

Nuages, orages et changement climatique

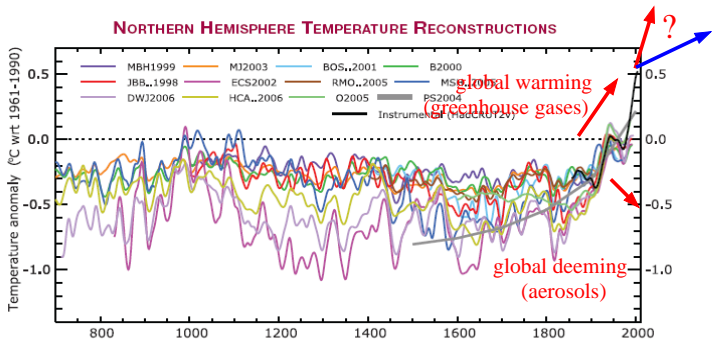
Camille Risi

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

Ecole Eccoclim, Juin 2023

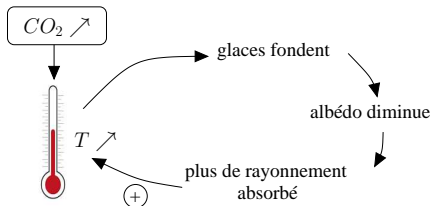
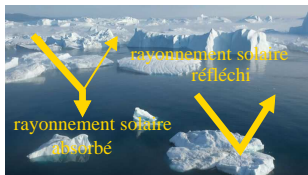


Comment prédire le climat à venir?



- ▶ Prédictions 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

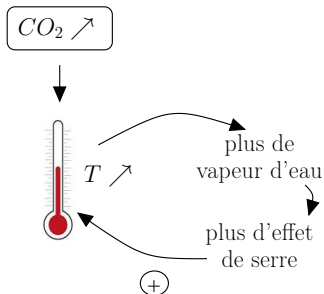
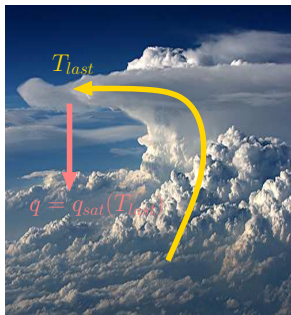
Rétroactions climatiques: ex de la rétroaction des glaces



- ▶ 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

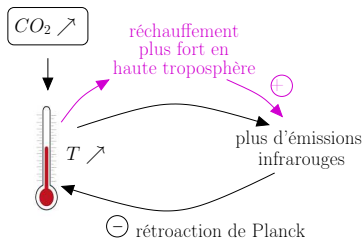
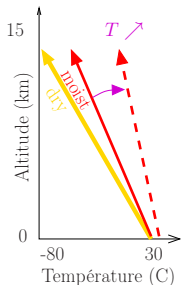
- ▶ vapeur d'eau $\sim 2/3$ de l'effet de serre naturel
- ▶ Sa concentration n'est pas contrôlée par l'évaporation en surface, mais par la convection (vidéo)
- ▶ $q_{sat}(T)$ fonction exponentielle d'après Clausius-Clapeyron



⇒ Rétroaction positive

La rétroaction du lapse rate

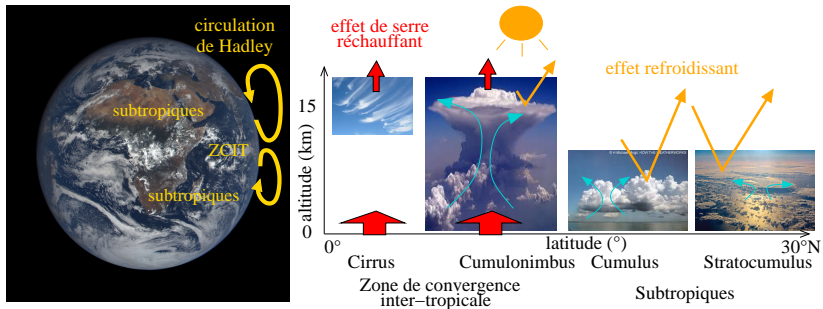
- ▶ lapse rate = gradient thermique dans la troposphère



