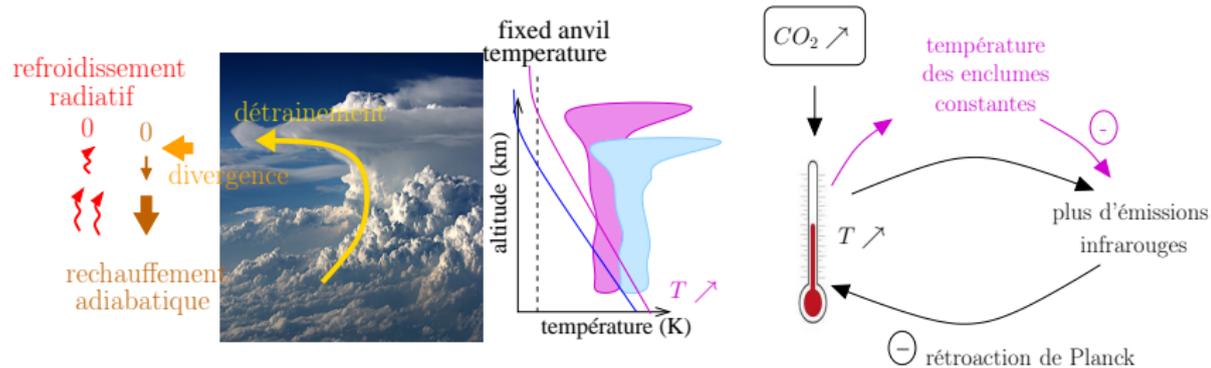
⇒ Rétroaction négative, mais dépassée par celle de la vapeur d'eau

# Les rétroactions nuageuses

- Importance des nuages dans le bilan radiatif de la Terre



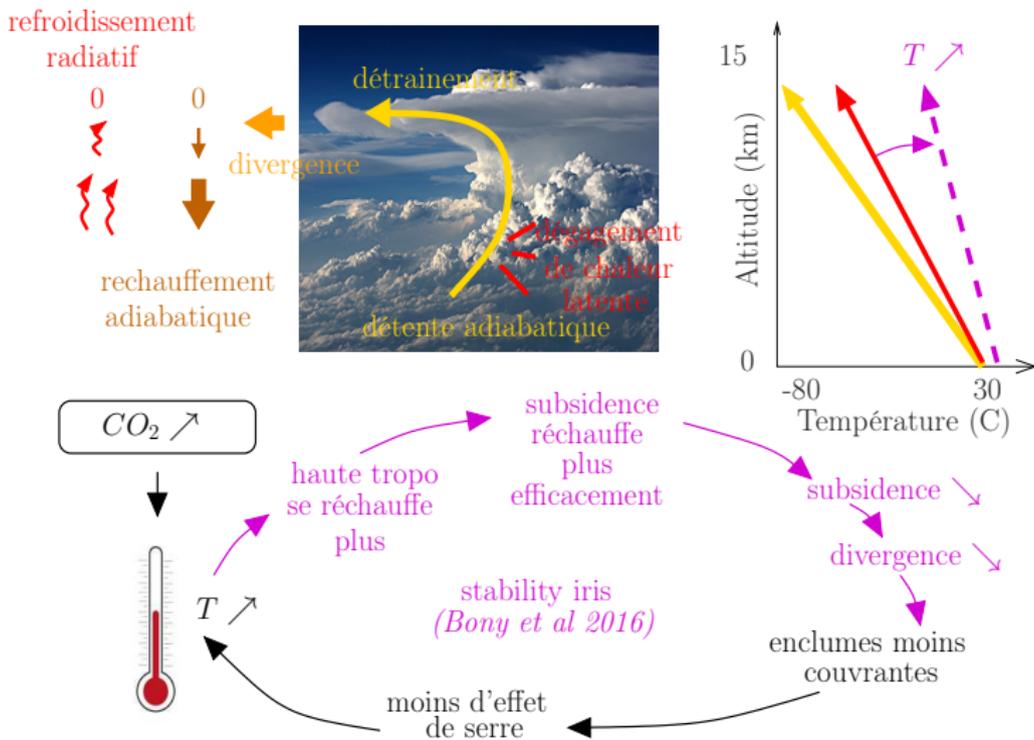
# La rétroaction de la hauteur des enclumes



