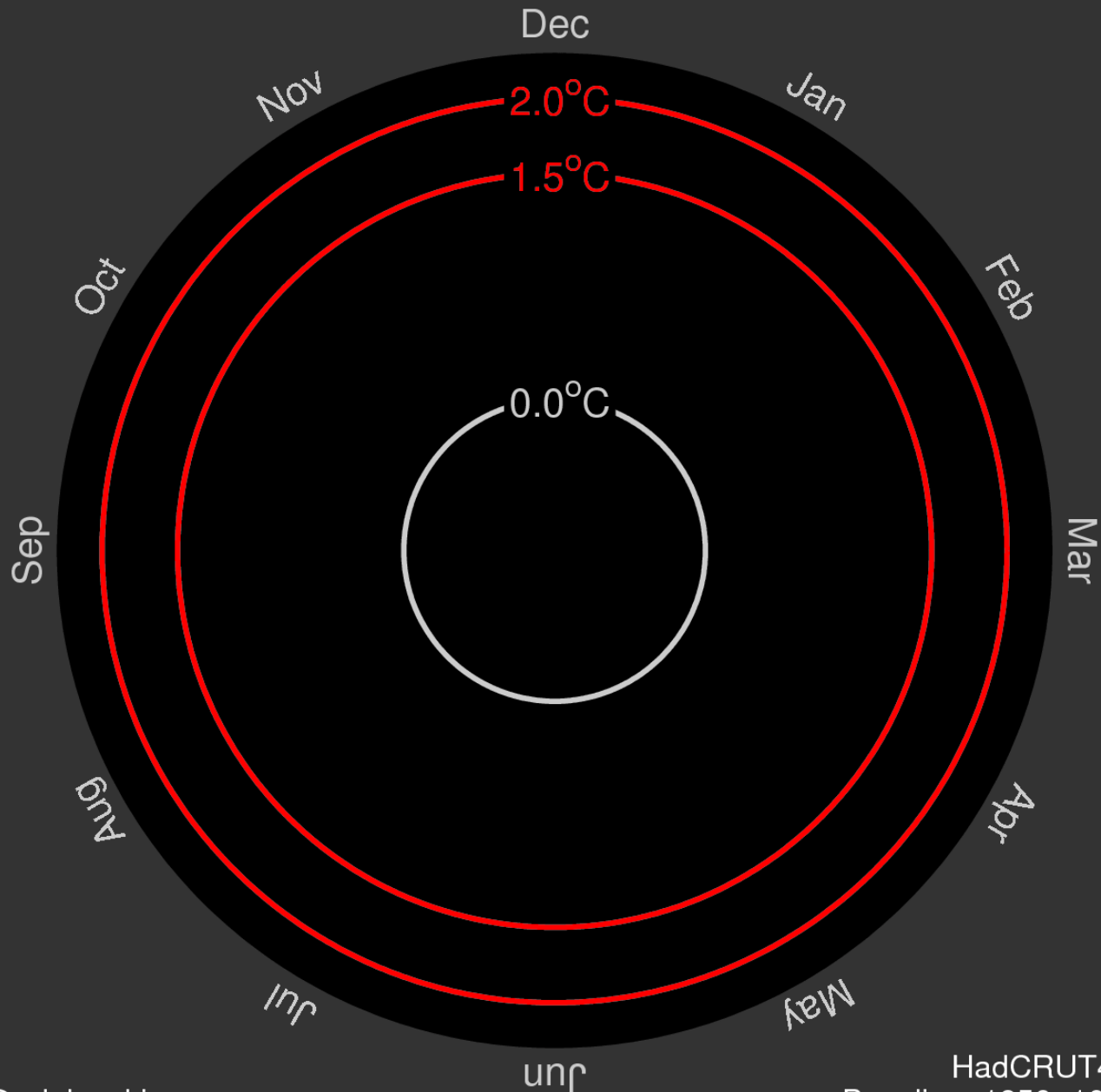


Introduction à la modélisation du climat

Didier Swingedouw
didier.swingedouw@u-bordeaux1.fr

Onglet vulgarisation de mon site (google Swingedouw)

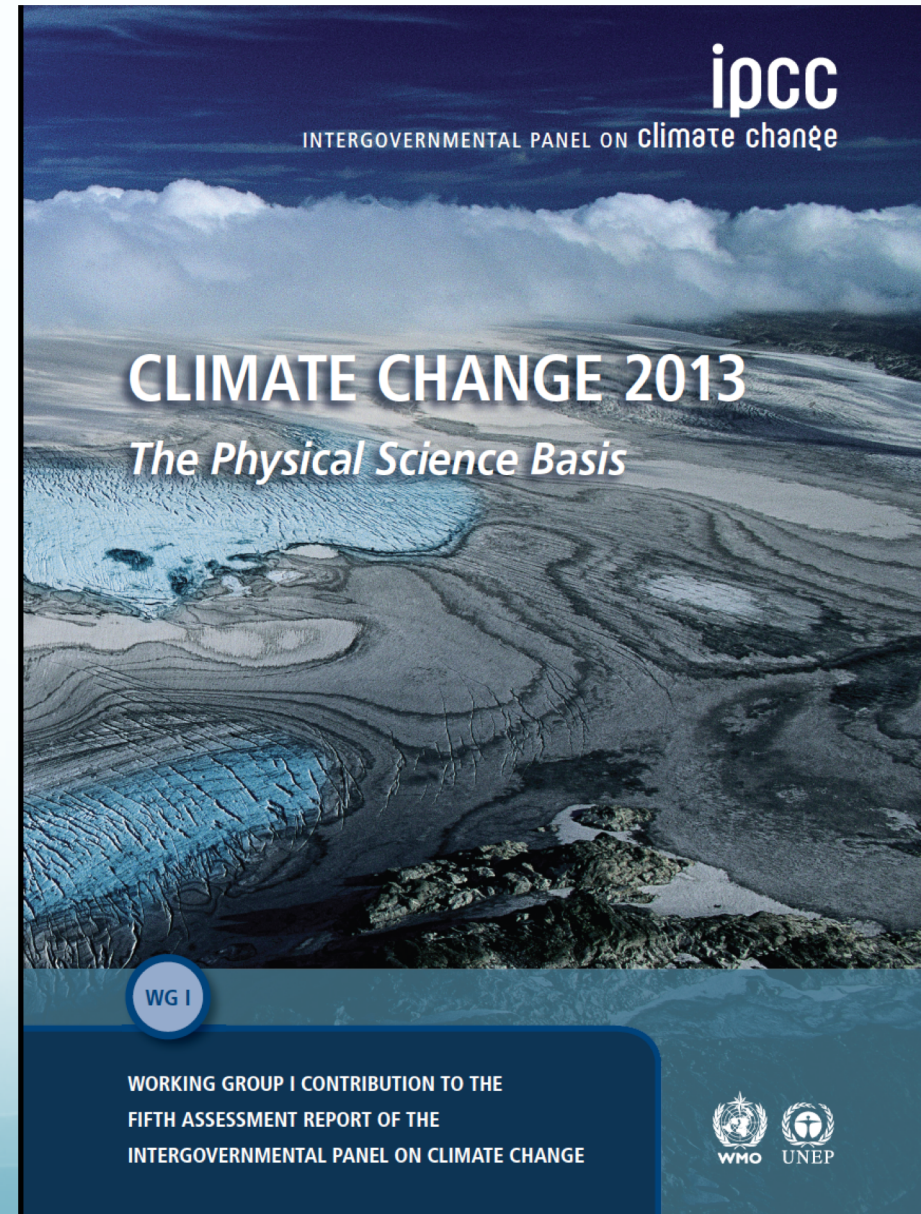
Global temperature change (1850–2016)



Avez-vous déjà entendu parler
de modélisation du climat ?

Climat et modèles : un enjeu d'actualité

- **Sortie du 5^e rapport du Groupement Intergouvernemental d'experts climatiques (GIEC, IPCC en anglais)**
- **Disponible gratuitement en pdf**
- **2015 : année du climat en France avec négociation à Paris**
- **2016 : ratification de l'accord de Paris**



Climat et modèles : un enjeu d'actualité



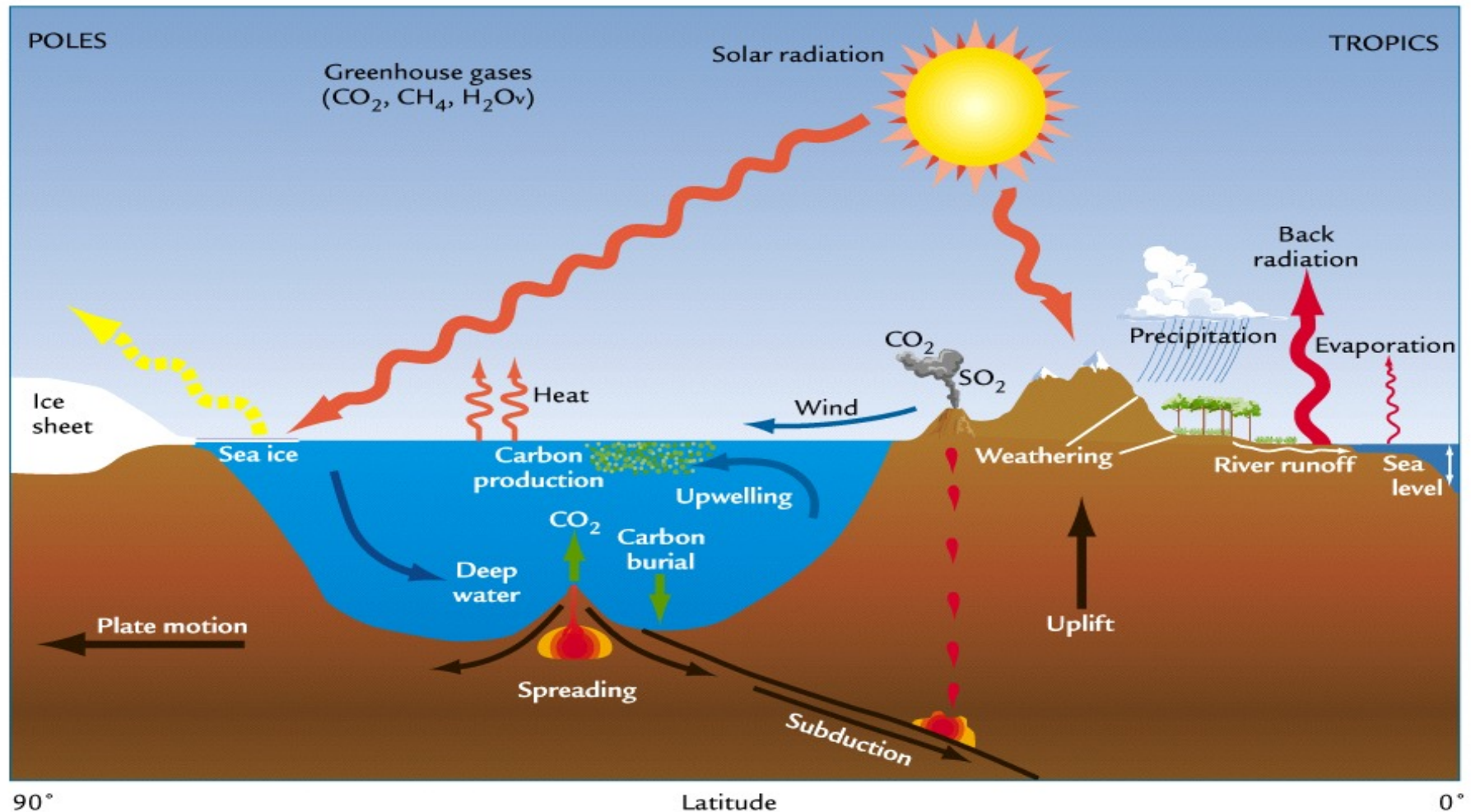
Plan du cours

- Description générale de la dynamique du climat
- Qu'est-ce qu'un modèle de climat
- Quelques applications

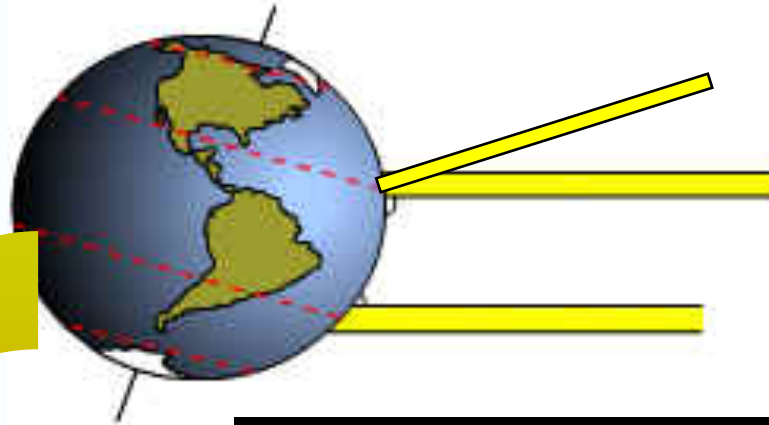
Qu'est-ce que le climat ?

Présence de :

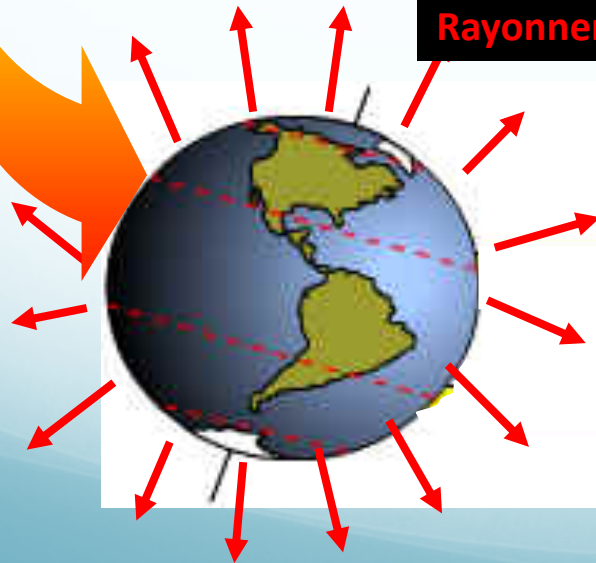
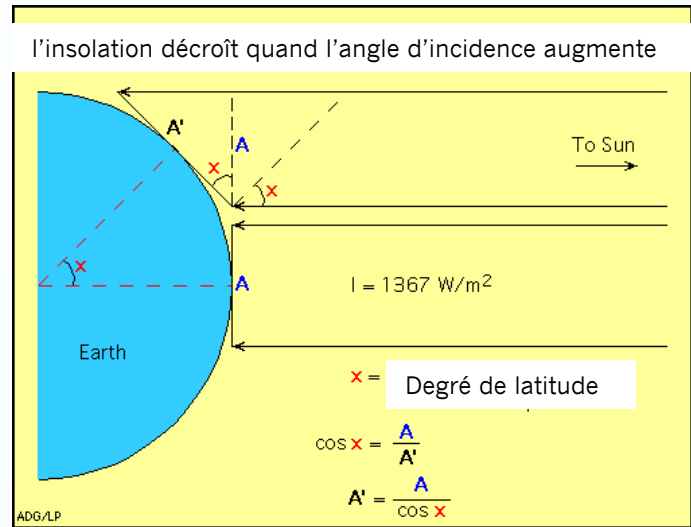
- Forçage : élément extérieur au système climatique qui force son évolution
- Rétroaction : élément interne au système qui peut agir sur une action qui l'a excité



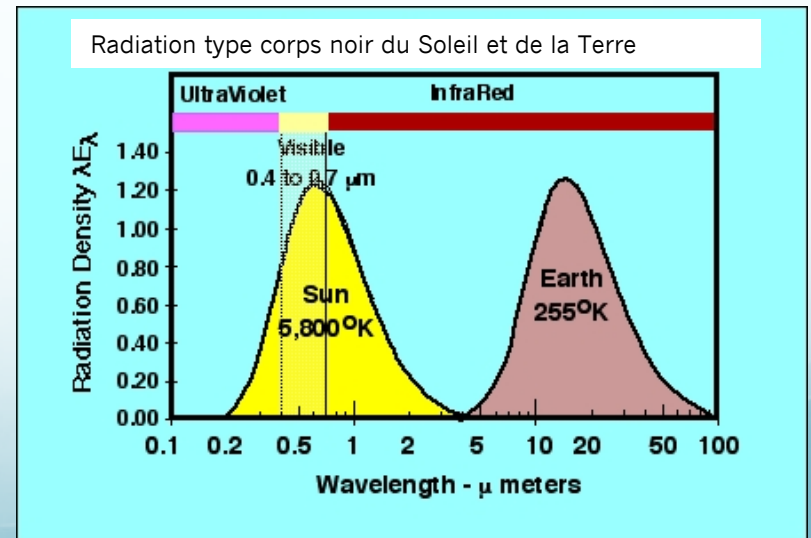
Equilibre radiatif de la Terre



Rayonnement directionnel

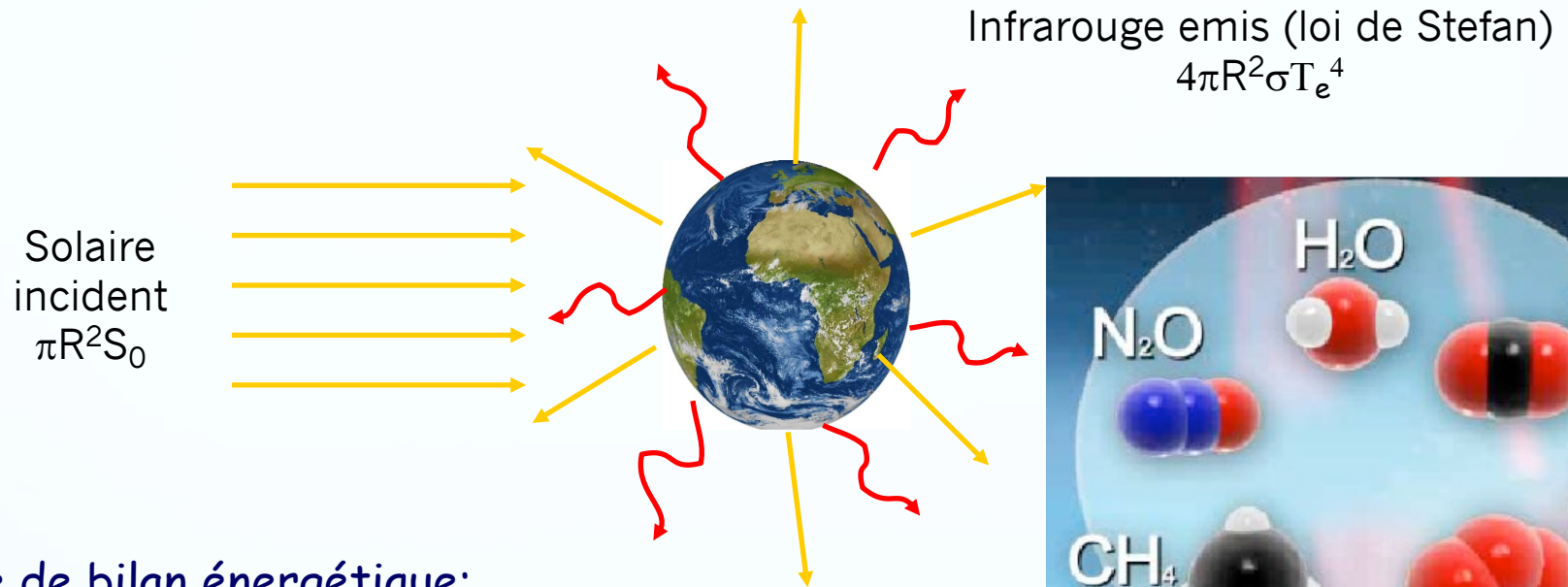


Rayonnement isotrope



Rayonnement terrestre (IR)

