

Changement climatique: mécanismes et projections



Jean-Louis Dufresne

CNRS / IPSL / LMD

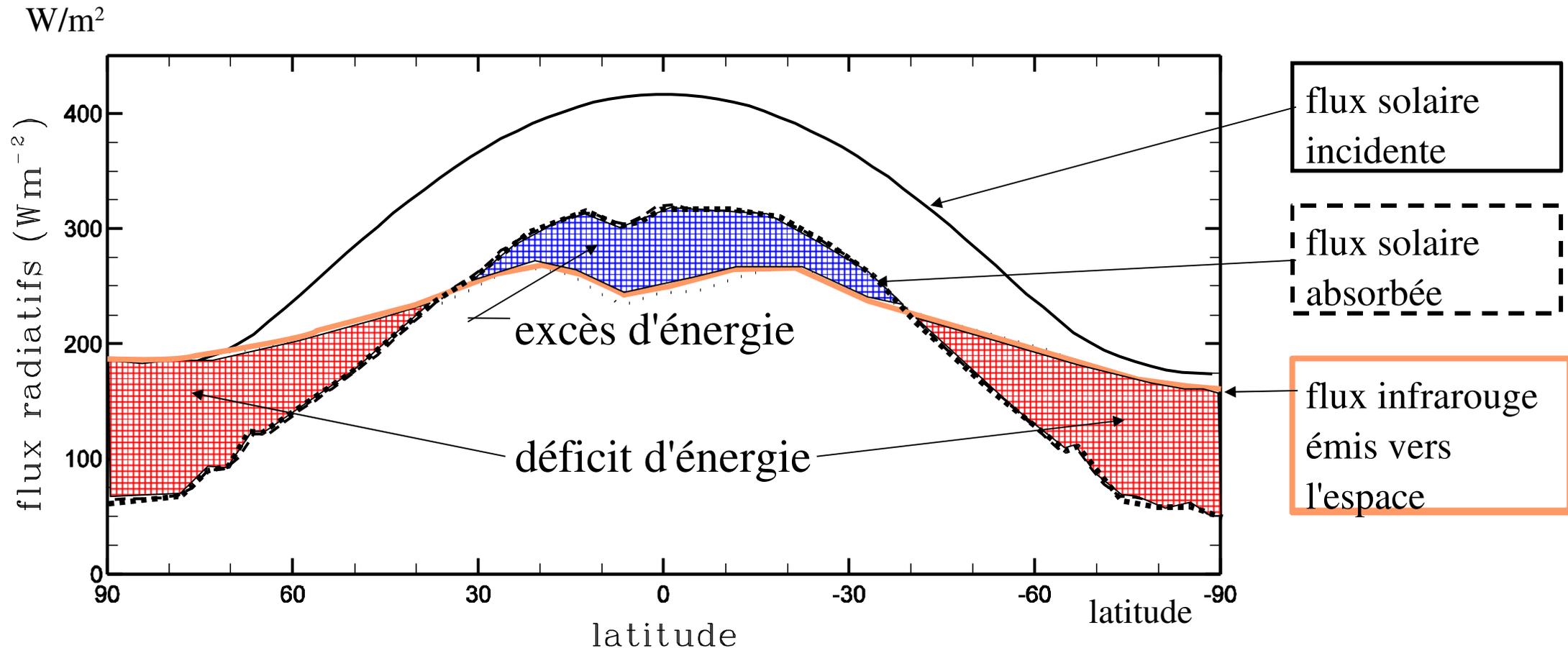
dufresne@lmd.jussieu.fr

<http://www.lmd.jussieu.fr/~jldufres>

Plan

- **Bilan radiatif et circulation générale atmosphérique**
 - transport d'énergie
 - circulation de Hadley-Walker
 - circulation des moyennes latitudes
- **Circulation atmosphérique et cycle de l'eau**
- **Échanges radiatifs et effet de serre**
- **Modélisation du climat**
- **Estimation des changements climatiques dus aux activités humaines**

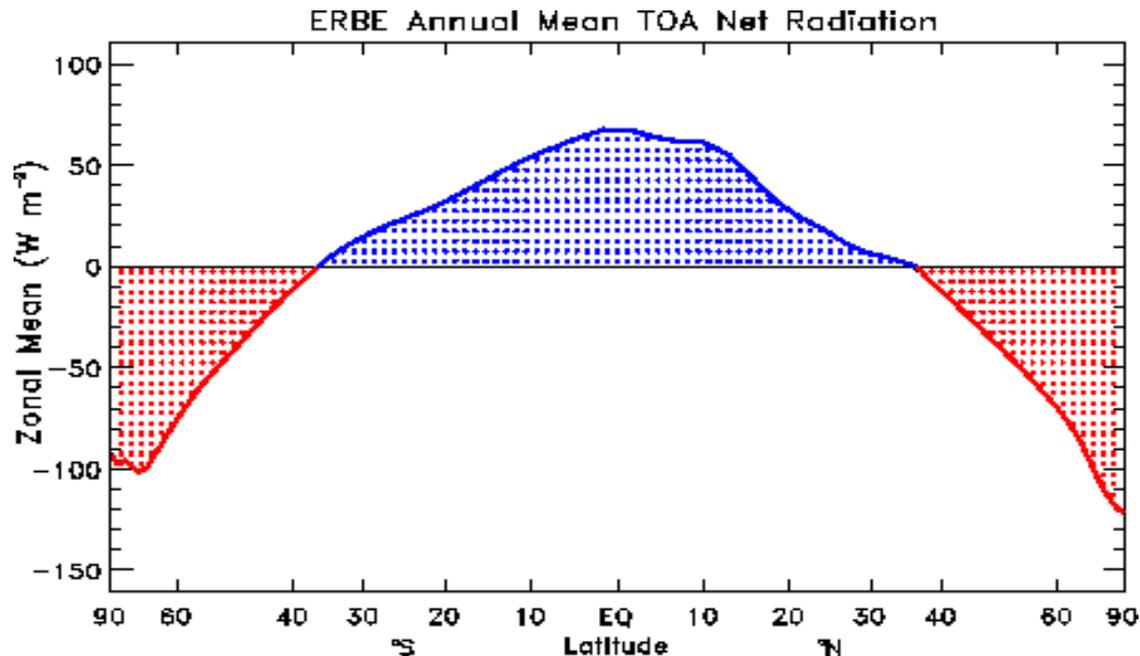
Les redistributions d'énergie en latitude



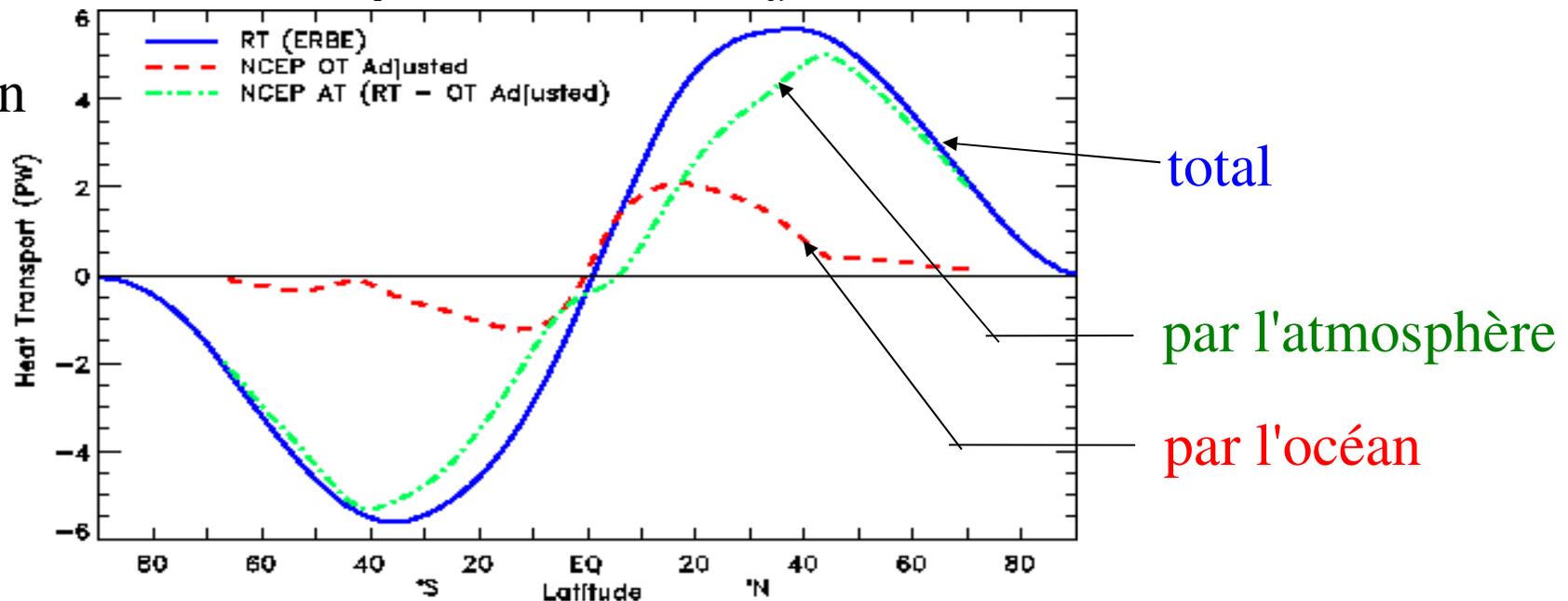
Moyenne annuelle et longitudinale du flux d'énergie radiative au sommet de l'atmosphère évalué par observations satellitaires.

Les redistributions d'énergie en latitude

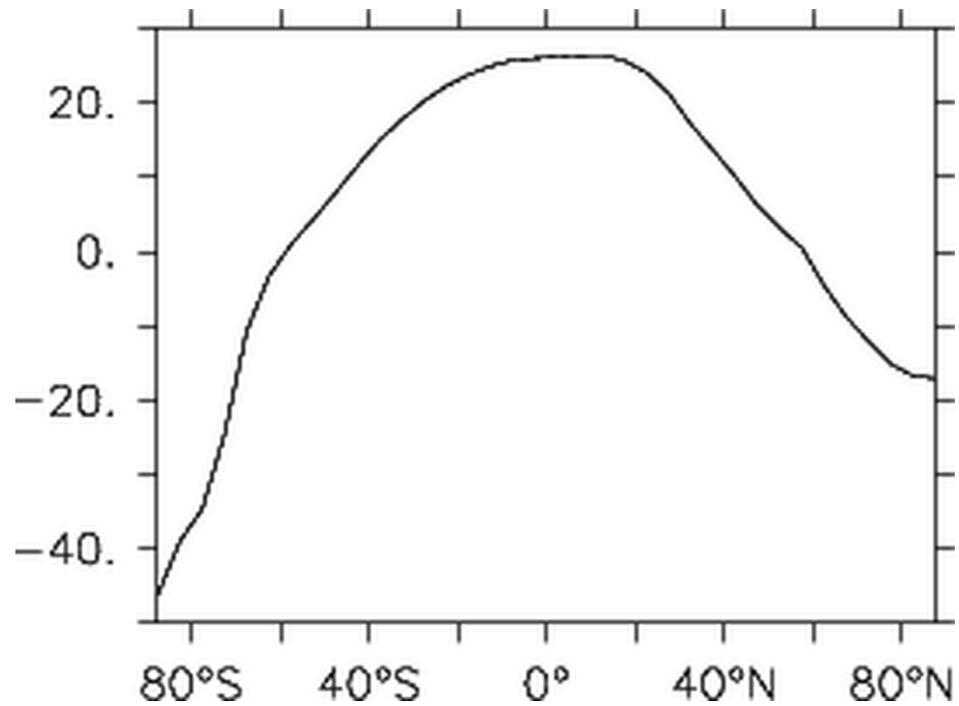
Bilan d'énergie
au sommet de
l'atmosphère
(W/m²)



Transport méridien
d'énergie
(PW, 10¹⁵W)

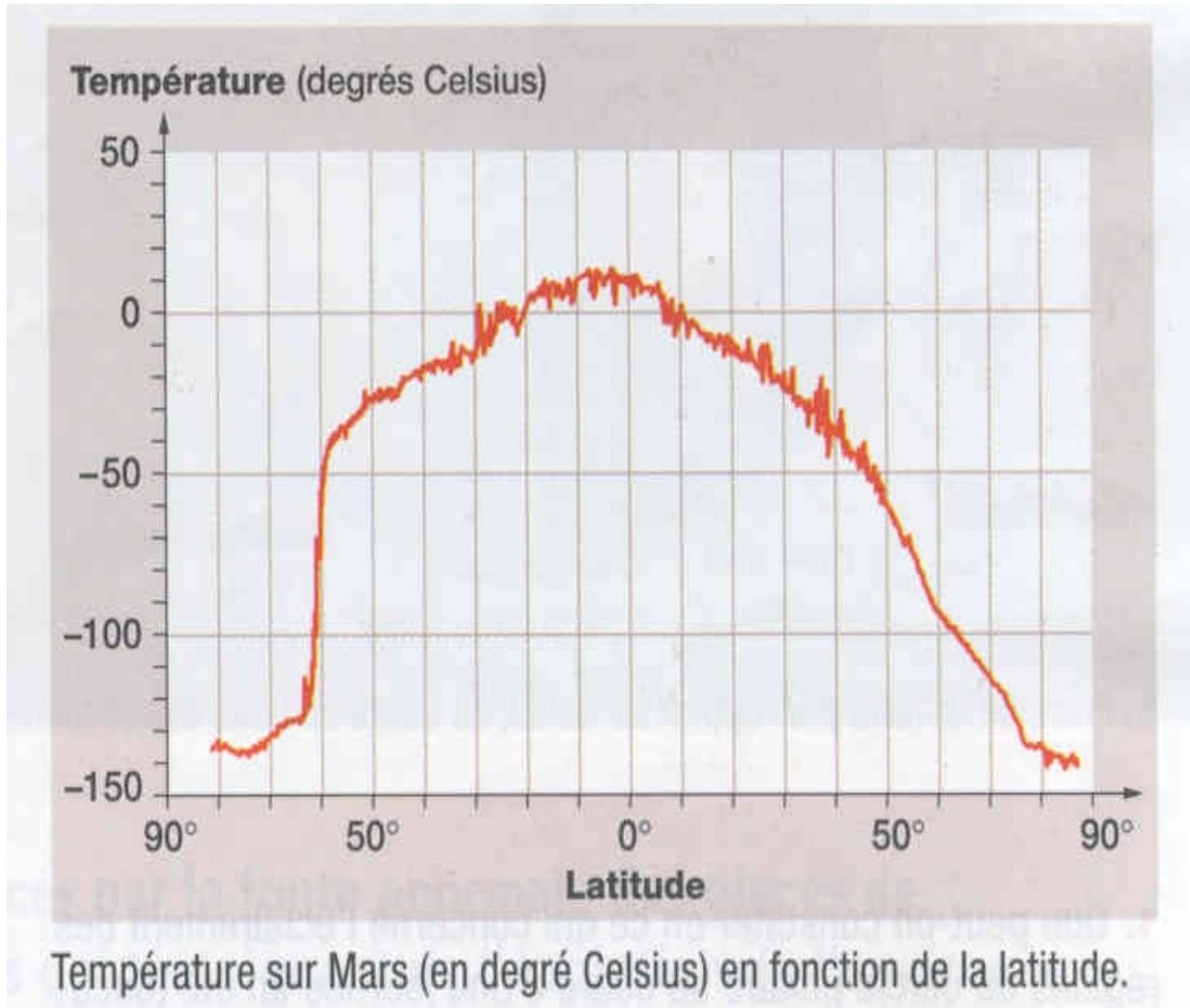


Variation latitudinale de la température... sur Terre



Variation latitudinale de la température...

sur Mars et sur Terre



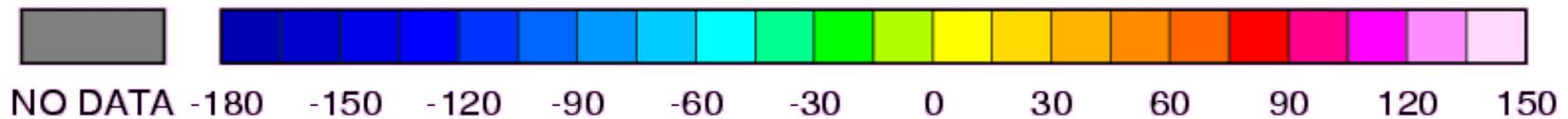
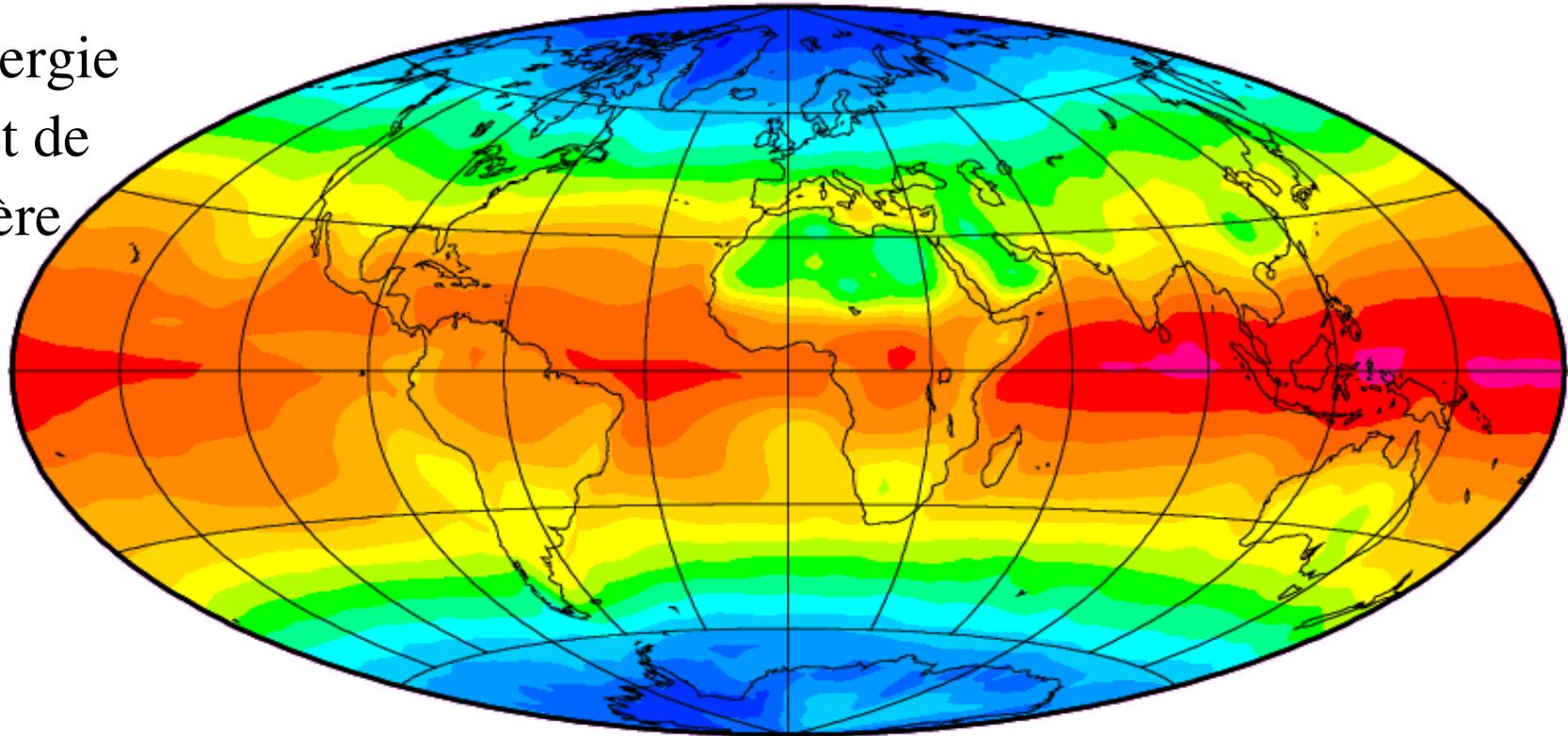
Par rapport à la Terre, il y a sur Mars:

- moins d'effet de serre
 - moins de transport d'énergie équateur-pôles (atmosphère plus fine)
- => différences de température équateur-pôle plus importante

Les redistributions d'énergie en latitude

Net Radiation
1985-1986

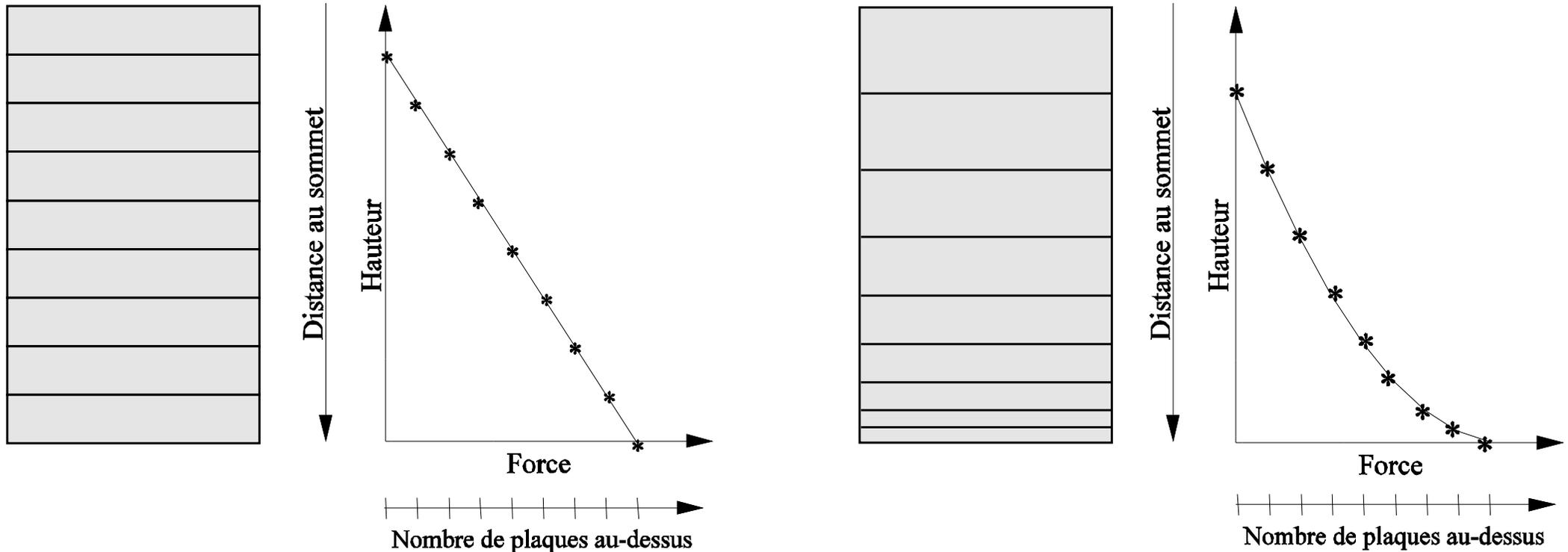
Bilan d'énergie
au sommet de
l'atmosphère
(W/m²)



W/m^{**2}

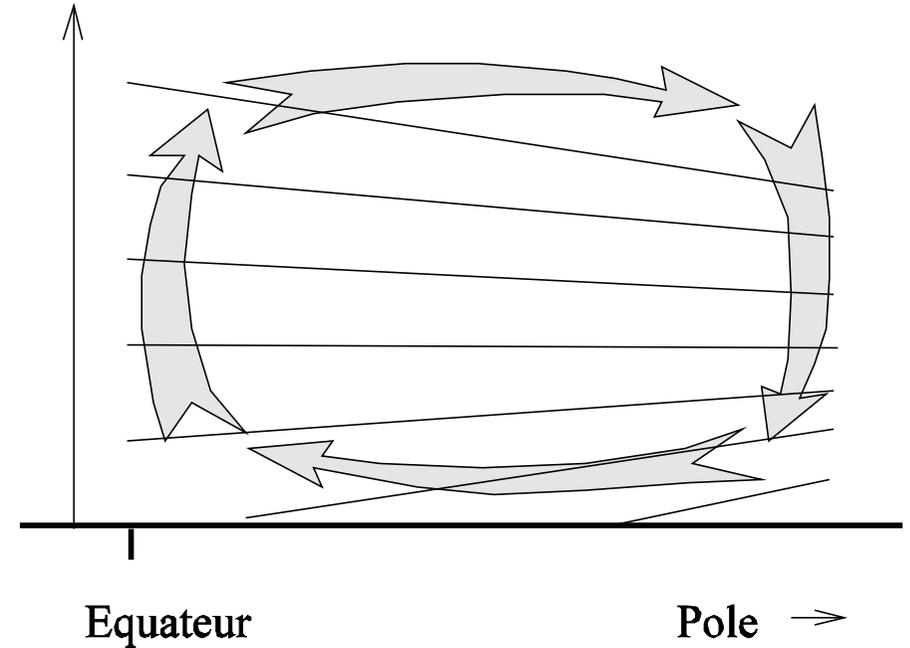
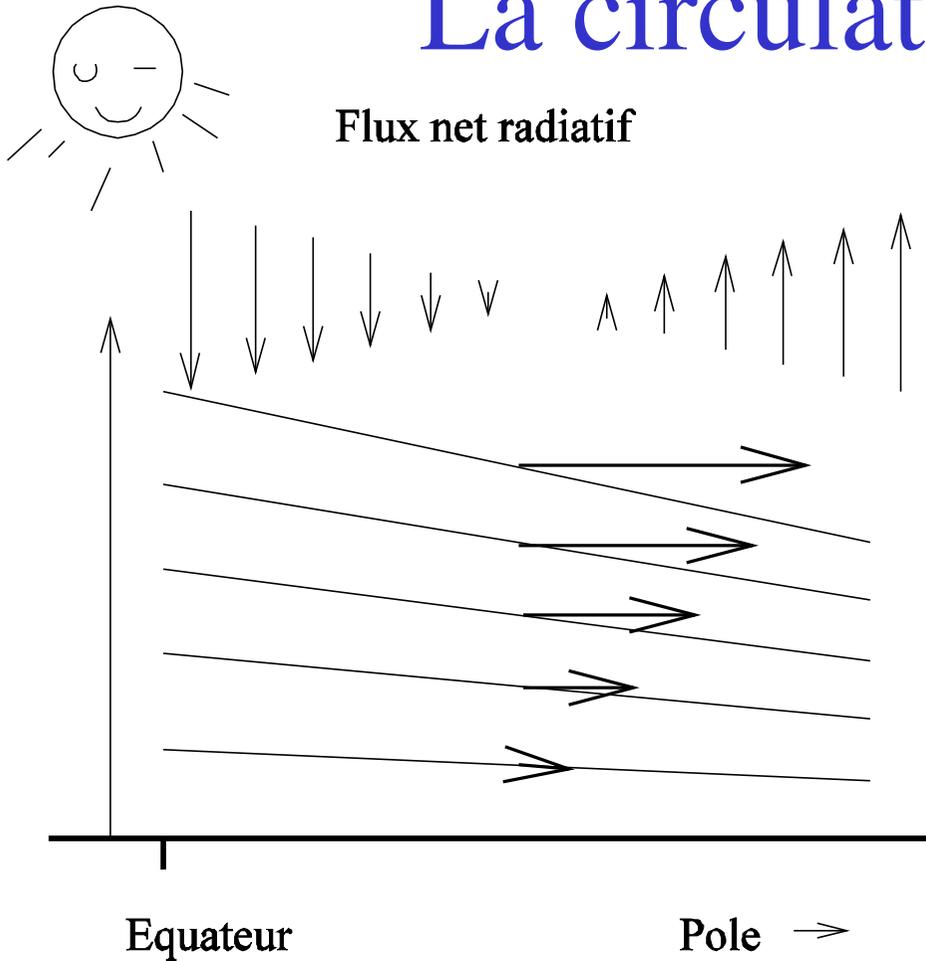
La pression

1) Pression hydrostatique : elle baisse avec l'altitude



2) Pression dynamique : liée au mouvement des fluides. Ils se dirigent des hautes vers les basses pressions (en écart par rapport à l'équilibre hydrostatique). Ex: vases communicants

La circulation de Hadley



Variations latitudinales du flux radiatif net (en haut), courbes à pression constante ou isobares (les droites penchées), force de gradient de pression créée par l'inclinaison de ces isobares.