- ▶ température des anvils = celle à laquelle refroidissement radiatif devient nul -> invariante (*Hartmann & Larson 2002*)
- ▶ En changement climatique, enclumes plus hautes mais toujours à même température

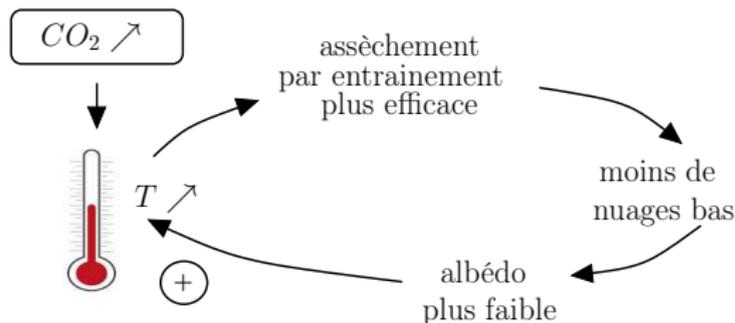
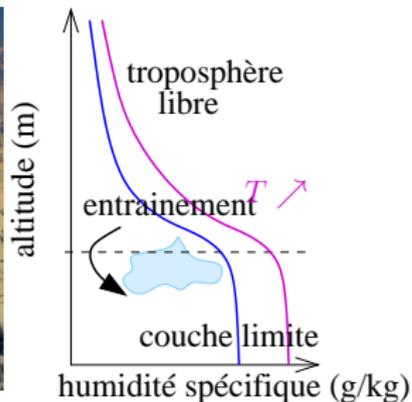
⇒ Rétroaction positive