Un modèle simple de Terre



Modèle de bilan énergétique:

$$S_0 (1 - \alpha) \pi R^2 = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$$

$$S_0 (1 - \alpha) / 4 = \sigma T_e^4$$

Avec $S_0 = 1370 \text{ W/m}^2$

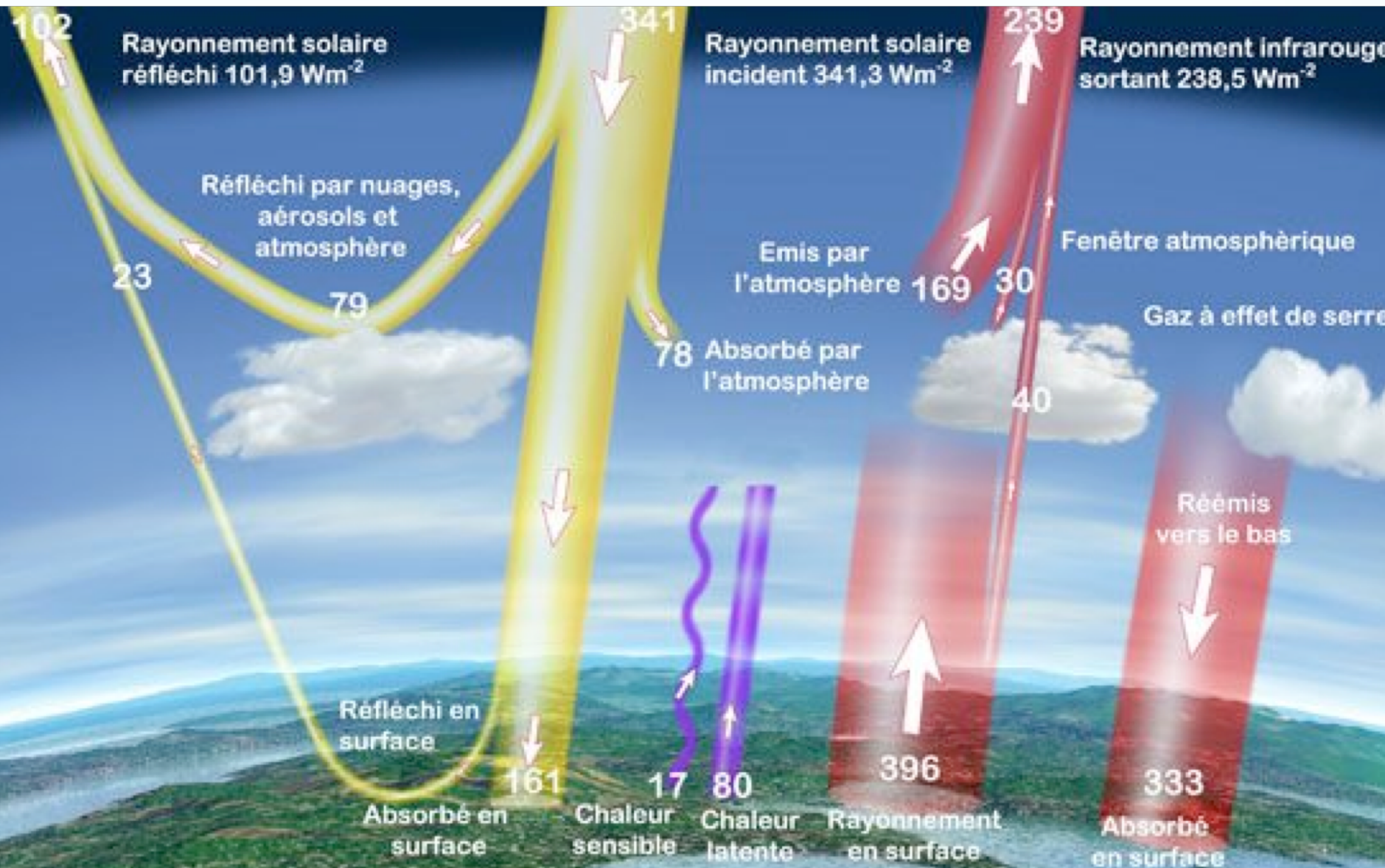
$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

$$\rightarrow T_e = 255\text{K}$$

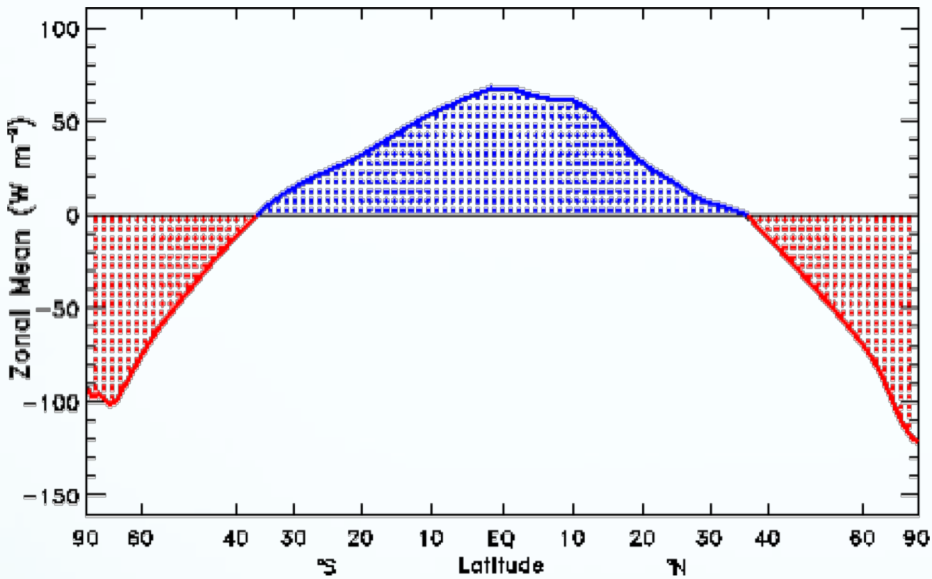
Effet de serre:

$$T_s = 288\text{K}$$

Bilan radiatif "réel"

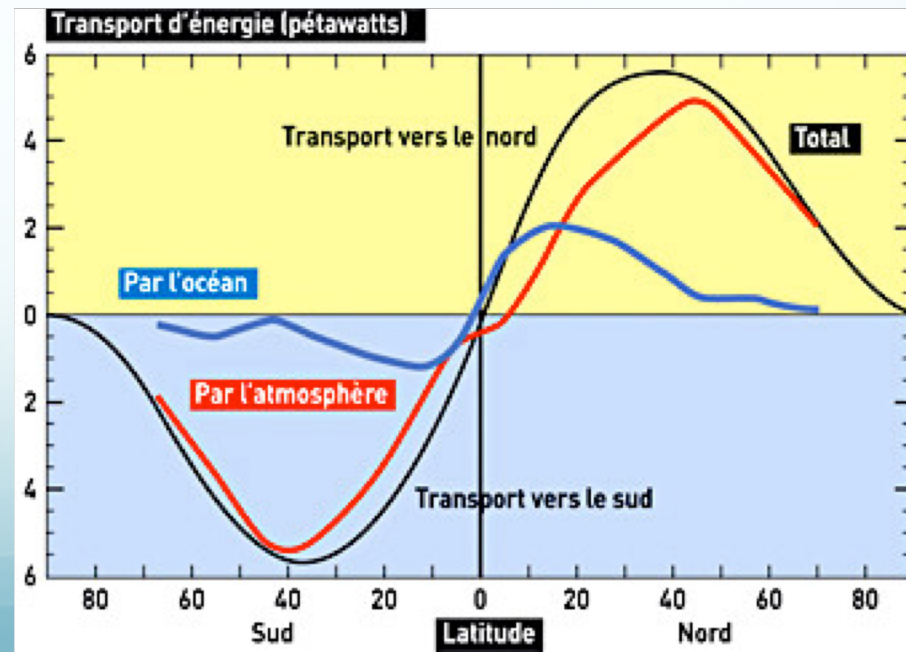


Transports d'énergie par l'atmosphère et l'océan

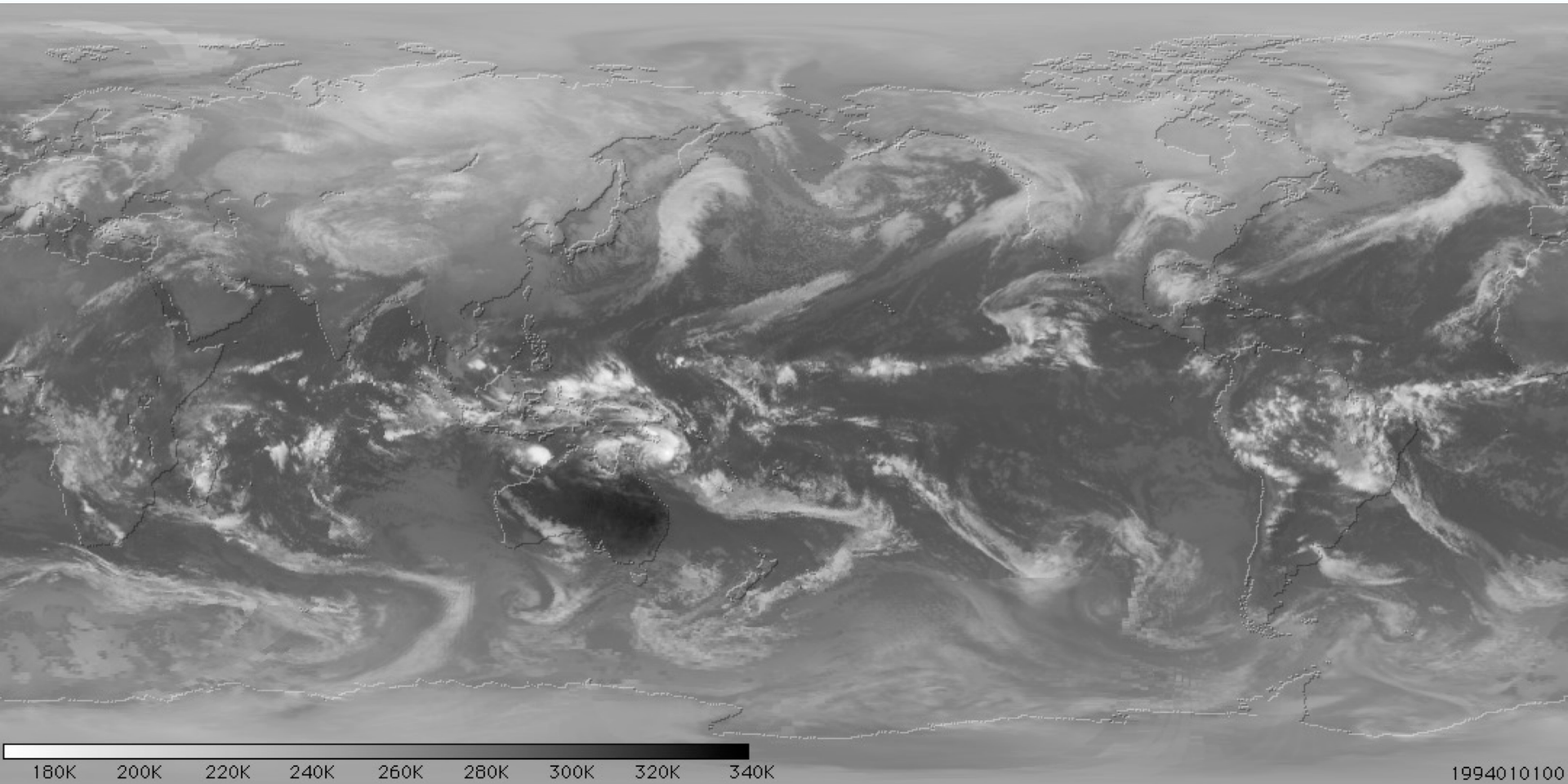


Transport vers le Nord par l'atmosphère et par l'océan (PW)

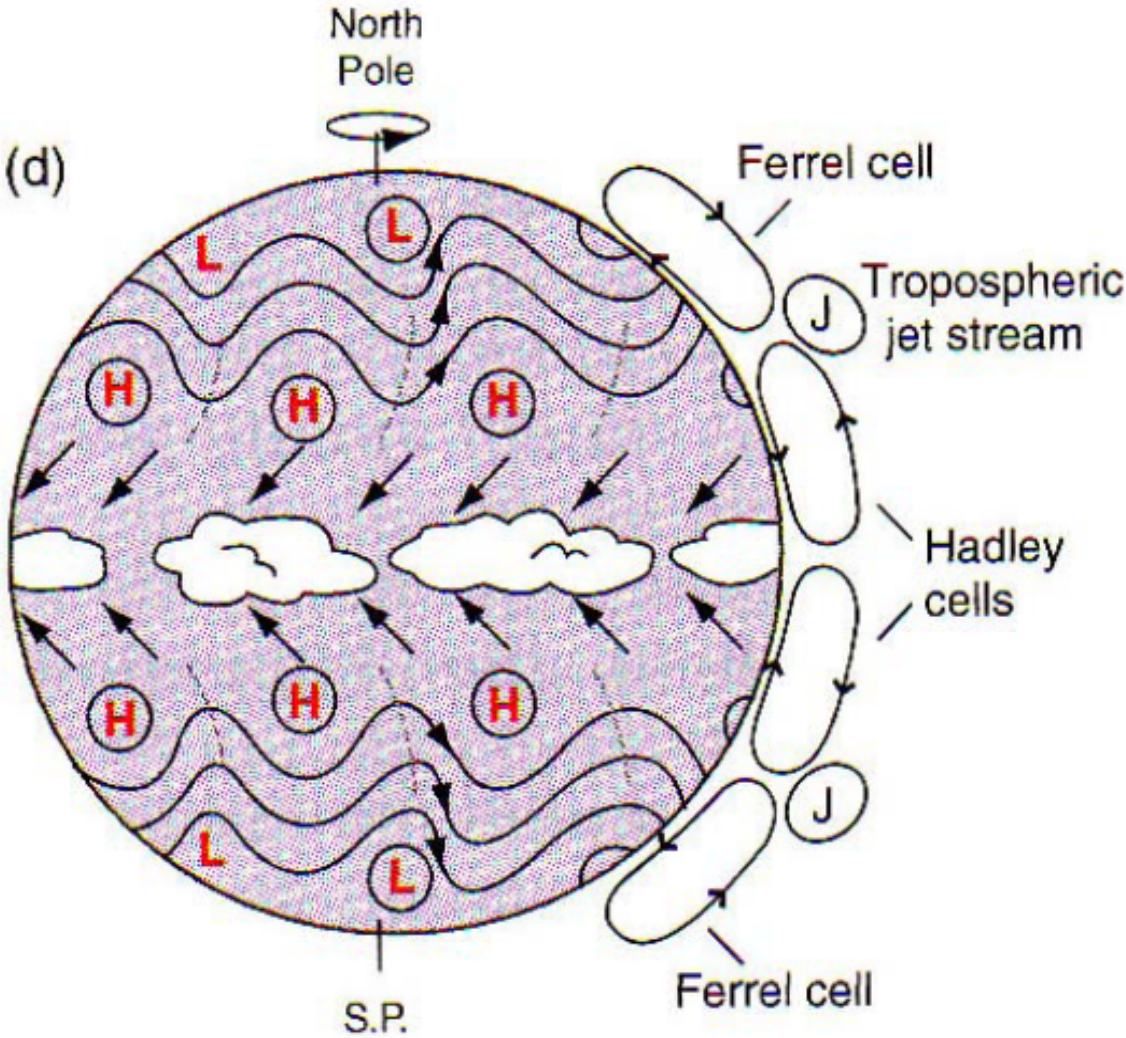
Bilan énergétique au sommet de l'atmosphère (moyenne zonale)