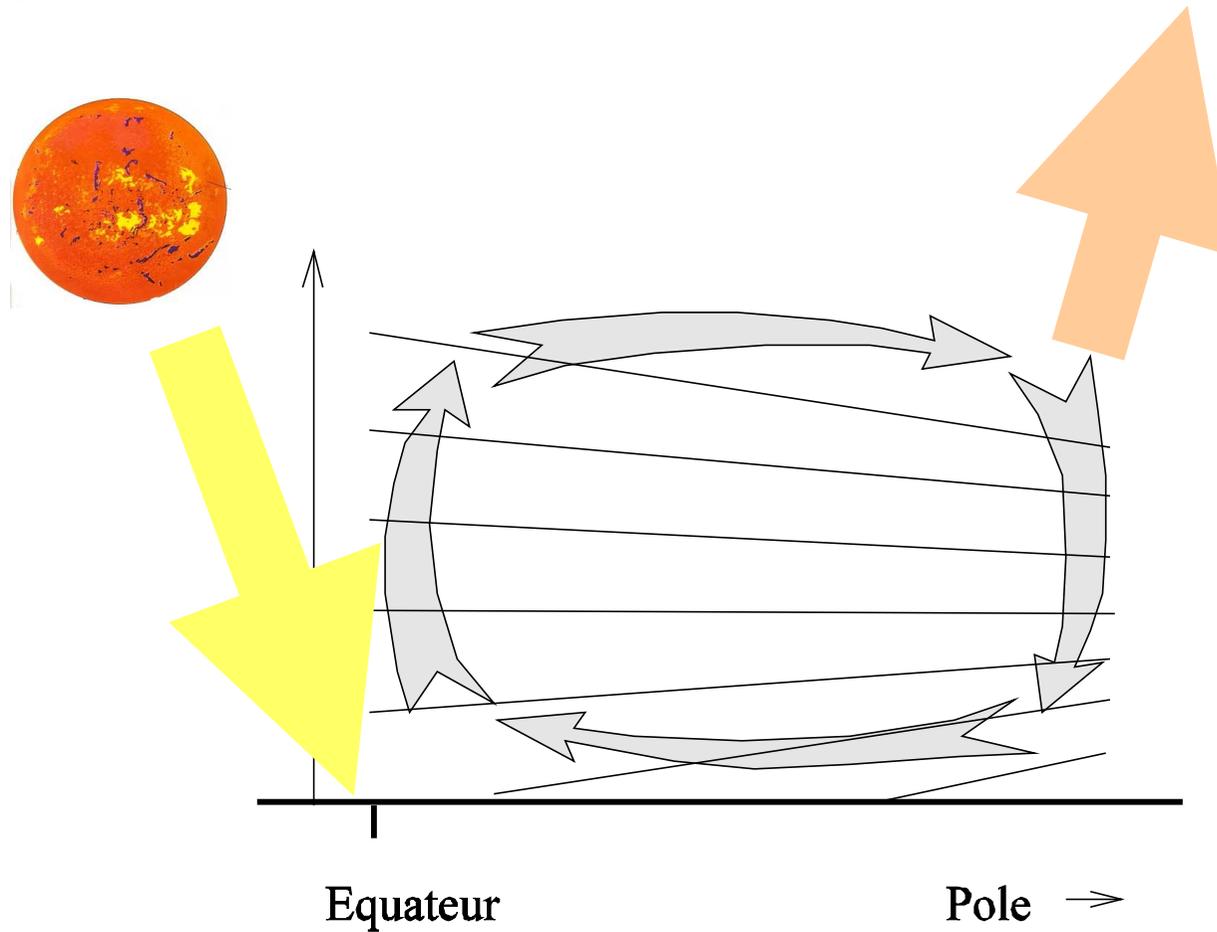
Représentation schématique de la cellule de Hadley

[Hourdin]

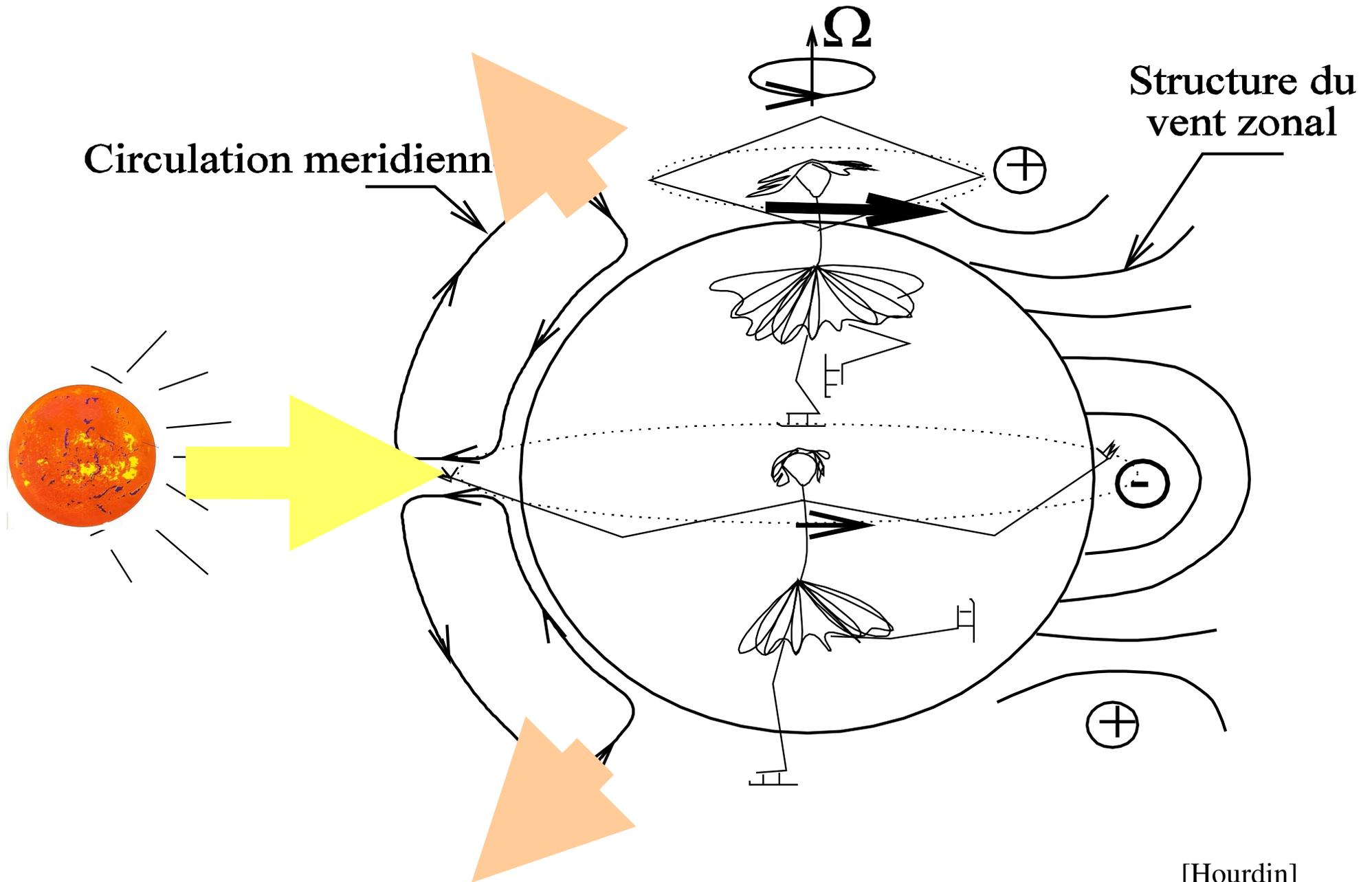
La circulation de Hadley

Apport d'énergie par rayonnement solaire

Perte d'énergie par rayonnement infra-rouge



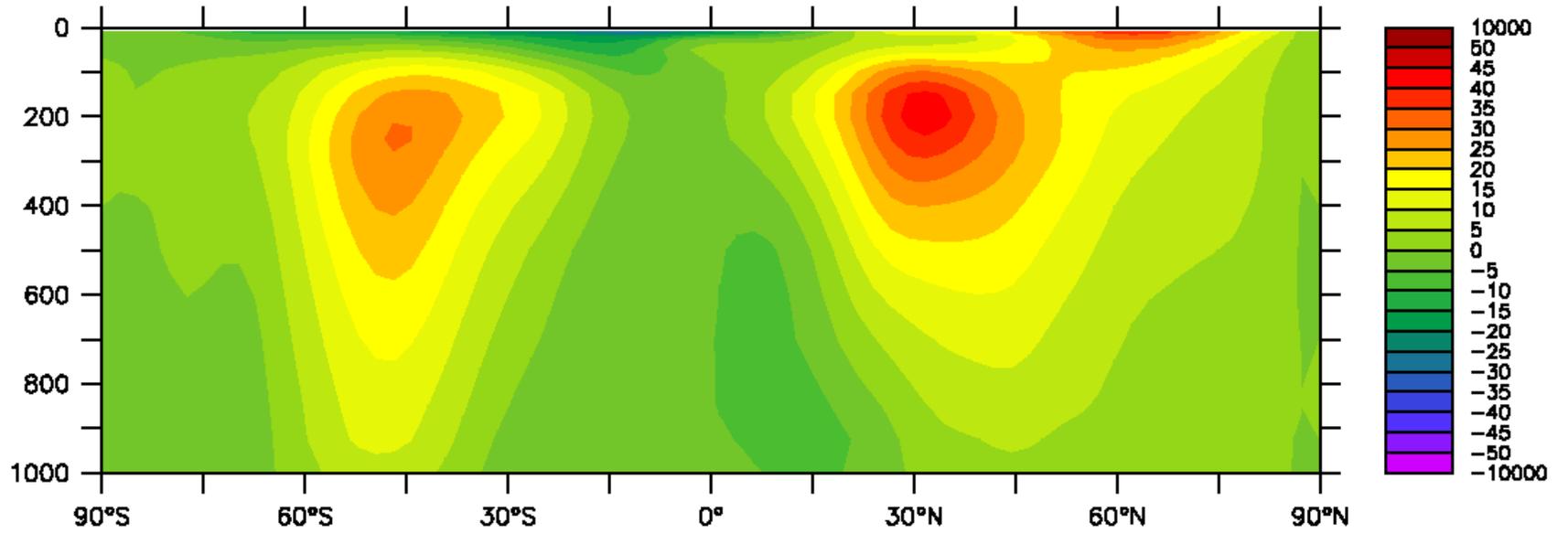
Extension vers le nord de la cellule de Hadley



Vents Zonaux

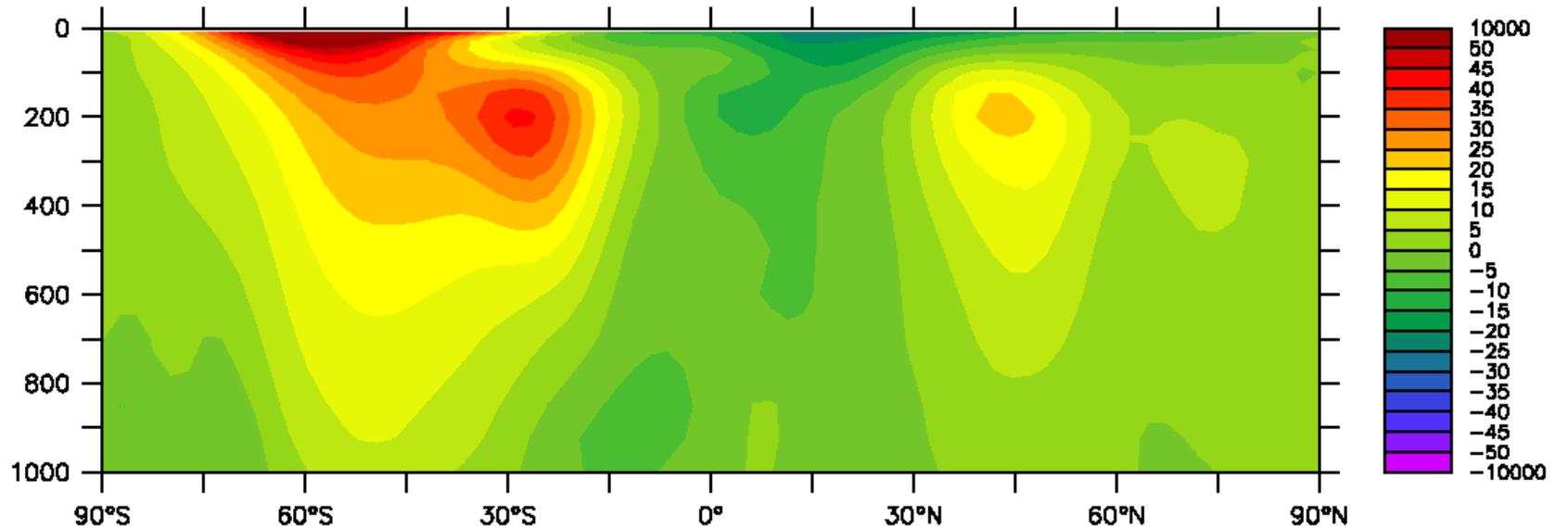
altitude (hPa)

Janvier



latitude

Juillet



La circulation méridienne (Hadley)

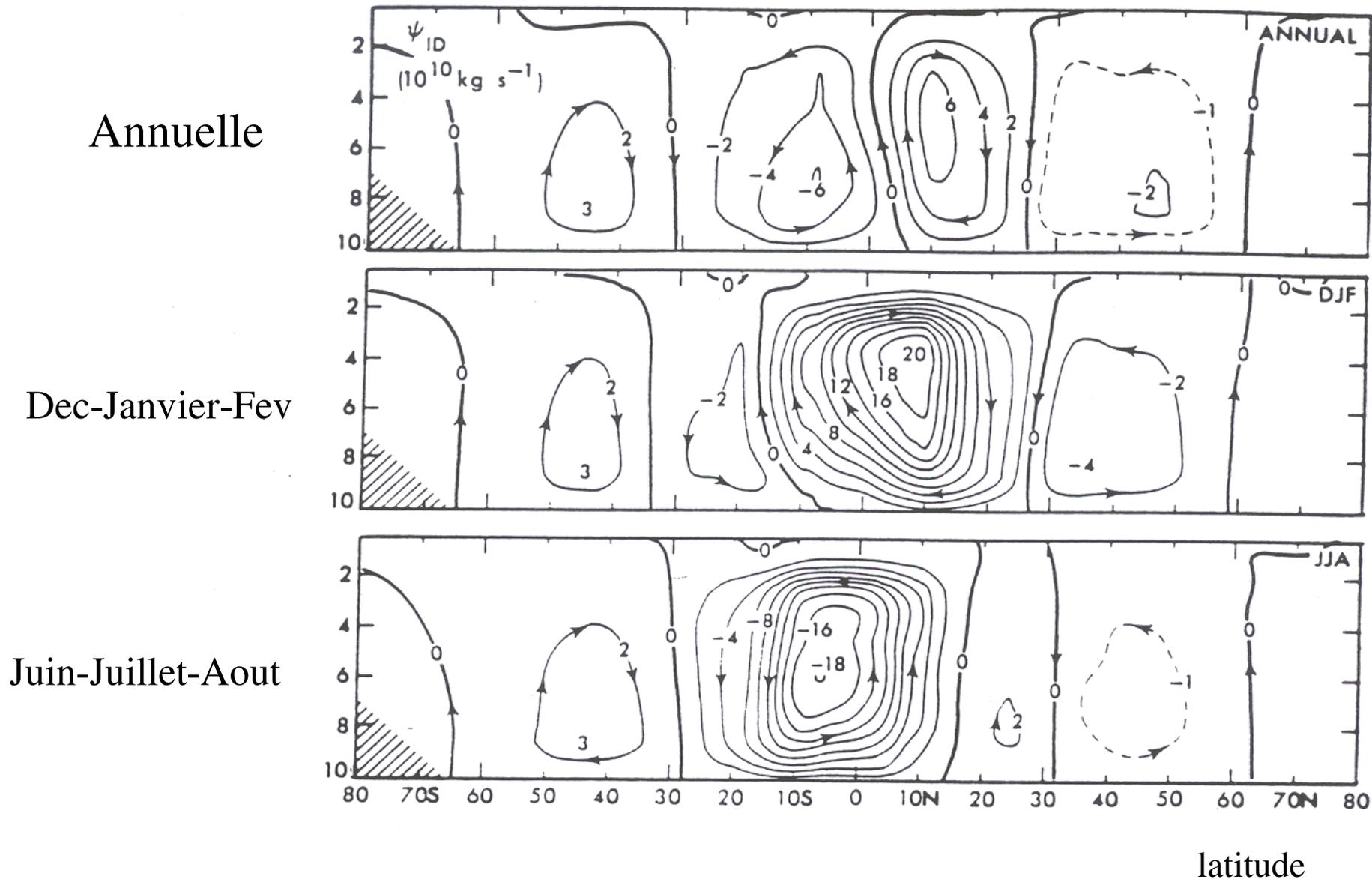
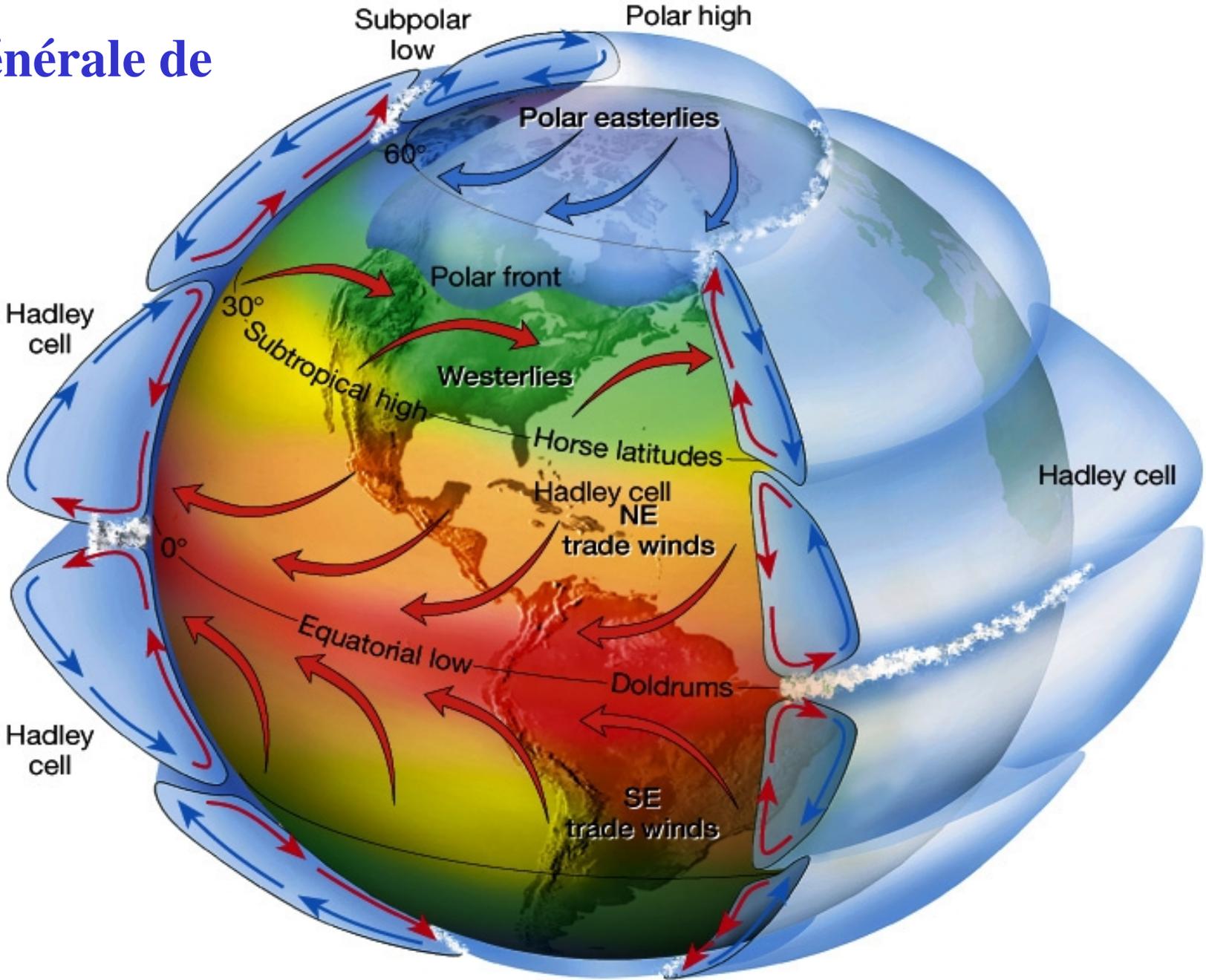


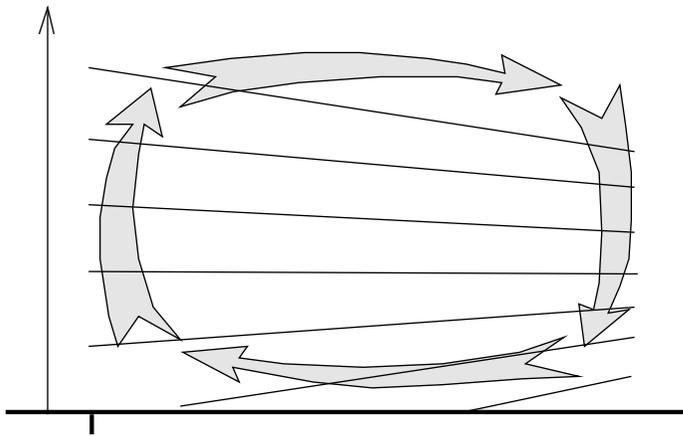
Figure 1.9 *Mouvement méridien moyen, représenté par une fonction de courant dans le plan latitude, pression, d'après Peixoto et Oort [1992].*