# La rétroaction de la couverture des enclumes



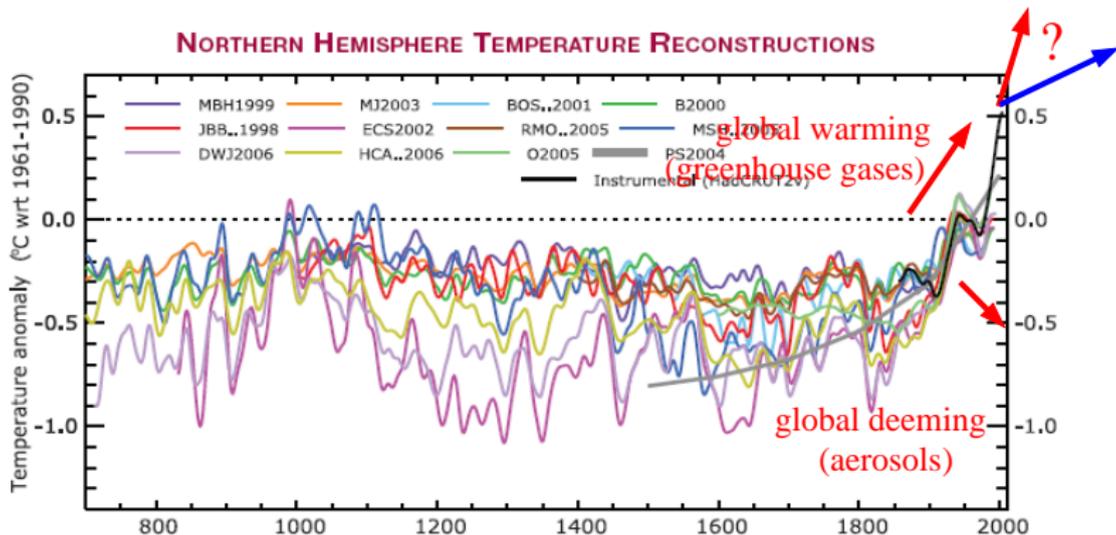
⇒ Rétroaction négative mais faible

# La rétroaction des nuages bas



⇒ Rétroaction positive mais amplitude incertaine

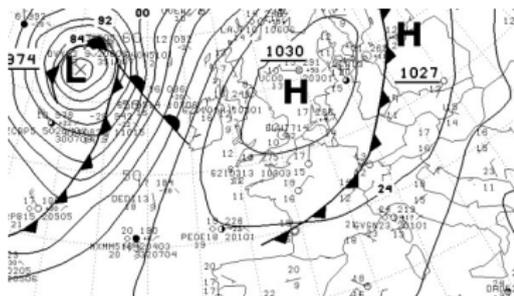
# Comment prédire le climat?



- ▶ Modélisation détaillée de l'atmosphère nécessaire

⇒ Modélisation numérique

# Historique de la modélisation numérique de la météo et du climat



Des calculs à la main... aux ordinateurs



*Richardson, 1922*

Du pattern-matching de cartes météo  
...aux équations physiques

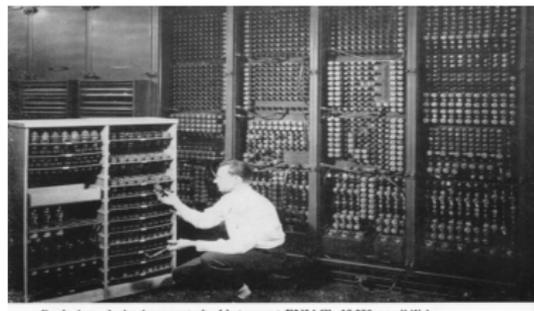
$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} - \rho \boldsymbol{\beta} \wedge \mathbf{u} + \mathbf{F},$$

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u},$$

$$c_p \frac{D}{Dt} \ln \theta = \frac{Q}{T},$$

$$p = \rho RT.$$

*Bjerknes, 1904*



Replacing a bad tube meant checking among ENIAC's 19,000 possibilities.

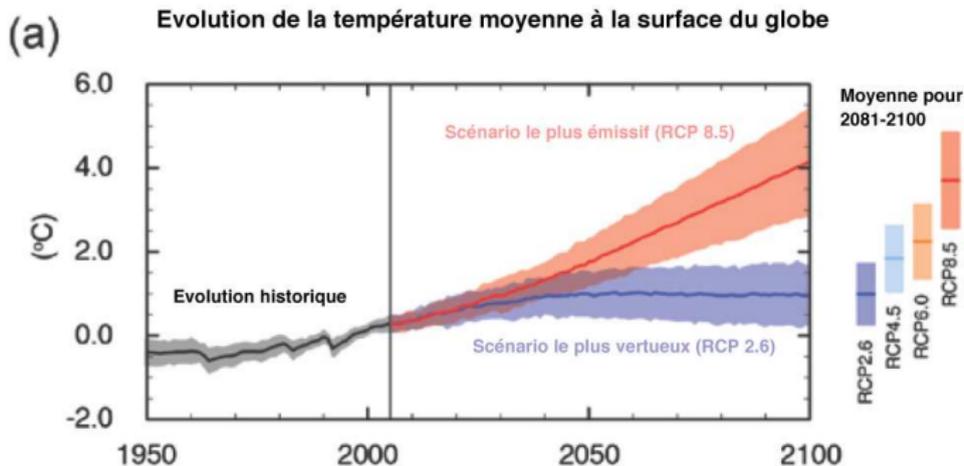
*von Neuman, 1950*

- -> utiliser ce type de modèles pour le climat?