Circulation atmosphérique



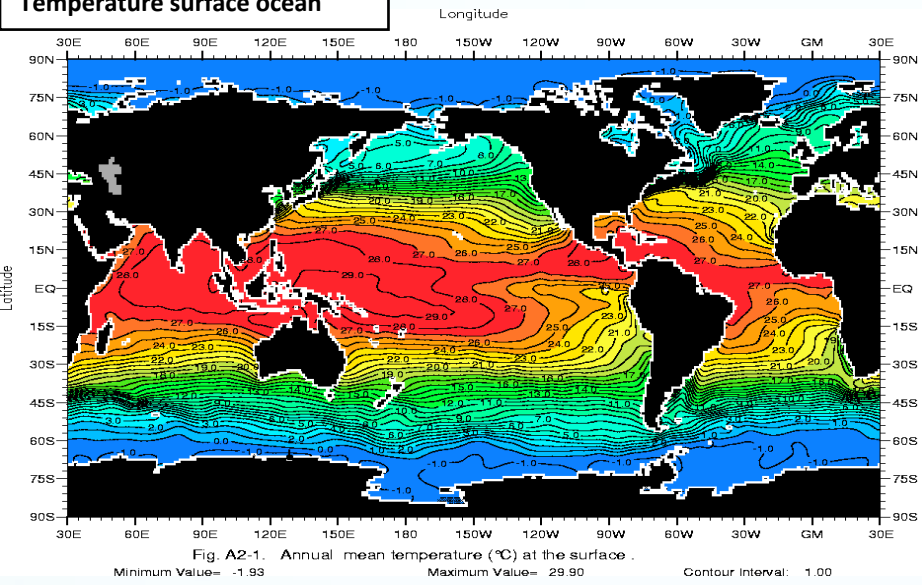
Circulation atmosphérique



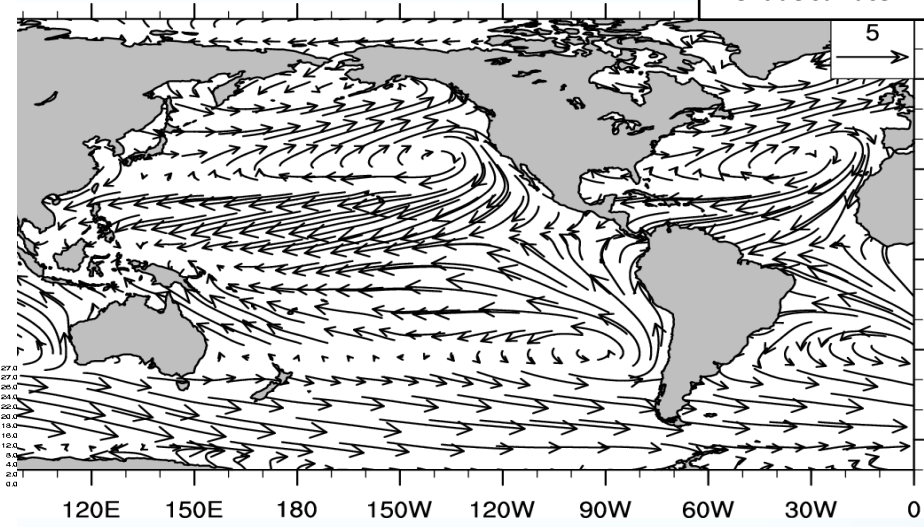
Circulation océanique

Circulation océanique

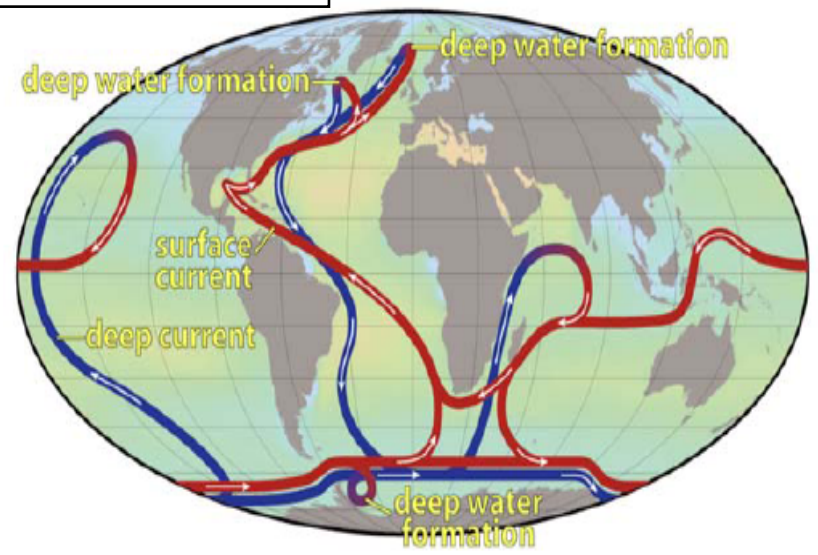
Température surface océan



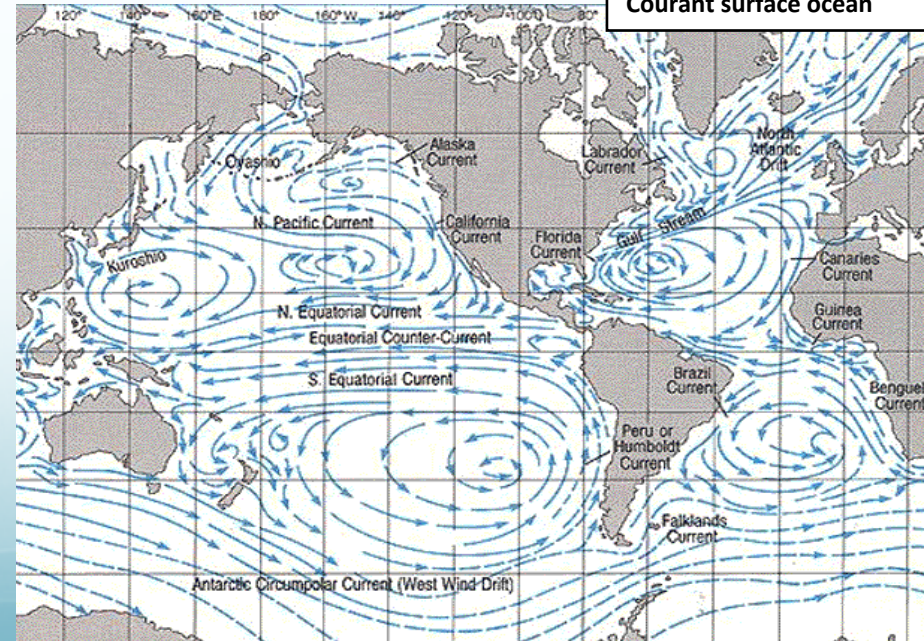
Vent de surface



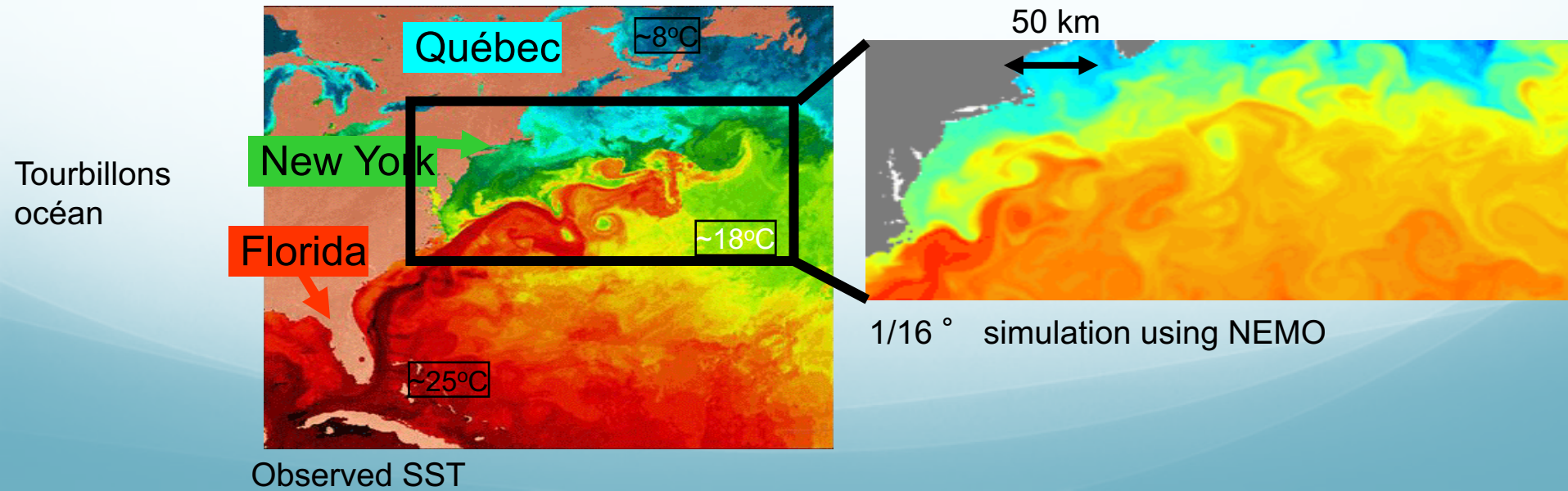
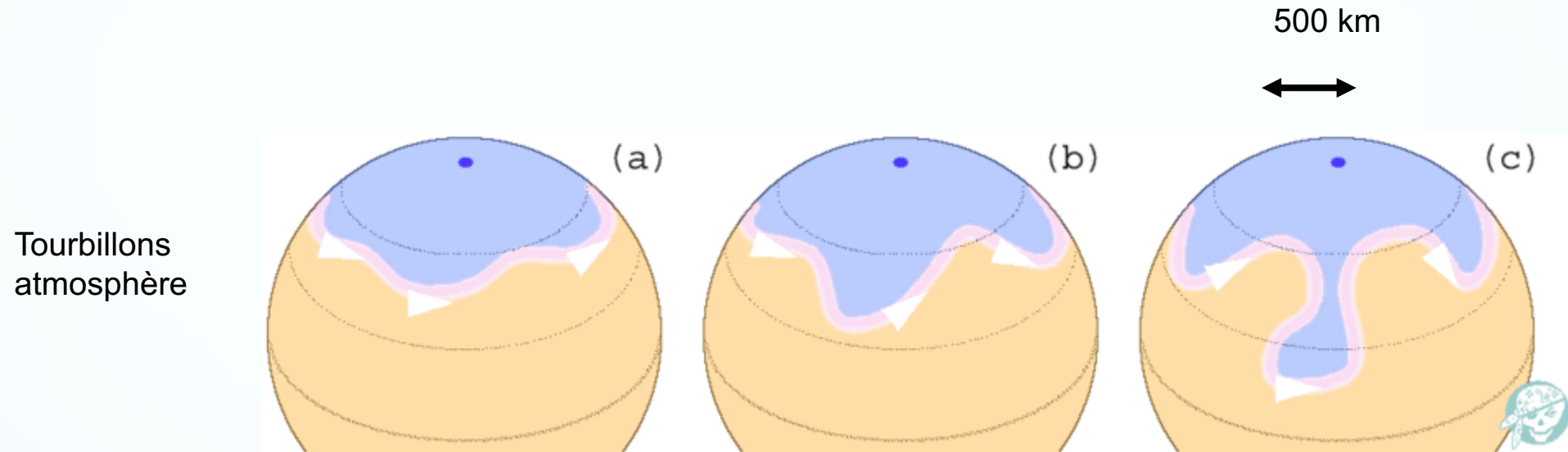
Circulation thermohaline



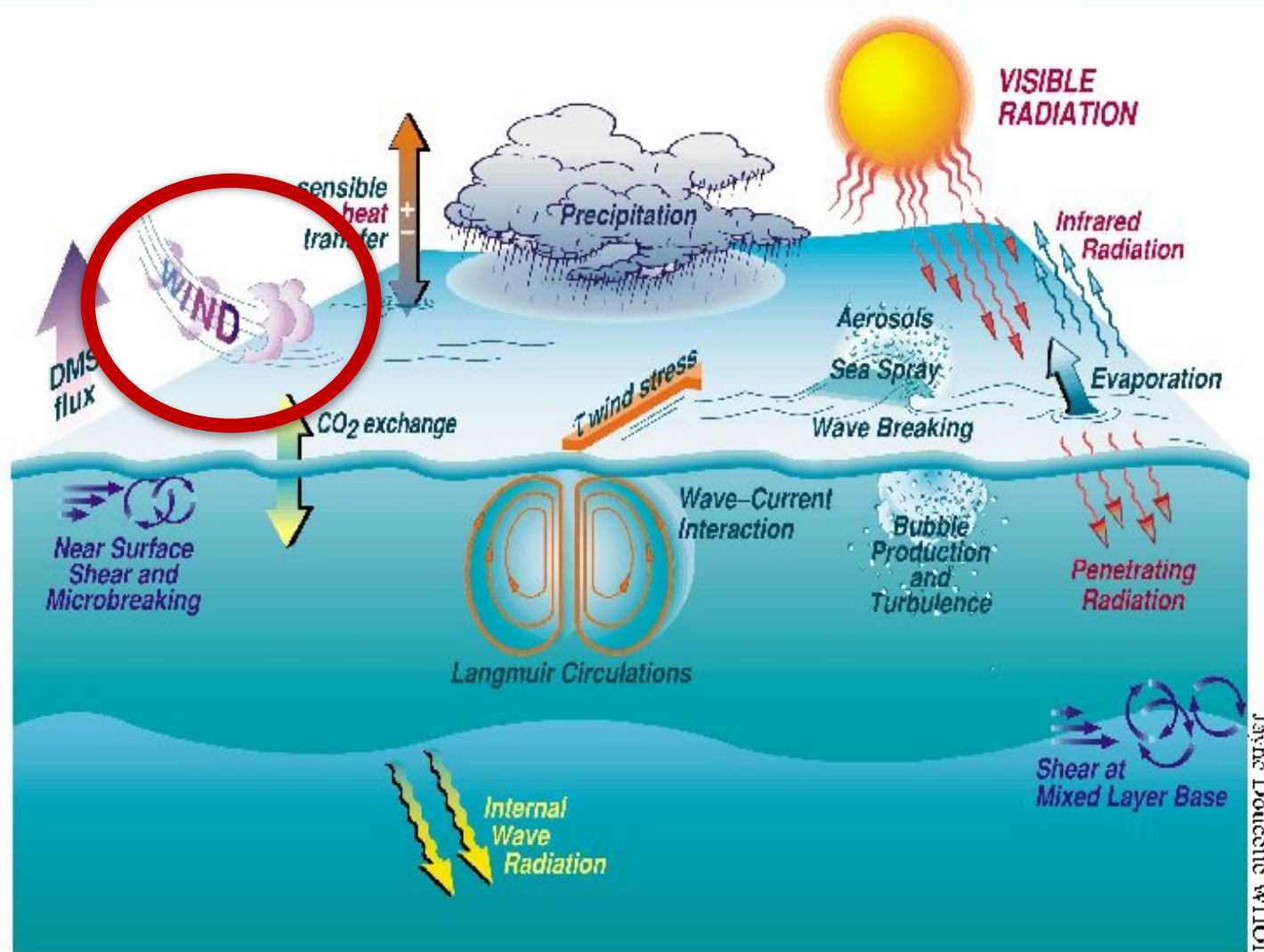
Courant surface océan



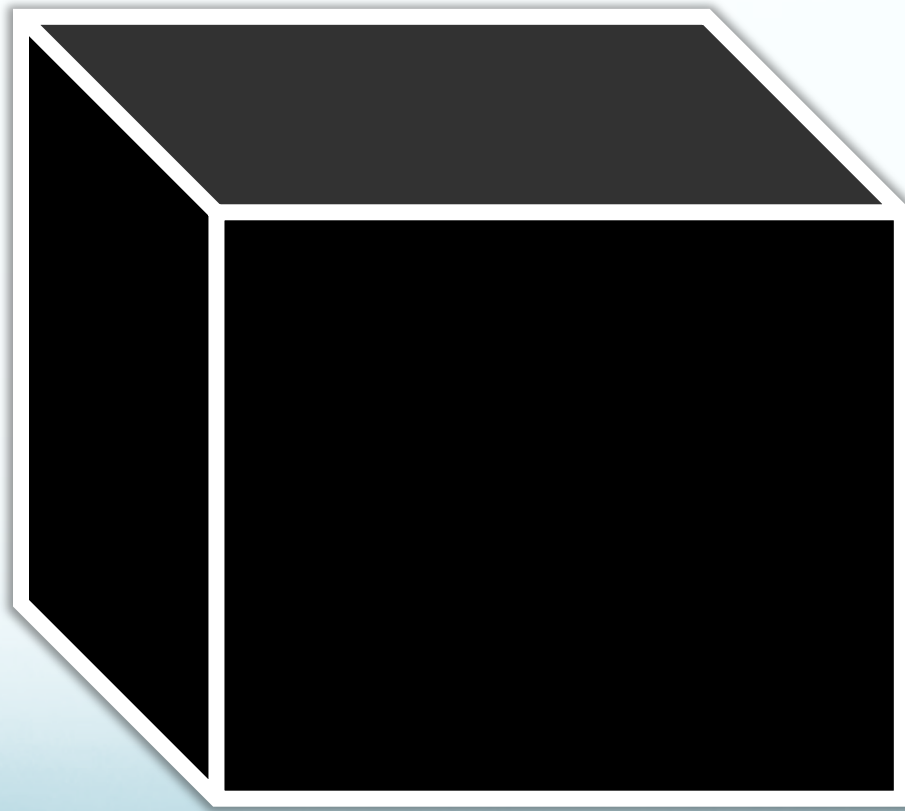
Différentes tailles d'instabilités



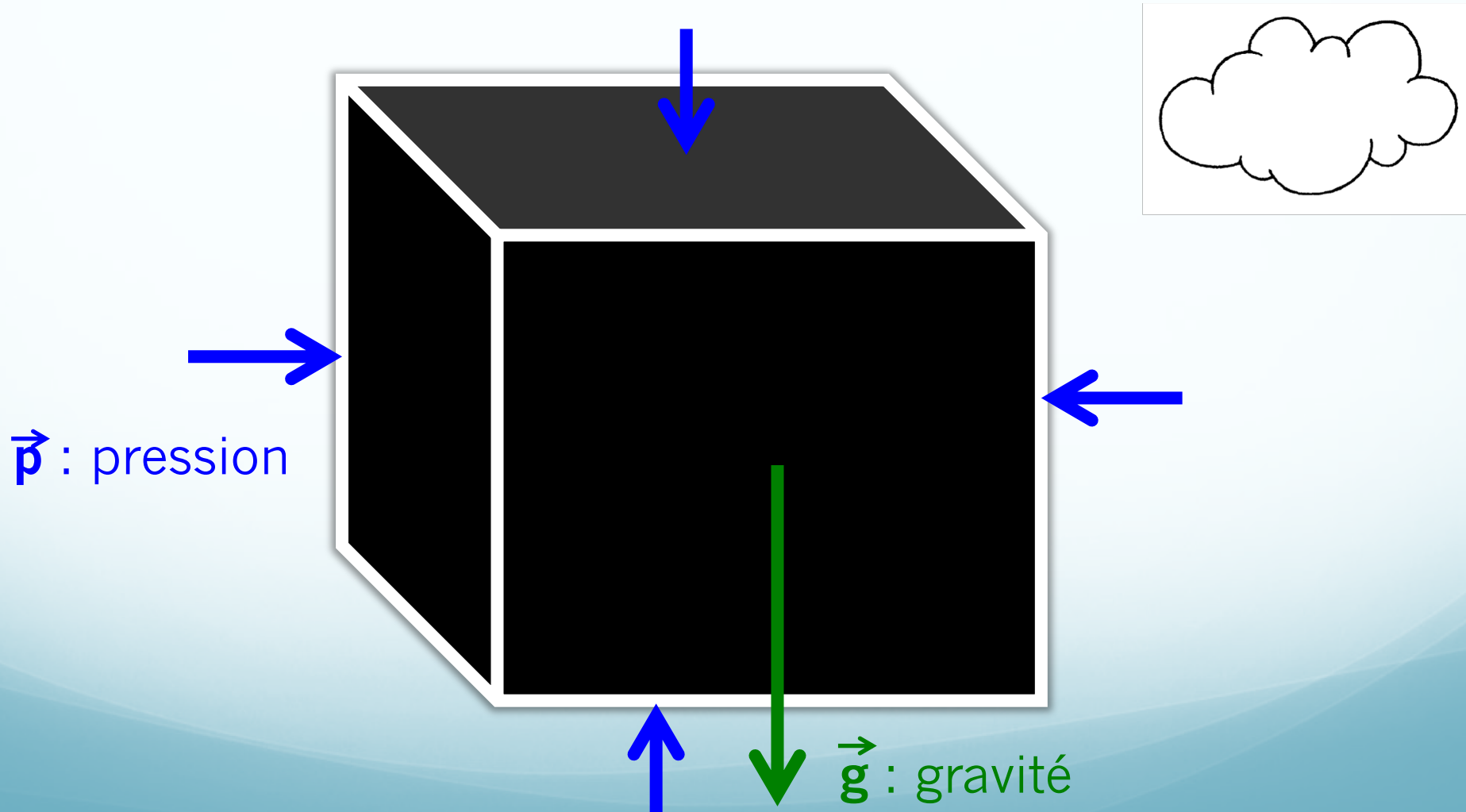
Interactions océan-atmosphère



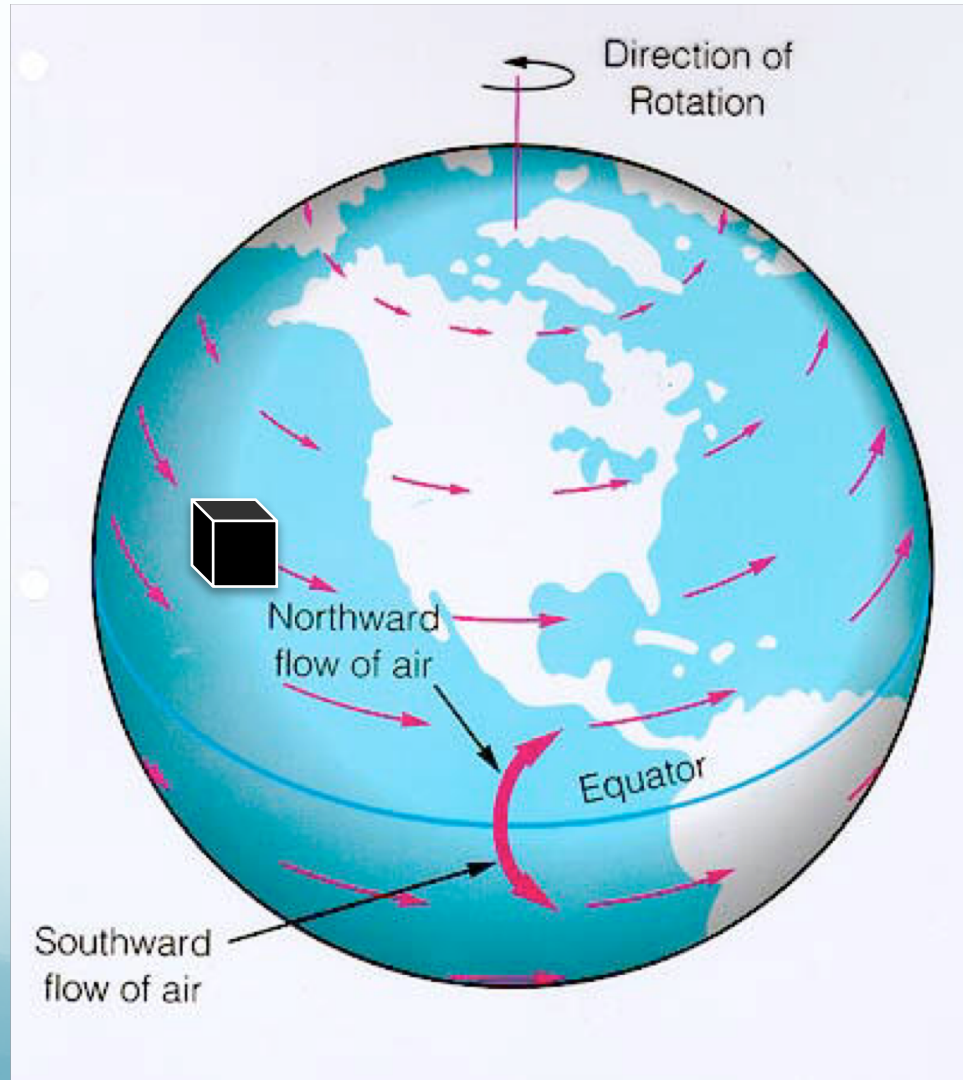
Qu'est-ce qu'un modèle (complexe) de climat