Circulation générale de L'atmosphère



Circulation générale et pression de surface

Juillet



Équateur

Sub-tropiques

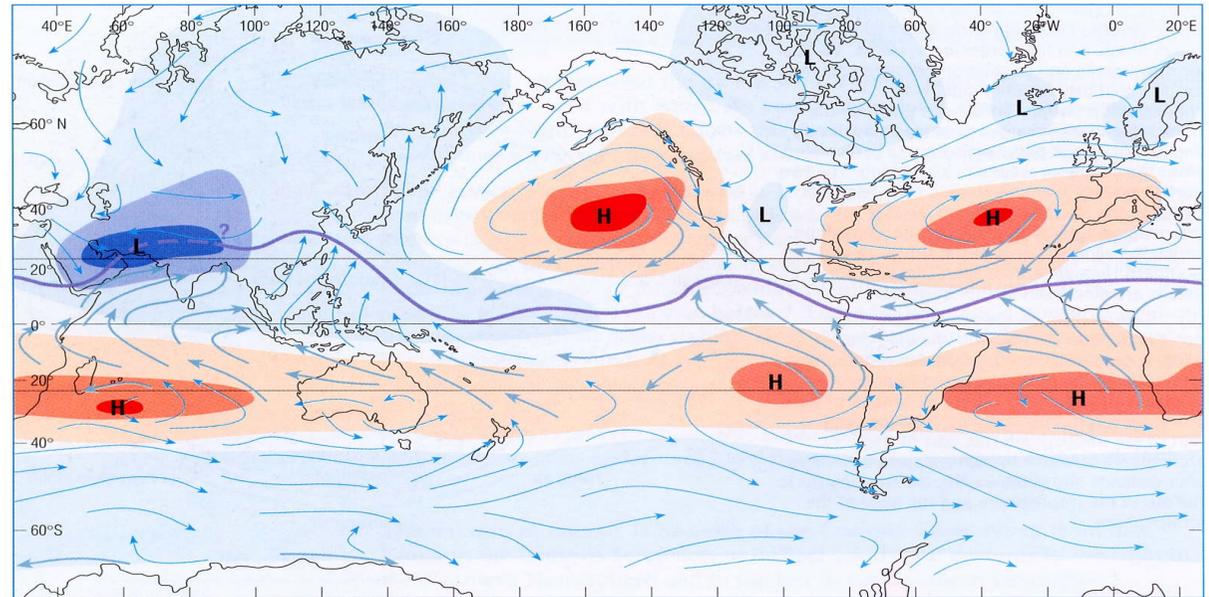
Basse pression

Haute pression

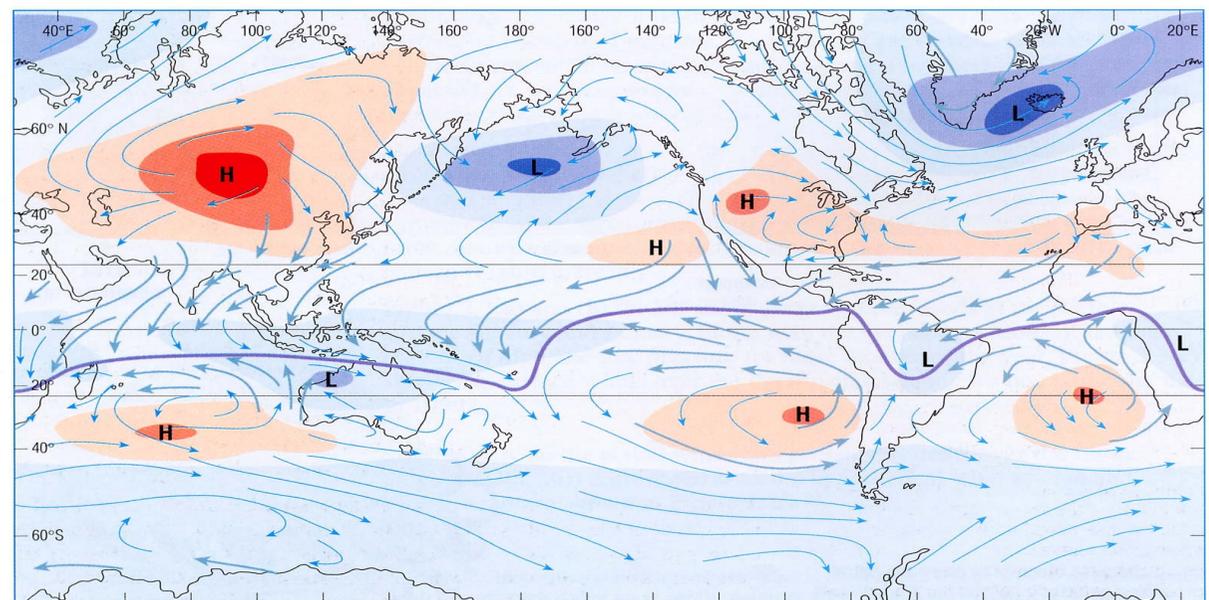
Ascendance

Subsidence

Janvier



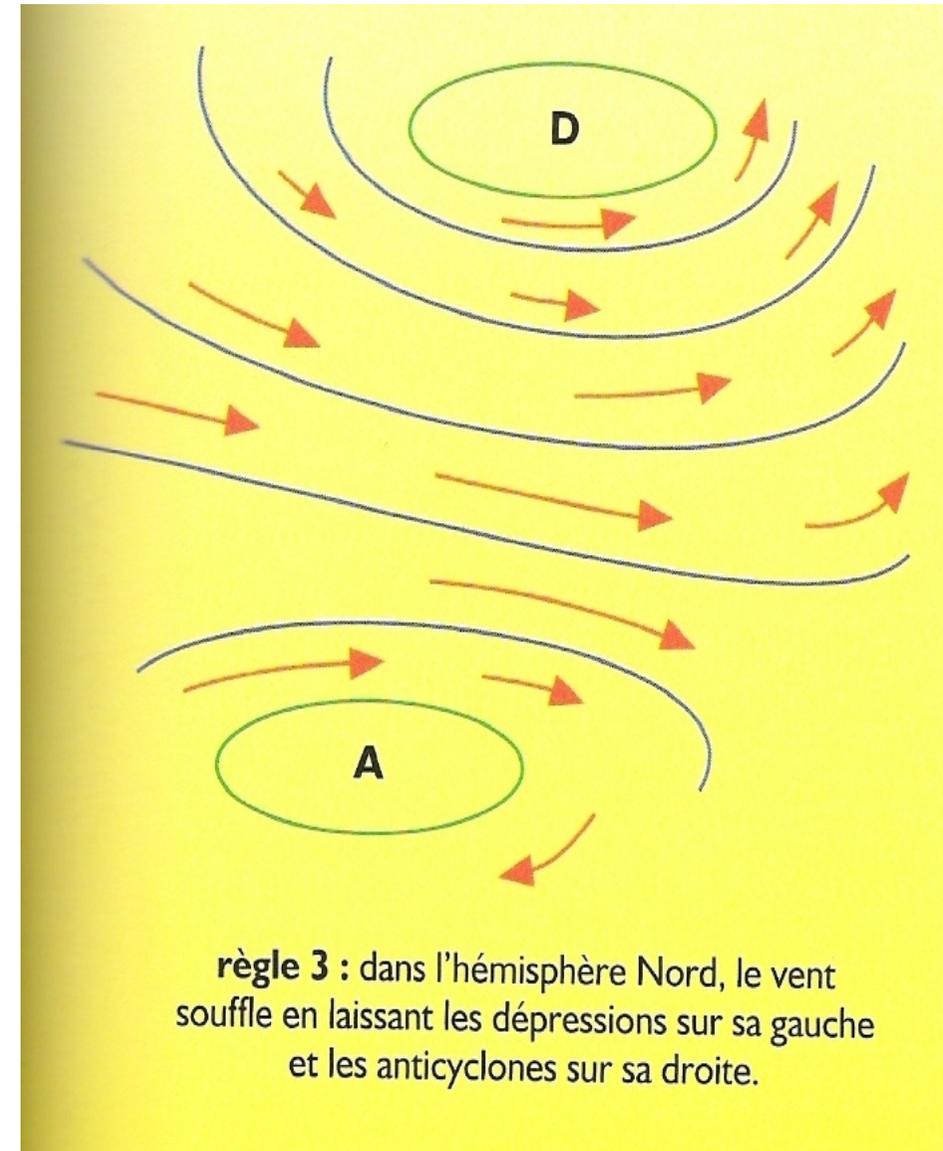
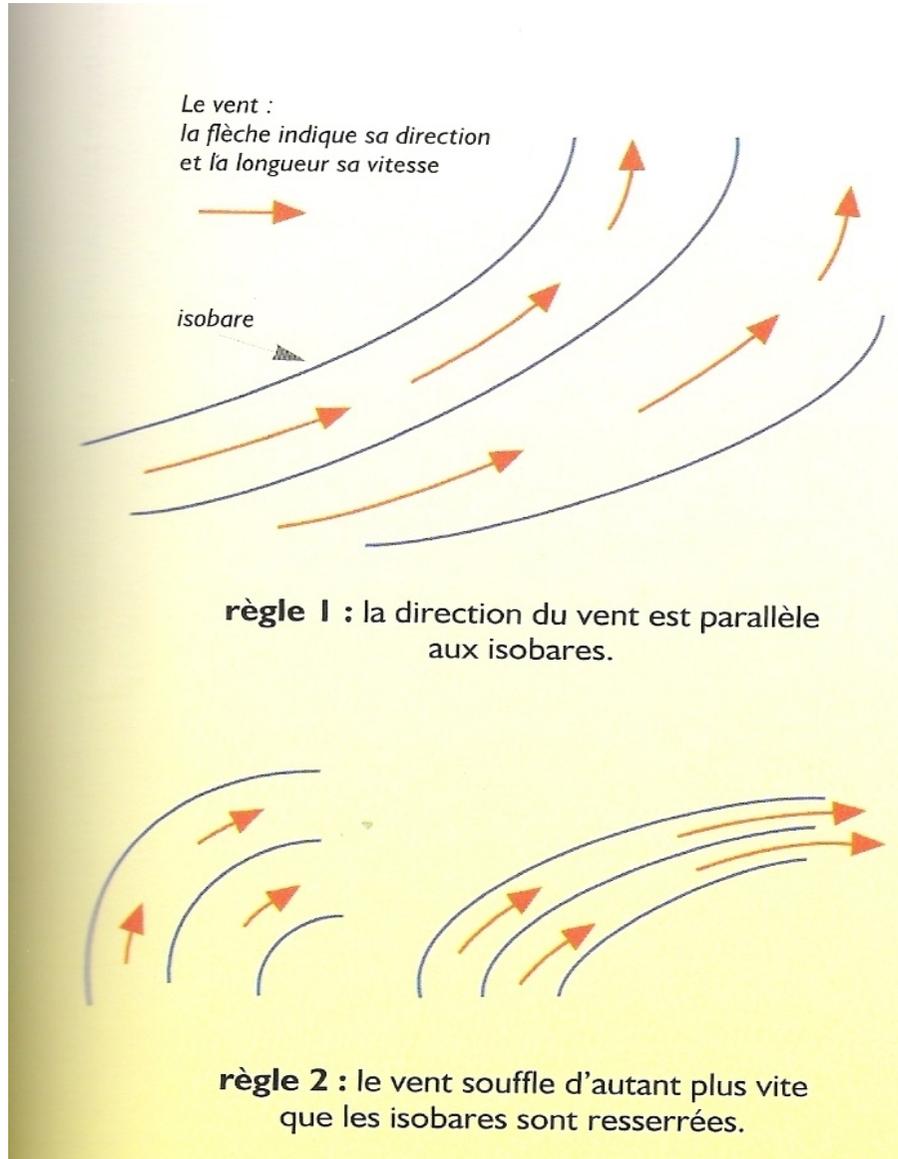
(a) JULY KEY ——— mean position of ITCZ ← most frequent wind direction ← prevailing wind direction (≥50% of observations)



(b) JANUARY

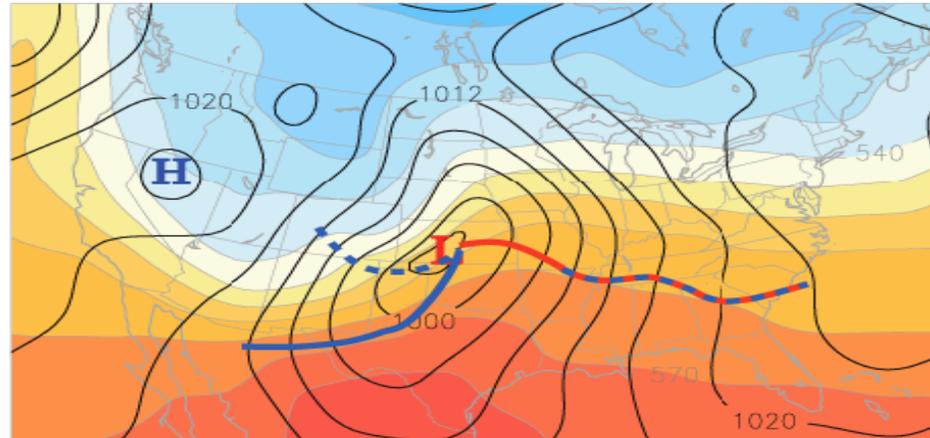
La circulation aux moyennes latitudes. Vent géostrophique

$$f\vec{k} \wedge \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p \quad \text{Force de Coriolis} = \text{force de pression horizontale}$$

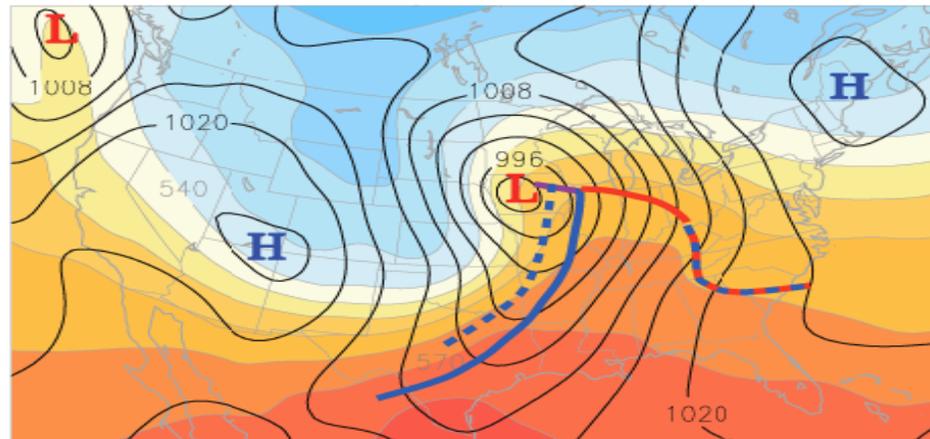


Exemple d'évolution d'une dépression

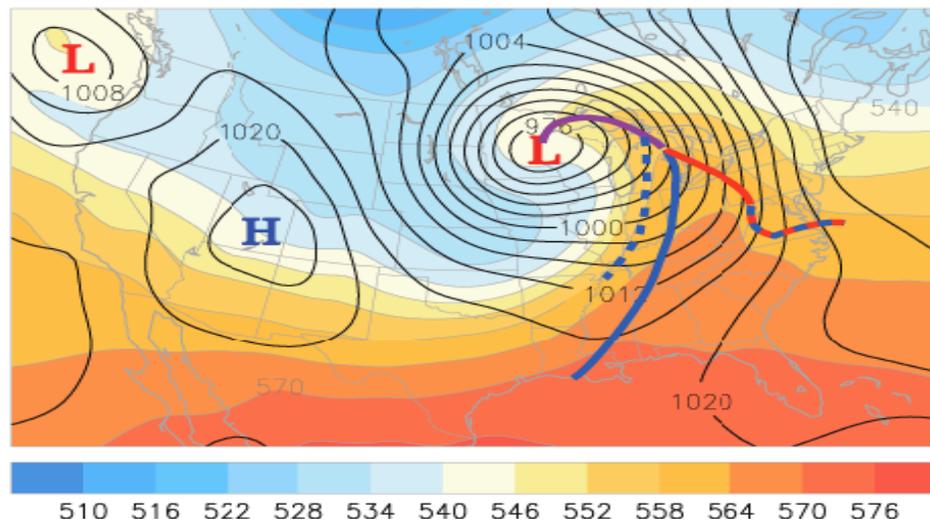
1.



2.



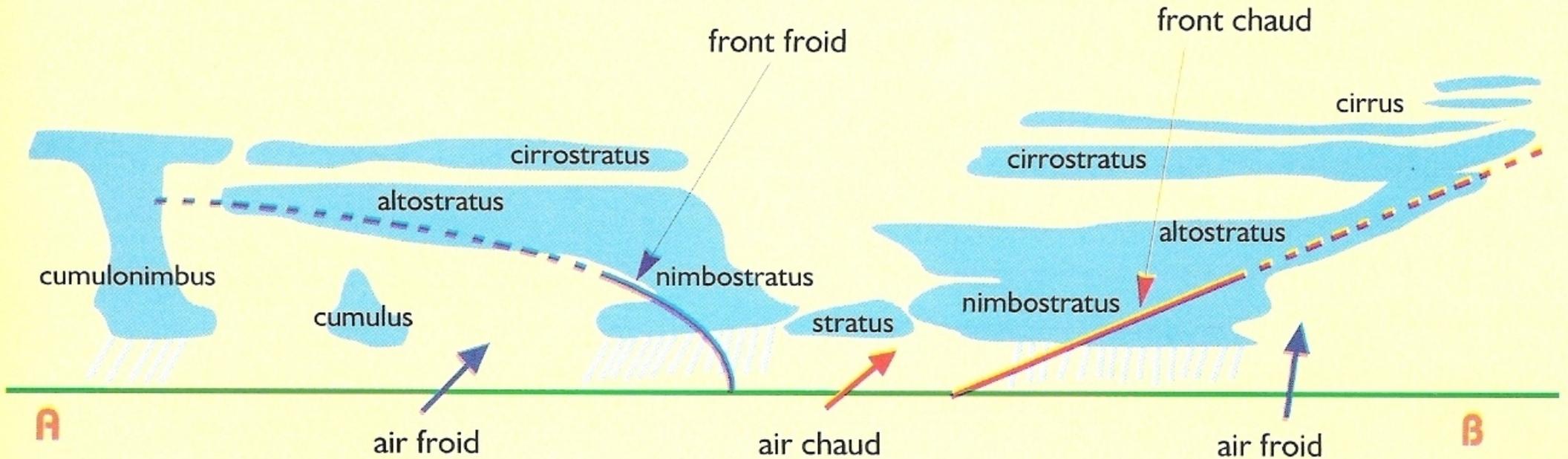
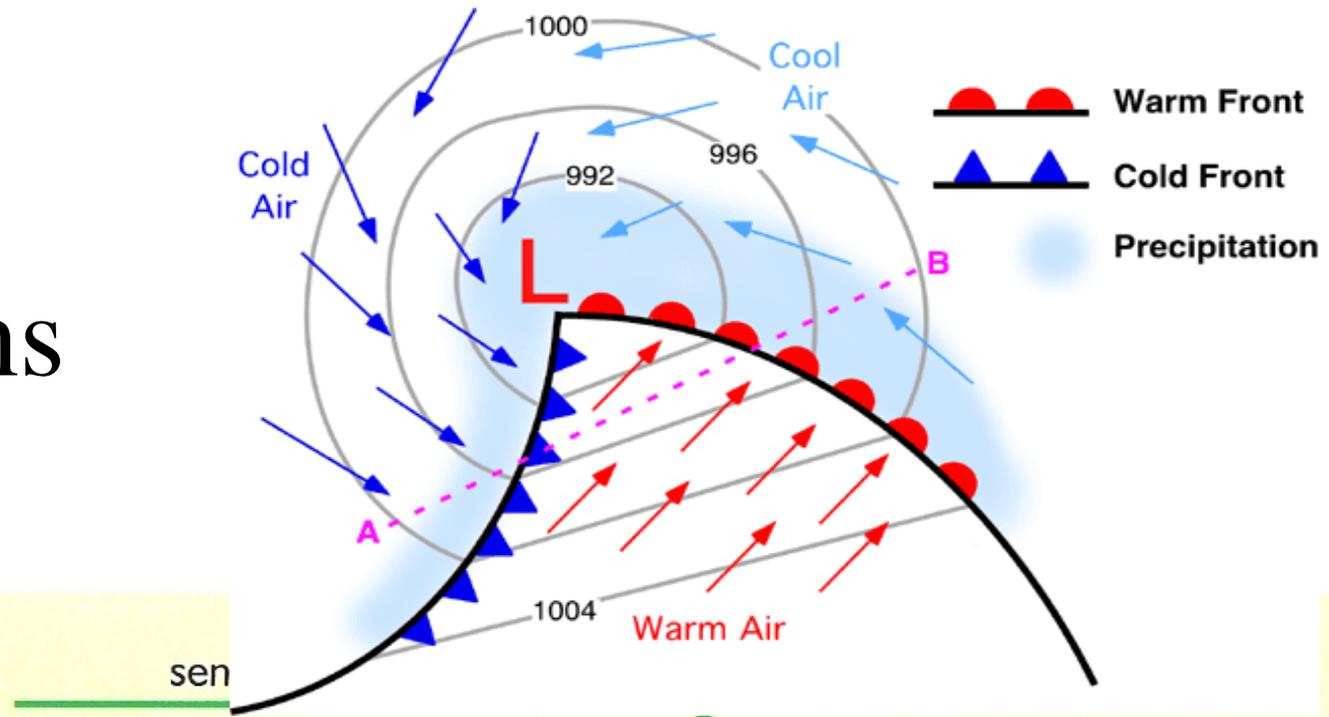
3.



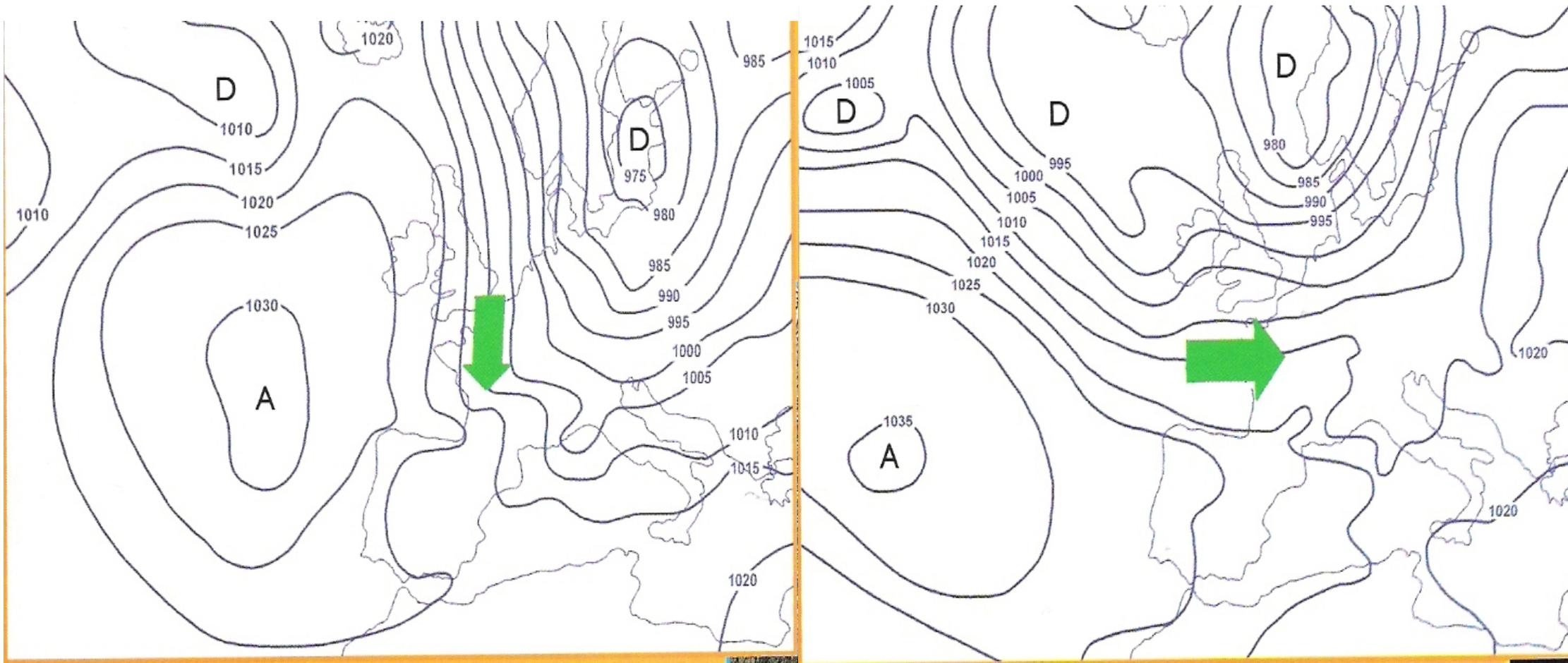
Droite:
Pression à Z=0
Epaisseur 1000-500hPa
(=Température)

510 516 522 528 534 540 546 552 558 564 570 576

Fronts, nuages et précipitations



Pression, circulation



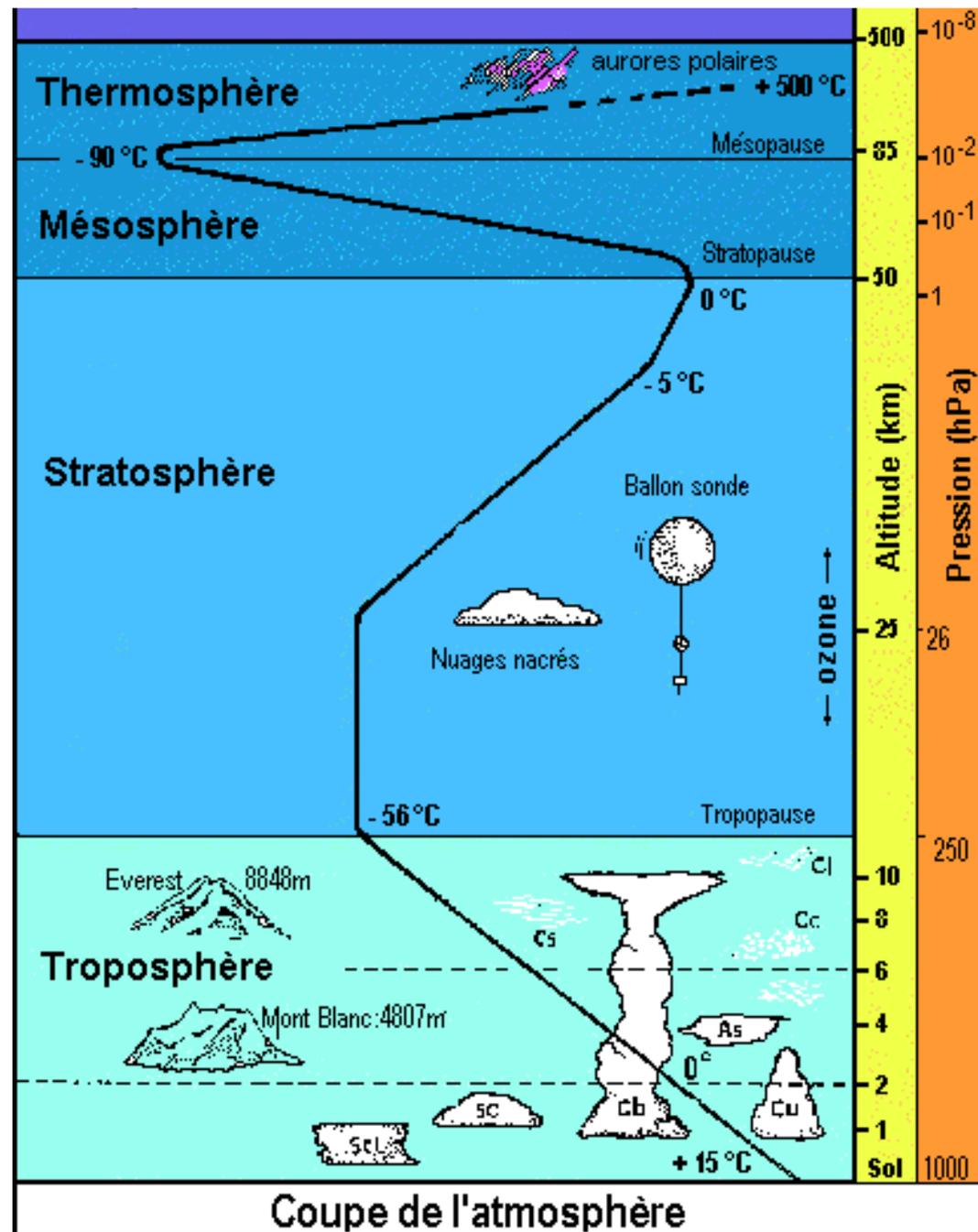
Ecoulement du nord:
baisse des températures

Ecoulement d'ouest:
doux et humides

Plan

- Bilan radiatif et circulation générale atmosphérique
- **Circulation atmosphérique et cycle de l'eau**
 - profil verticale de température
 - distribution des pluies et de la végétation
 - distribution de la vapeur d'eau
 - distribution des nuages
- Echanges radiatifs et effet de serre
- Modélisation du climat
- Estimation des changements climatiques dus aux activités humaines

Profil vertical de l'atmosphère



Profil vertical de l'atmosphère

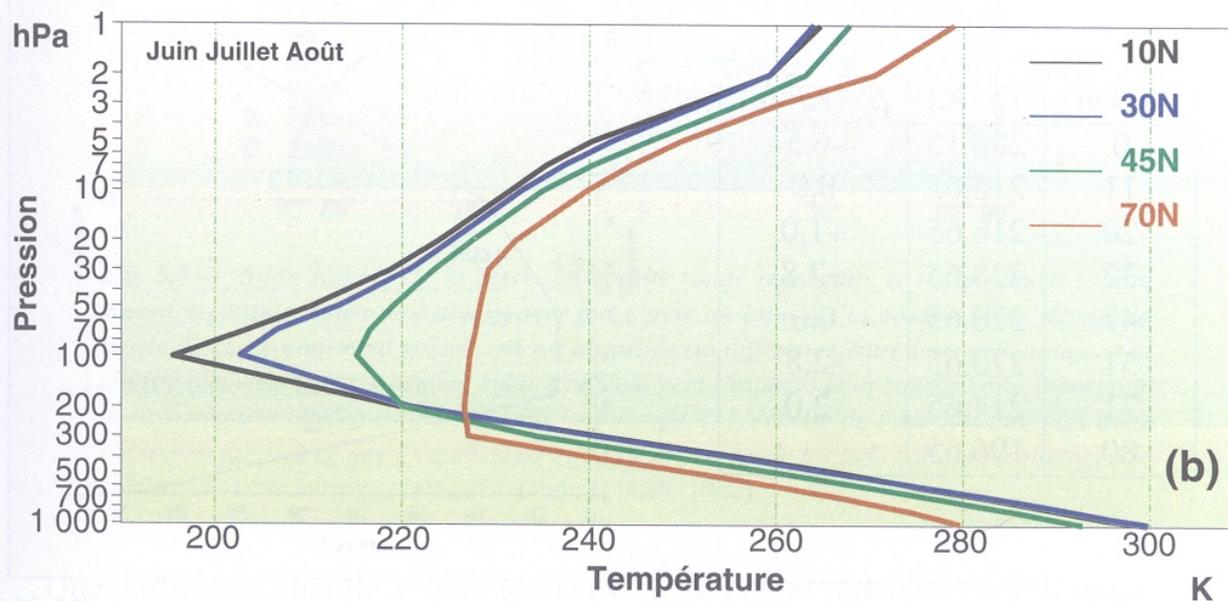
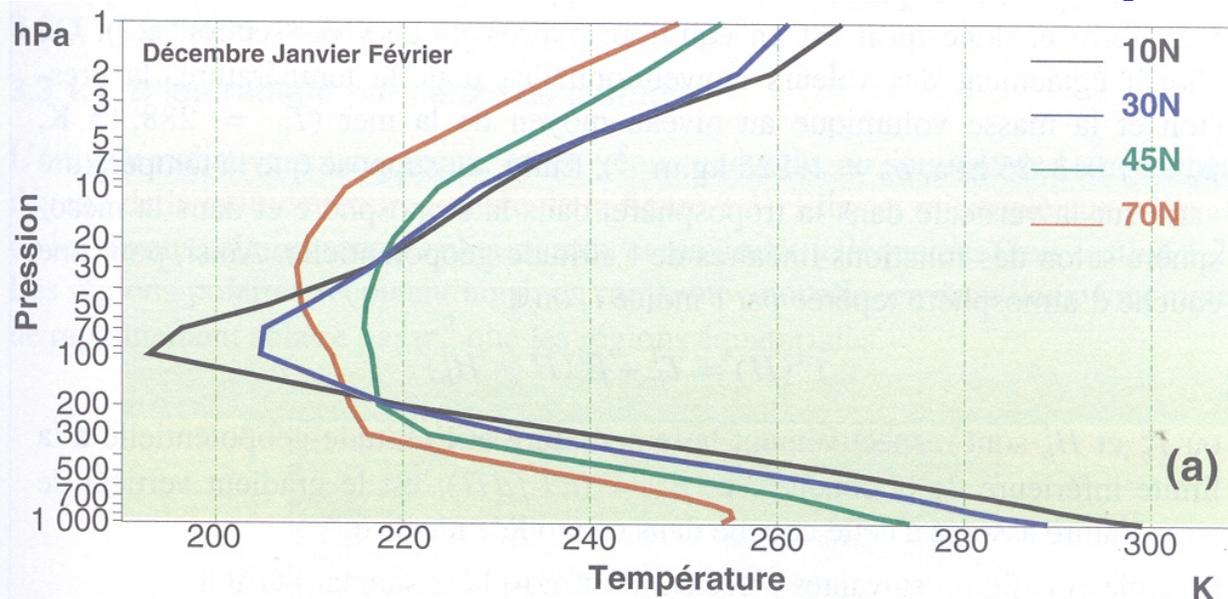


Fig. 3.2 — Profils verticaux de température moyenne entre 1 000 hPa et 1 hPa calculés à partir des réanalyses ERA40 aux 70N, 45N, 30N et 10N : (a) en hiver, (b) en été.