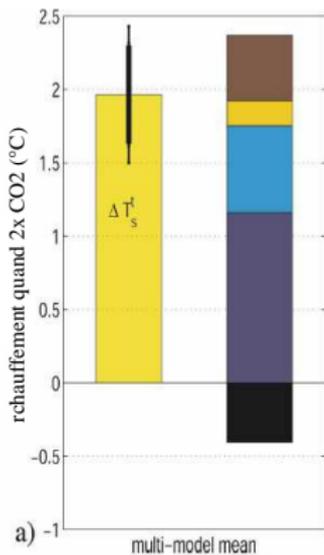
# Projections de température: aspects robustes et incertains

- ▶ CMIP (coupled model intercomparison project):  $\simeq 50$  modèles

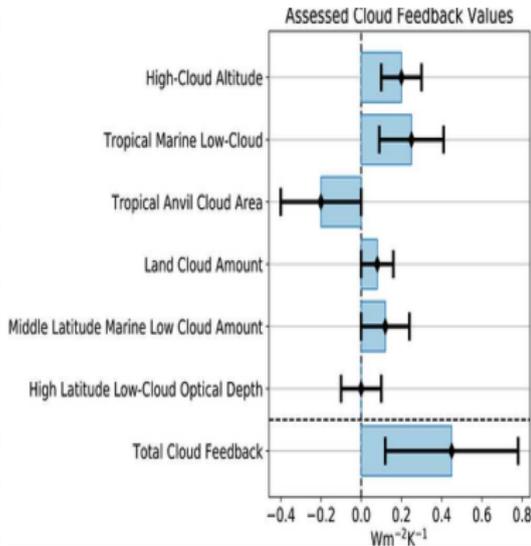
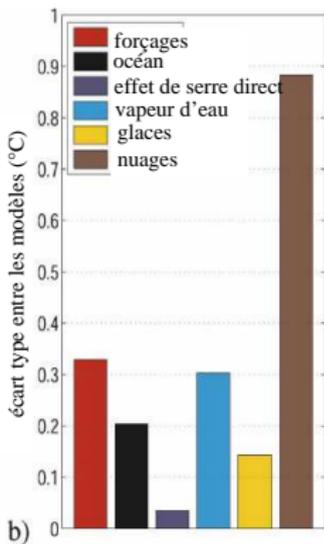


- ▶ tous les modèles s'accordent sur un réchauffement
- ▶ dispersion entre modèles sur le réchauffement exact: 3-6°C

# Sources d'incertitudes dans les projections de température?



*Dufresne and Bony 2008*

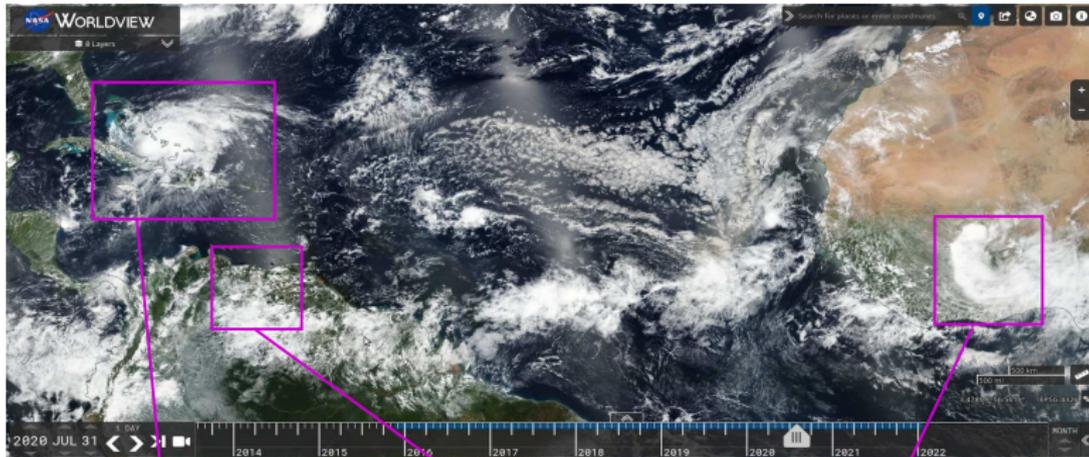


*Sherwood et al 2020*

- ▶ principale rétroaction= vapeur d'eau
- ▶ principale source d'incertitude= rétroactions nuageuses