Qu'est-ce qu'un modèle (complexe) de climat

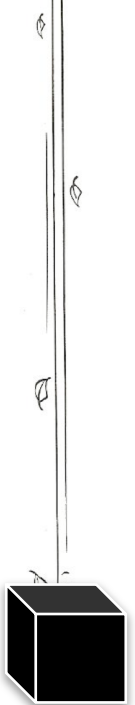


Qu'est-ce qu'un modèle (complexe) de climat



Equation de Navier Stokes

Newton: $m\vec{a} = \sum \vec{F}$



$$\rho \left(\underbrace{\frac{d\vec{V}}{dt}}_{\text{acceleration}} + \underbrace{2\vec{\Omega} \times \vec{V}}_{\text{Coriolis}} \right) = \rho g \underbrace{-\text{grad}(p)}_{\text{pression}} + \underbrace{\gamma \Delta \vec{V}}_{\text{viscosité}} + \underbrace{\vec{f}}_{\text{forçages}}$$



Application pour cette équation

- Equation non résolvable analytiquement depuis 1 siècle (un des 10 défis de Hilbert du XXe siècle)
- Le rêve de Richardson (~1^e guerre mondiale) : premières prévisions météorologiques numériques

Grille du “modèle”

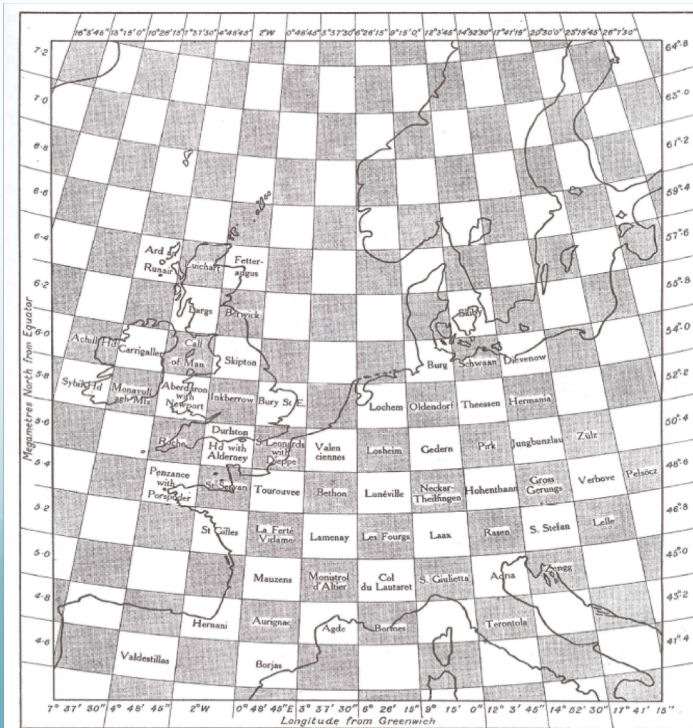
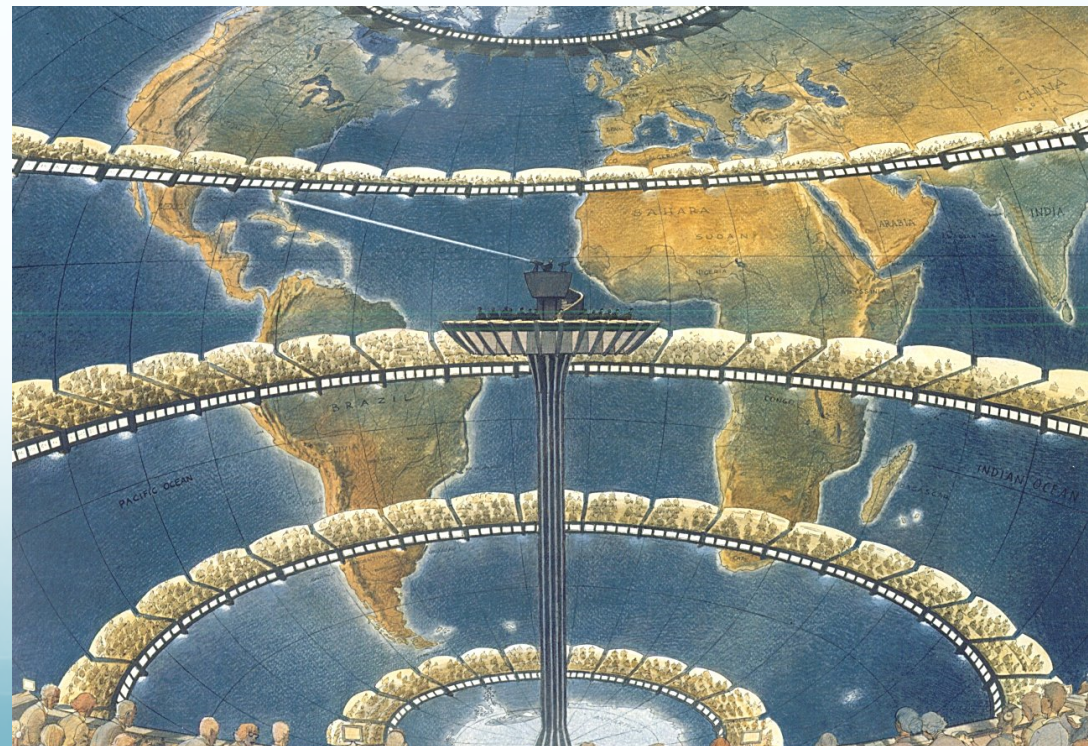
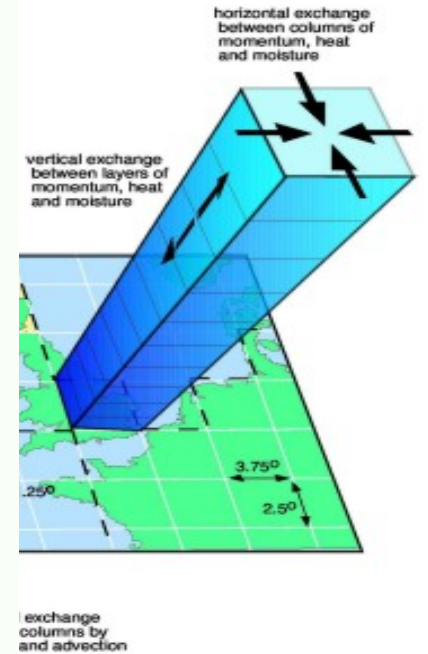
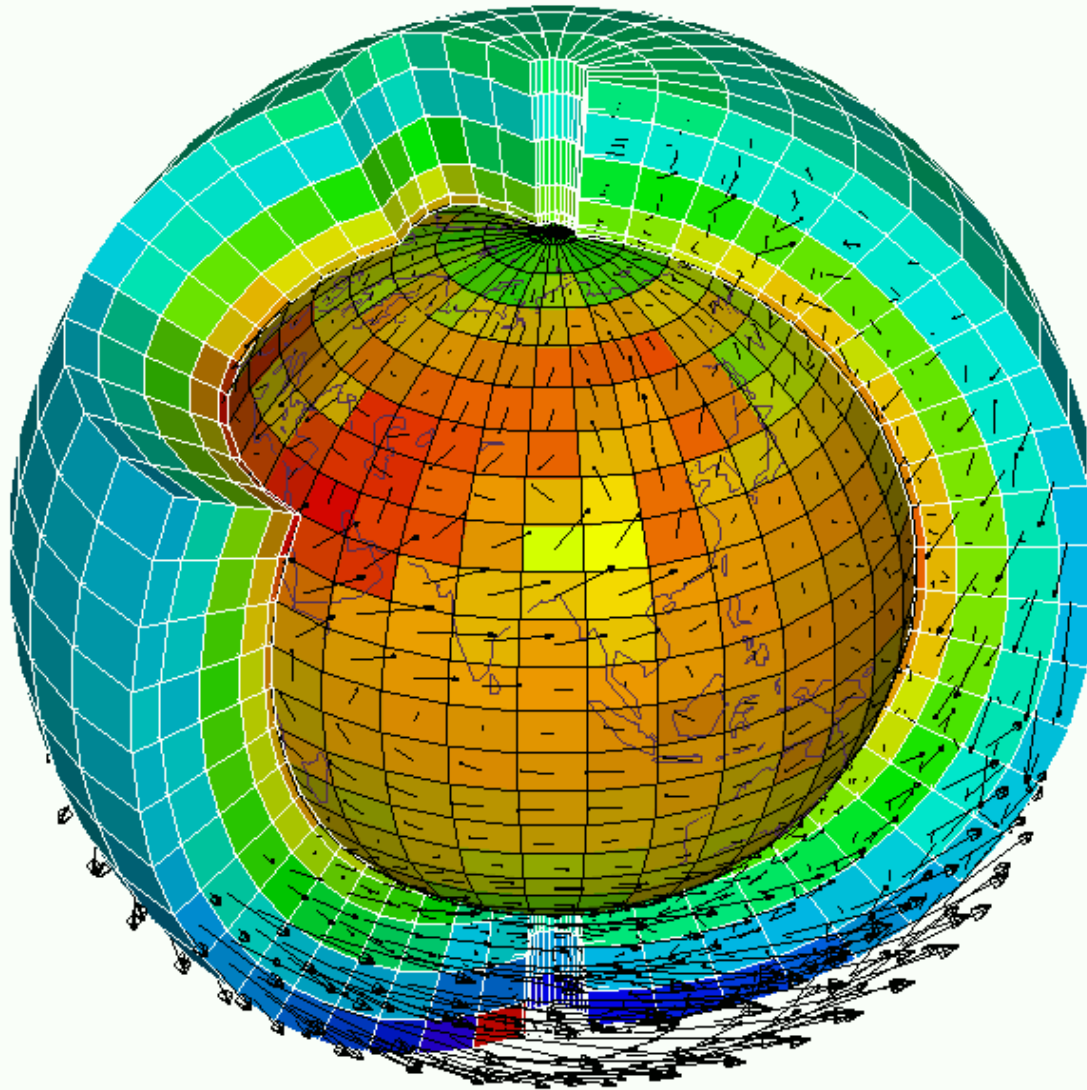


Figure 1.6 Richardson's idealised computational grid. (Frontispiece of WPNP)

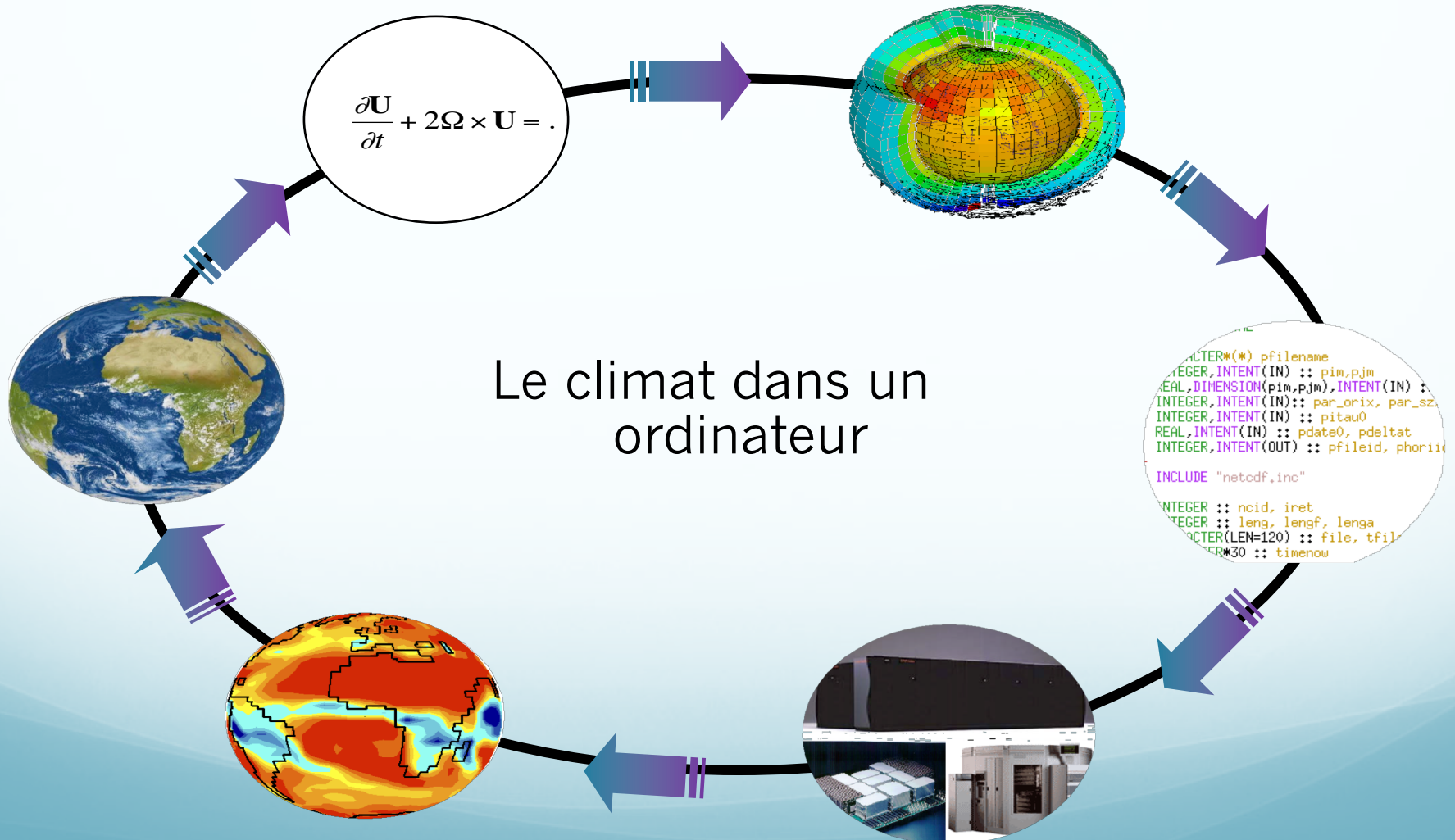
Les calculateurs



Le maillage de la Terre dans un modèle



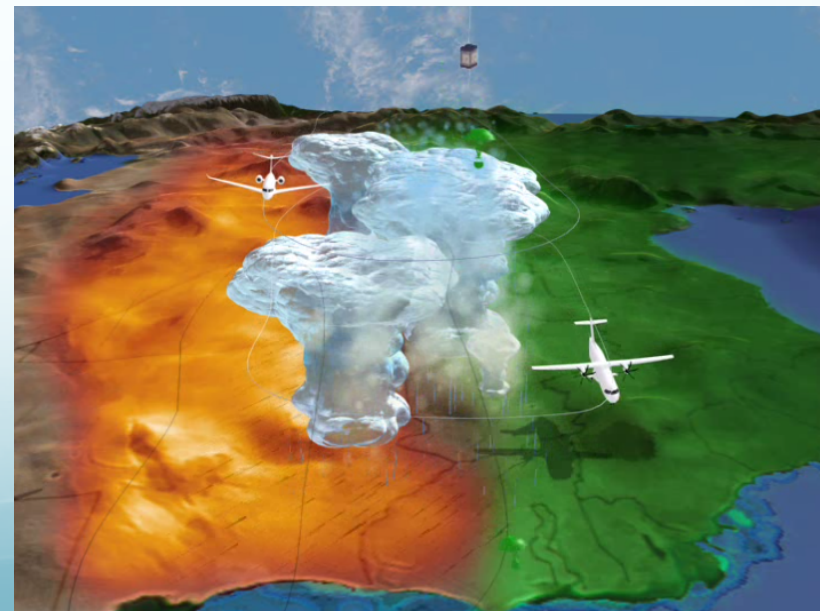
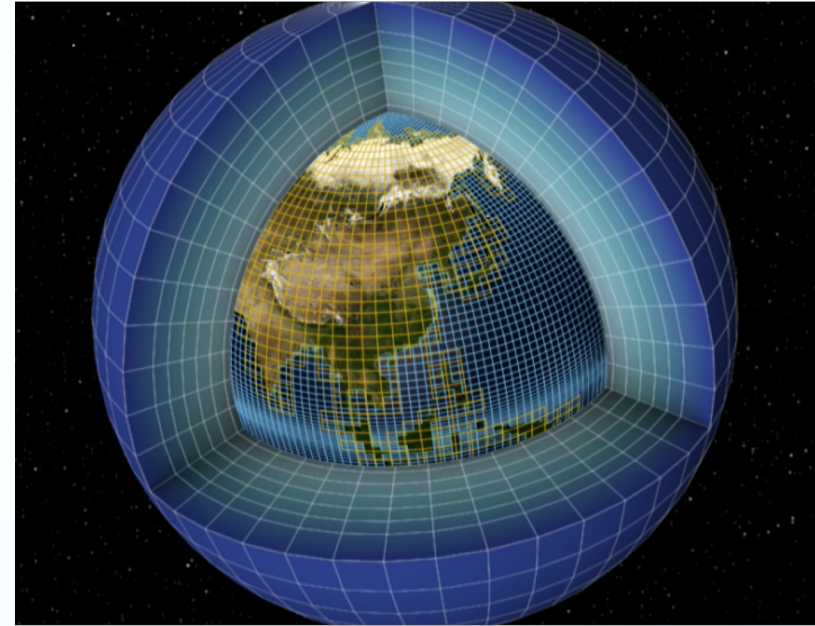
Principe de la modélisation du climat