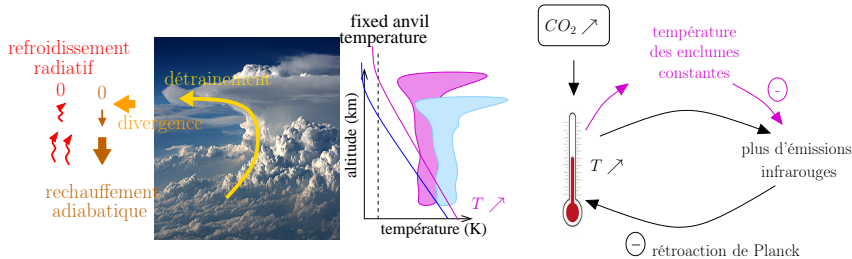
⇒ Rétroaction négative, mais dépassée par celle de la vapeur d'eau

Les rétroactions nuageuses

- Importance des nuages dans le bilan radiatif de la Terre



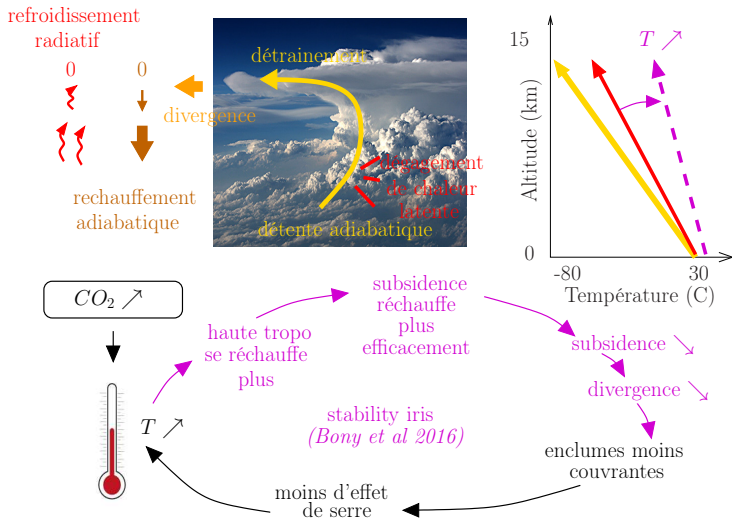
La rétroaction de la hauteur des enclumes



- ▶ 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

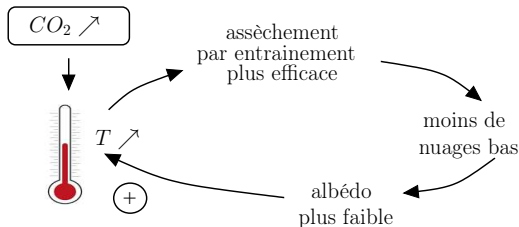
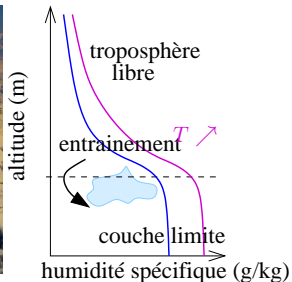
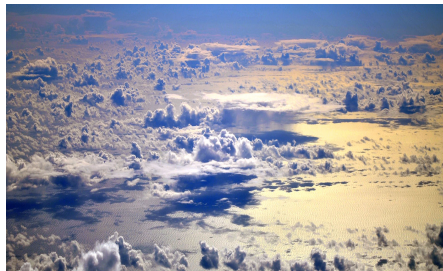
⇒ Rétroaction positive