# Les nuages d'orages



tropical cyclone



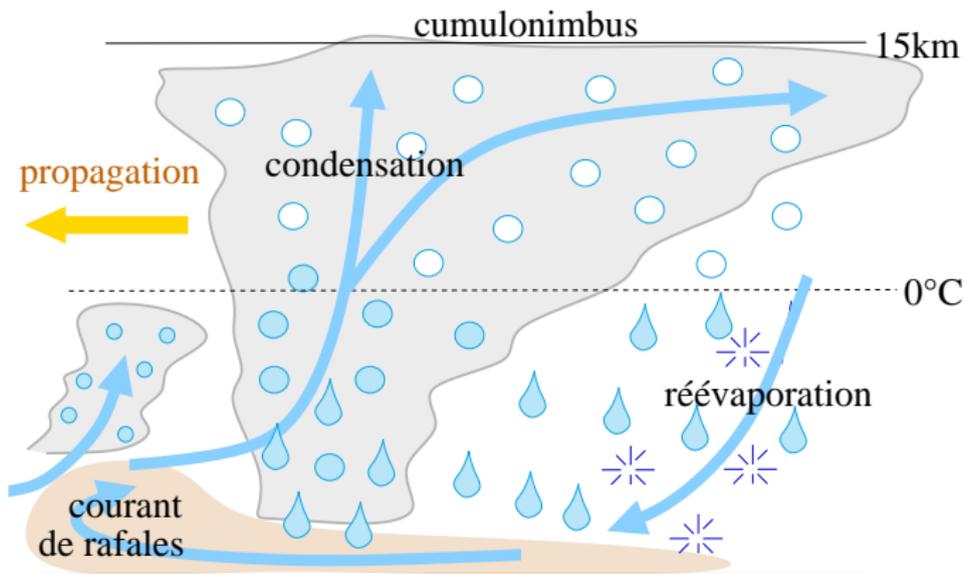
isolated cumulonimbus



squall line

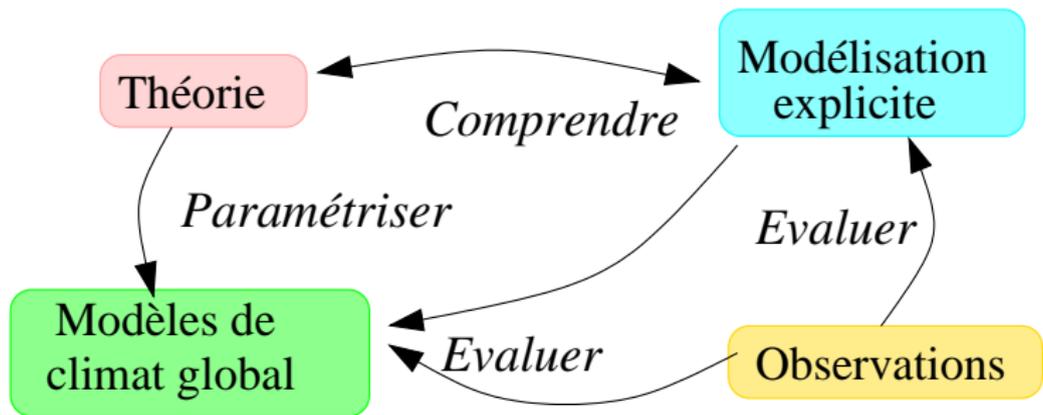
- Diversité d'organisation de la convection