Le climat dans un ordinateur

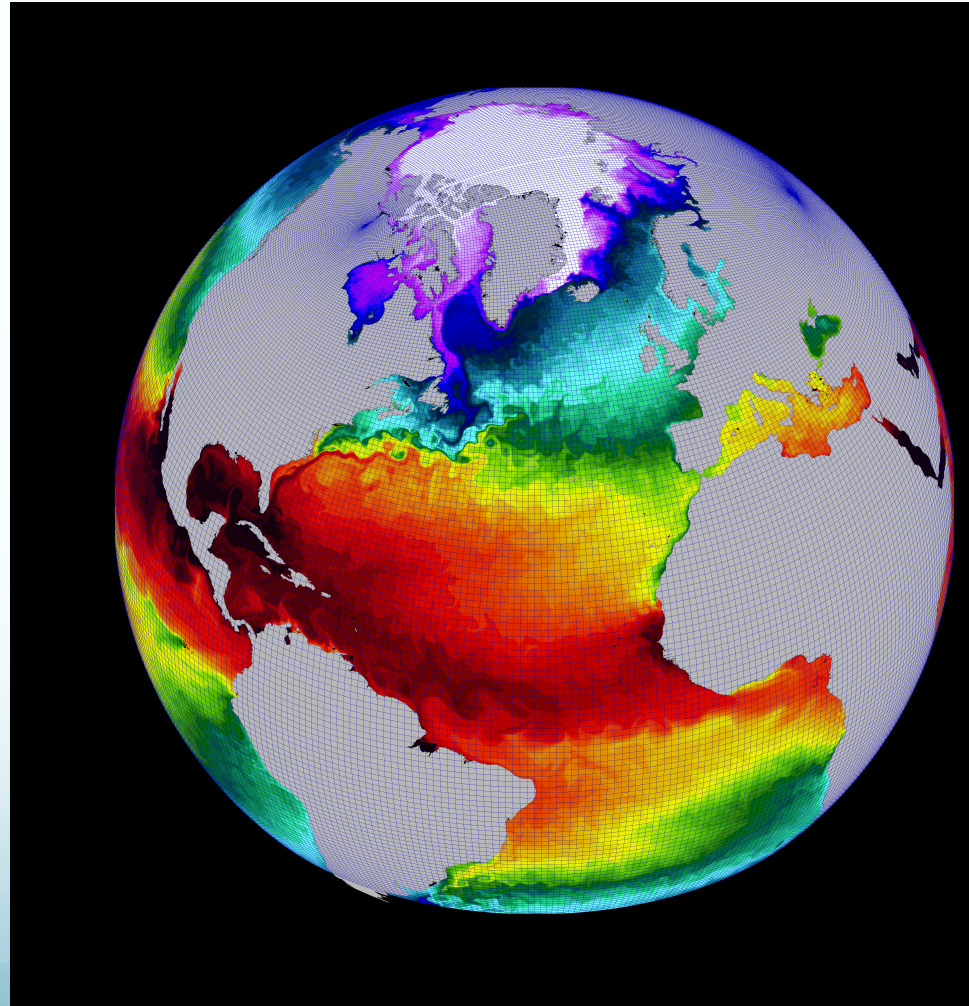
Modèle d'atmosphère

- Les mêmes que ceux utilisés pour la météo, mais avec des mailles plus grandes (100km)
- Paramétrisation sous maille notamment pour prendre en compte les nuages et la convection atmosphérique



Modèle d'Océan

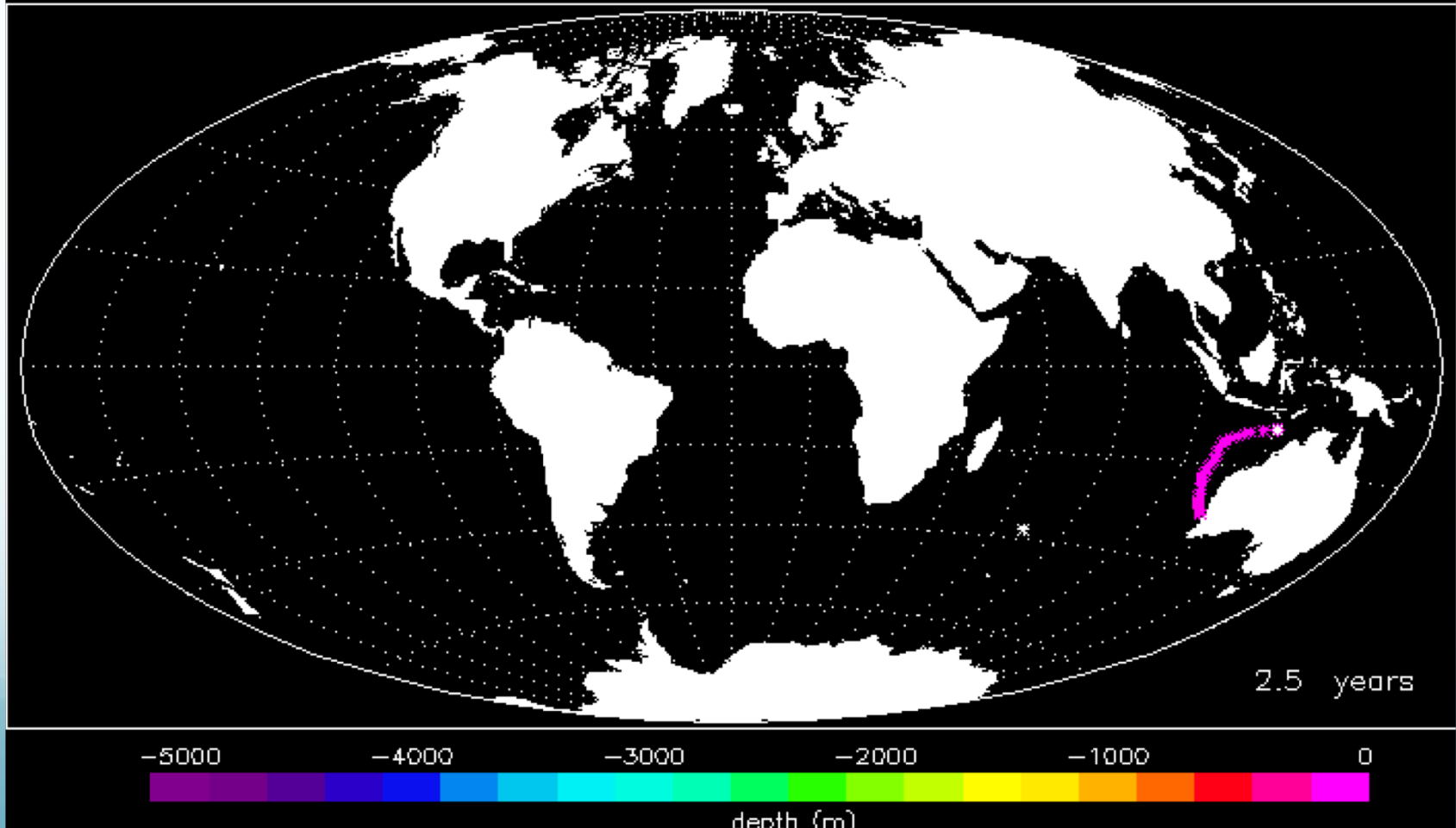
- Modèles plus récents par rapport atmosphère
- Problématiques spécifiques (tourbillon plus petit, salinité, chauffé par le dessus...)



Trajectoire lagrangienne dans un modèle d'océan

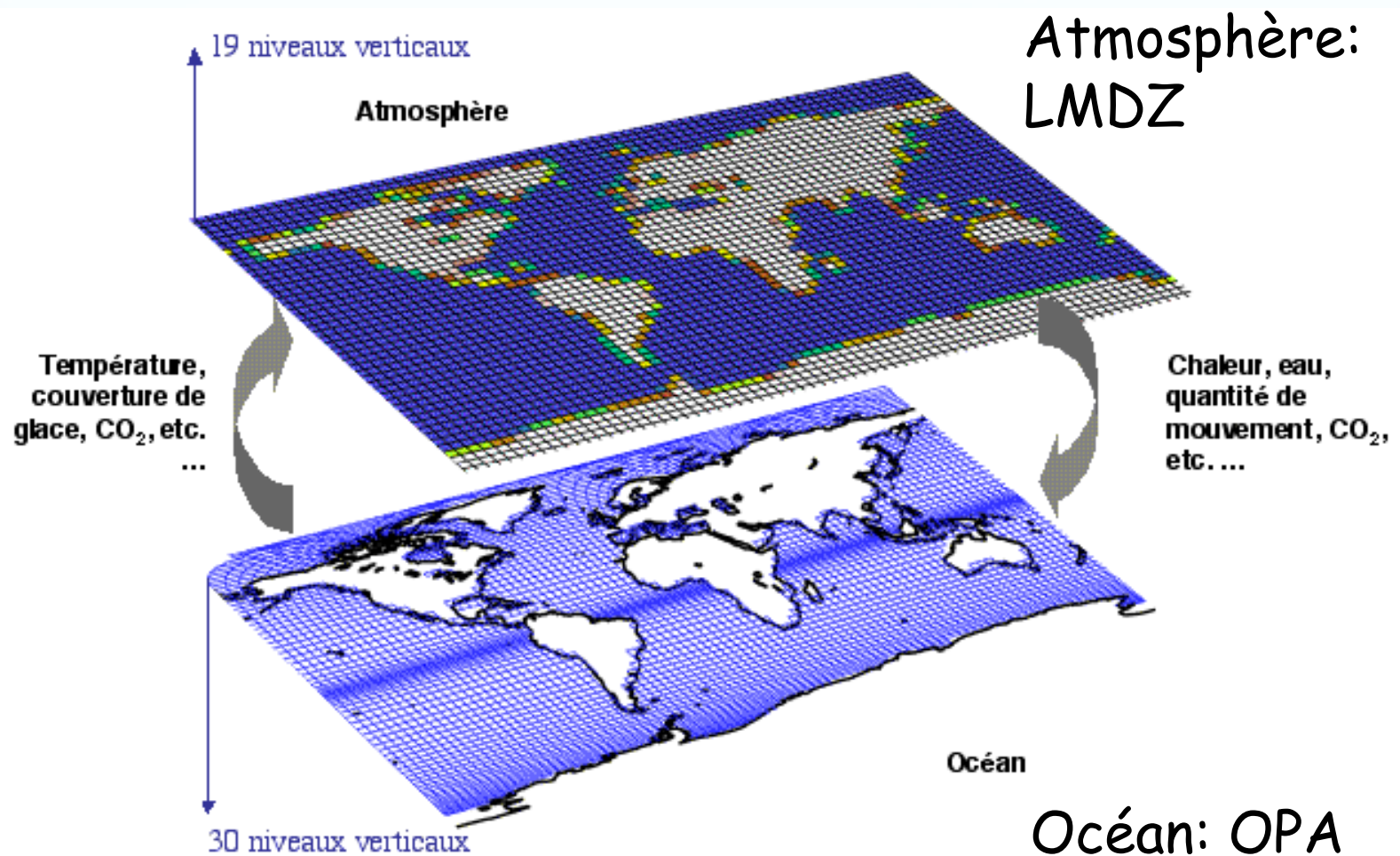
"Global" trajectory in the OPA model

<http://www.univ-brest.fr/lpo/ariane>



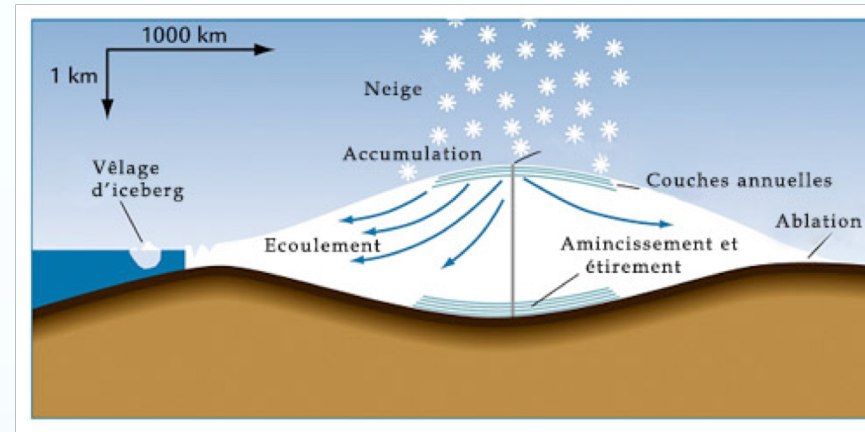
Modèles couplés océan-atmosphère

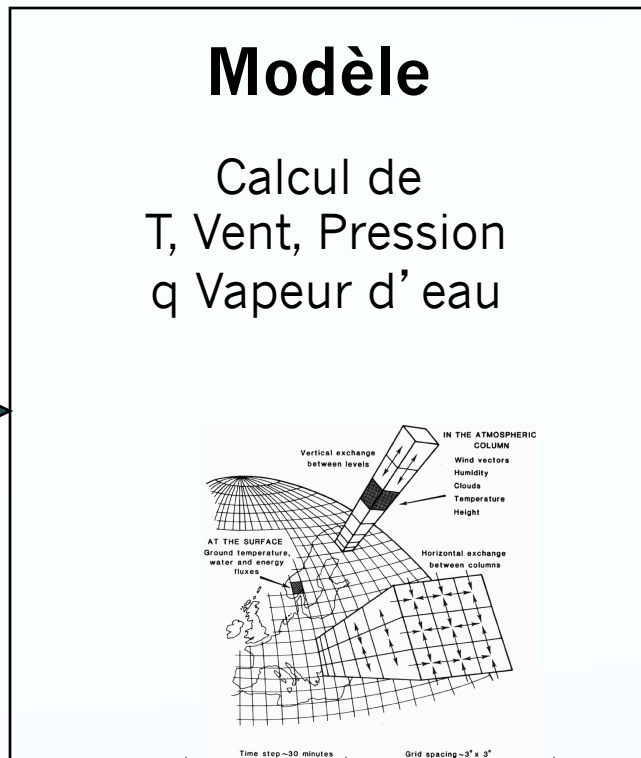
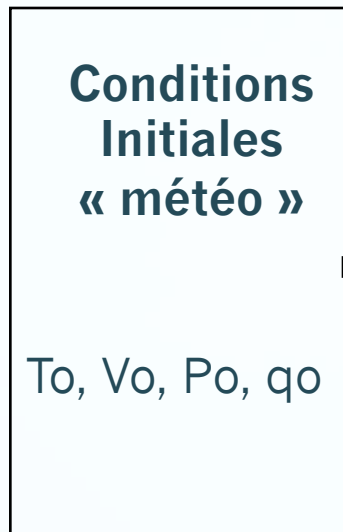
Exemple du modèle de l'IPSL



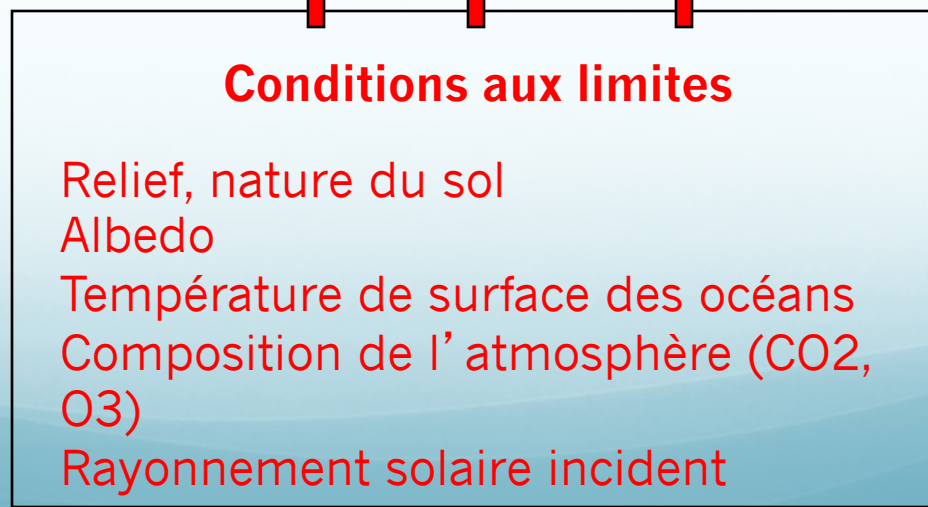
Autres composantes...

- Banquise au pôles
- Calotte de glace
- Surface terrestre : terre et végétation
- Biogéochimie marine
- Chimie atmosphérique
- ...

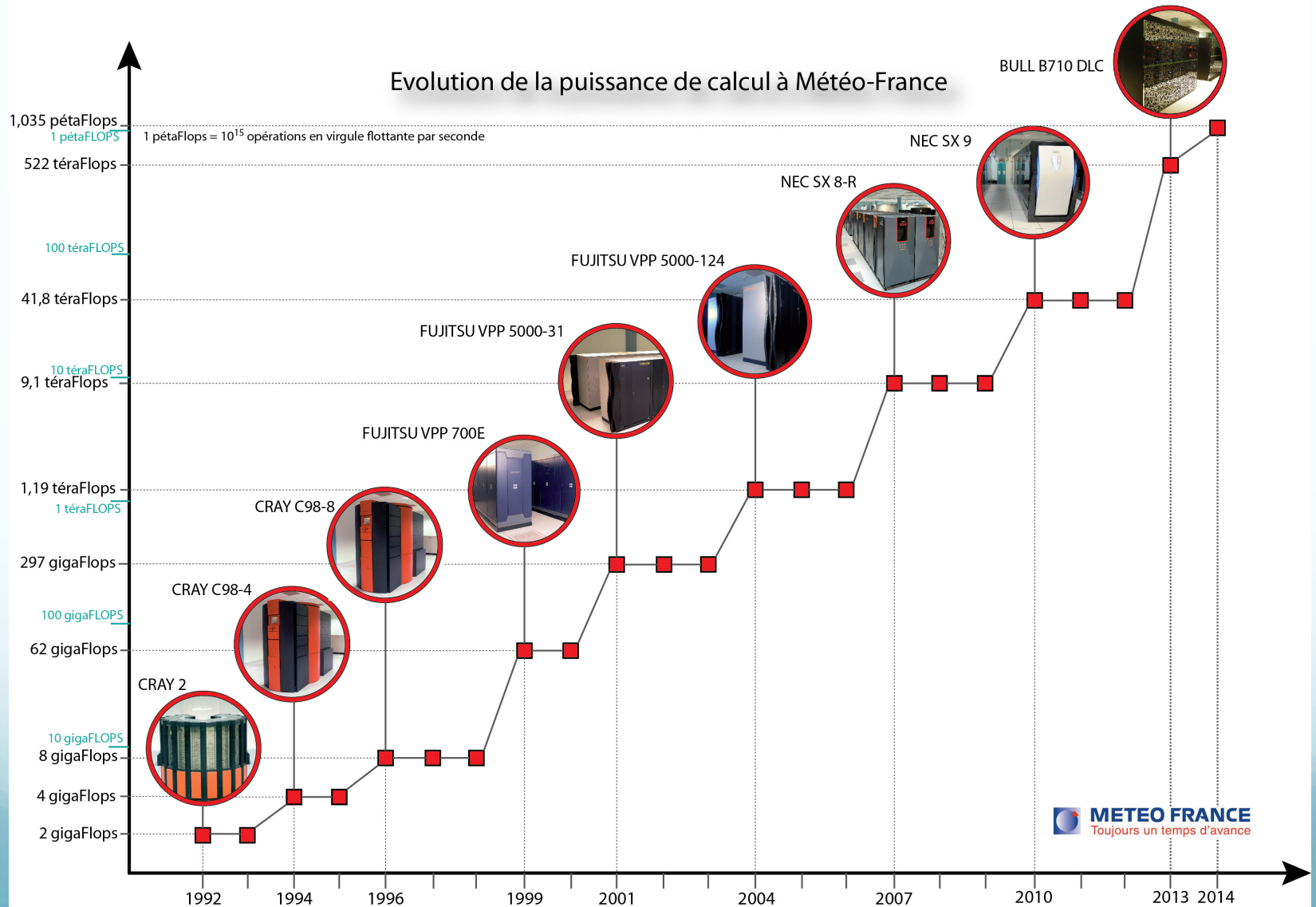




Statistiques
Mois/saisons

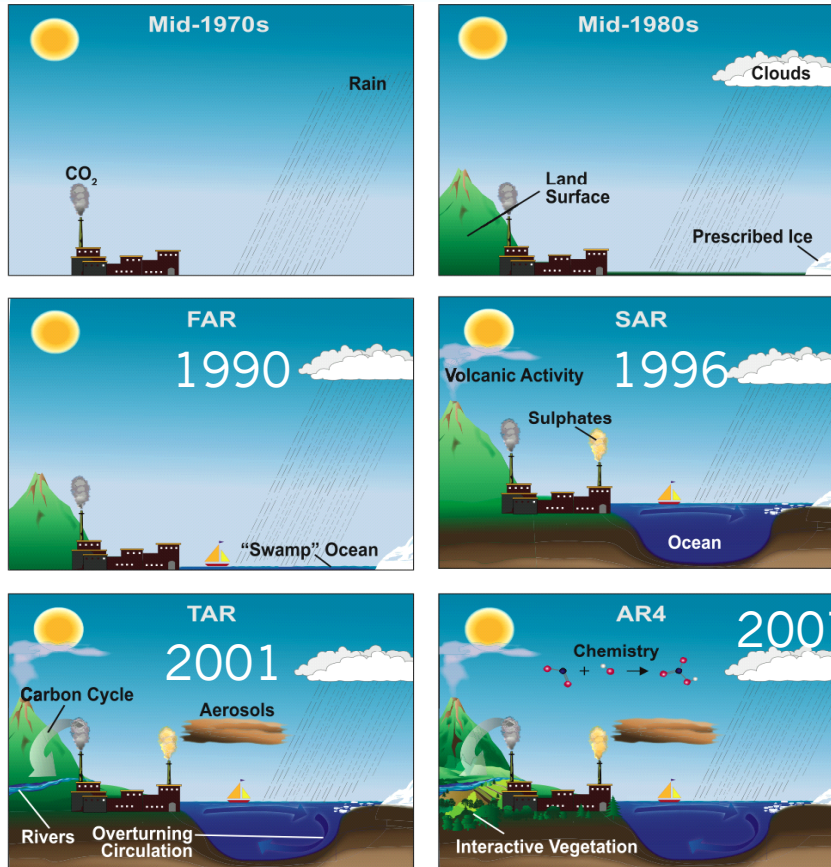


Moyens de calcul

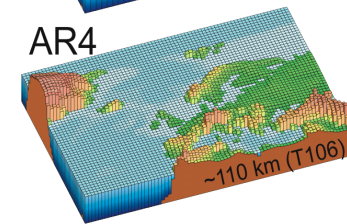
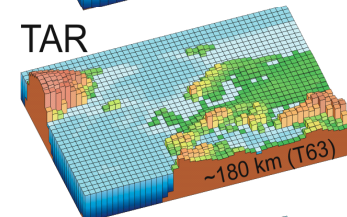
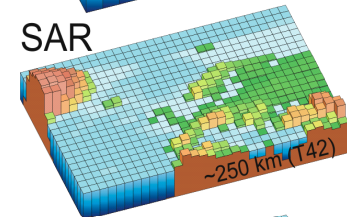
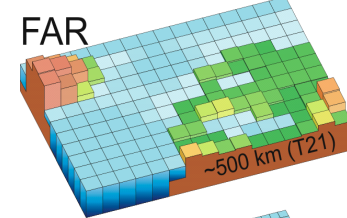