La rétroaction de la couverture des enclumes



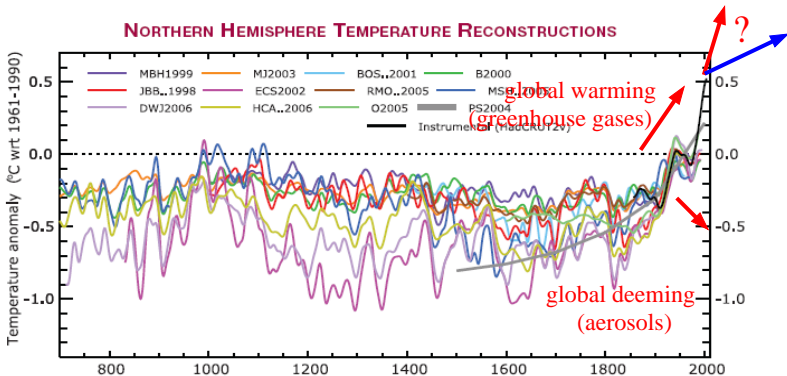
⇒ Rétroaction négative mais faible

La rétroaction des nuages bas



⇒ Rétroaction positive mais amplitude incertaine

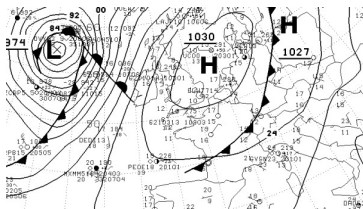
Comment prédire le climat?



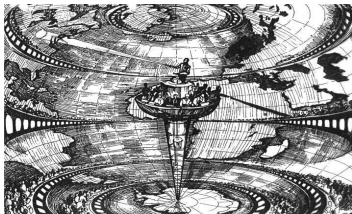
- ▶ Modélisation détaillée de l'atmosphère nécessaire

⇒ 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

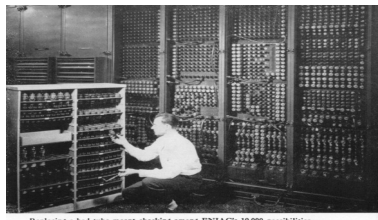
$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} - \rho \boldsymbol{\beta} \wedge \mathbf{u} + \mathbf{F},$$

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

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

$$p = \rho RT.$$

Bjerknes, 1904

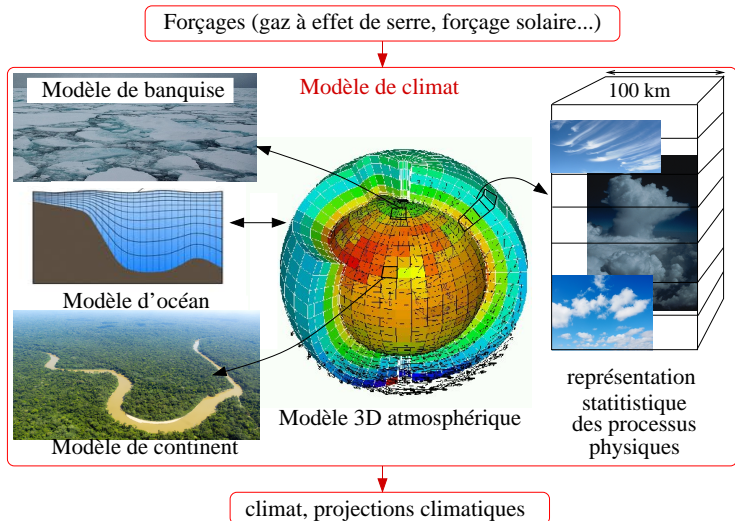


Replacing a bad tube meant checking among ENIAC's 19,000 possibilities.

von Neuman, 1950

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

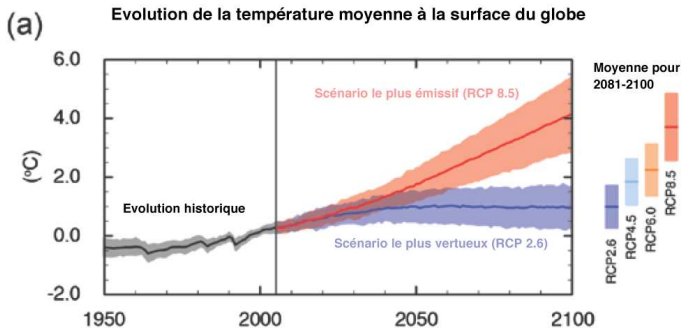
Modèles numériques globaux de climat



- le maillon faible: les nuages!