# Systemes convectifs méso-échelle: ex de la ligne de grain



- ▶ Vidéo poches
- ▶ Dans les modèles: effet évaporation de la pluie, parfois poches (LMDZ), rarement organisation sous maille, jamais propagation

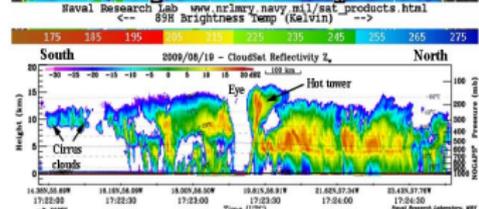
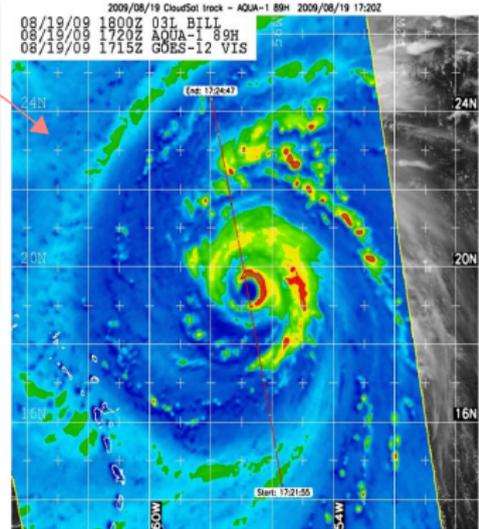
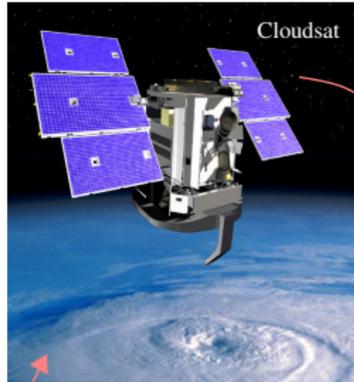
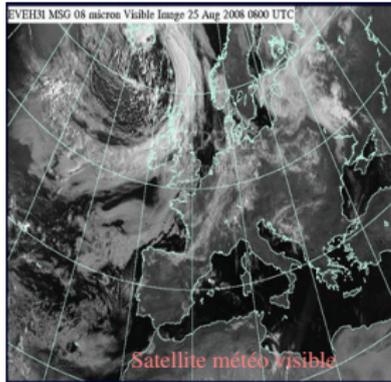
# Comment améliorer la représentation des nuages et orages dans les modèles de climat?



# Observations au sol

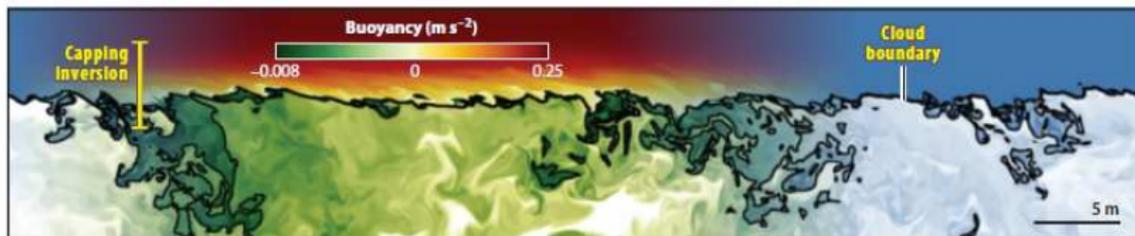
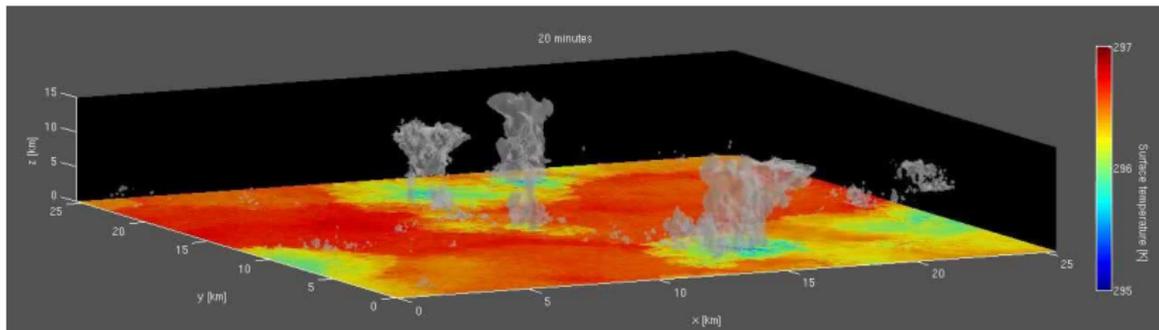