Evolution des modèles climatiques

composantes



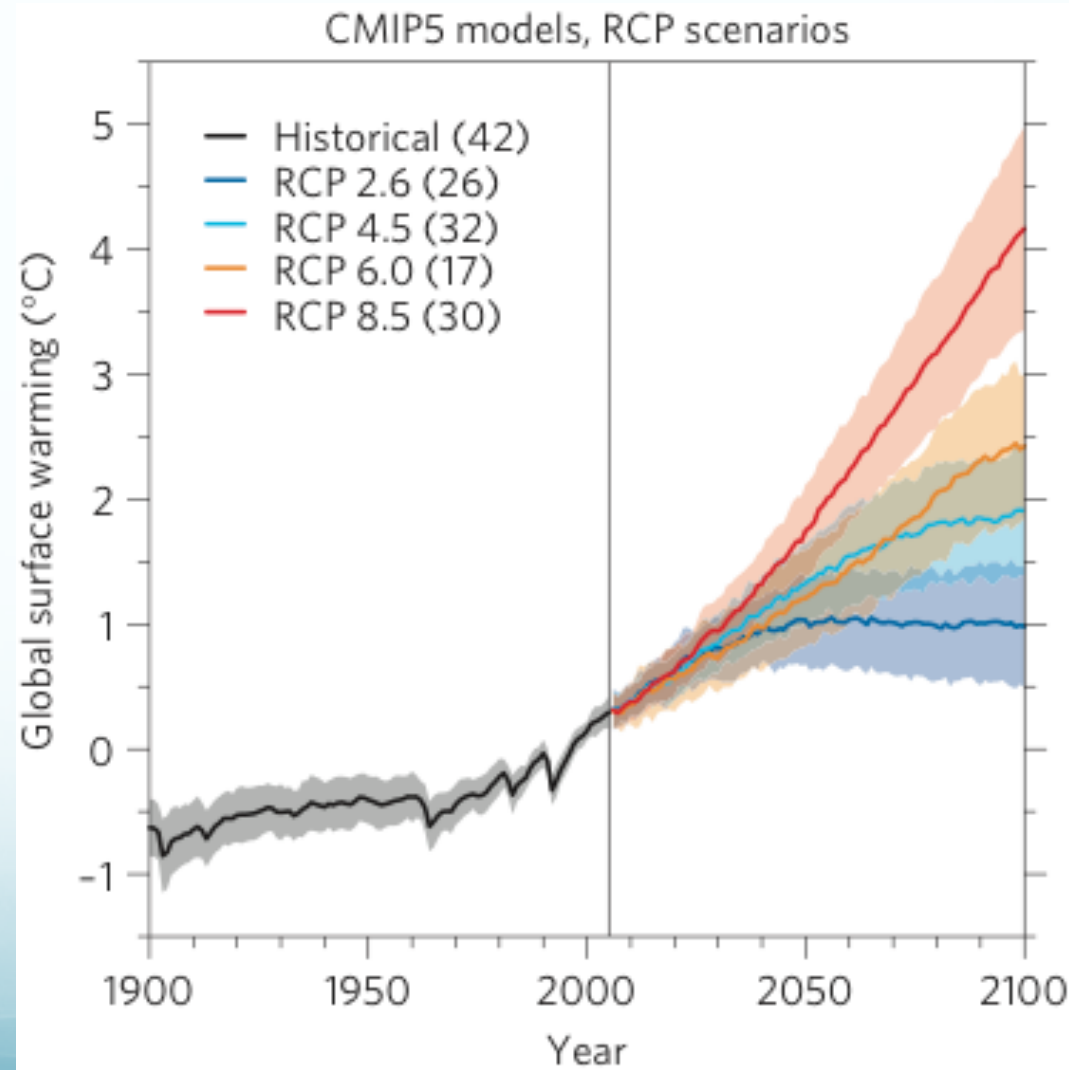
résolution



Prochains développements: cycle du carbone, stratosphère, couplage aux calottes glaciaires... et toujours amélioration des modèles d'atmosphère et d'océan

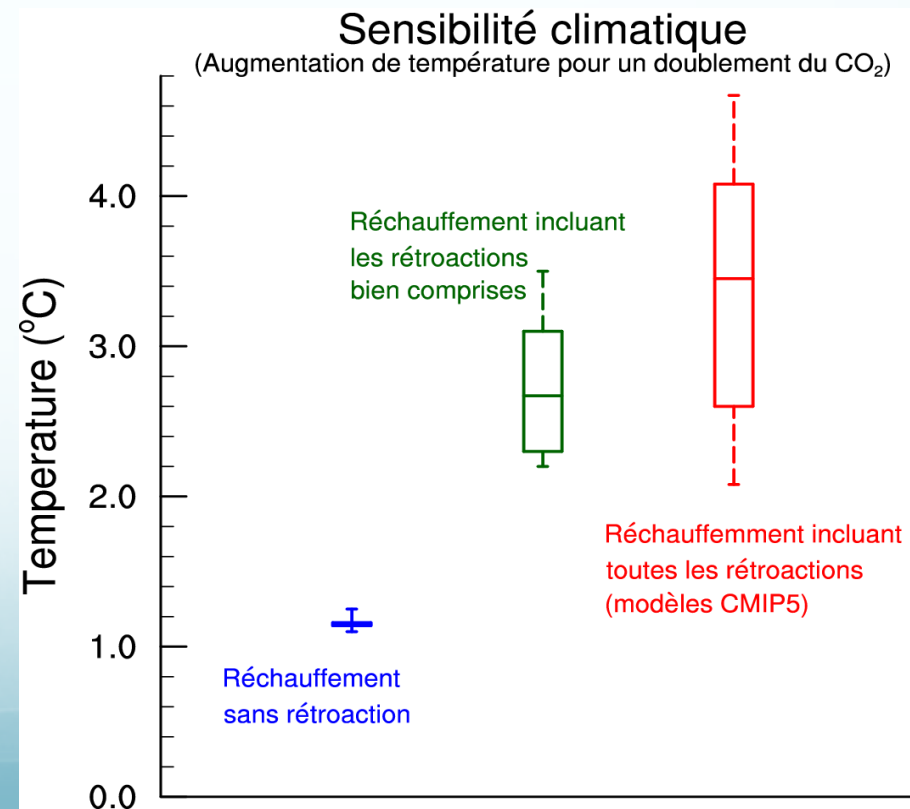
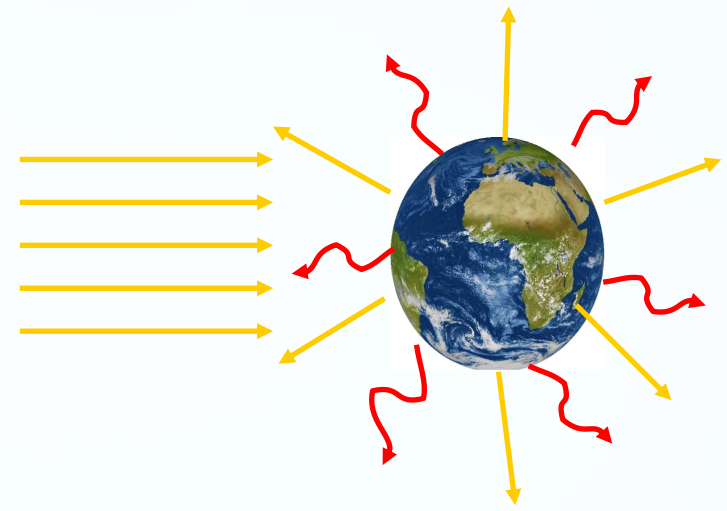
Projections climatiques

- Des dizaines de modèles développés de par le monde
- Deux en France (Paris et Toulouse)
- Projettent un réchauffement entre 1 et 4°C en 2100 selon nos émissions

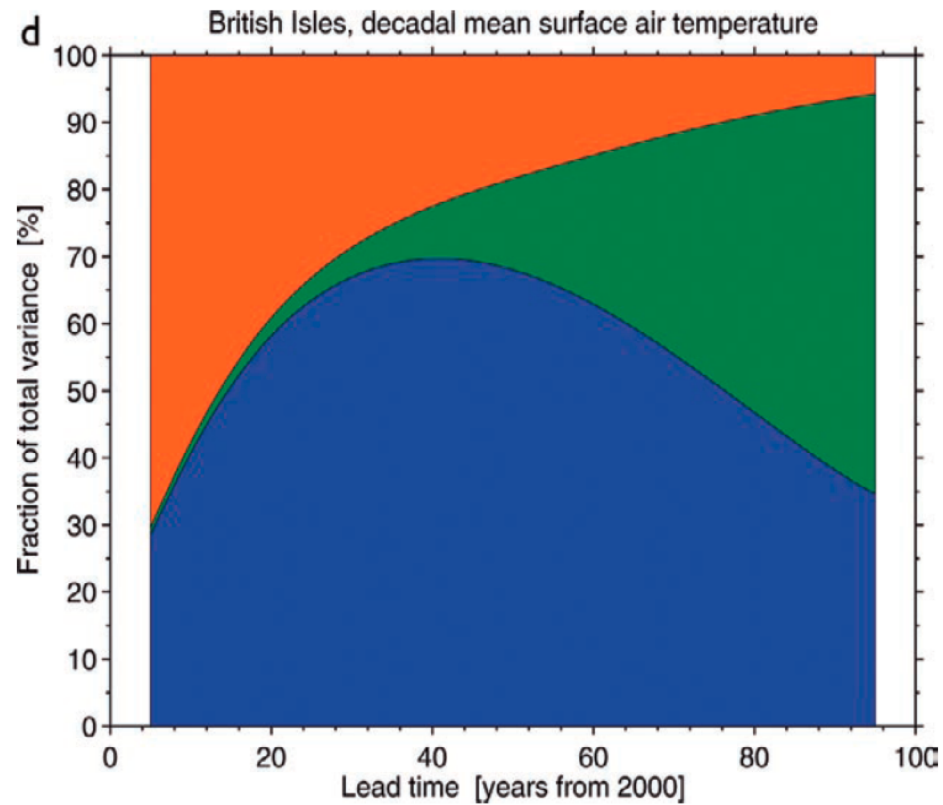
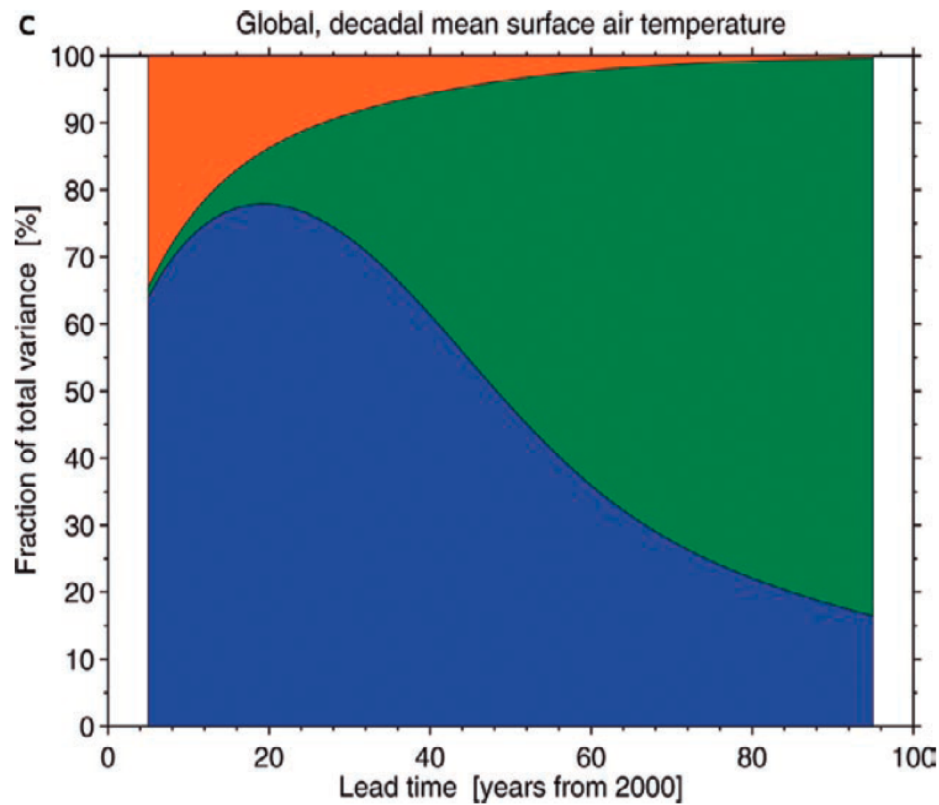
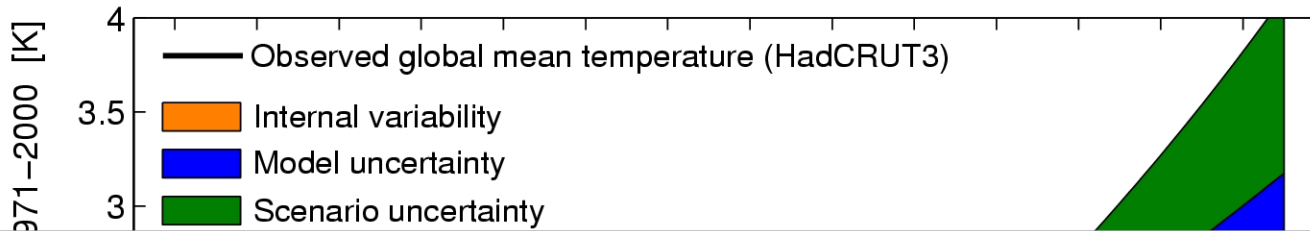


Notion de sensibilité climatique

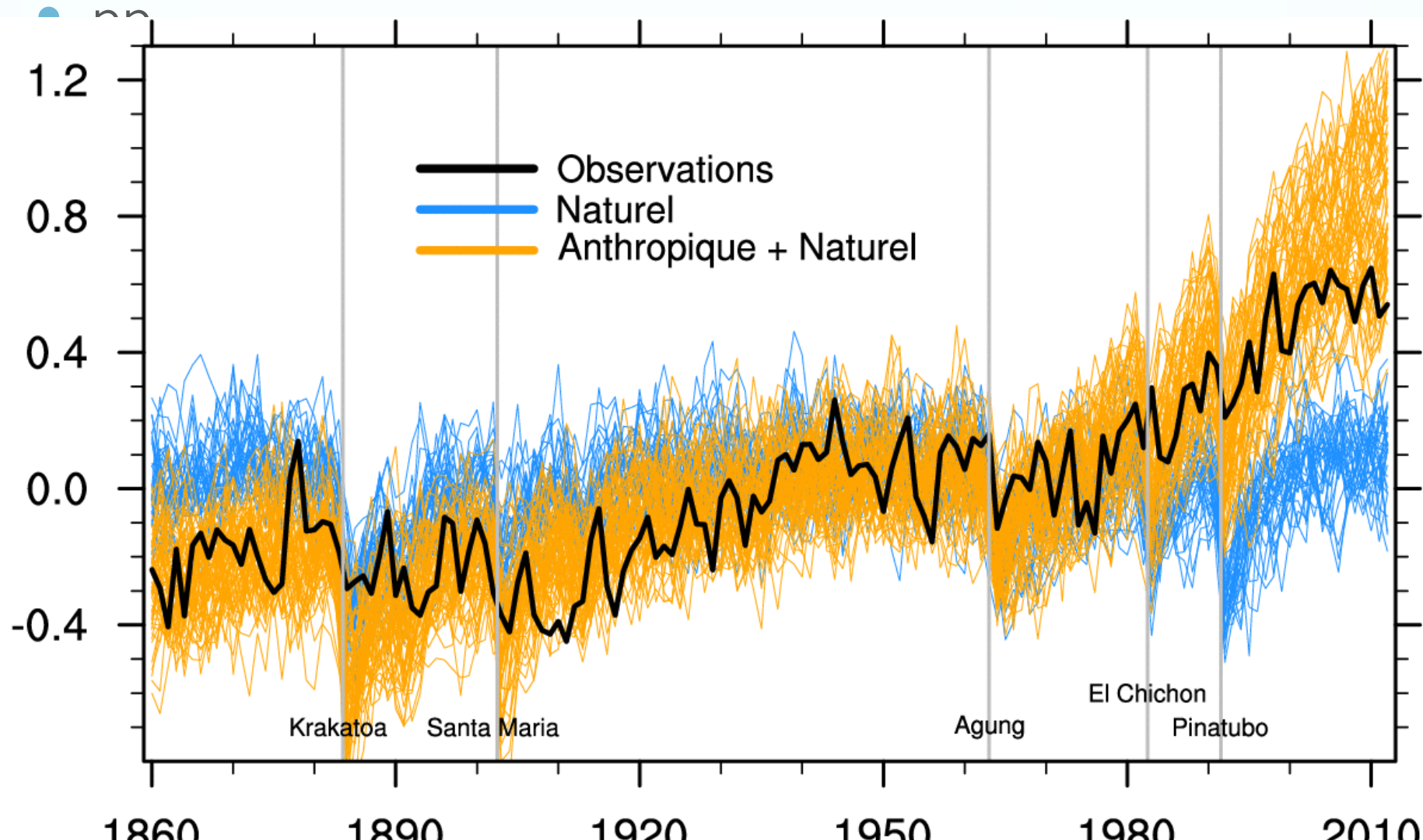
- Augmentation de température pour un doublement de CO_2 (de 280 à 560 ppm par ex.)
- Evaluation des rétroactions robustes :
 - Albedo
 - Vapeur d'eau
 - nuages