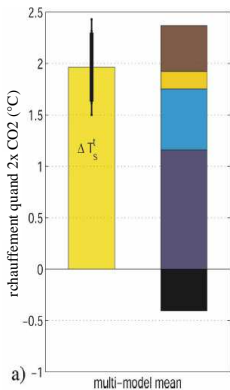
Projections de température: aspects robustes et incertains

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

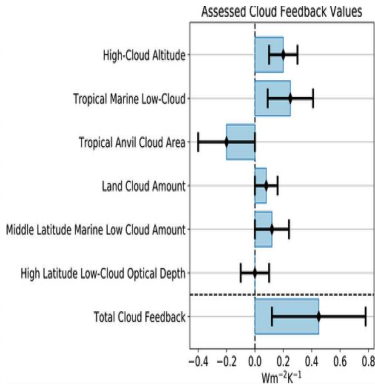
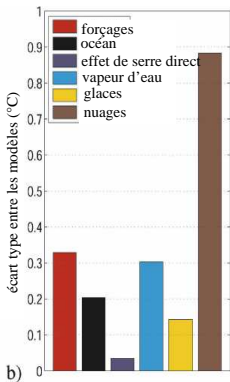


- ▶ tous les modèles s'accordent sur un réchauffement
- ▶ dispersion entre modèles sur le réchauffement exact: 3-6°C

Sources d'incertitudes dans les projections de température?



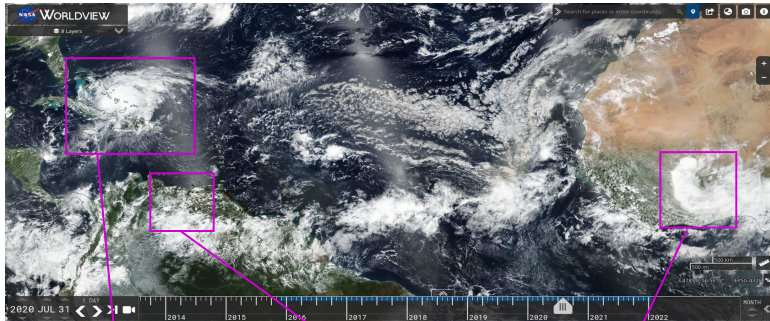
Dufresne and Bony 2008



Sherwood et al 2020

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

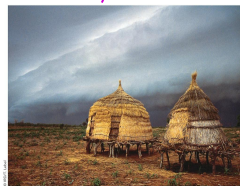
Les nuages d'orages



tropical cyclone



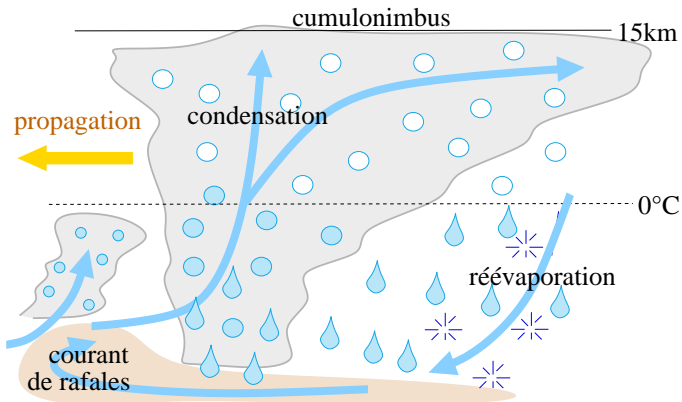
isolated cumulonimbus



squall line

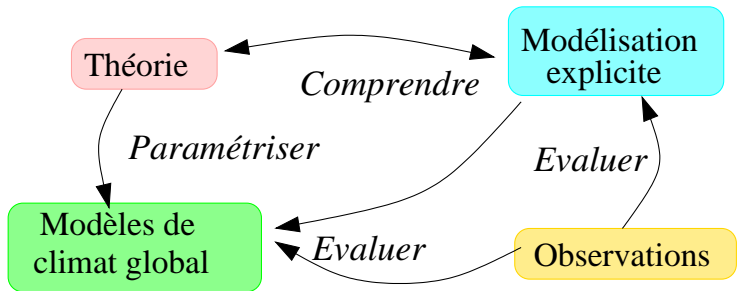
- Diversité d'organisation de la convection