Profil vertical de l'atmosphère

Trois concepts importants pour comprendre et interpréter le profil vertical de température dans la basse atmosphère (< 12 à 15km)

- 1) La pression hydrostatique baisse avec l'altitude
- 2) La température baisse quand la pression baisse
- 3) La pression vapeur saturante de l'eau diminue avec la température

Profil vertical de l'atmosphère

1) La pression hydrostatique baisse avec l'altitude

Equilibre hydrostatique: $\rho g = \partial p / \partial z$

avec ρ : masse volumique de l'air ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

p : Pression (Pa)

z : altitude (m)

g : accélération due à la gravité ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)

avec l'hypothèse des gaz parfaits $p = \rho RT$

$\implies 1/p \partial p / \partial z = -g/RT$

Avec l'hypothèse d'atmosphère isotherme:

$\implies p = p_0 \exp(-zg/RT)$

Profil vertical de l'atmosphère

2) *La température baisse quand la pression baisse*

- Conservation de l'énergie
- loi des gaz parfait
- mouvement adiabatique

$$\Rightarrow T/p^{\kappa} = \text{cte}$$

On définit la température potentielle $\Theta = T(p_0/p)^{\kappa}$ *invariante par ascendance adiabatique.*

\Rightarrow la température baisse avec l'altitude: $\partial T/\partial z \cong -6$ à -8 K/km

Mont blanc : 4800m \Rightarrow -34K plus froid qu'en plaine : si $20^{\circ} \Rightarrow -15^{\circ}\text{C}$

Mont Everest: 8800m \Rightarrow -60K plus froid qu'en plaine : si $20^{\circ} \Rightarrow -40^{\circ}\text{C}$

Avion : 10000m \Rightarrow -70K plus froid qu'en plaine : si $20^{\circ} \Rightarrow -50^{\circ}\text{C}$

Profil vertical de l'atmosphère

3) *La pression de vapeur saturante de l'eau diminue avec la température*

Equation de Clausius Clapeyron

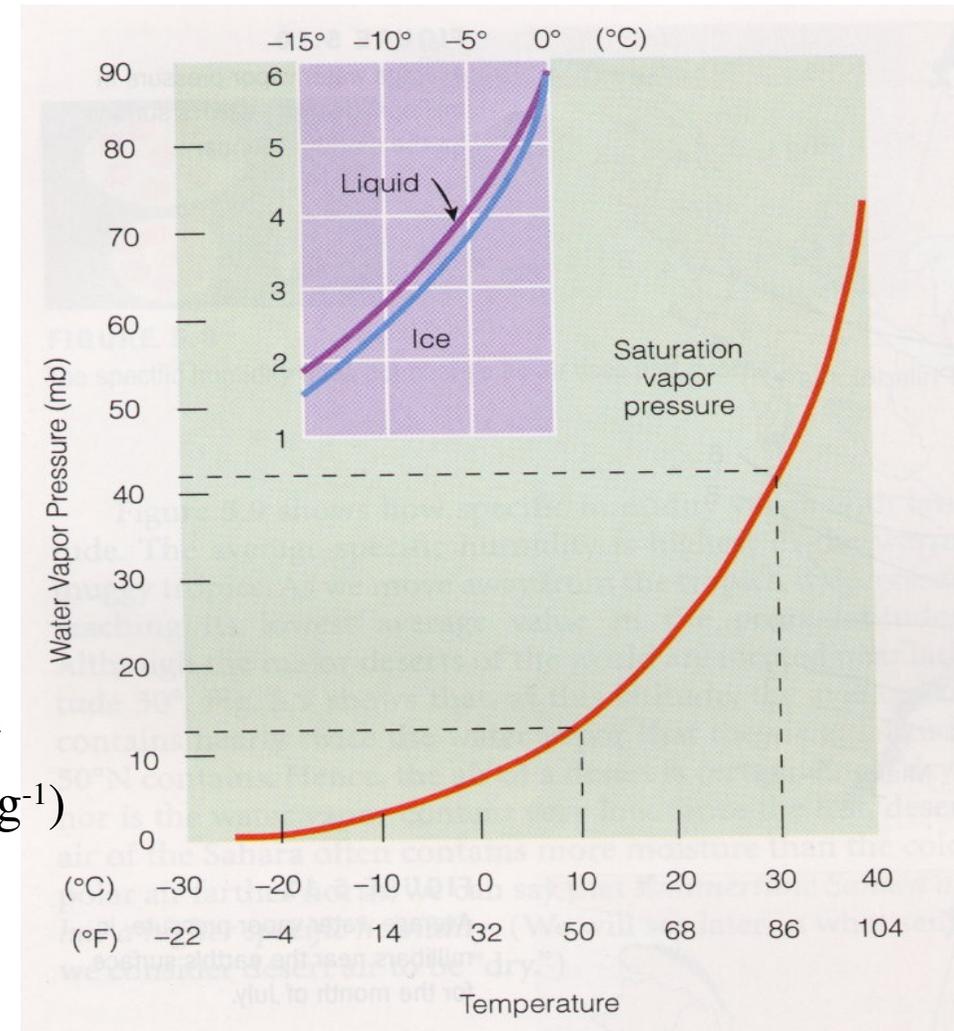
$$\frac{d \ln e_s}{dT} = \frac{L_{c,s}}{R_V T^2}$$

e_s : pression de vapeur saturante sur une surface plane

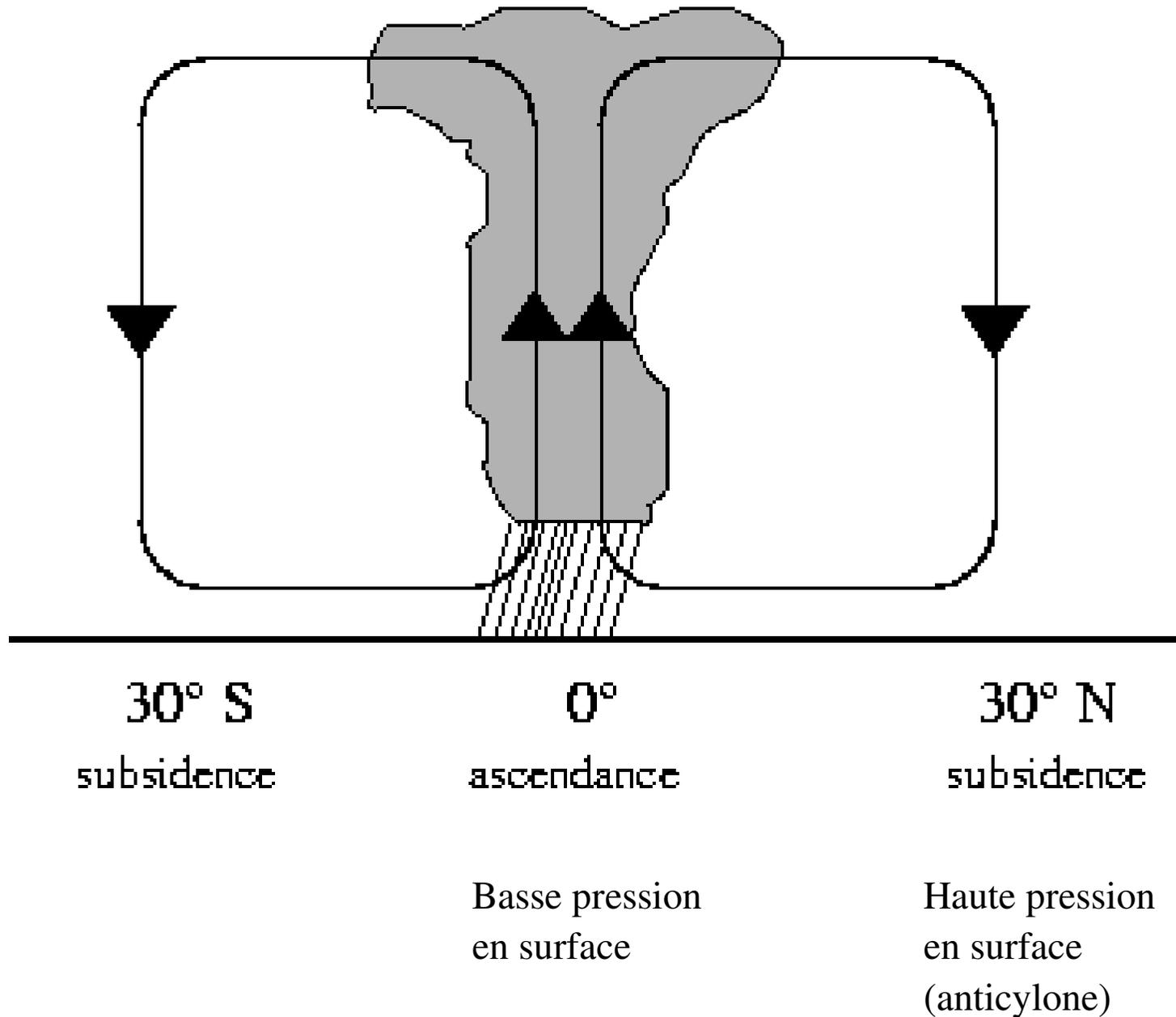
R_V : constante des gaz pour la vapeur d'eau ($461 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$)

$L_{C,S}$: chaleur latente de évaporation/sublimation

T : température (K)

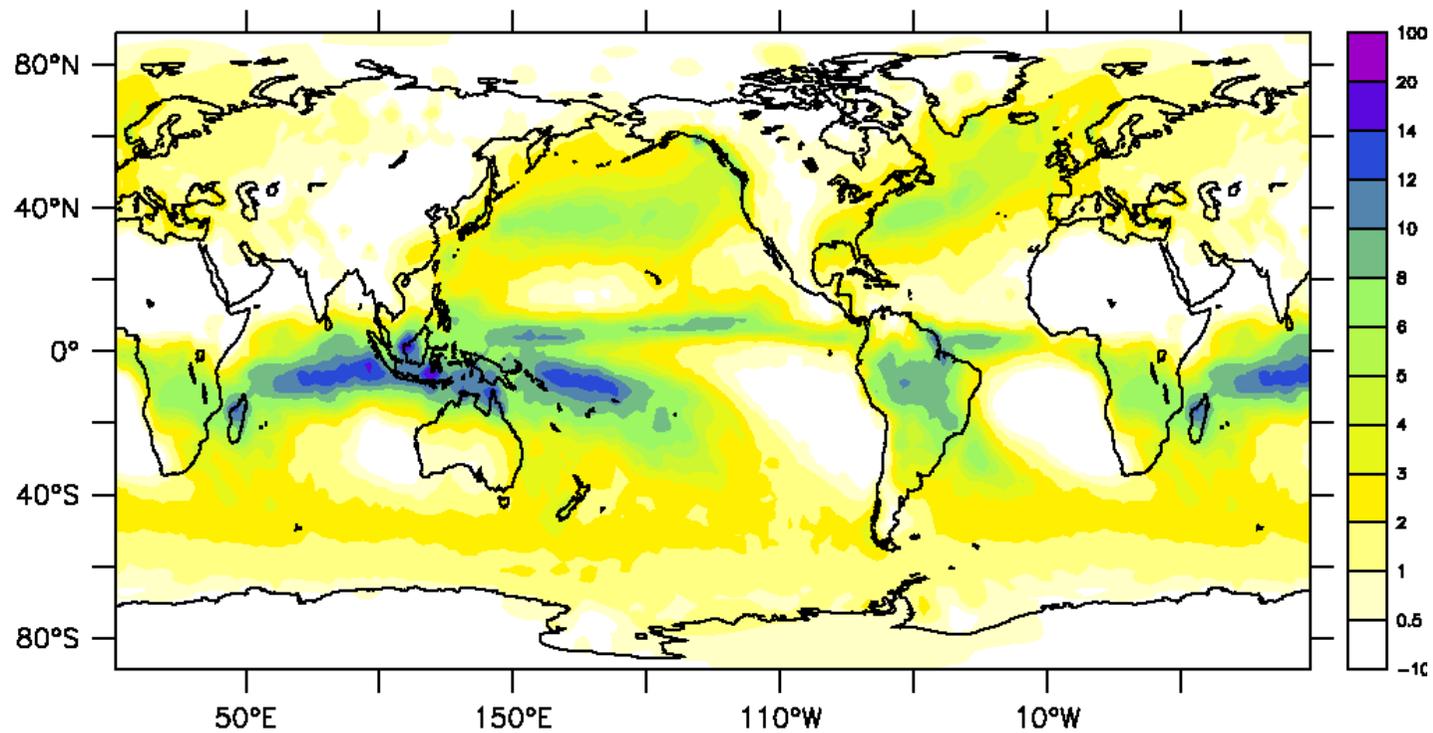


La circulation de Hadley

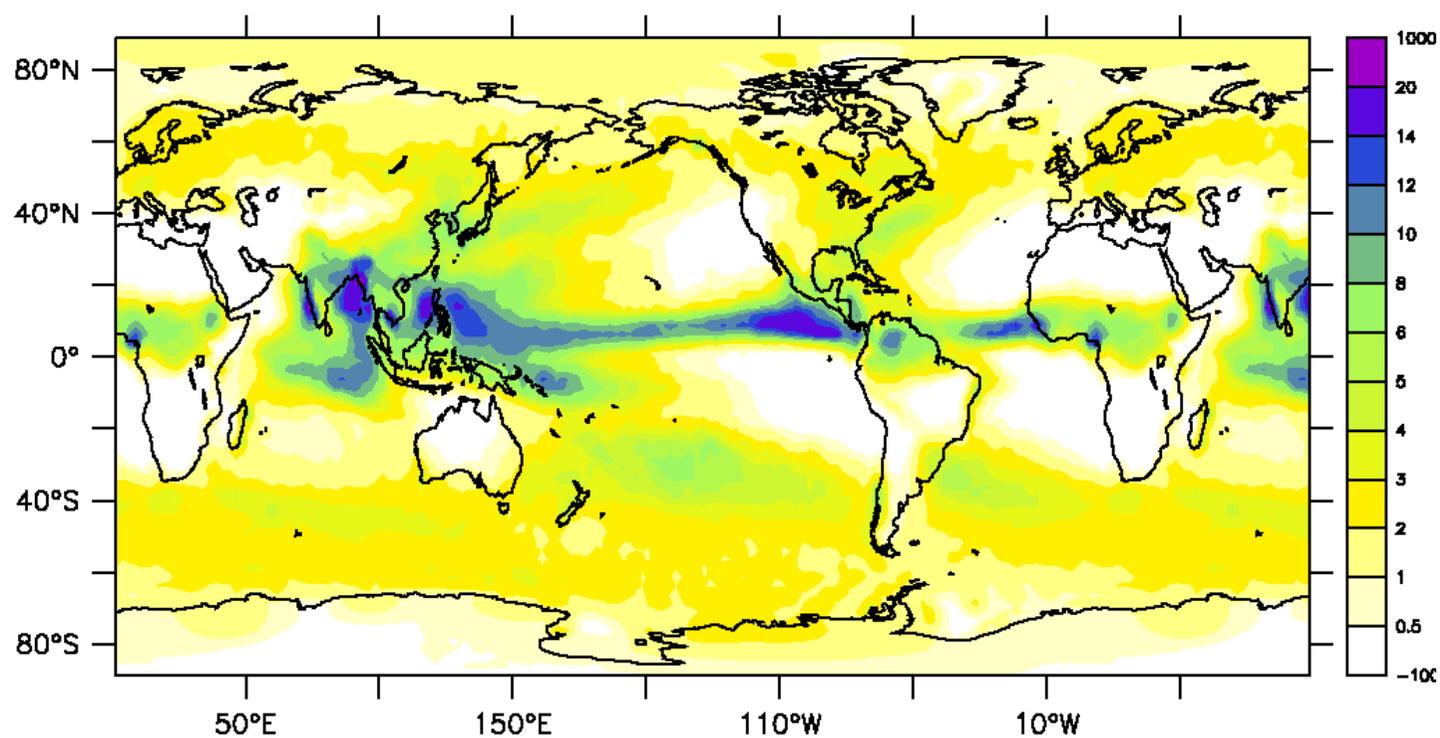


Précipitations (mm/j)

Janvier



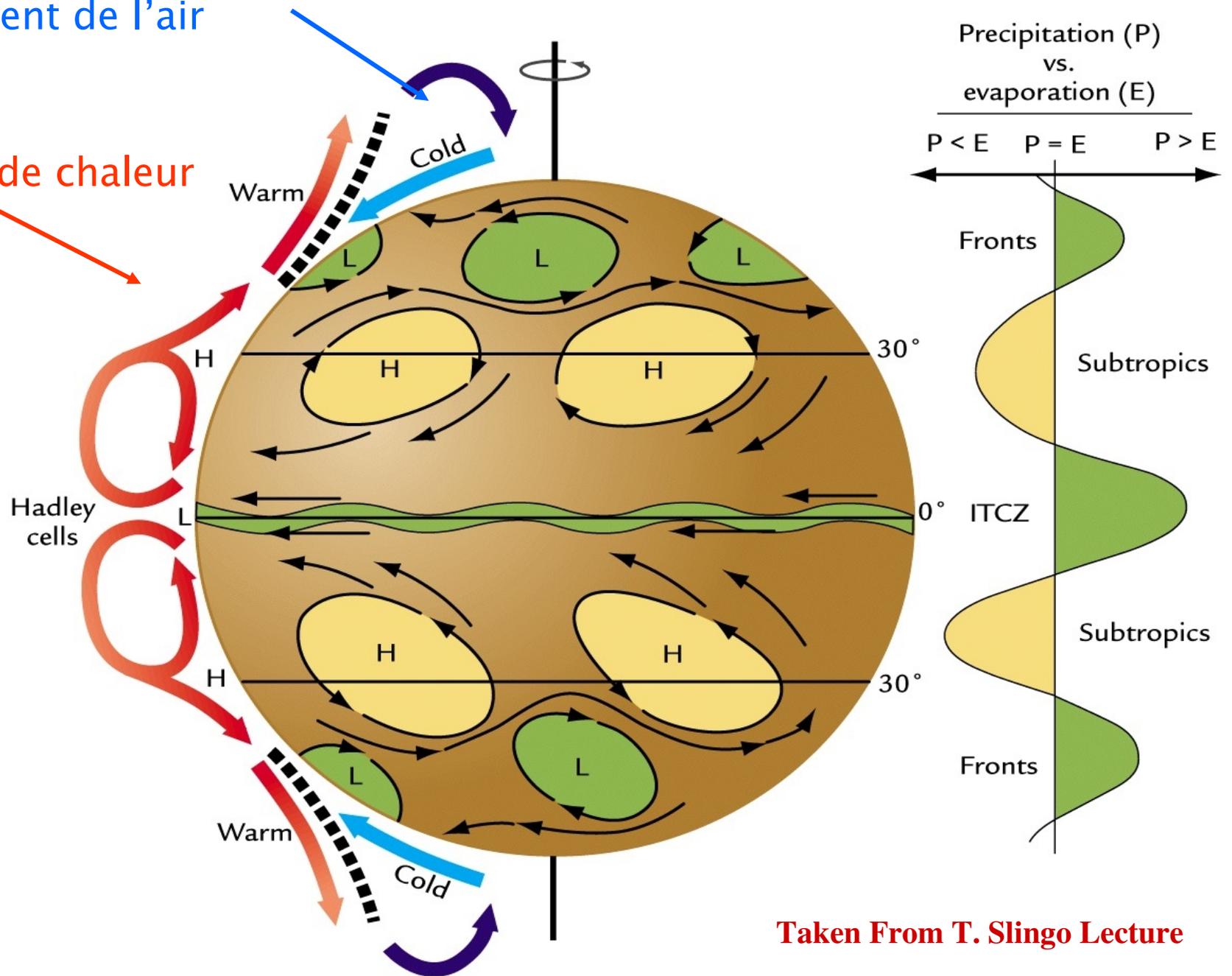
Juillet



Circulation générale atmosphérique et bilan d'eau

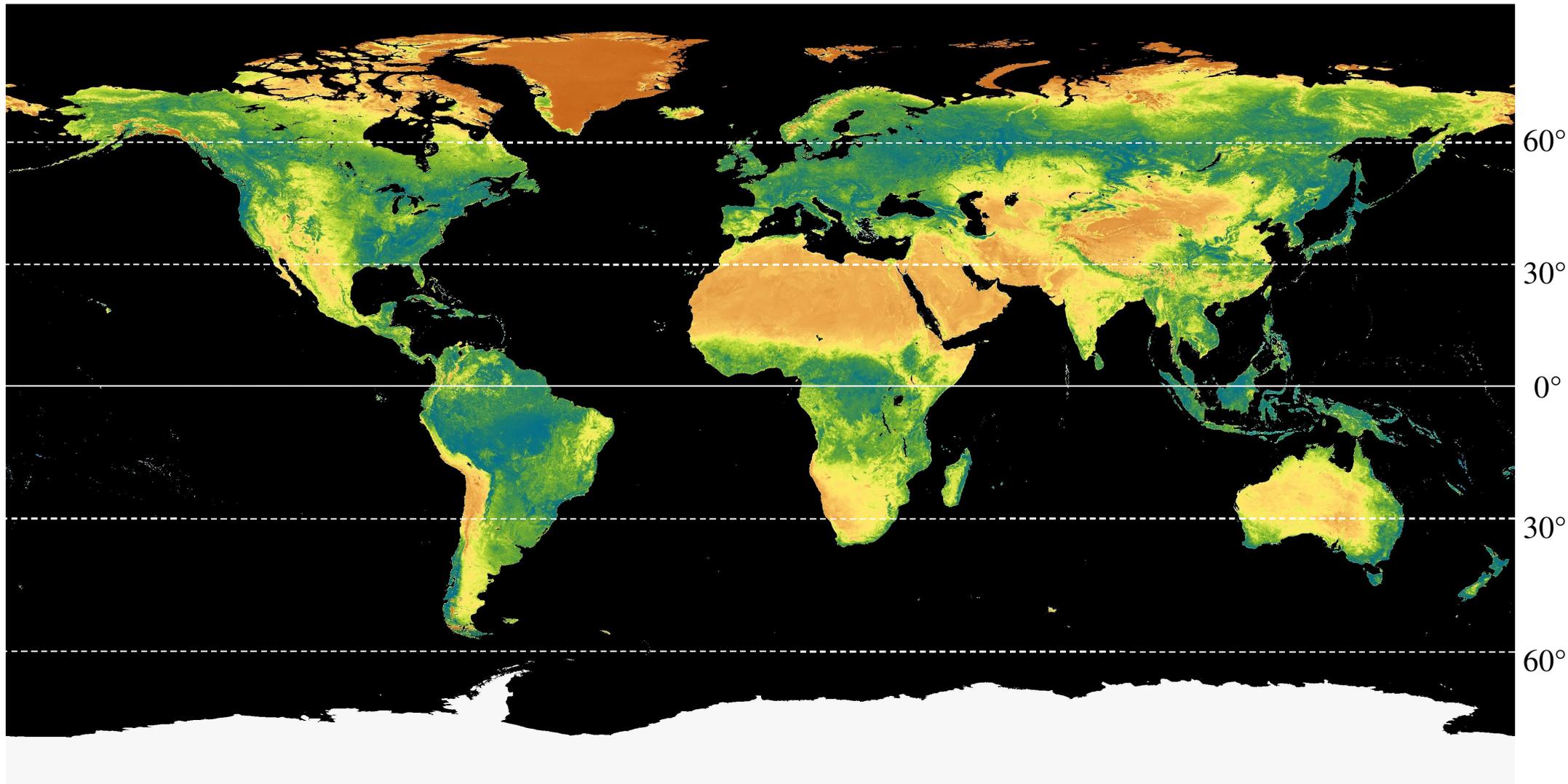
Mouvement de l'air froid

Transport de chaleur

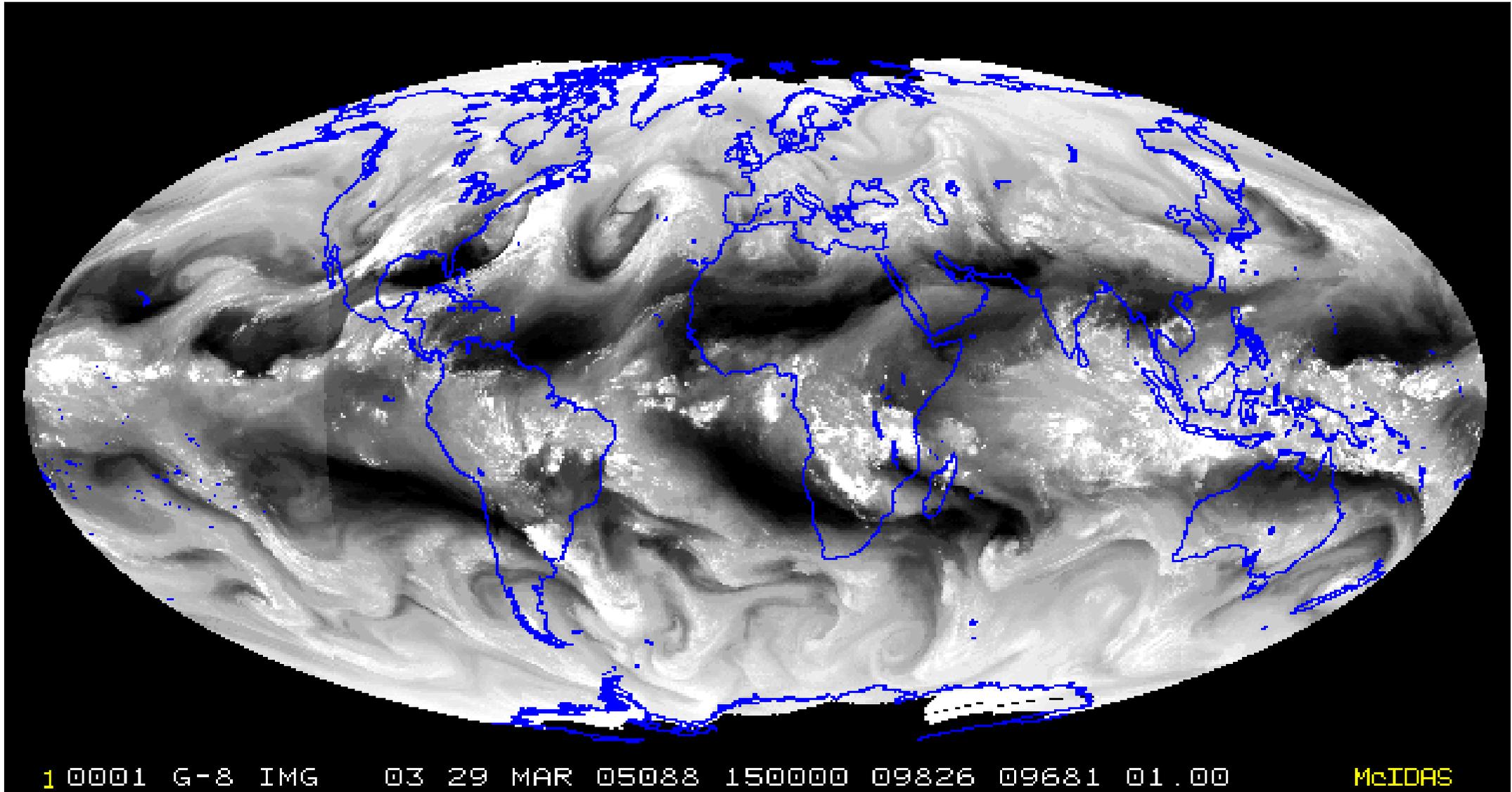


Taken From T. Slingo Lecture

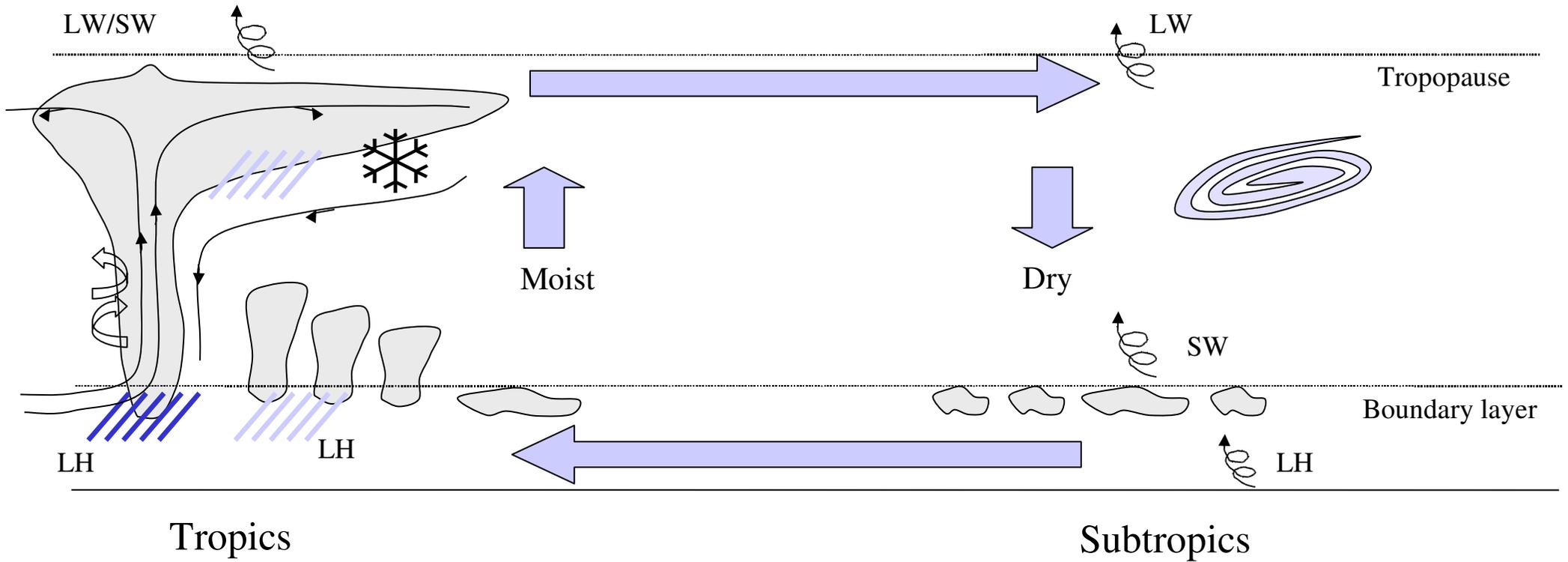
La circulation générale atmosphérique vue à travers la distribution spatiale de la végétation