Sources d'incertitude



Détection-attribution du changement climatique



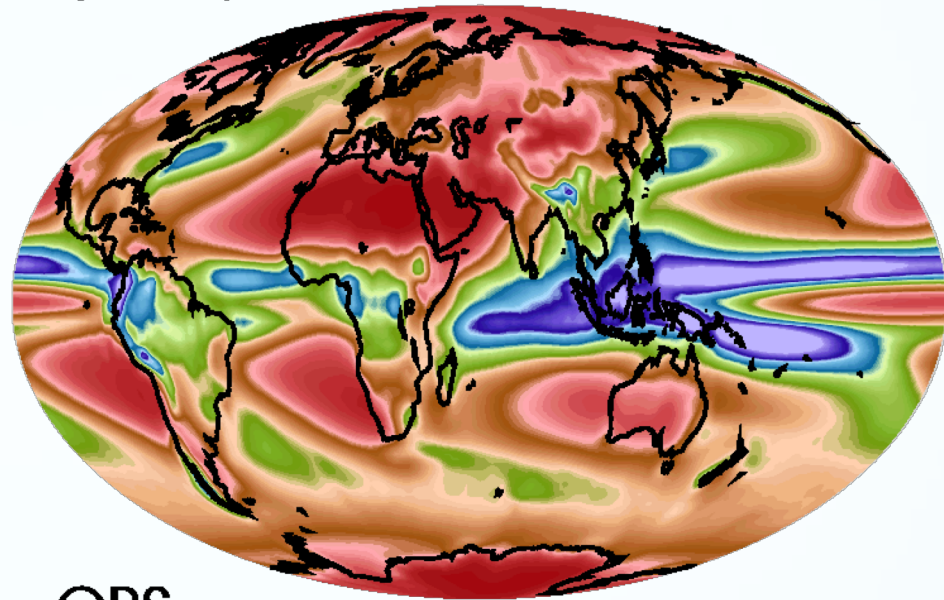
Tester les modèles

Des moyens de mesures inédits:

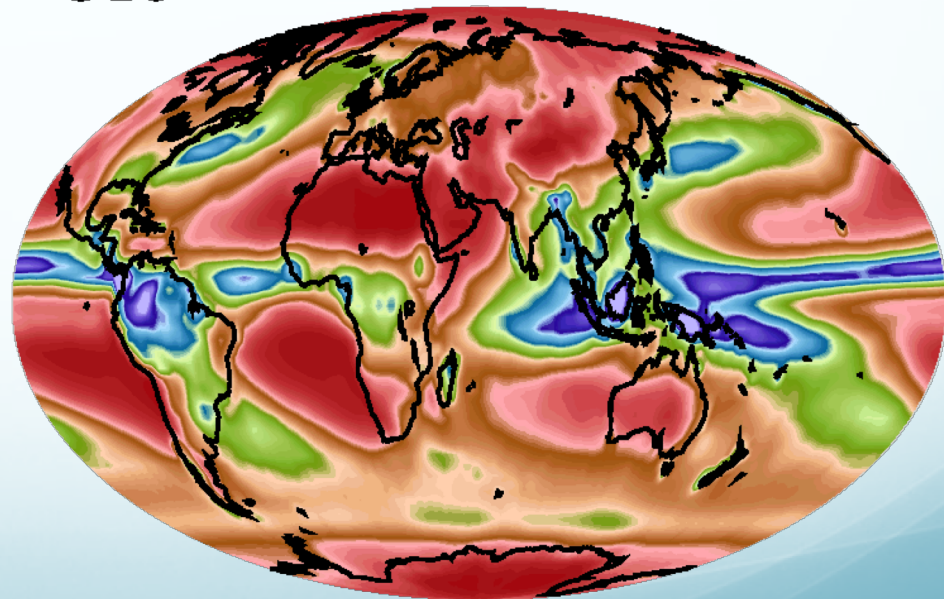
- Satellites
- Balises ARGO



CMIP5

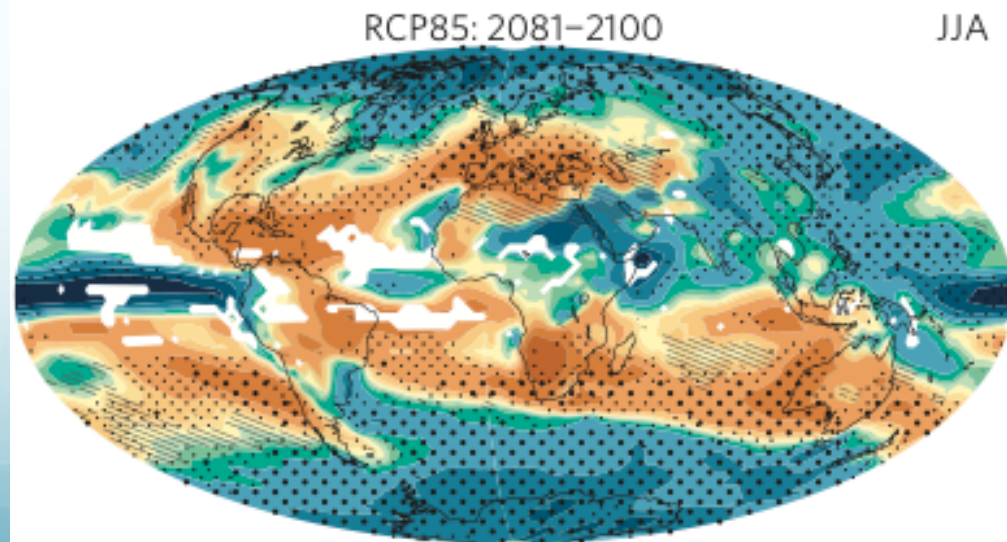
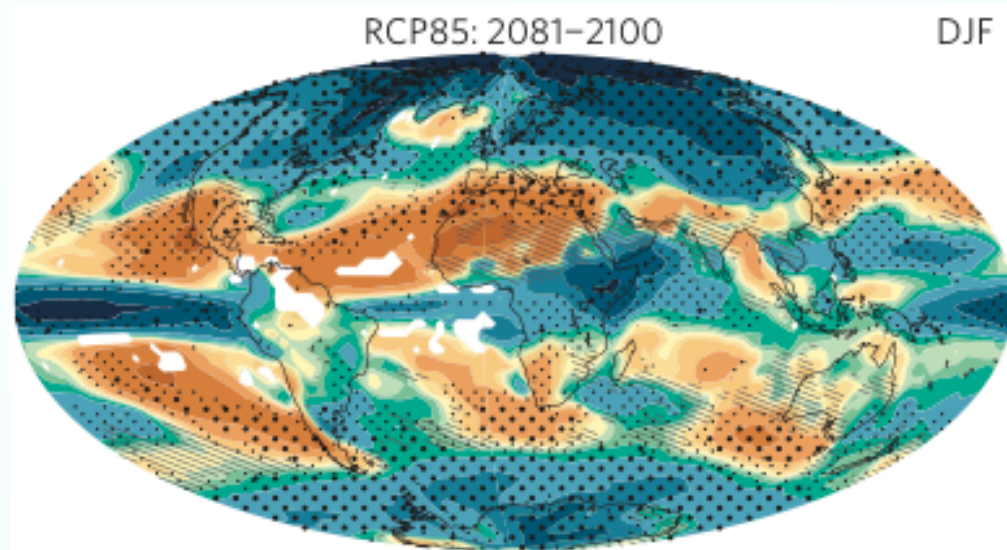


OBS



Projection de précipitations

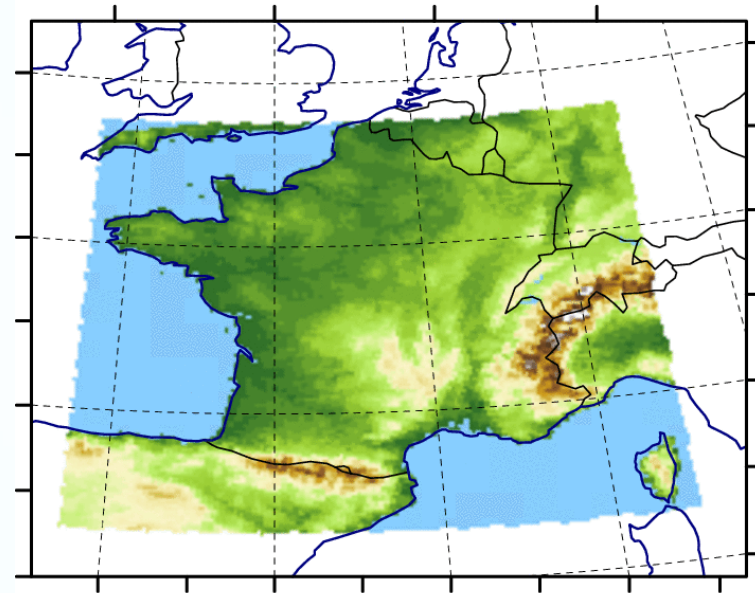
- Projections des changements de précipitation plus incertain
- Région méditerranéenne affectée (sécheresse) dans quasi tous les modèles



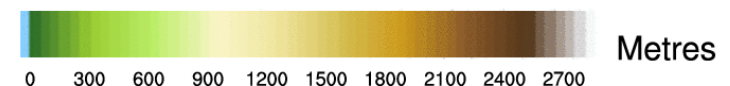
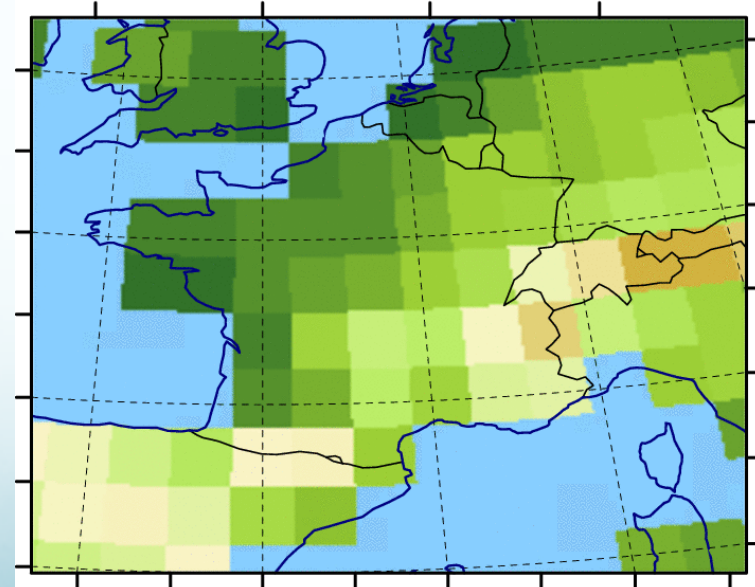
Regionalisation

- Possibilité d'imbriquer les modèles les uns dans les autres
- Meilleure résolution du climat local (vent vallée du Rhone, événement cévenols, orages...)

CORDEX - ALADIN 12km



CMIP5 - ARPEGE 120km

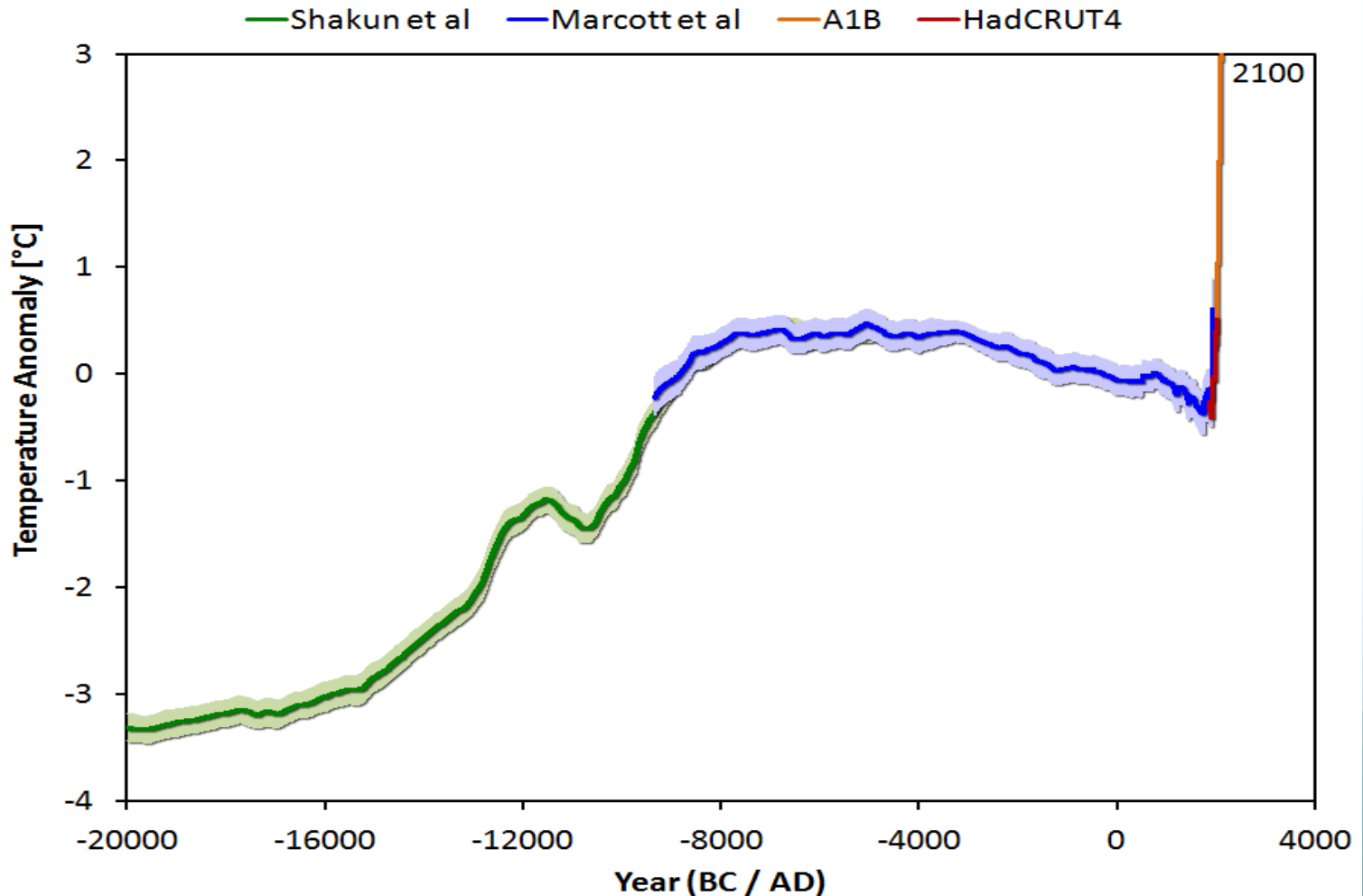


La mauvaise nouvelle est que la banquise fond et cela va devenir impossible d'attraper des phoques

La bonne nouvelle est que si nous descendons vers le sud, il y a des tonnes d'animaux appelés "humains" qui ne court pas très vite



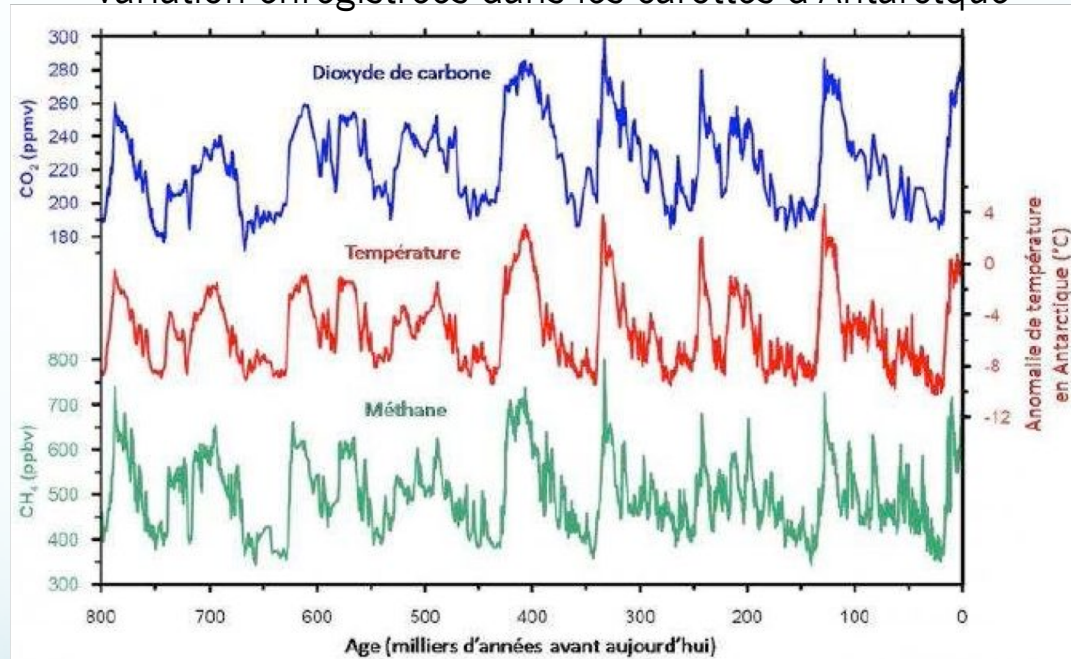
Projections climatiques dans un contexte paléoclimatique



Les climats du passé : une boussole pour le futur ?