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

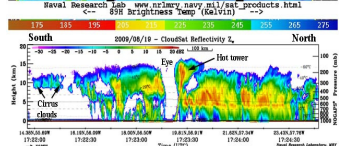
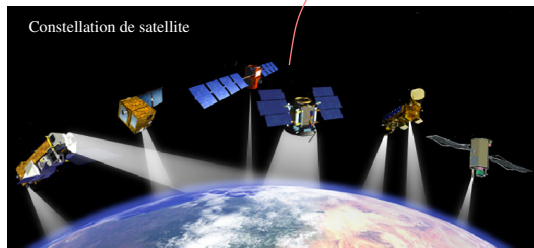
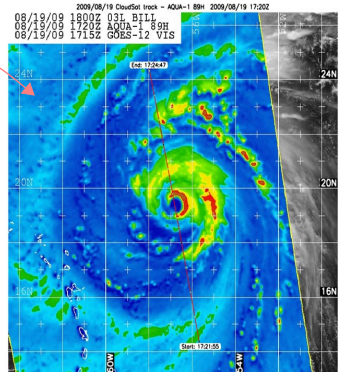
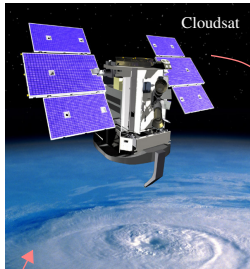
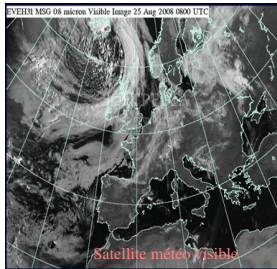
Comment améliorer la représentation des nuages et orages dans les modèles de climat?



Observations au sol

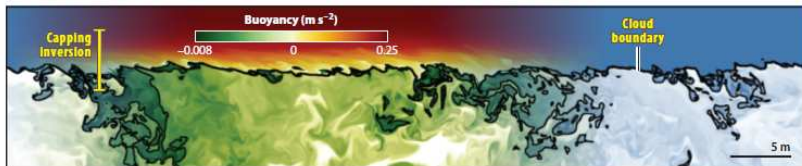
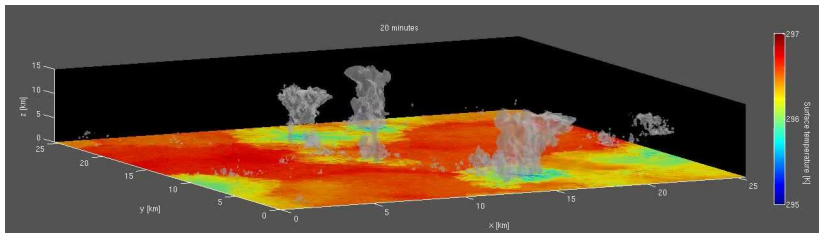


Observations satellites



Simulations haute résolution

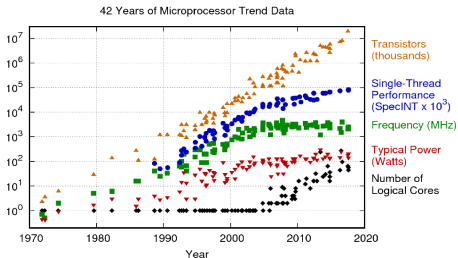
- ▶ CRM (cloud resolving model): qq km
- ▶ LES (large eddy simulations): 10-100m (vidéo)
- ▶ DNS (direct numerical simulations): qq cm



- ▶ 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?