Météosat canal vapeur d'eau 29 Mars



Circulation générale et nuages



Idéalisation bi-dimensionnelle de la circulation tropicale

Fraction nuageuse (observations CALIPSO)

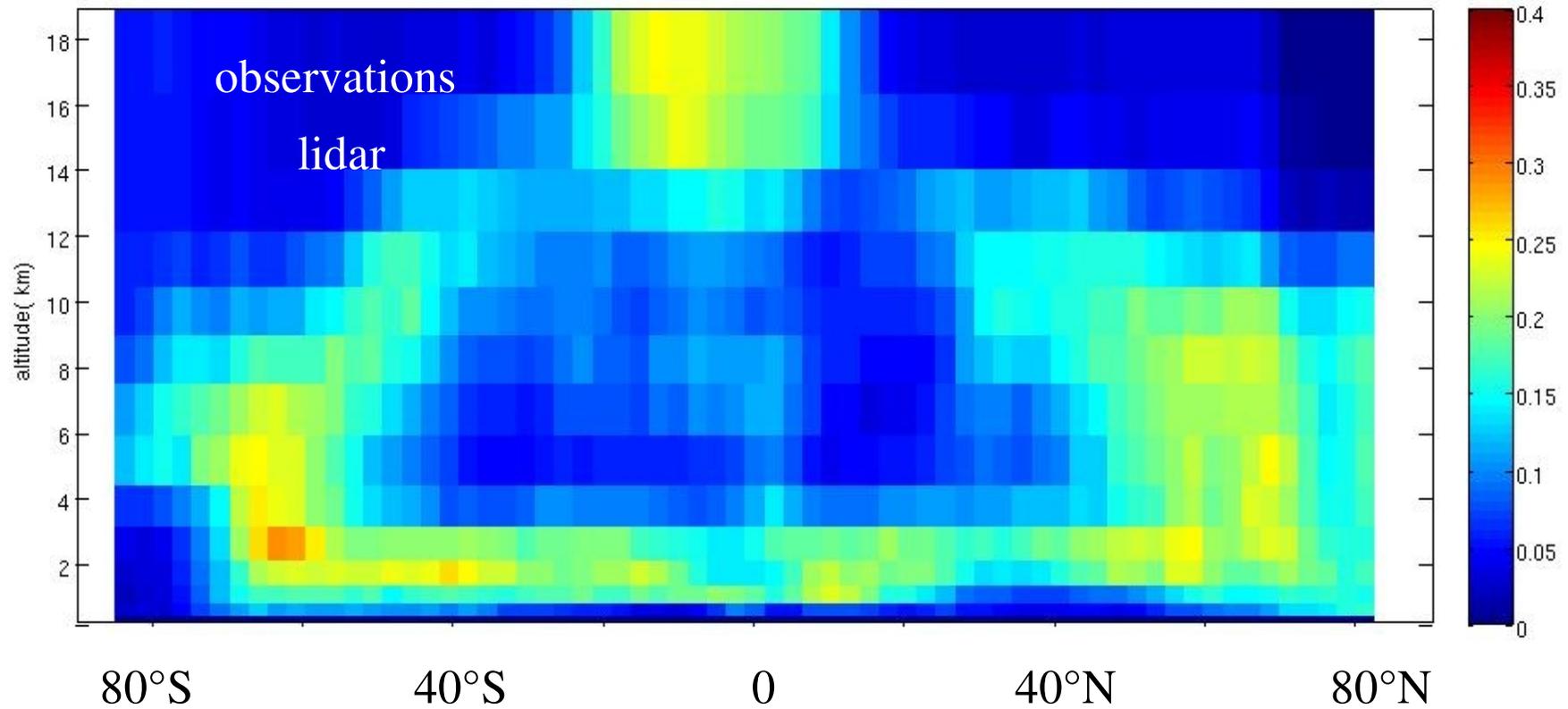
jan-fév-mars

Moyenne zonale

couverture nuageuse

Altitude

(km)

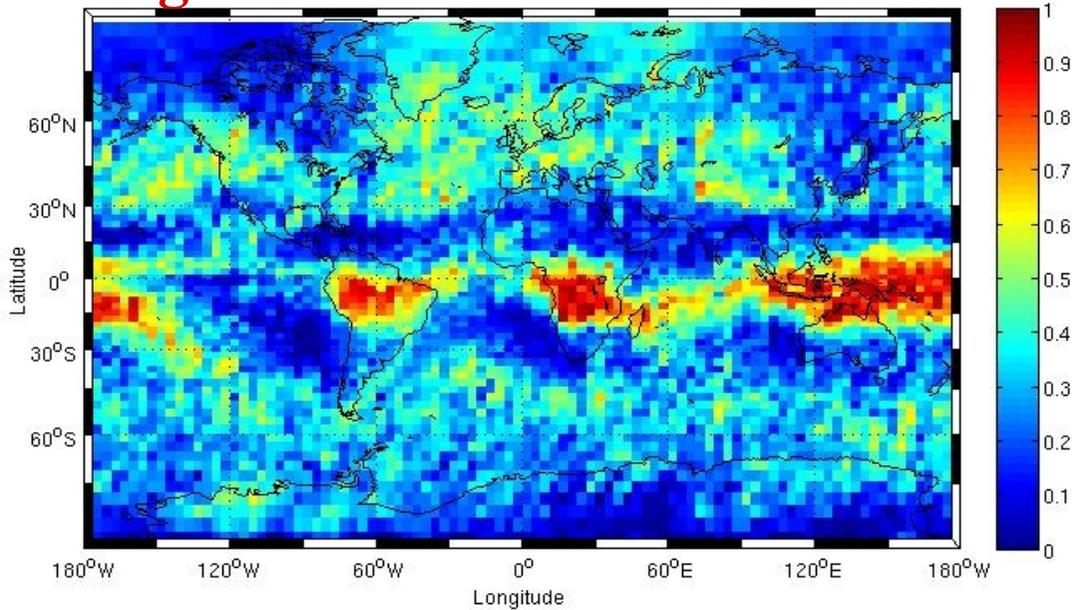


Latitude

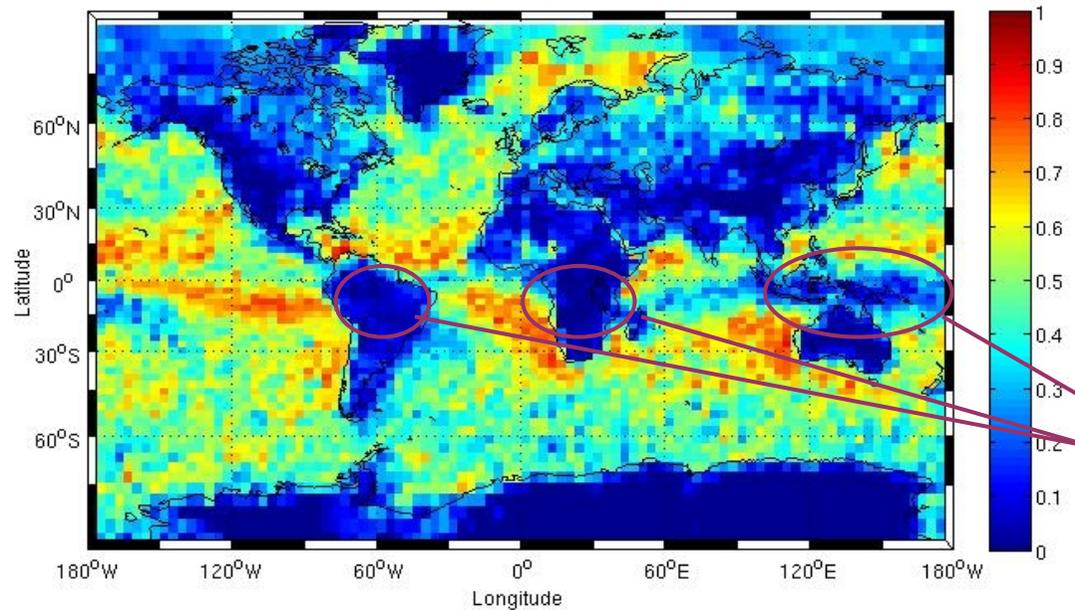
Fraction nuageuse (observations CALIPSO)

jan-fév-mars

nuages hauts

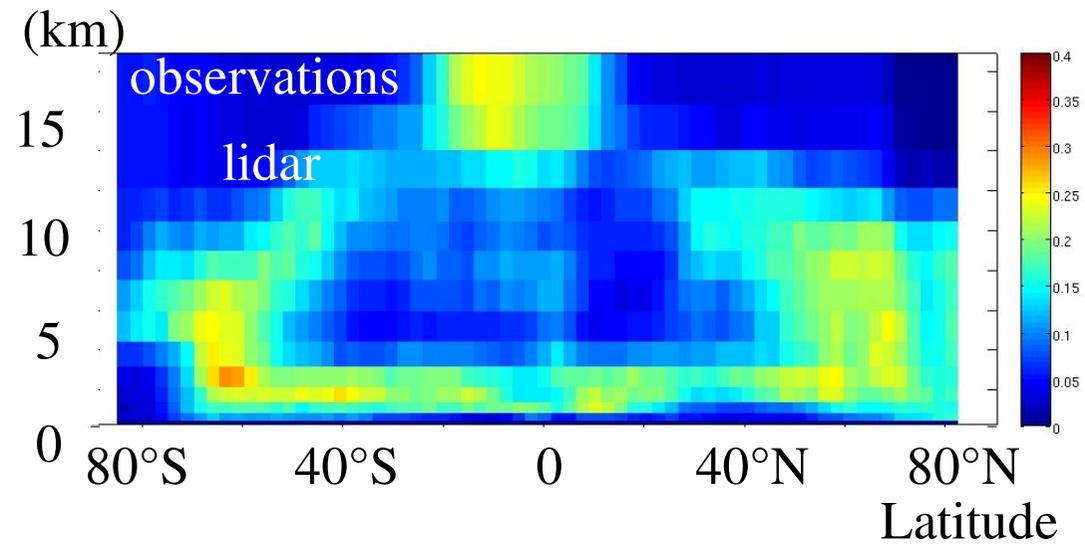


nuages bas



Altitude
(km)

Moyenne zonale

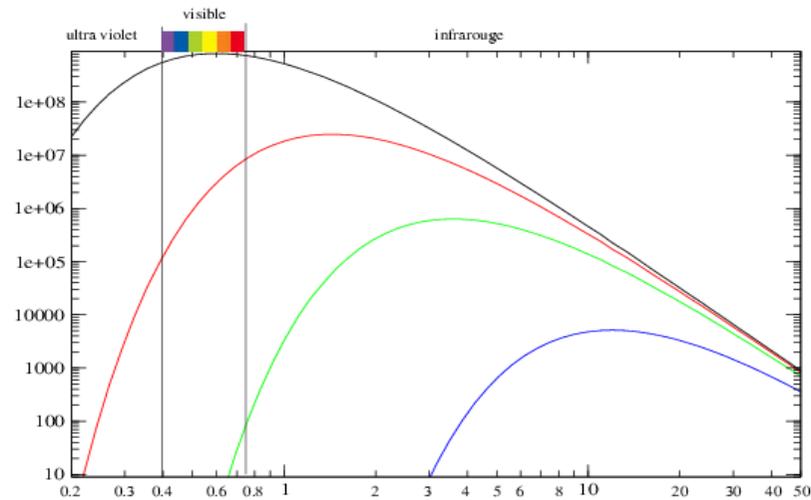
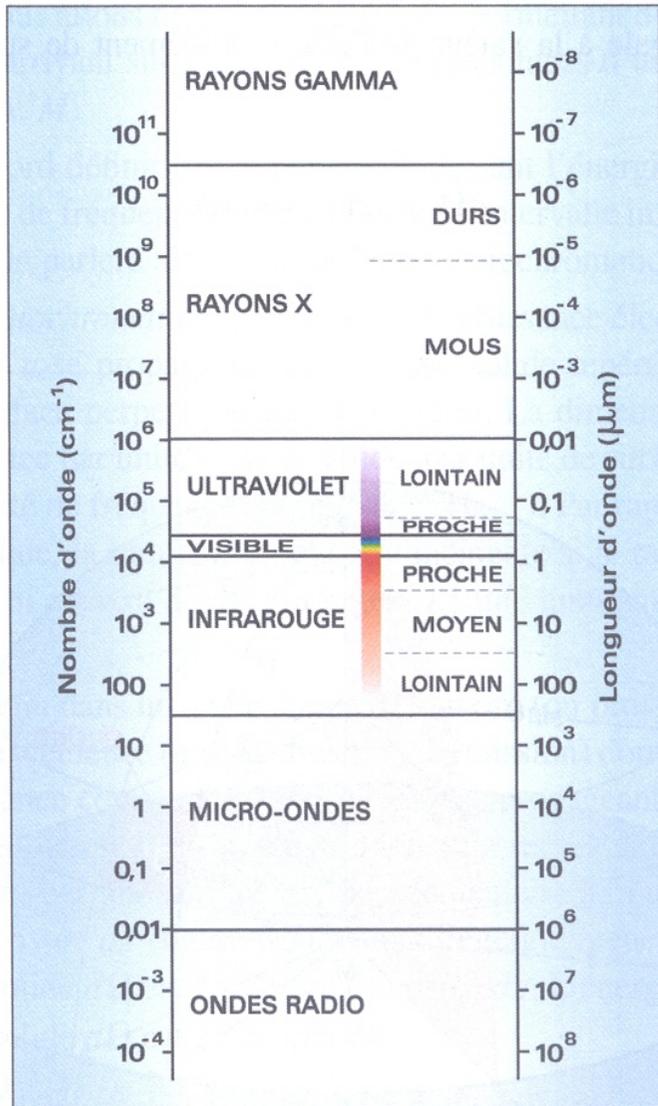


effet de masque des nuages

Plan

- Bilan radiatif et circulation générale atmosphérique
- Circulation atmosphérique et cycle de l'eau
- **Echanges radiatifs et effet de serre**
- Modélisation du climat
- Estimation des changements climatiques dus aux activités humaines

Emission rayonnement électromagnétique



Energie émise (fonction de Planck) en fonction de la longueur d'onde, pour plusieurs températures

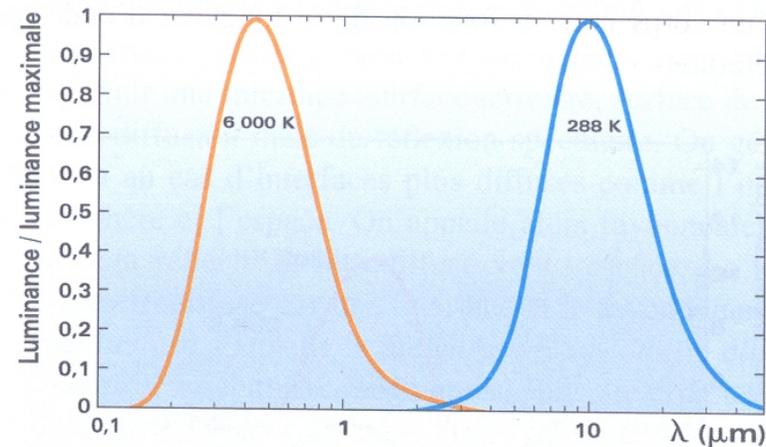
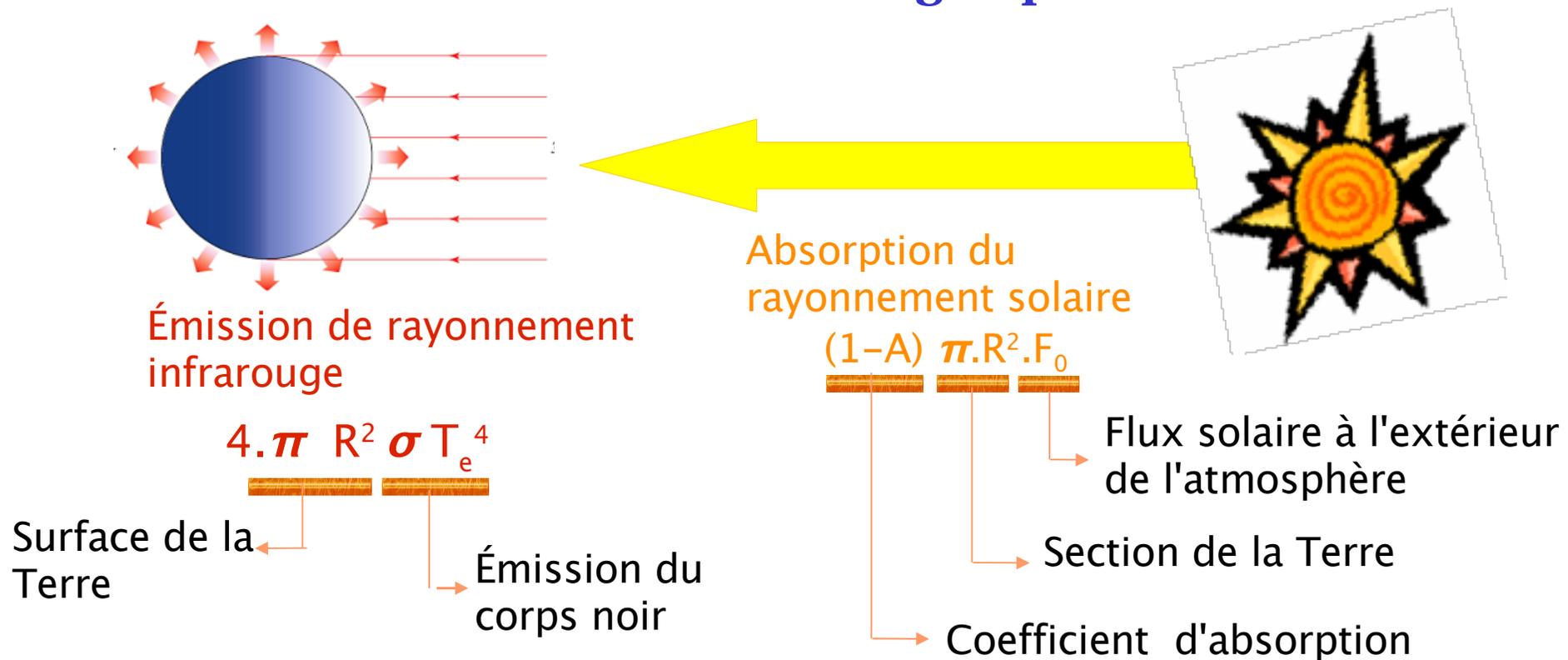


Fig. 8.8 — Fonction de Planck en fonction de la longueur d'onde (en μm), normalisée par la valeur de l'émission maximale, pour un corps émettant à 6 000 K et un corps émettant à 288 K.

Température d'équilibre de la Terre

Modèle énergétique 0D



Équilibre énergétique: flux infrarouge émis = flux solaire absorbé

$$4 \pi R^2 \sigma T_e^4 = (1-A) \pi R^2 F_0$$

$$\sigma T_e^4 = \frac{1}{4} (1-A) F_0$$

T_e : Température d'équilibre radiatif

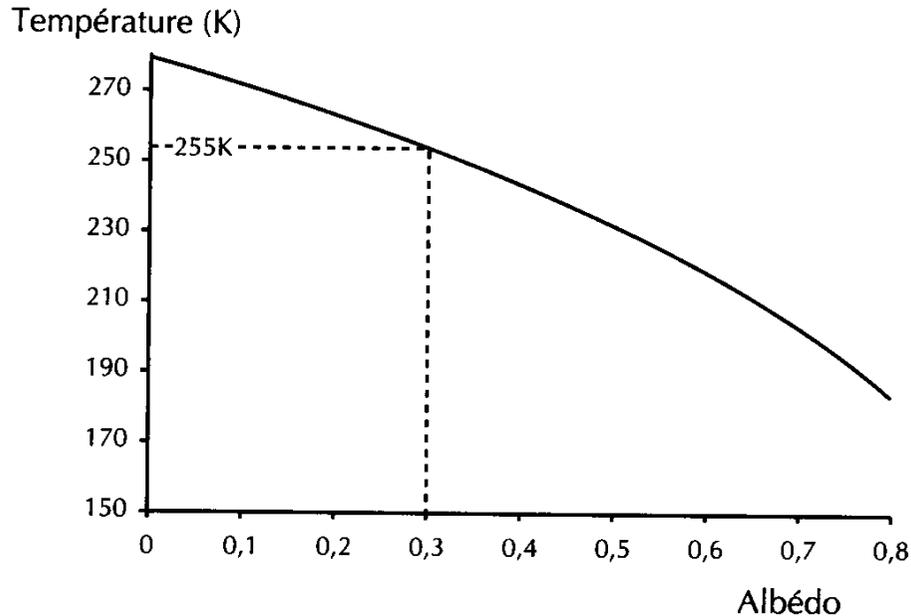
A : albédo planétaire

F_0 : Flux solaire à l'extérieur de l'atmosphère

σ : constante de Stefan-Boltzmann

Température d'équilibre de la Terre (2)

Modèle énergétique 0D



Température d'équilibre radiatif de la Terre pour diverses valeurs de l'albédo.

Albédo (c.-à-d. pourcentage de rayonnement solaire réfléchi) de différents type de surface

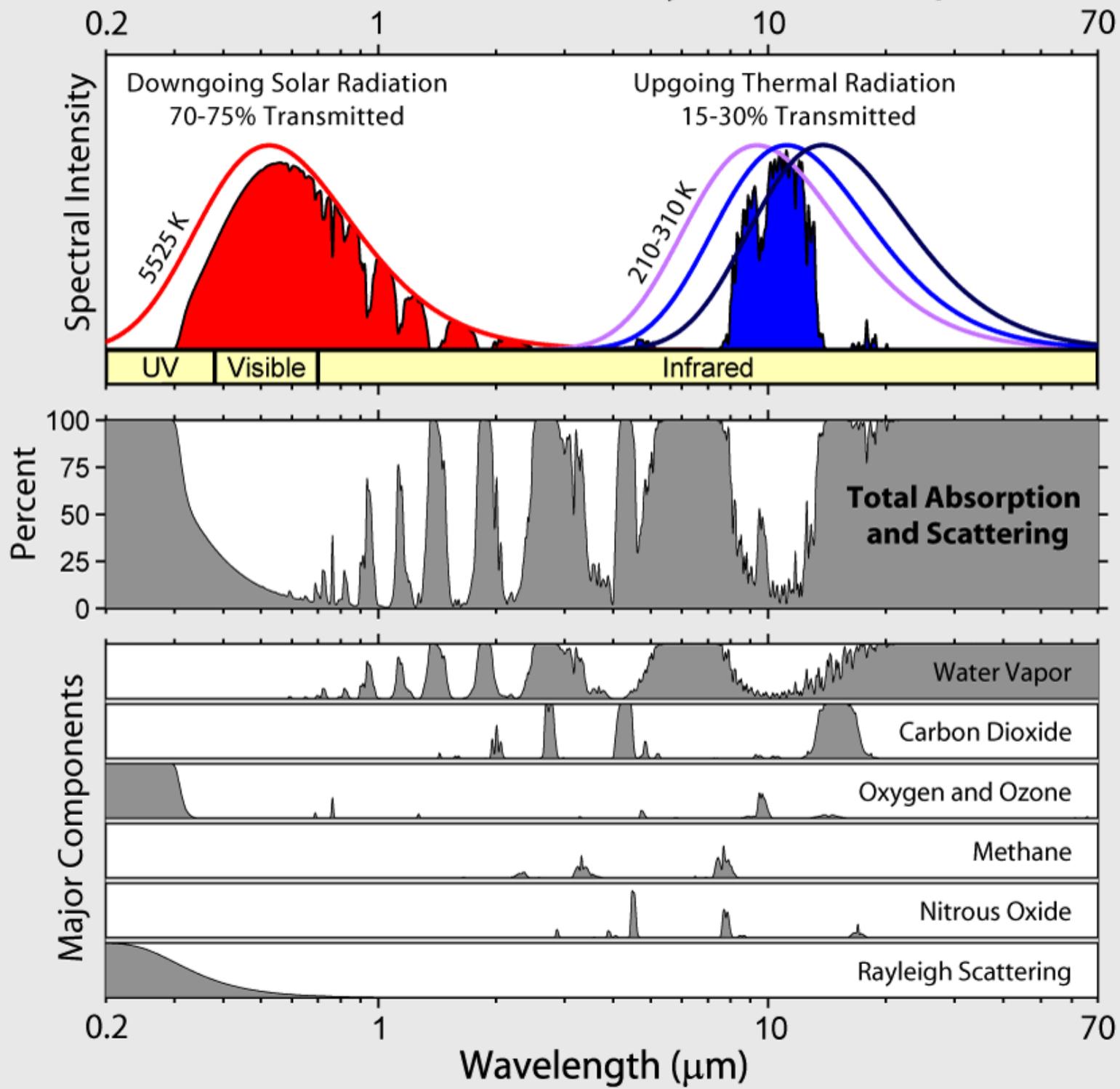
Neige fraîche	75 à 95%
Surface de la mer	2 à 7 %
Sol sombre	5 à 15%
Cultures	15 à 25%

La valeur moyenne actuelle de l'albédo de la Terre est 30%, notamment du fait de la présence de nuages.

La valeur moyenne actuelle du globe est 0,3, ce qui correspond à une température de 255 °K (soit -18°C).