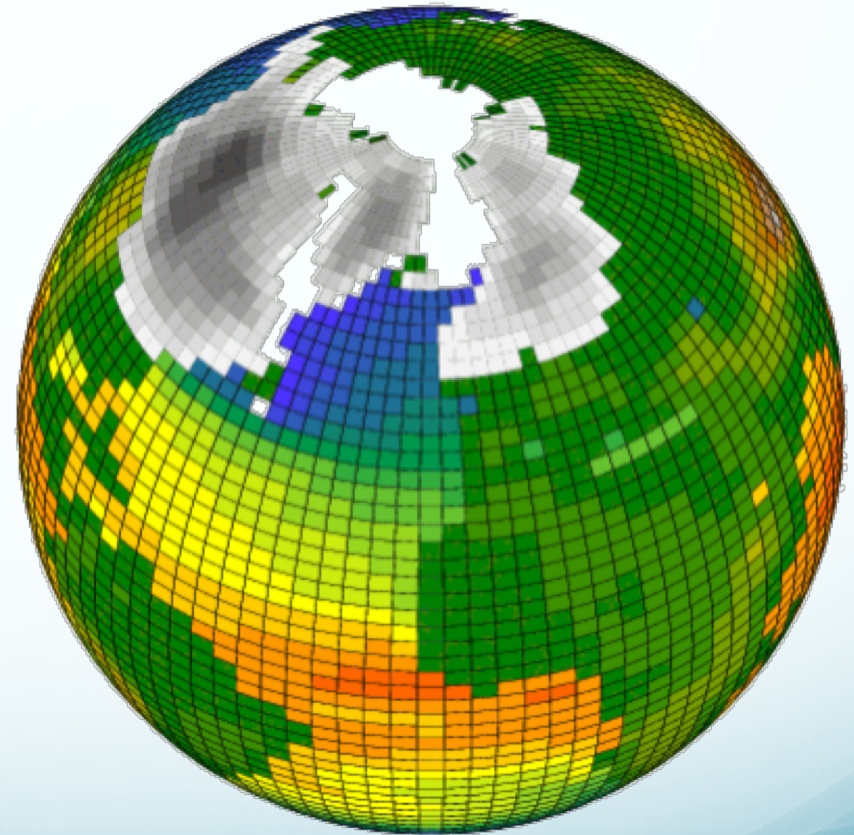
- Pas d'analogie strict au climat récent et à venir
- Modèles ont besoin d'être testés en conditions extrêmes
- Seule la reconstruction du passé le permet

Variation enregistrées dans les carottes d'Antarctique

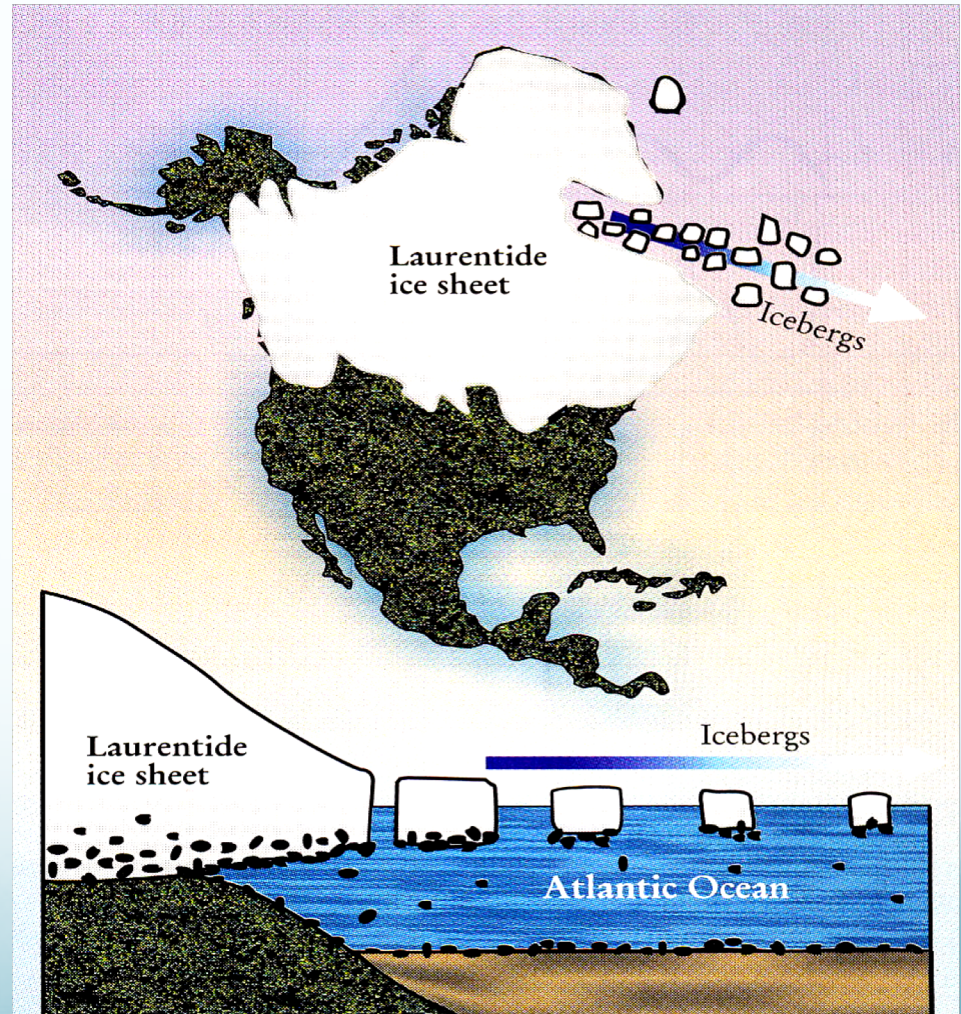
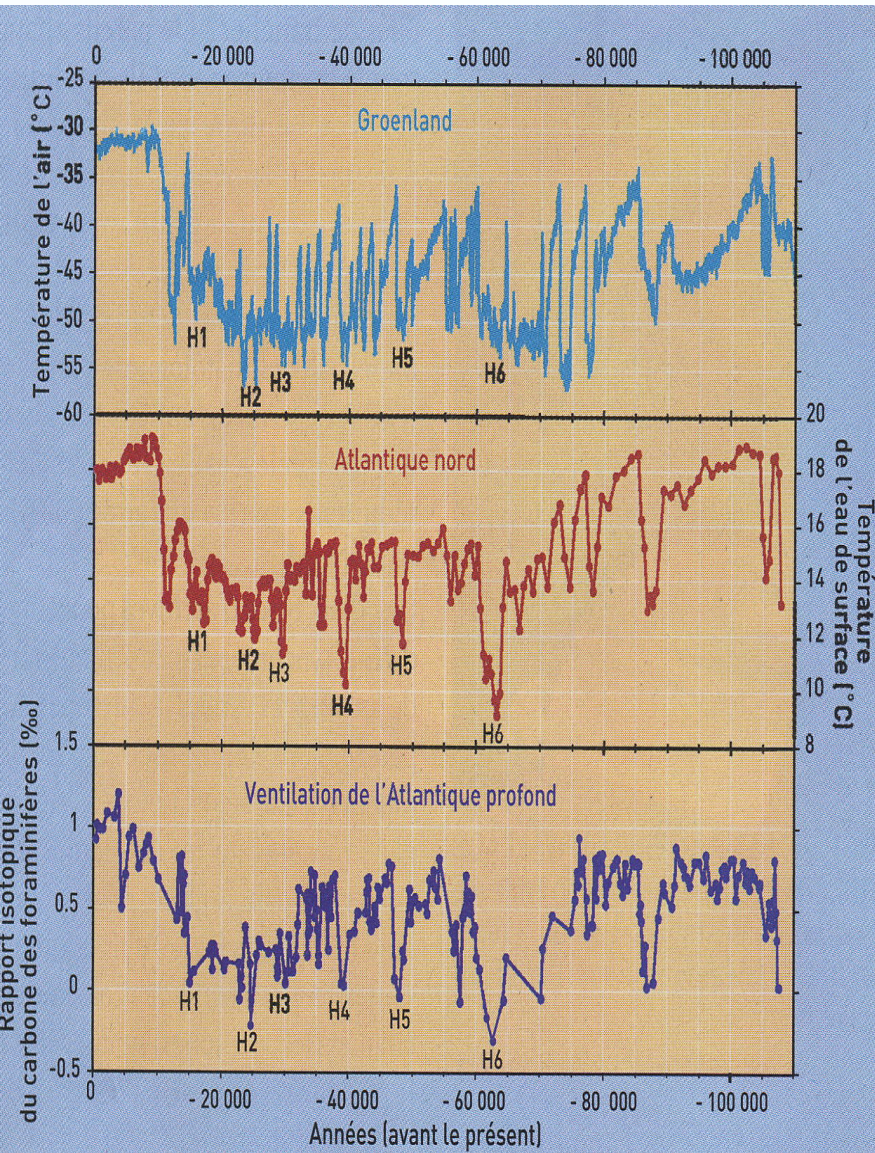


Modélisation du climat du Dernier Maximum Glaciaire

- Il y a 21000 ans
- Enormes calottes de glace sur le Canada et la Scandinavie
- CO₂ à 180 ppm
- Insolation similaire à aujourd'hui

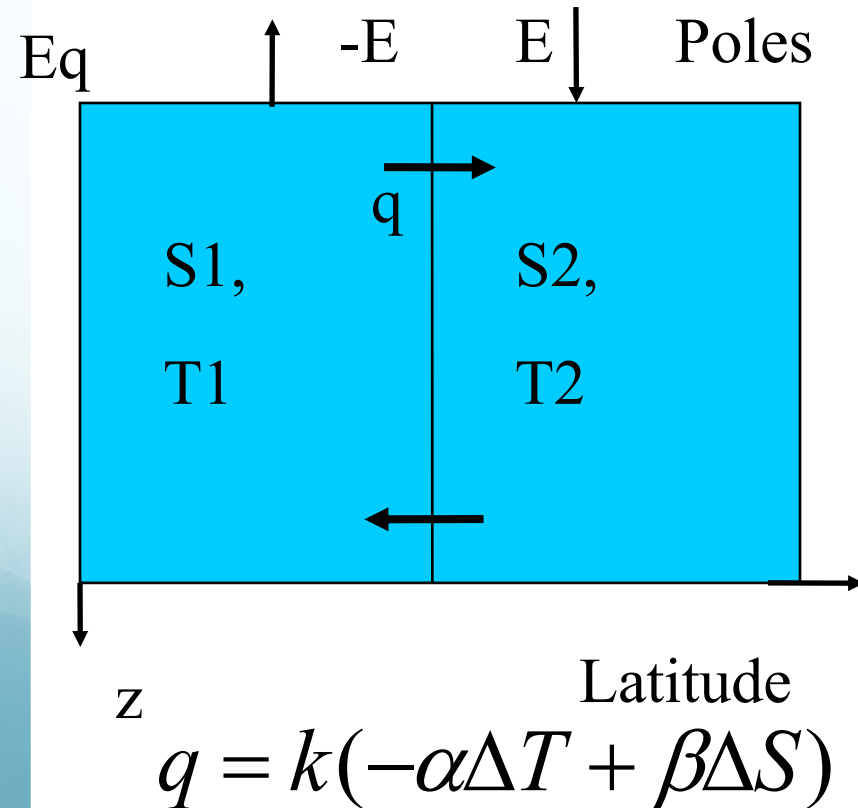


Événement de Heinrich

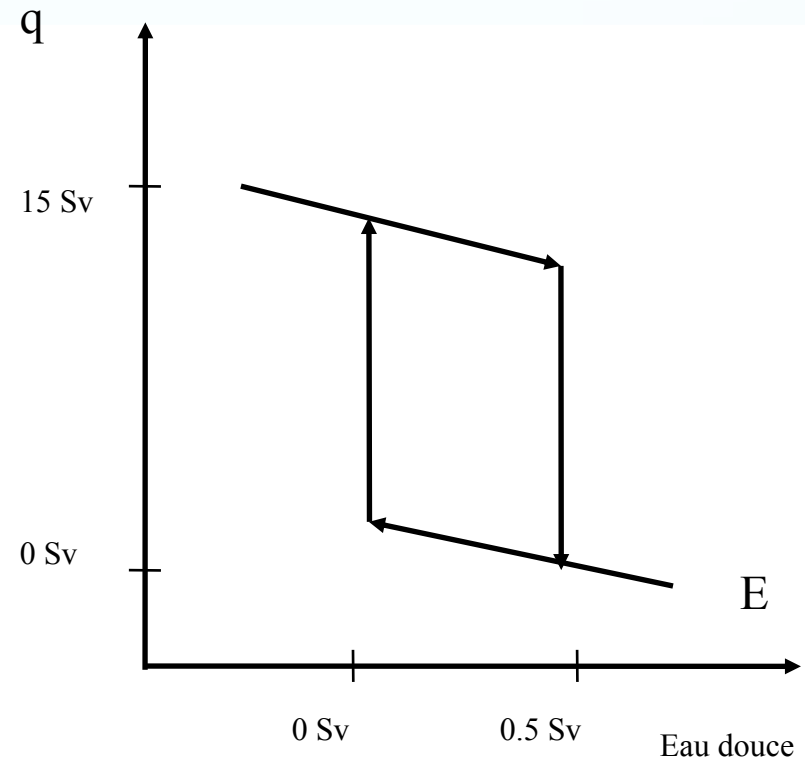


Circulation thermohaline : un système non-linéaire

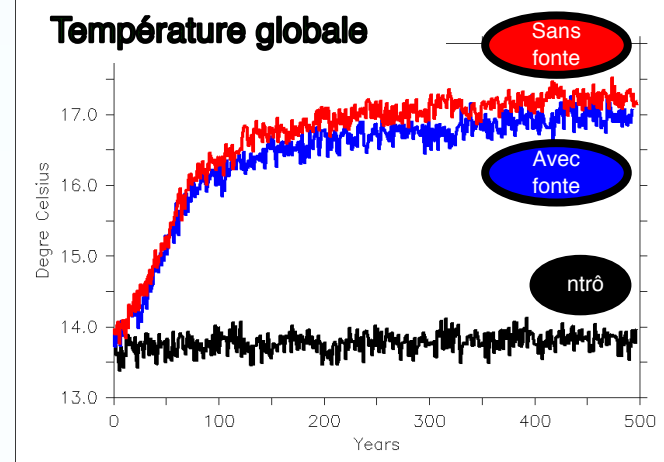
Modèle de Stommel (1961)



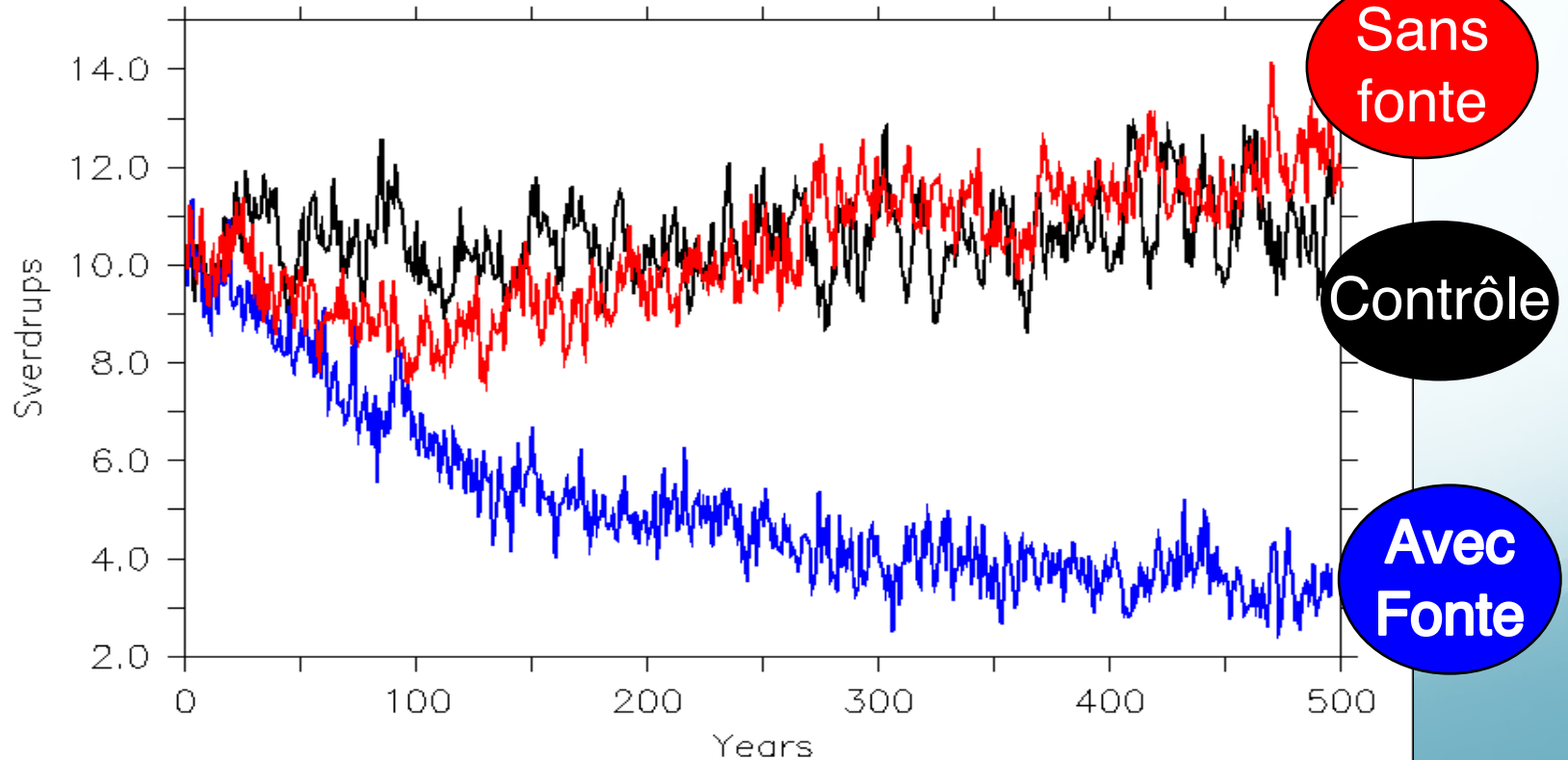
2 états stables



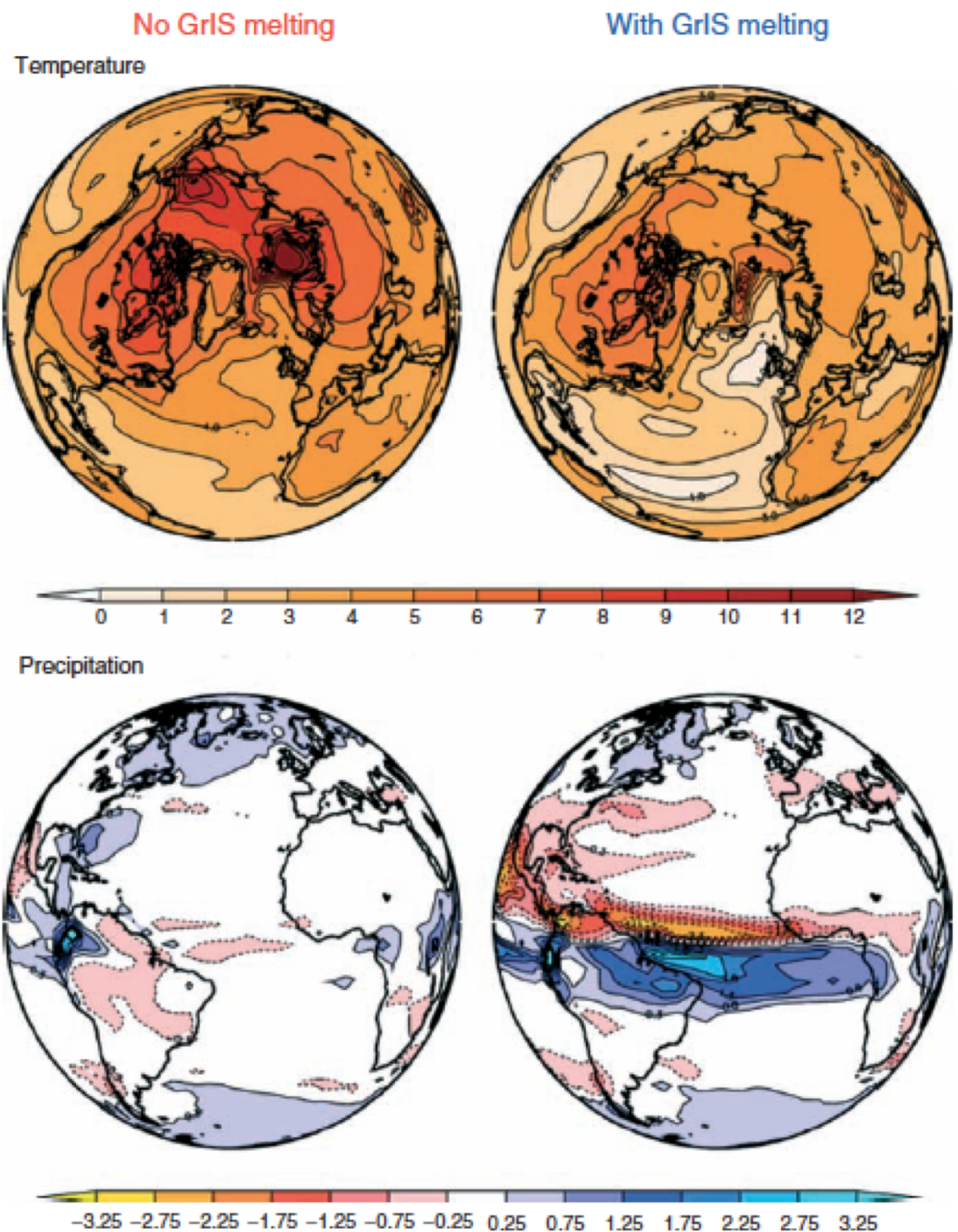
Réponse de la circulation thermohaline à la fonte de la calotte groenlandaise



Indice d'intensité de la circulation



Et si la circulation thermohaline s'arrêtait : impact climatique



Conclusions

- Une science assez jeune, en plein développement
- Beaucoup de choses reste à découvrir sur la variabilité passé et future du climat
- Modèle, outil indispensable pour comprendre la dynamique du climat (observations restent "la vérité" comme pour toute science)
- Possibilité de stage avec moi si intéressé(e)

CLIMAT

Modéliser pour comprendre et anticiper