# Observations satellites



# Simulations haute résolution

- ▶ CRM (cloud resolving model): qq km
- ▶ LES (large eddy simulations): 10-100m (vidéo)
- ▶ DNS (direct numerical simulations): qq cm

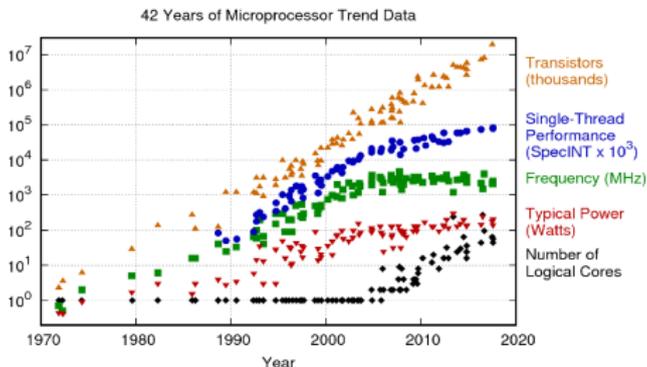


- ▶ petit domaine, petite période



# Que peut apporter l'intelligence artificielle?

- ▶ a-t-on atteint les limites des progrès de puissance de calcul?



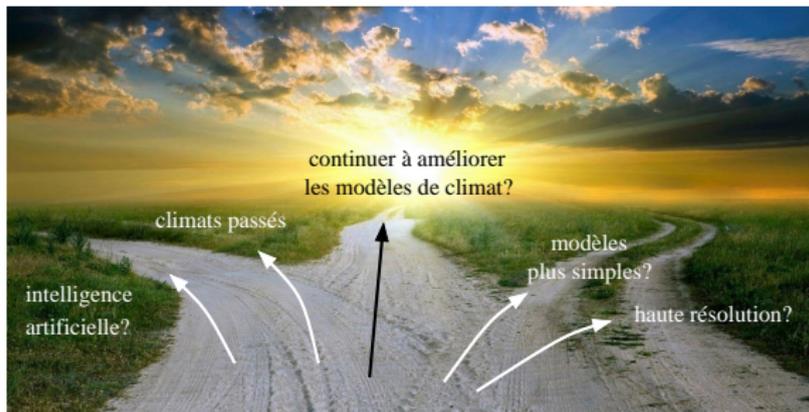
*Balaji 2020*

-> utiliser la puissance de calcul pour l'intelligence artificielle?

- ▶ apprentissage sur simulations haute résolution?
- ▶ retour vers du "pattern matching"? Problème: valeur prédictive si le climat change?

# Conclusion

- ▶ Après plus de 60 ans de modélisation climatique:
  - ▶ meilleure compréhension des processus en jeu
  - ▶ meilleure confiance dans certains aspects des projections
  - ▶ incertitudes récalcitrantes
- ▶ Recherche climatique à la croisée des chemins



- ▶ Ces incertitudes ne remettent pas en cause la réalité du changement climatique, et sont indépendantes de la réponse politique à y apporter