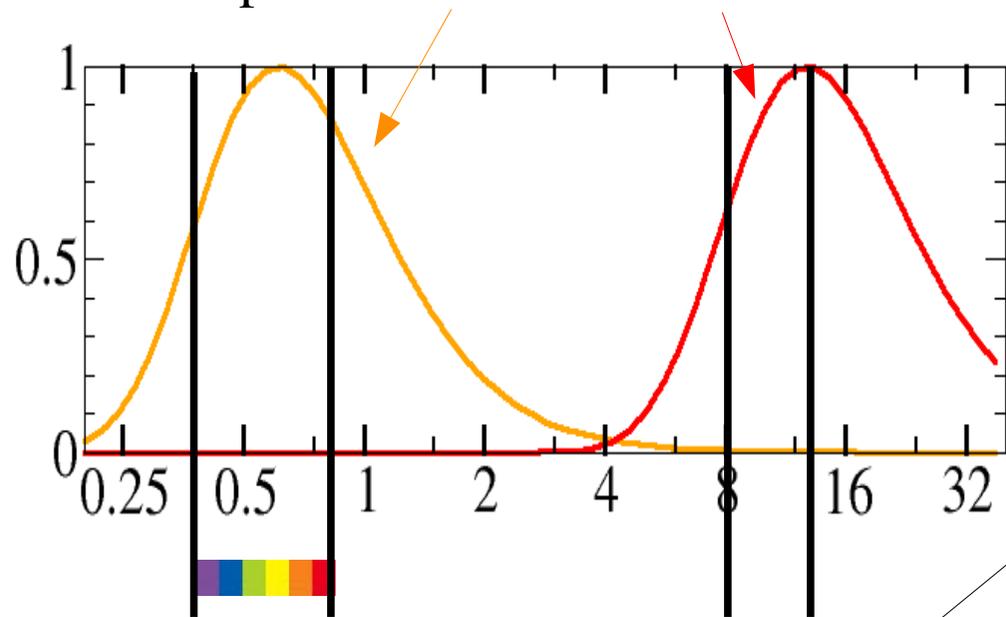
La température de surface plus élevée (environ 15°C) est due à l'effet de serre.

Radiation Transmitted by the Atmosphere

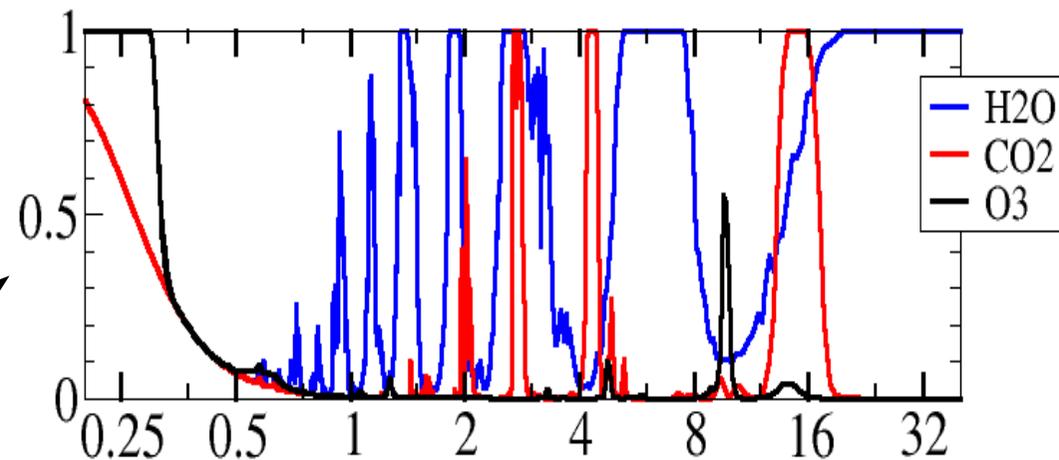


Spectres d'émission et d'absorption

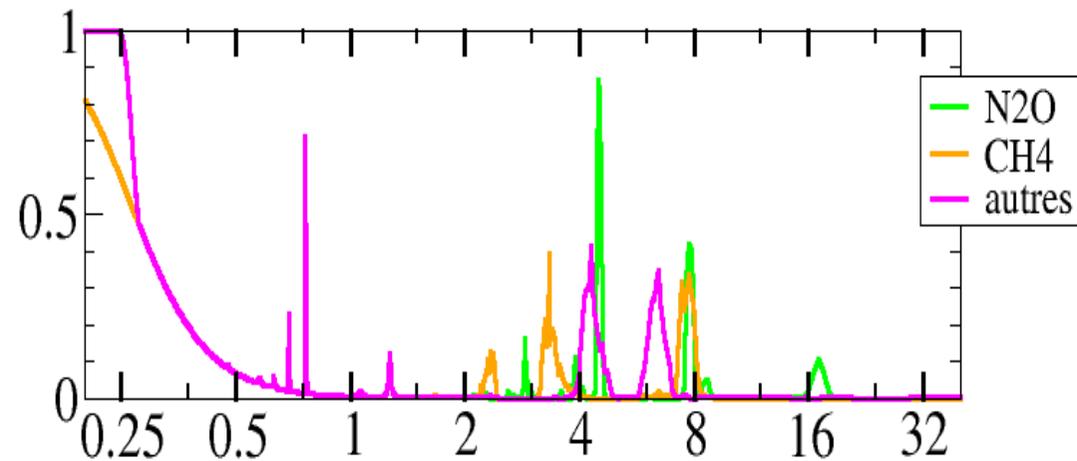
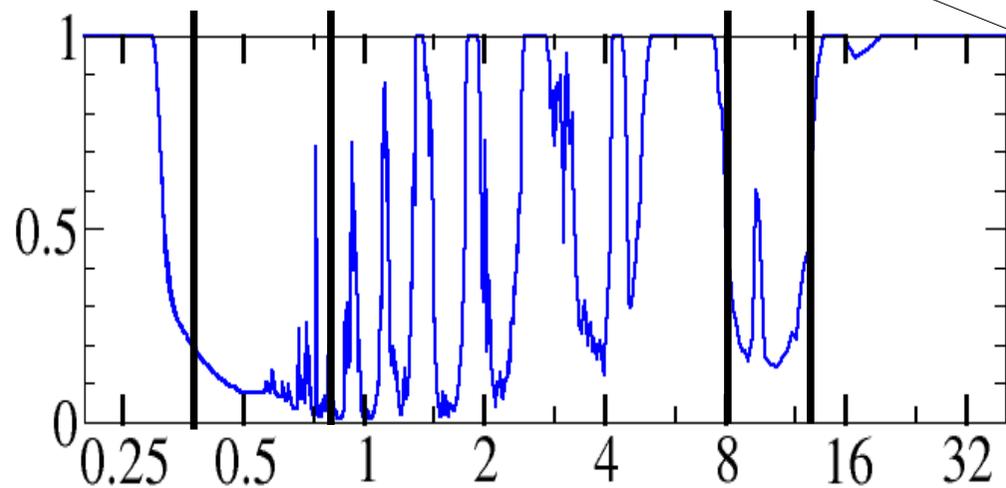
Émission par le **soleil** et la **surface** de la Terre



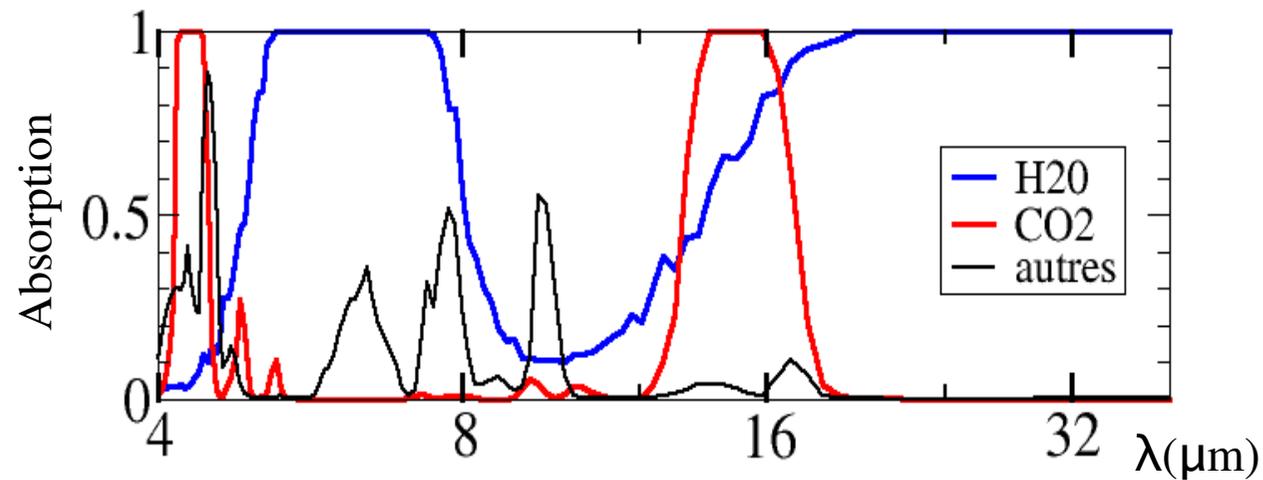
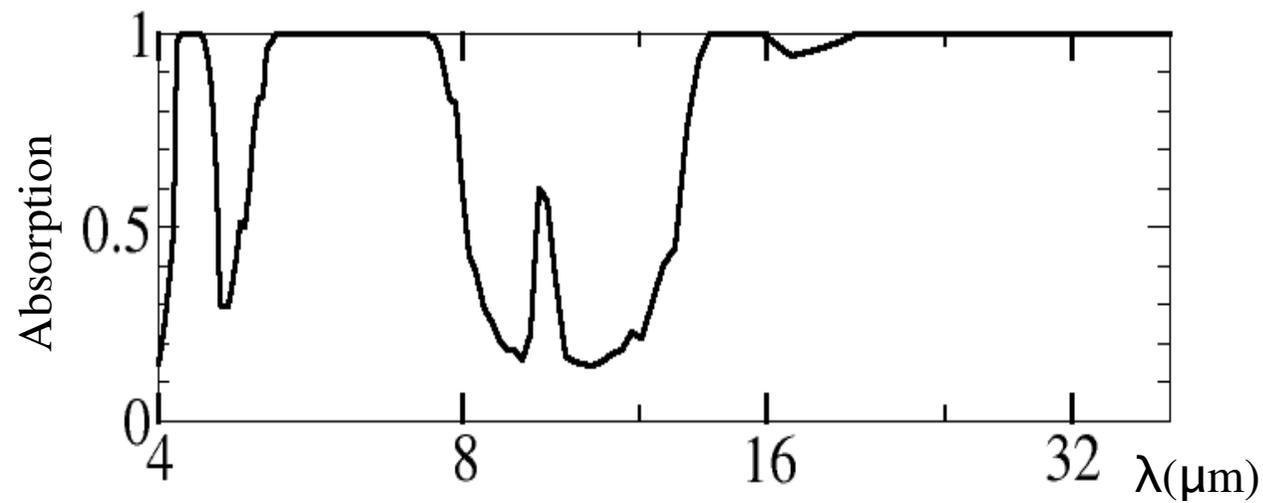
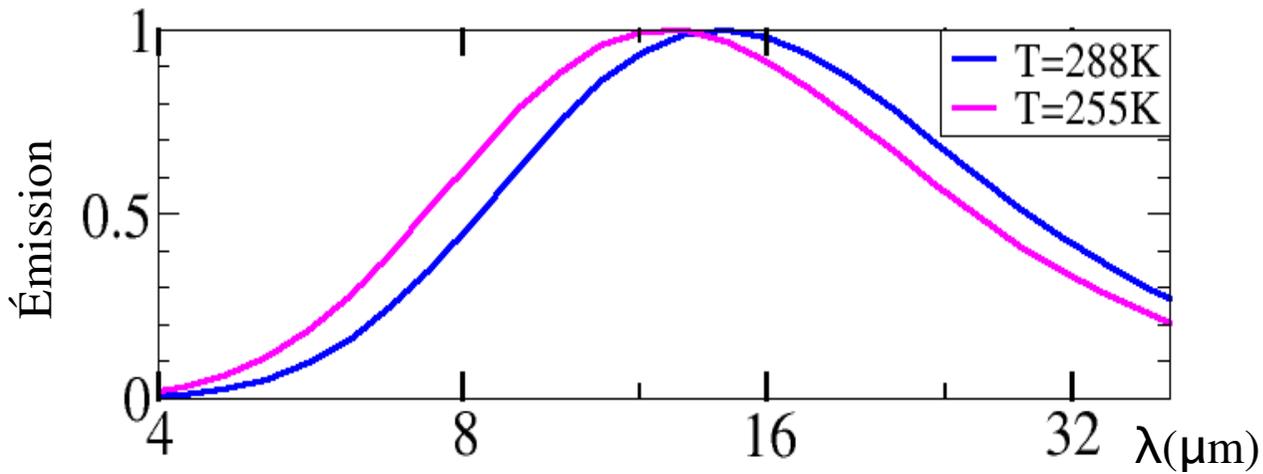
Absorption par les différents gaz de l'atmosphère



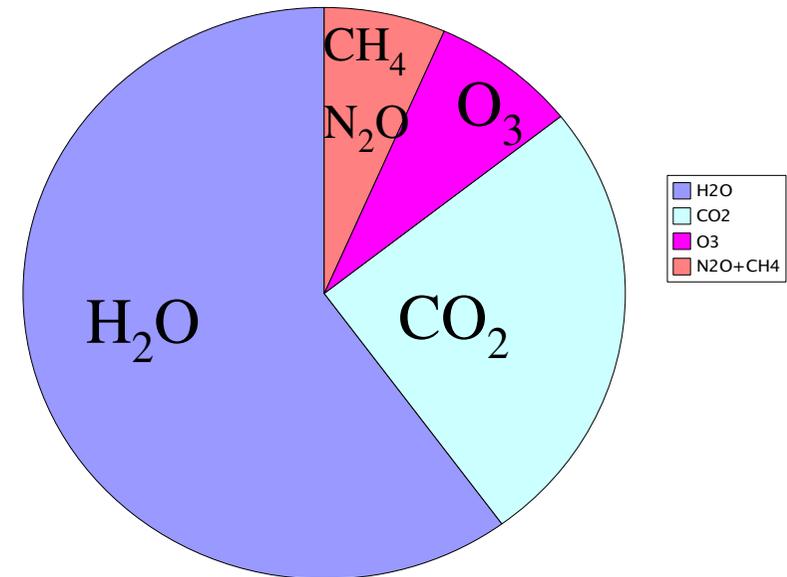
Absorption par l'atmosphère



L'effet de serre sur Terre



Contribution à l'effet de serre

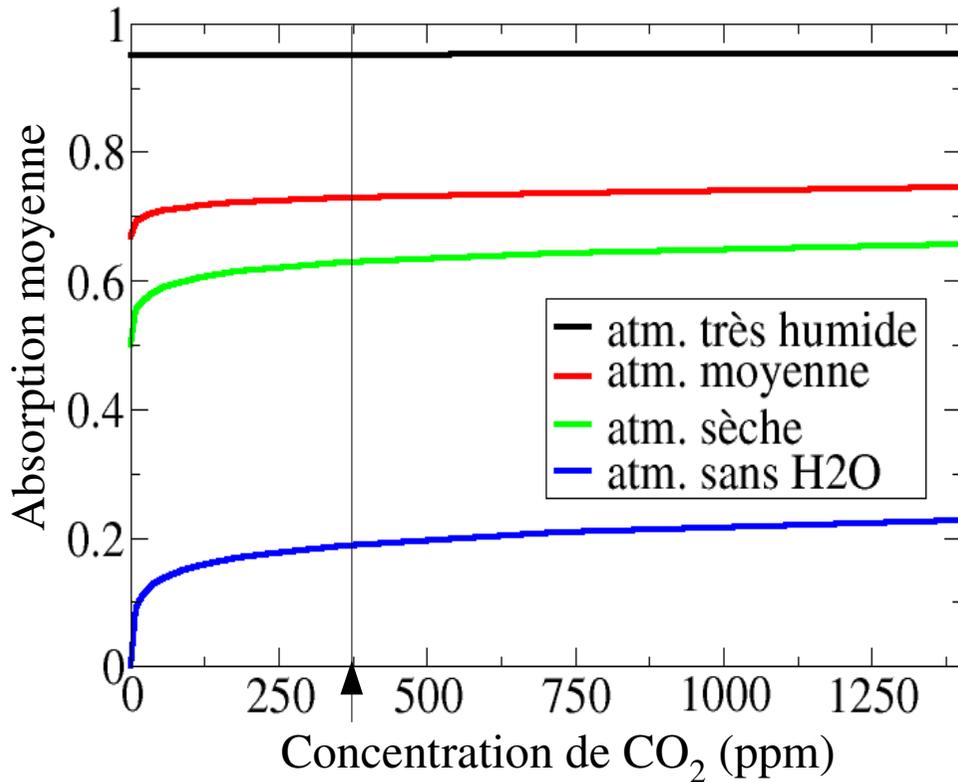


Effet de serre:

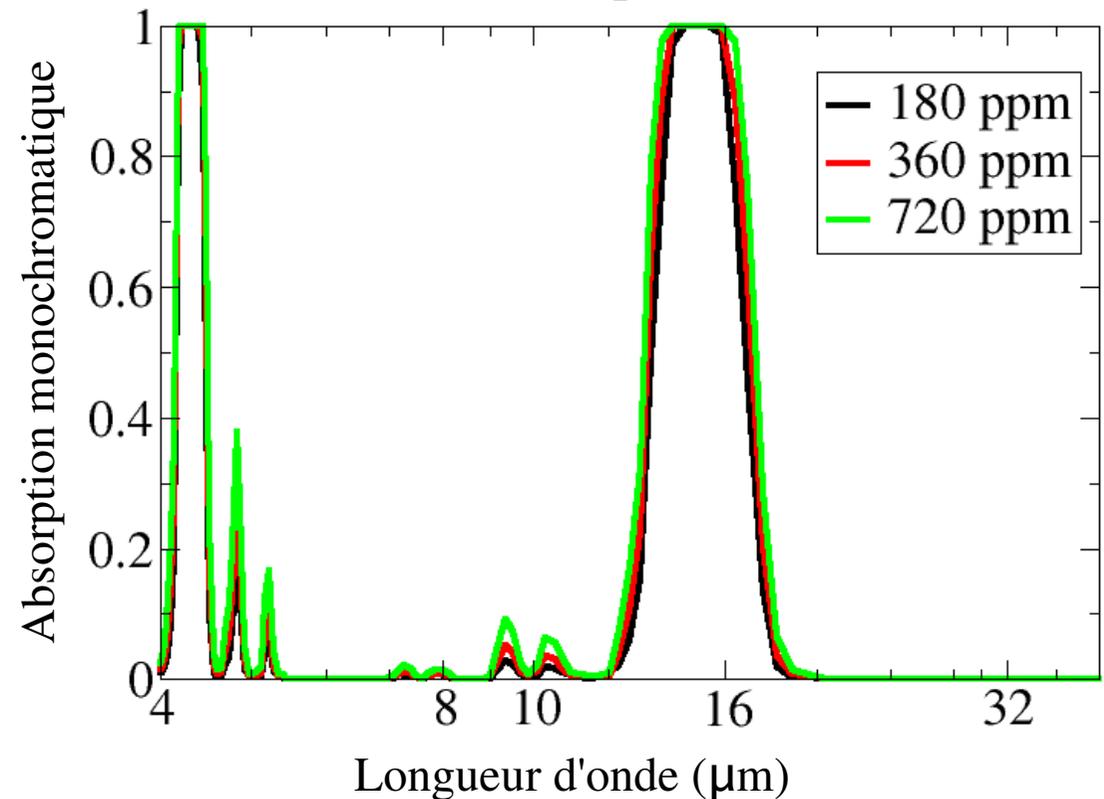
Vapeur d'eau	60%
CO ₂	26%
Ozone	8%
N ₂ O+CH ₄	6%

Effet de saturation

Absorption de l'atmosphère **moyennée** sur le domaine infra-rouge en fonction du CO_2 , pour différentes valeurs de H_2O



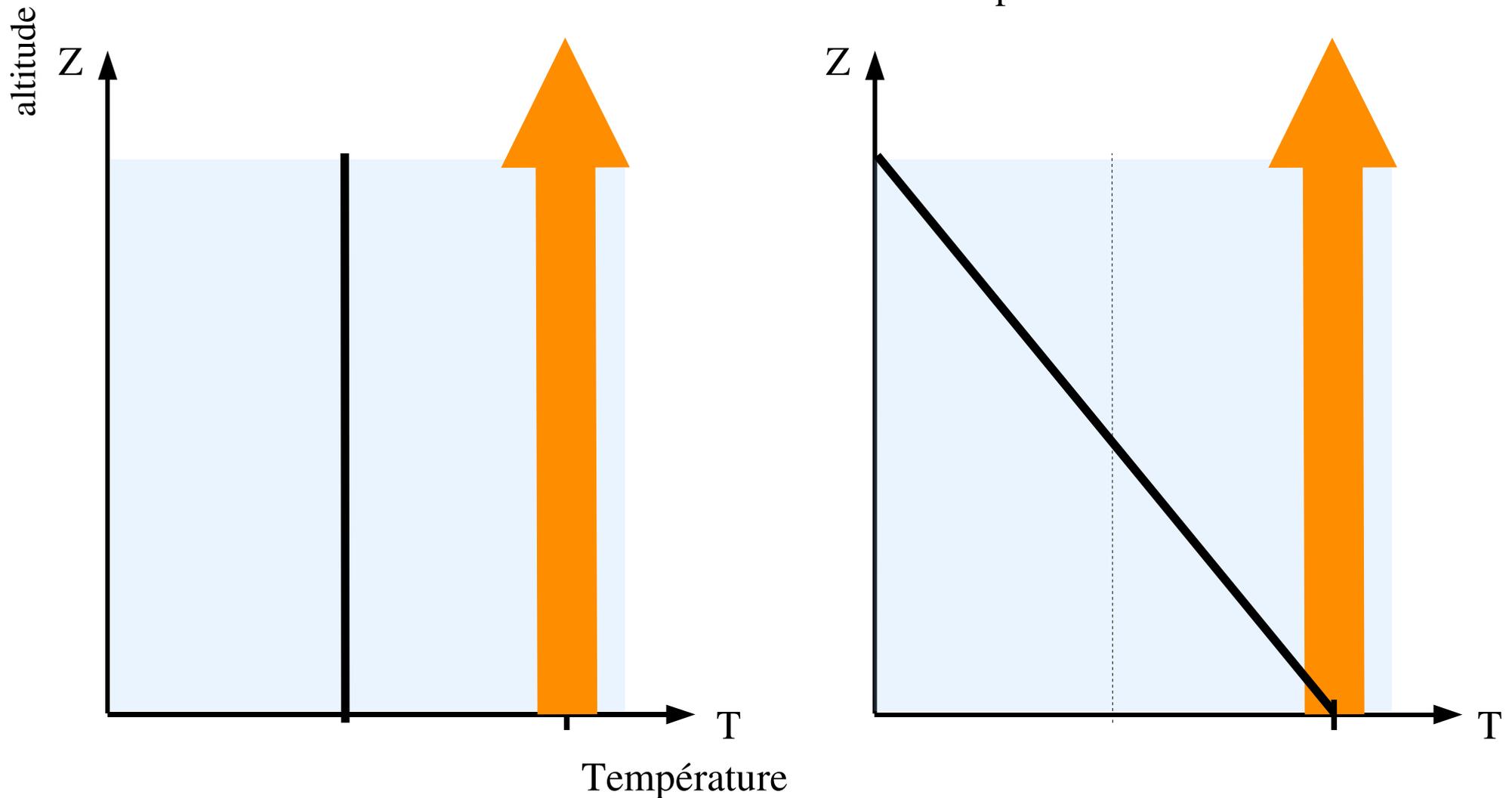
Absorption monochromatique de l'atmosphère due au seul CO_2 , en fonction de la longueur d'onde, pour différente concentration de CO_2



Effet de serre dans un milieu isotherme ou stratifié

Rayonnement IR sortant : $\epsilon \cdot \sigma \cdot T(z_e)^4$

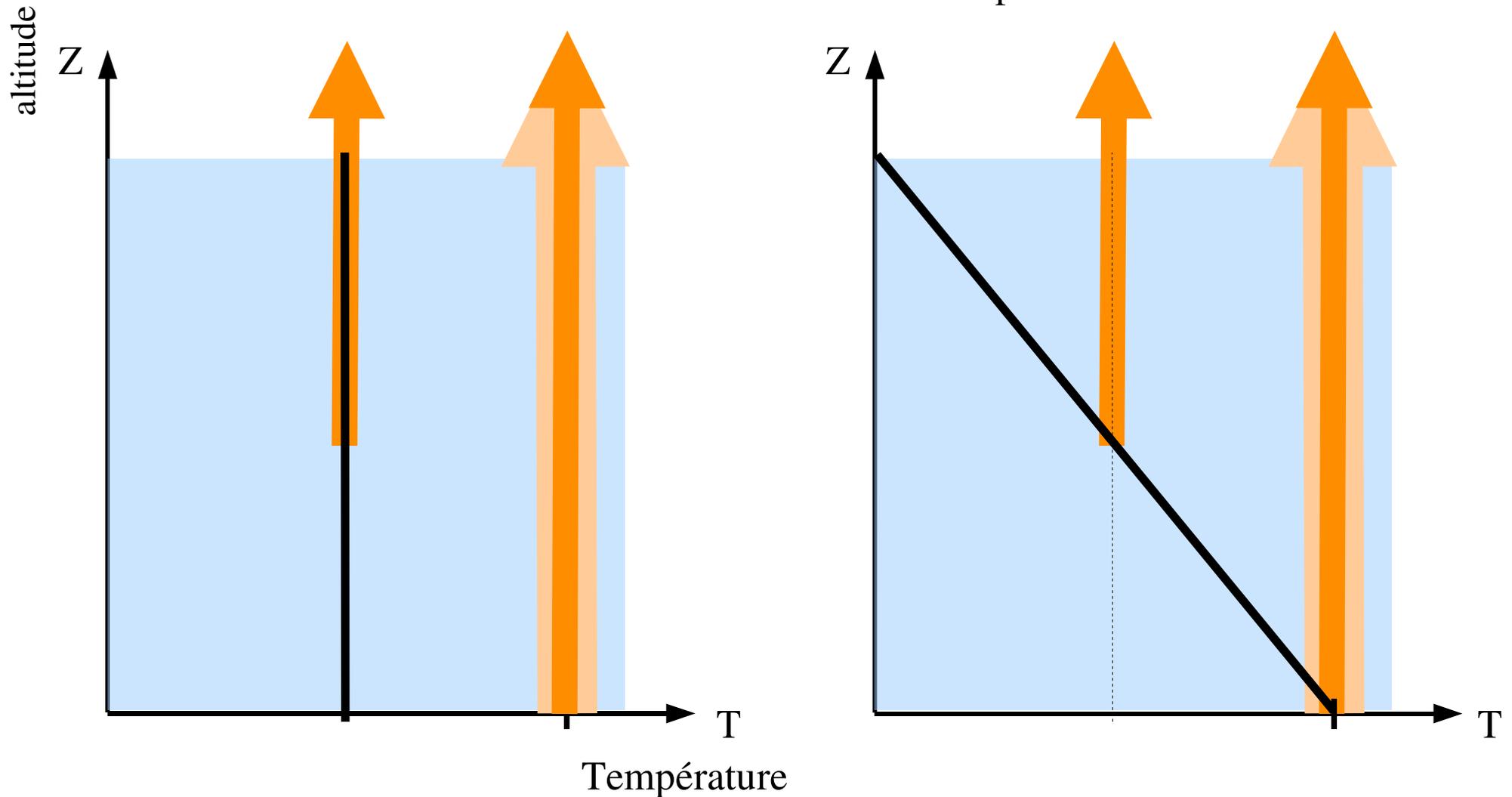
Z_e : altitude d'émission vers l'espace



Effet de serre dans un milieu isotherme ou stratifié

Rayonnement IR sortant : $\epsilon \cdot \sigma \cdot T(z_e)^4$

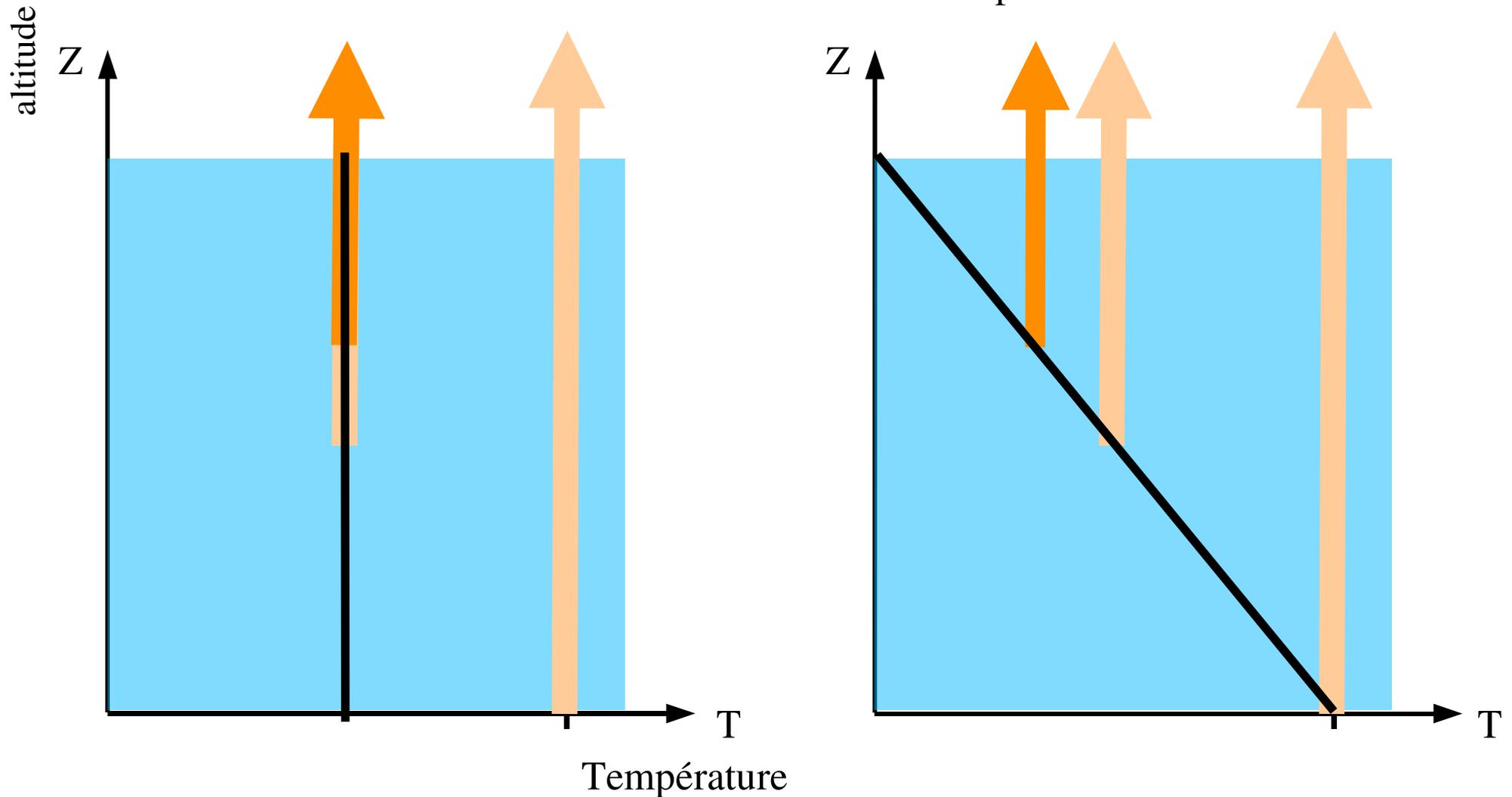
Z_e : altitude d'émission vers l'espace



Effet de serre dans un milieu isotherme ou stratifié

Rayonnement IR sortant : $\epsilon \cdot \sigma \cdot T(z_e)^4$

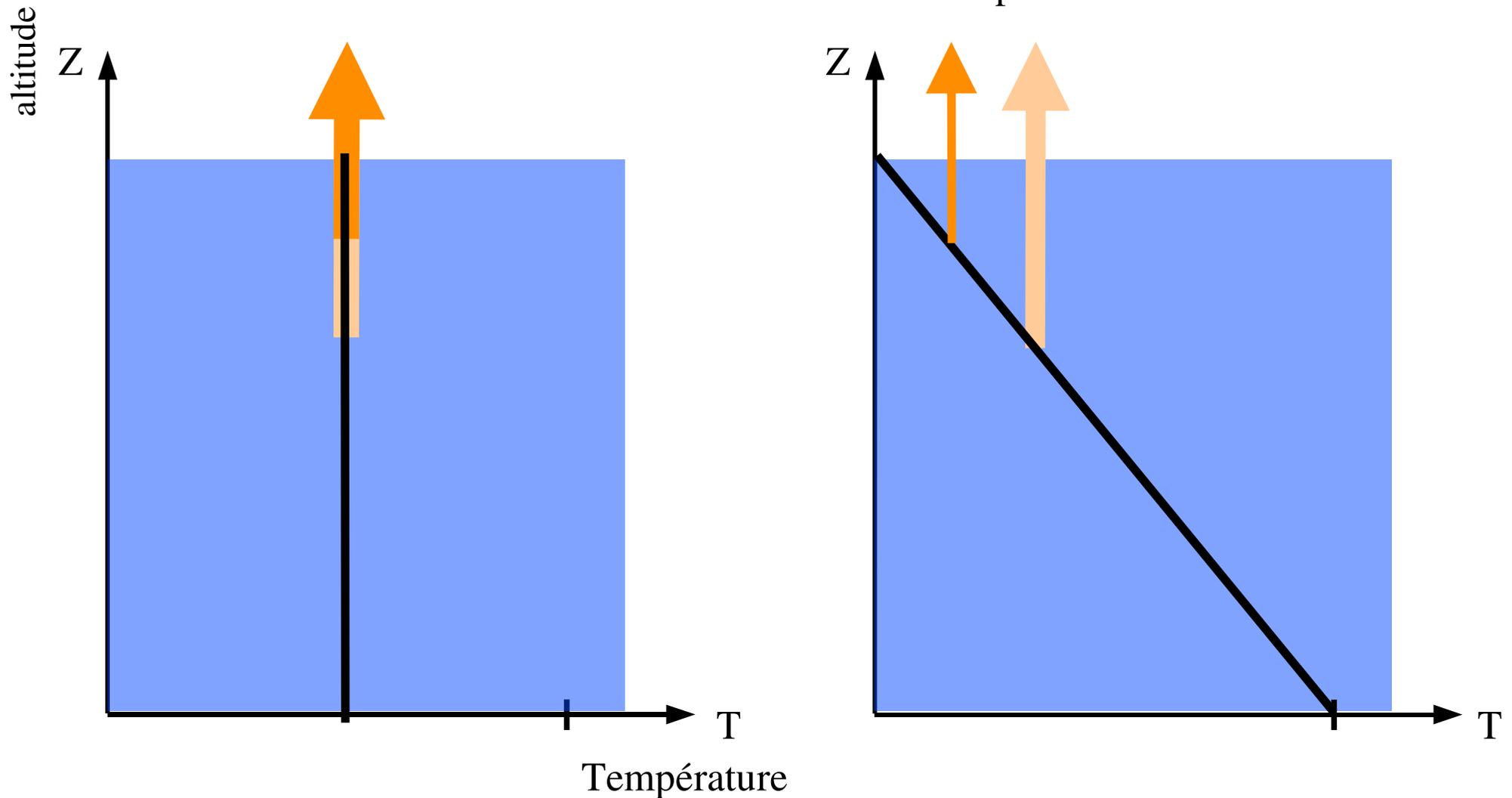
Z_e : altitude d'émission vers l'espace



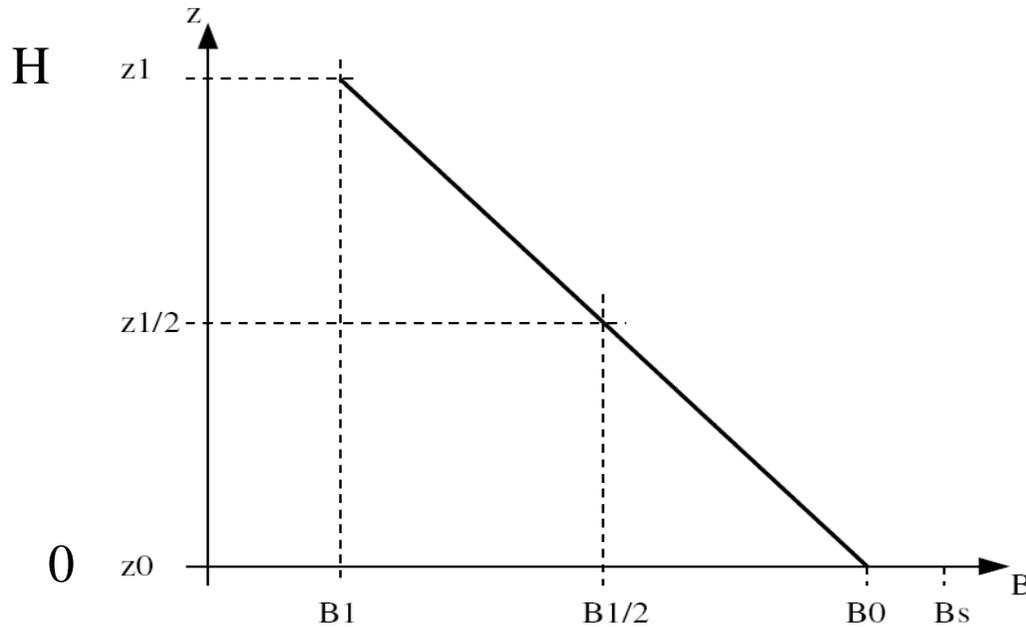
Effet de serre dans un milieu isotherme ou stratifié

Rayonnement IR sortant : $\epsilon \cdot \sigma \cdot T(z_e)^4$

Z_e : altitude d'émission vers l'espace



Atmosphère idéalisée



Profil verticale linéaire de
l'émission du corps noir

$$B(z) = B_0 + (z - z_0) \frac{B_1 - B_0}{z_1 - z_0}$$

Coefficient d'absorption k_a uniforme

$$I_1 = B_s \exp\left(\frac{-k_a \cdot H}{\mu}\right) + \int_0^H \frac{k_a \cdot B(z)}{\mu} \exp\left(\frac{-k_a \cdot (H - z)}{\mu}\right) dz \quad \text{avec } \mu = \cos \theta$$

En intégrant par partie

$$I_1(x, \vec{T}) = B_s e^{-x} + B_0 (1 - e^{-x}) + (B_1 - B_0) \left[1 - \frac{1}{x} (1 - e^{-x}) \right]$$

avec $x = \frac{k_a \cdot H}{\mu}$

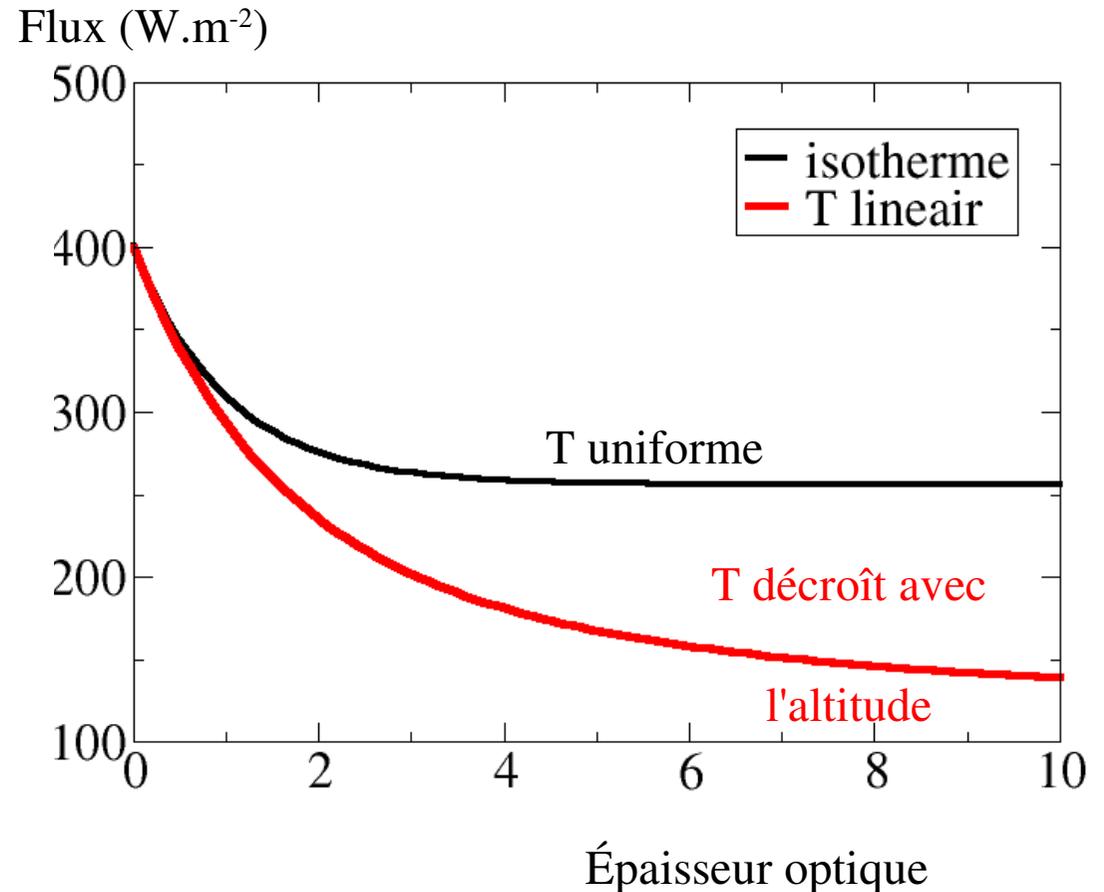
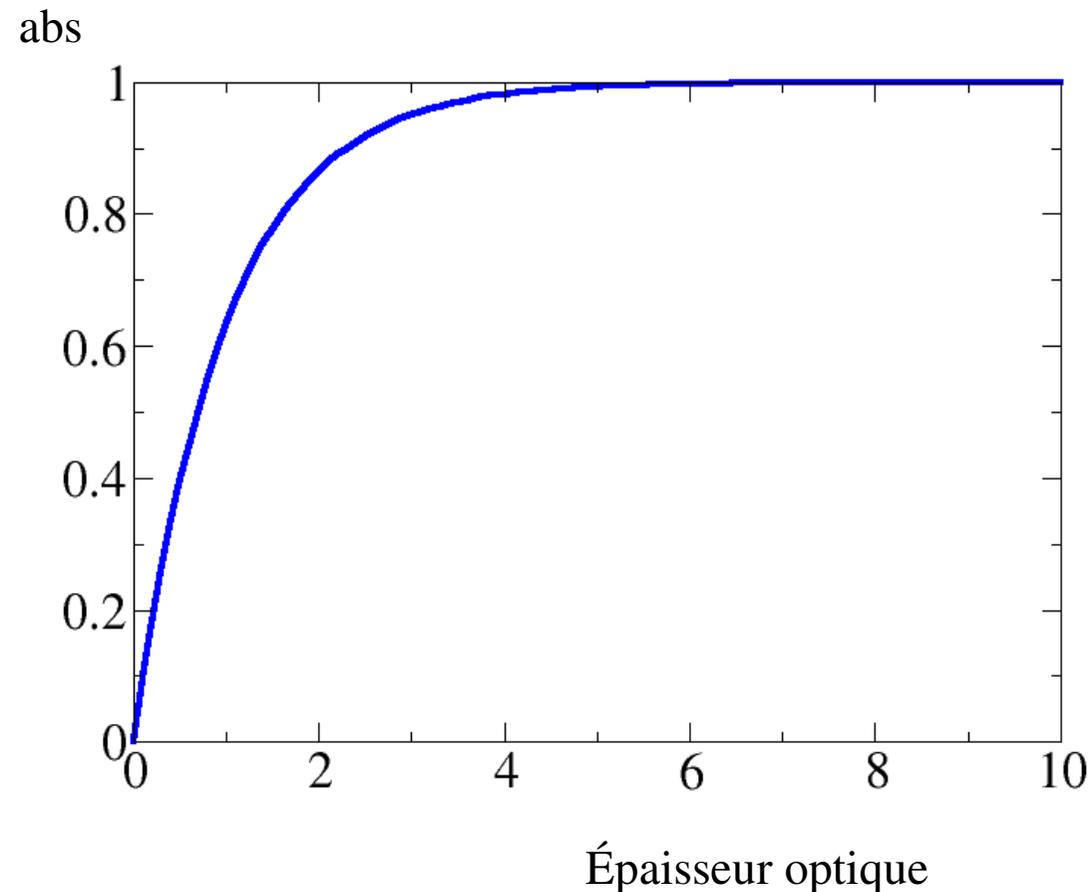
Effet de saturation

On suppose que la température de l'atmosphère est soit **uniforme** sur la verticale **soit décroît avec l'altitude**

Variation, en fonction de l'épaisseur optique d'un milieu « gris »

de l'absorption par l'atmosphère

du flux au sommet de l'atmosphère

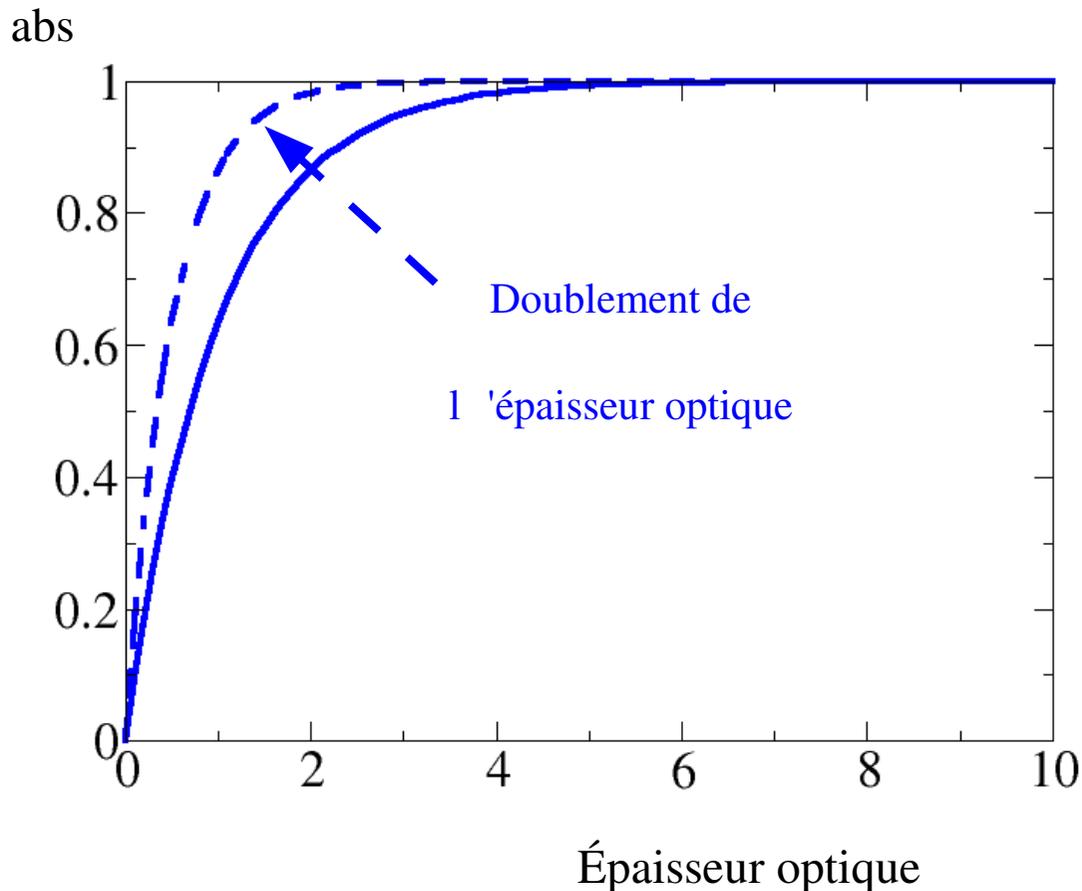


Effet de saturation

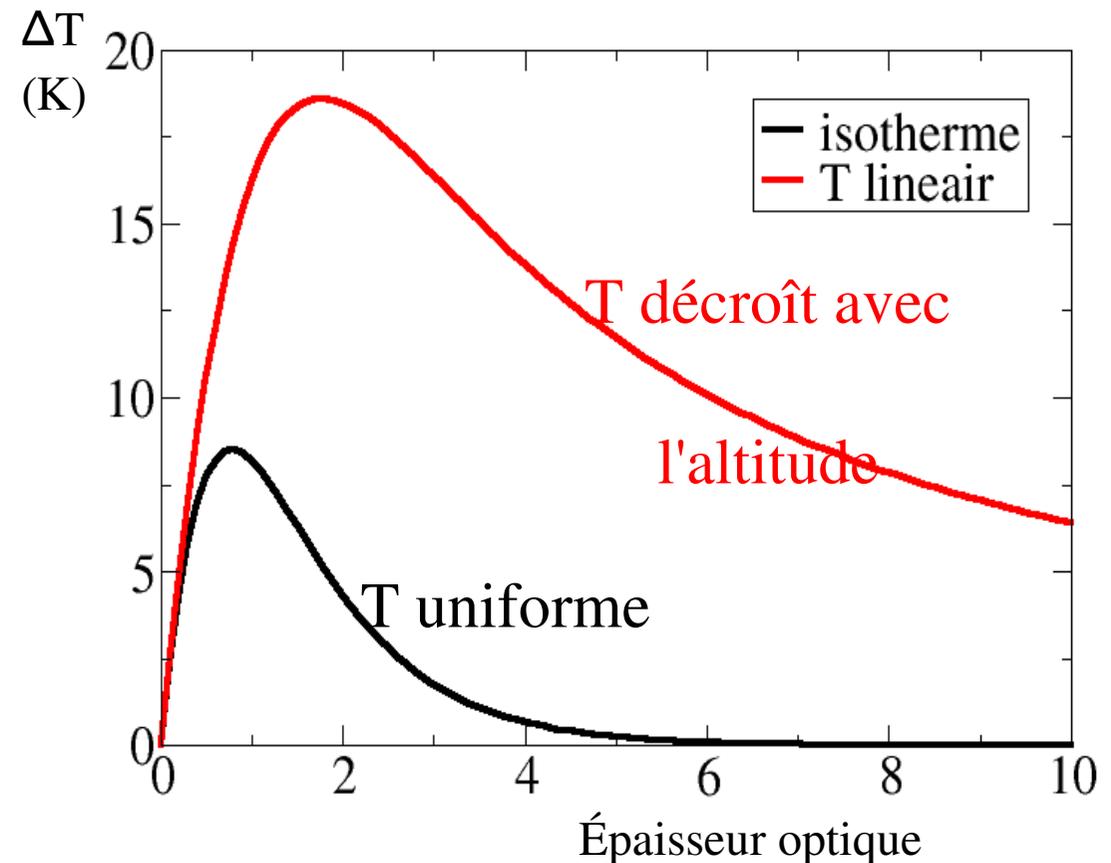
On suppose que la température de l'atmosphère est soit **uniforme** sur la verticale **soit décroît avec l'altitude**

Variation, en fonction de l'épaisseur optique d'un milieu « gris »

de l'absorption par l'atmosphère

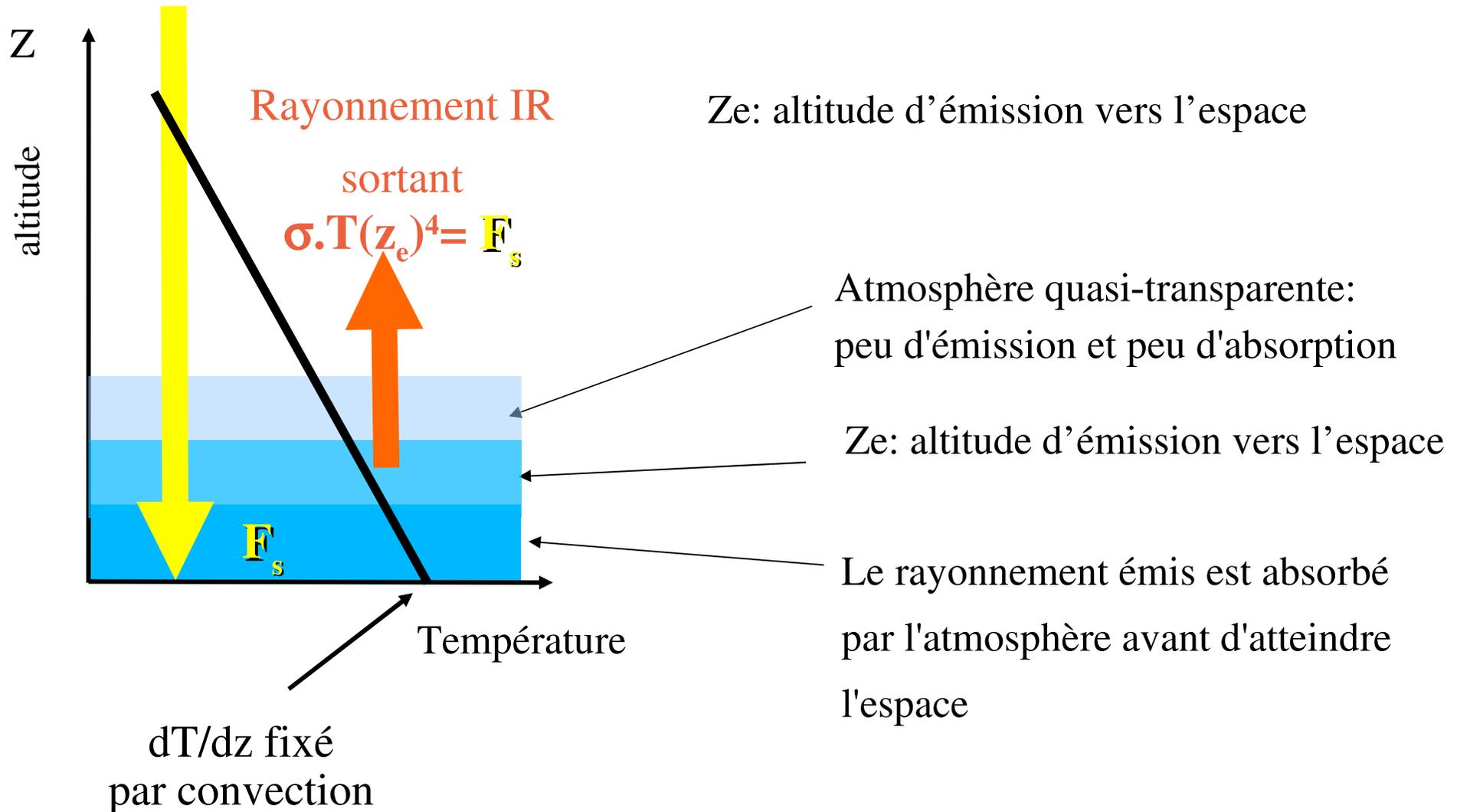


de l'augmentation de la température ΔT de surface pour un doublement de l'épaisseur optique.



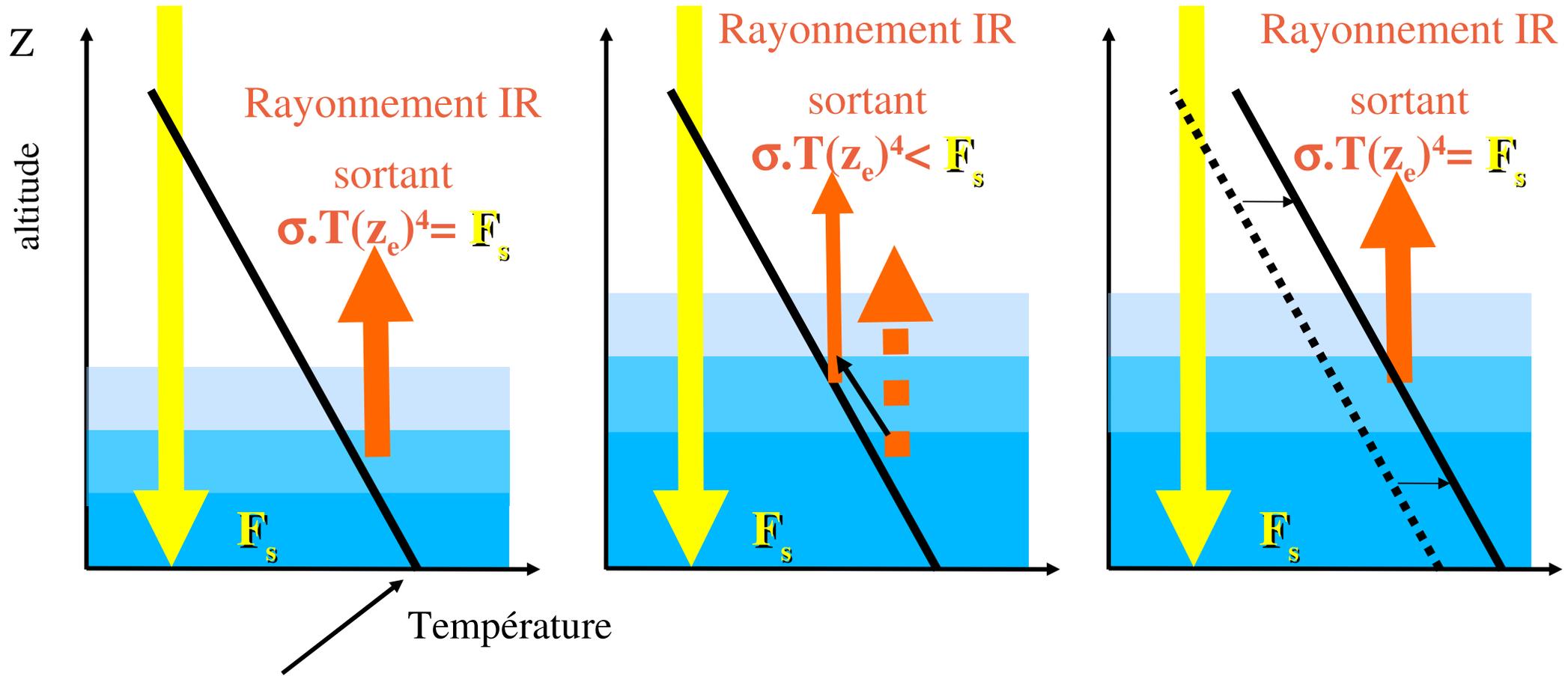
Effet de serre dans une atmosphère stratifiée.

Rayonnement solaire net



Effet de serre dans une atmosphère stratifiée.

Rayonnement solaire net



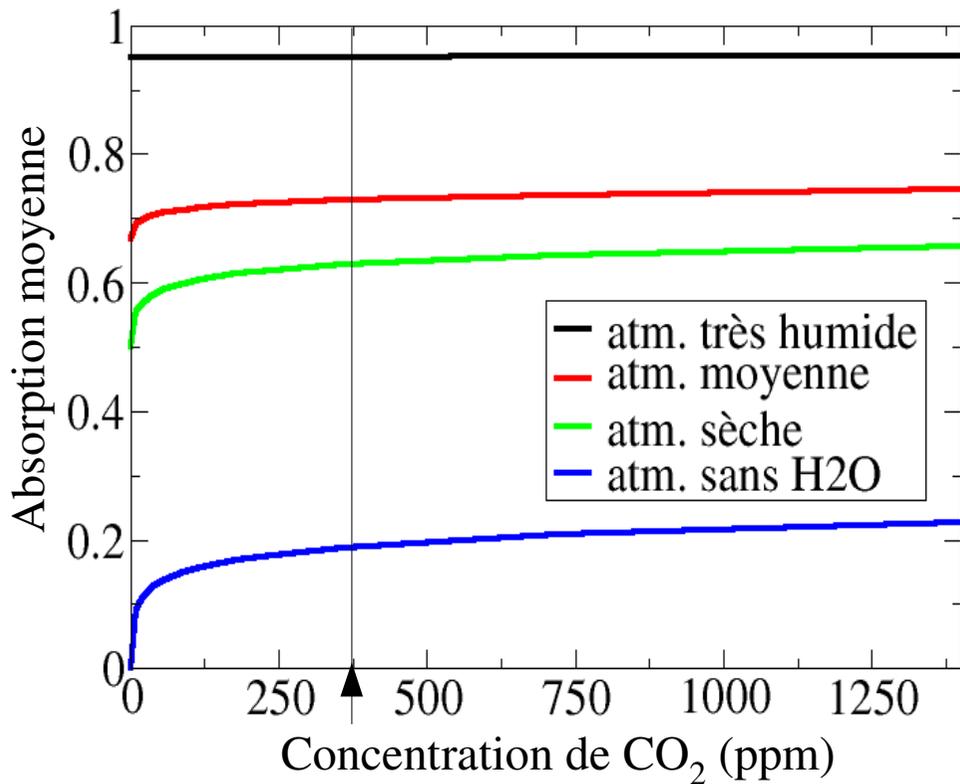
dT/dz fixé
par convection

Z_e augmente, T_e diminue:
Rayonnement sortant plus
faible.

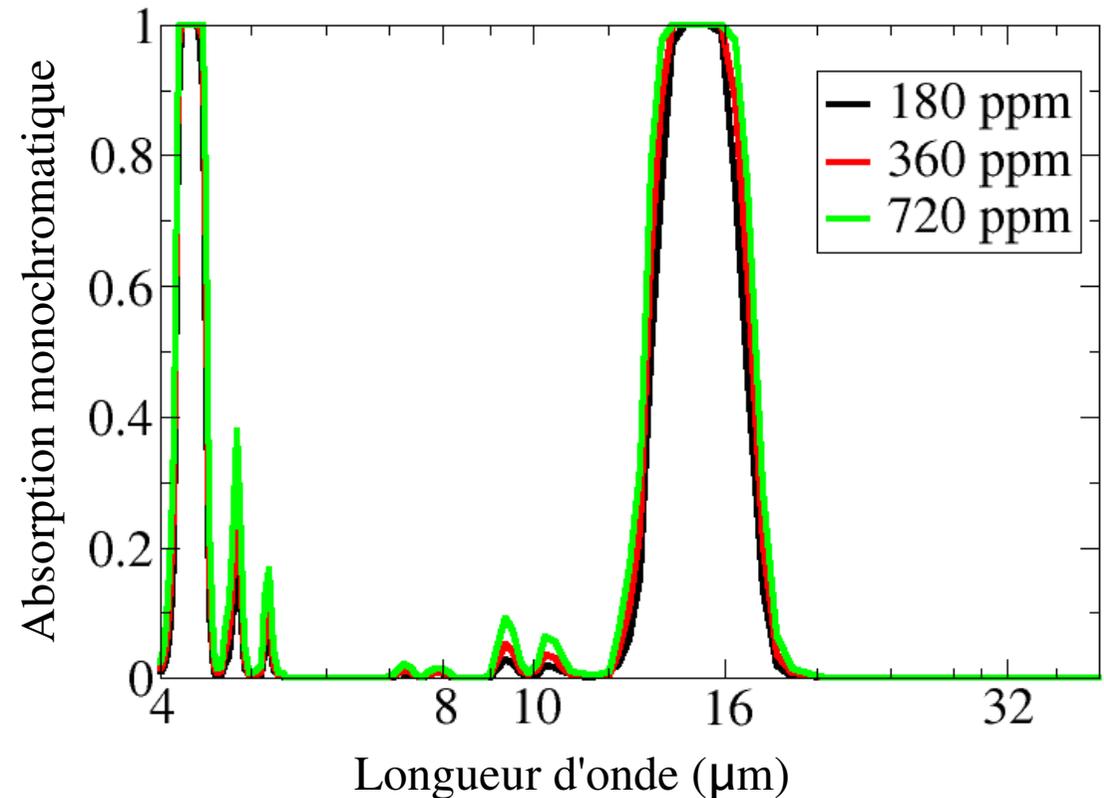
$T(z)$ augmente:
Retour à l'équilibre

Effet de saturation

Absorption de l'atmosphère **moyennée** sur le domaine infra-rouge en fonction du CO_2 , pour différentes valeurs de H_2O

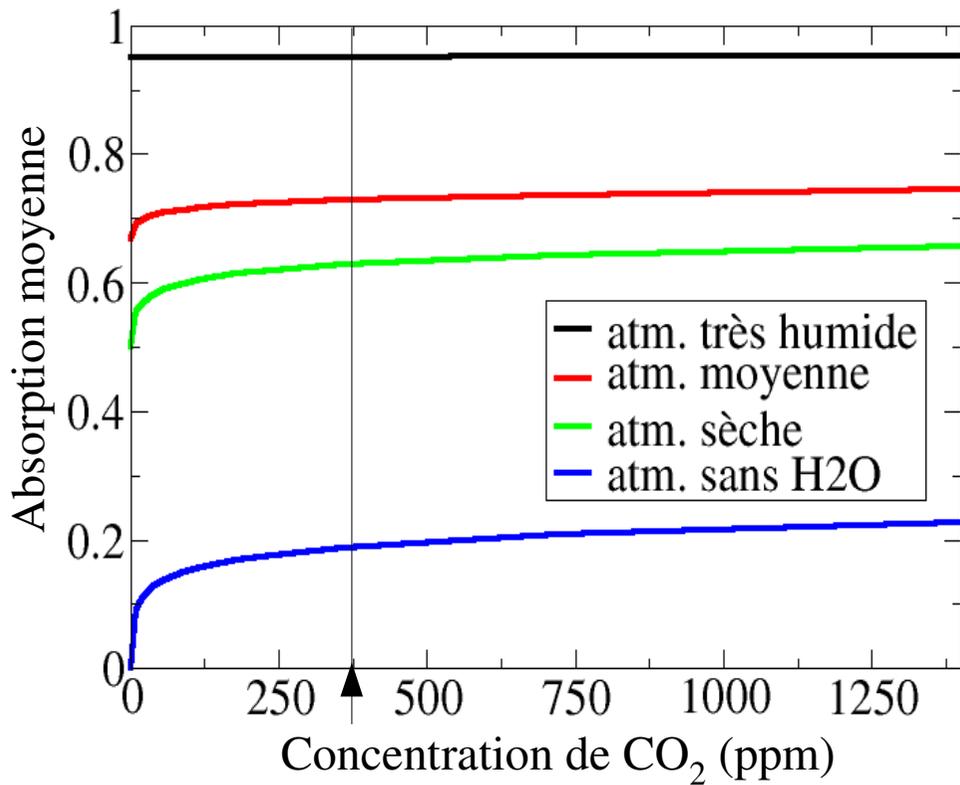


Absorption monochromatique de l'atmosphère due au seul CO_2 , en fonction de la longueur d'onde, pour différente concentration de CO_2

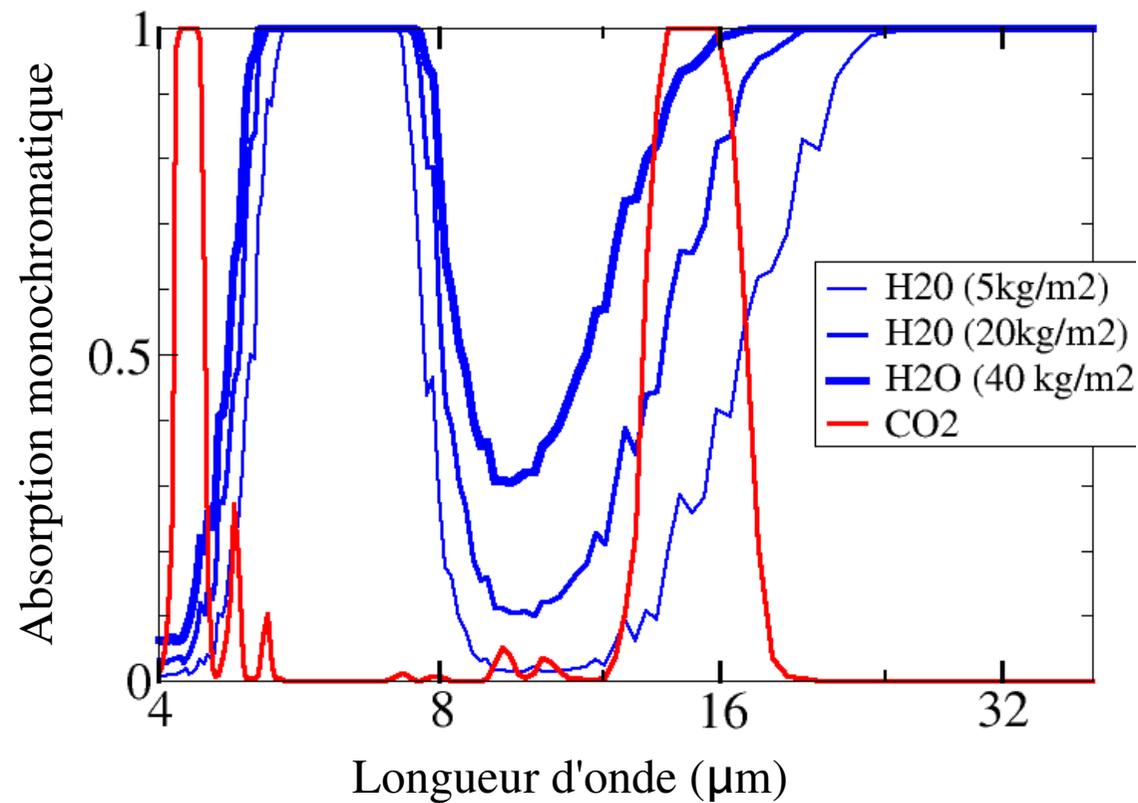


Effet de saturation

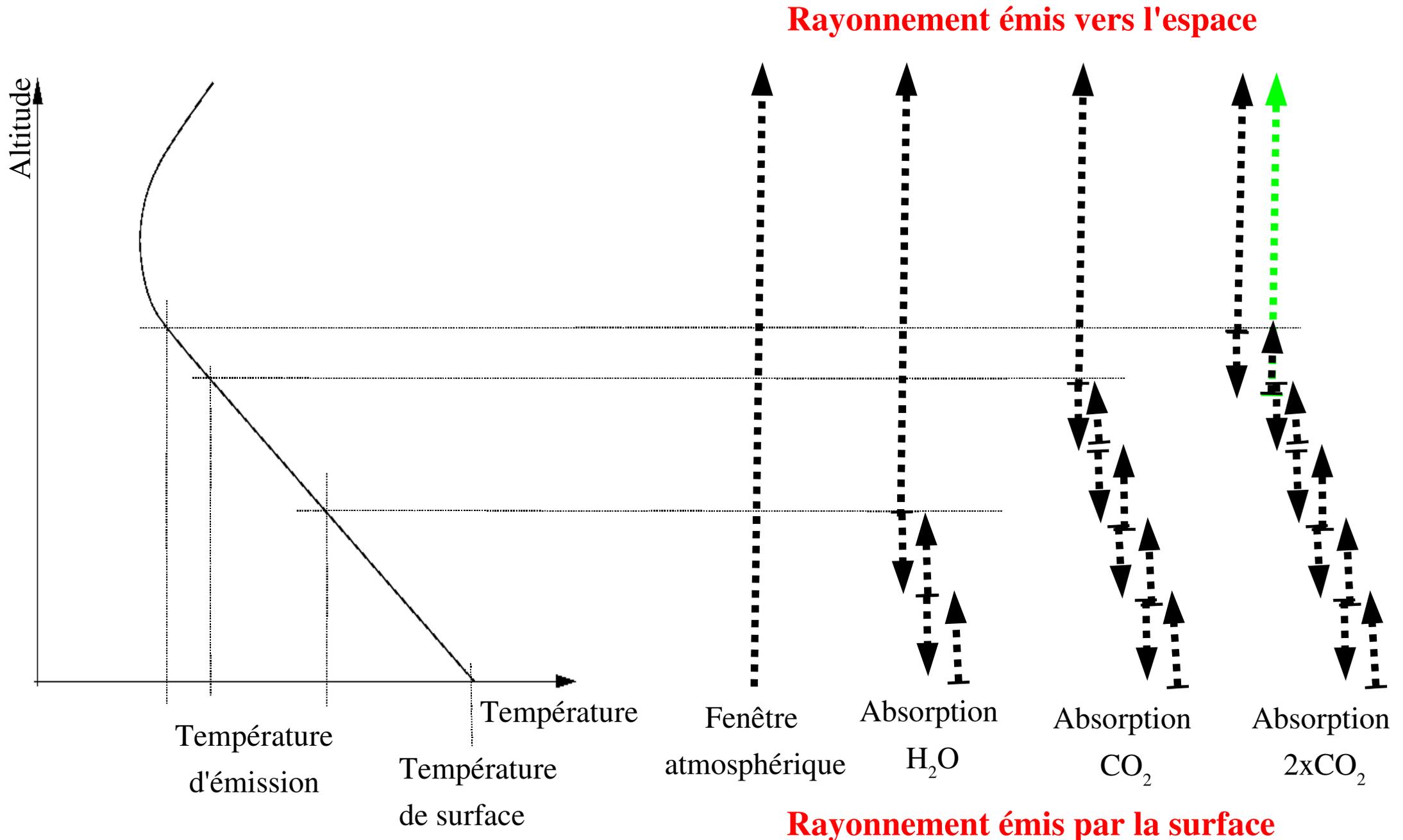
Absorption de l'atmosphère **moyennée** sur le domaine infra-rouge en fonction du CO_2 , pour différentes valeurs de H_2O



Absorption monochromatique de l'atmosphère due au CO_2 et à H_2O , pour différente concentration de H_2O

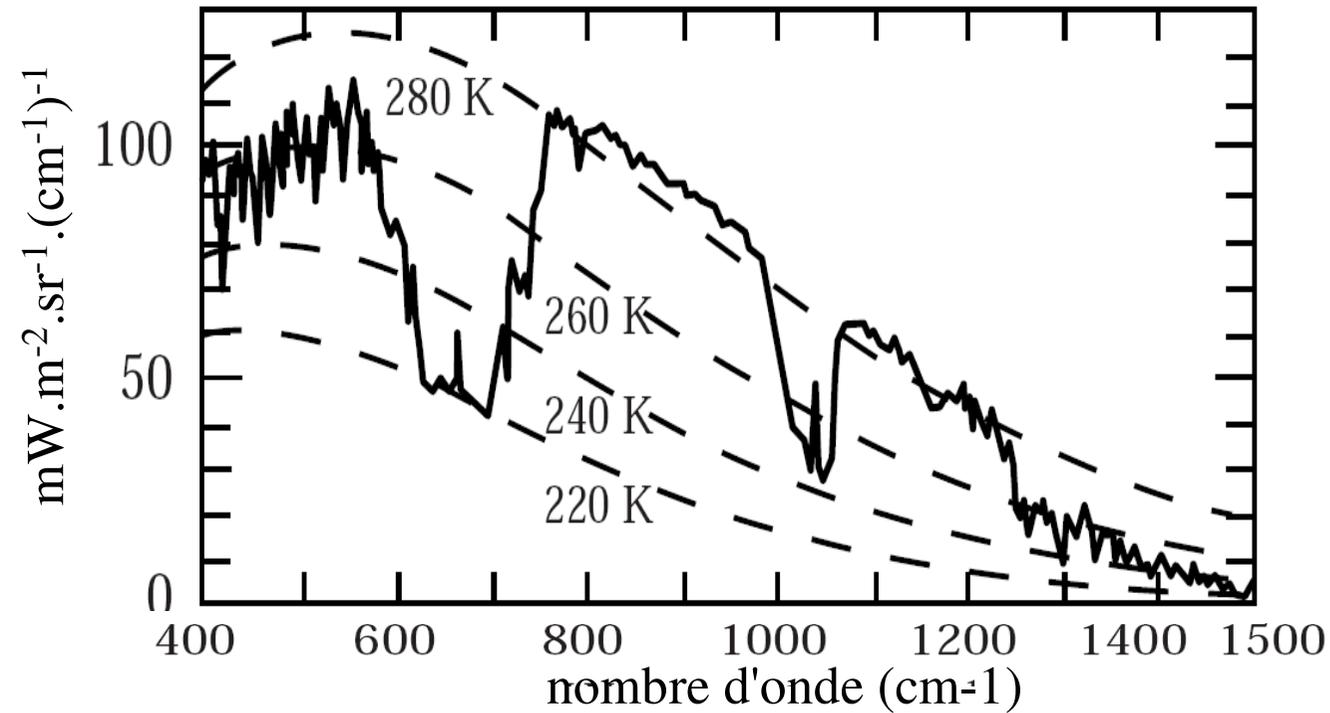


Effet de serre dans une atmosphère.

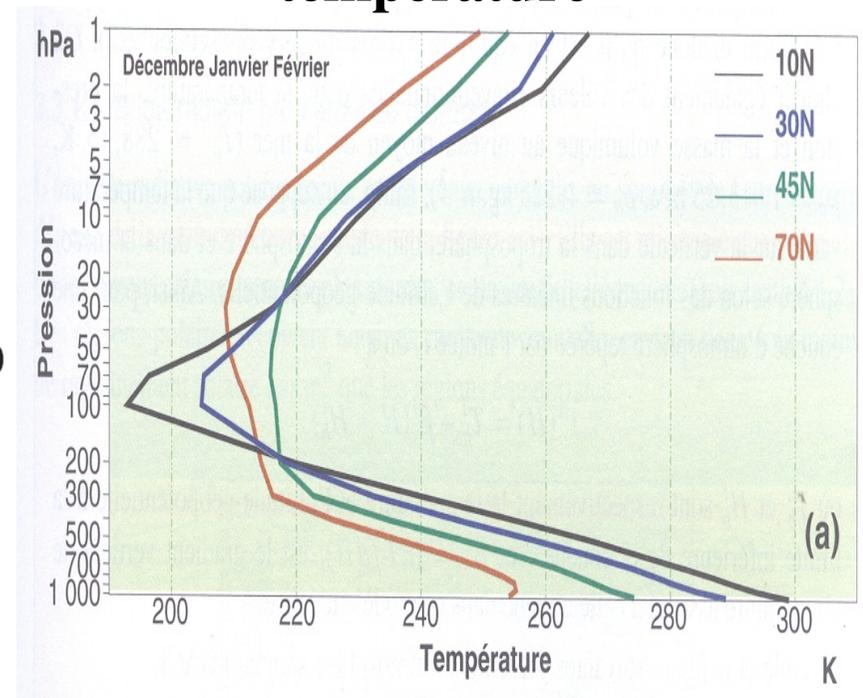


Rayonnement émis par la terre et l'atmosphère

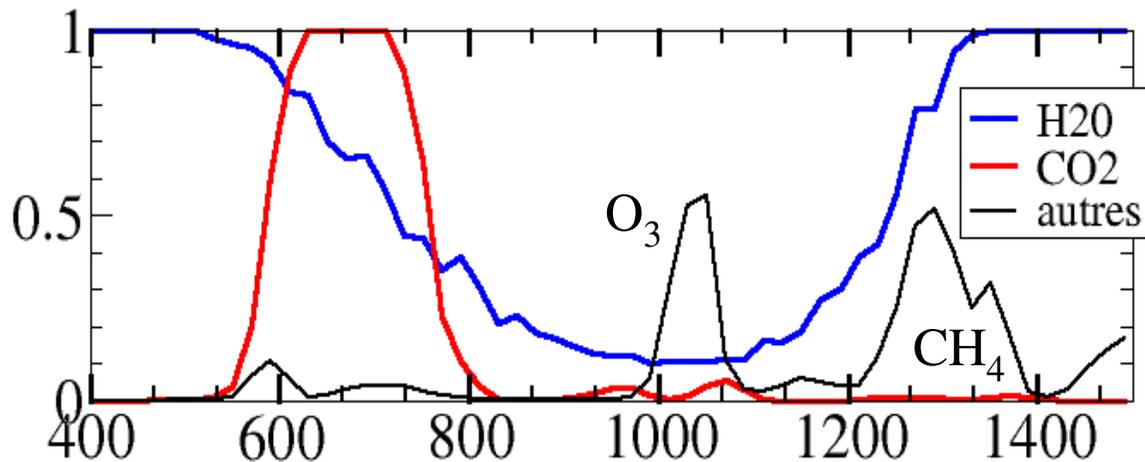
Spectre infra-rouge observé par satellite (méditerranée)



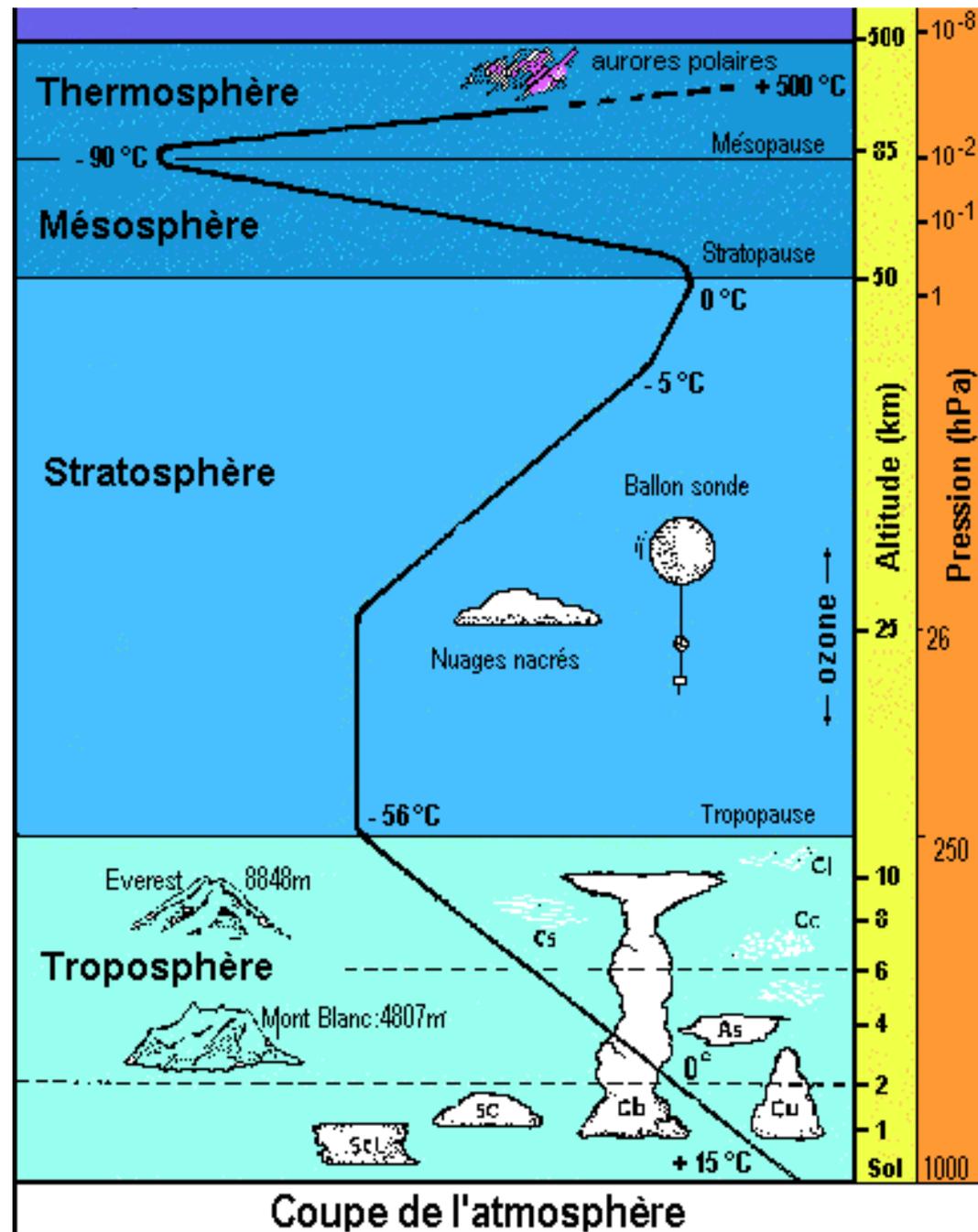
Profil verticaux de température



Spectre d'absorption de l'atmosphère

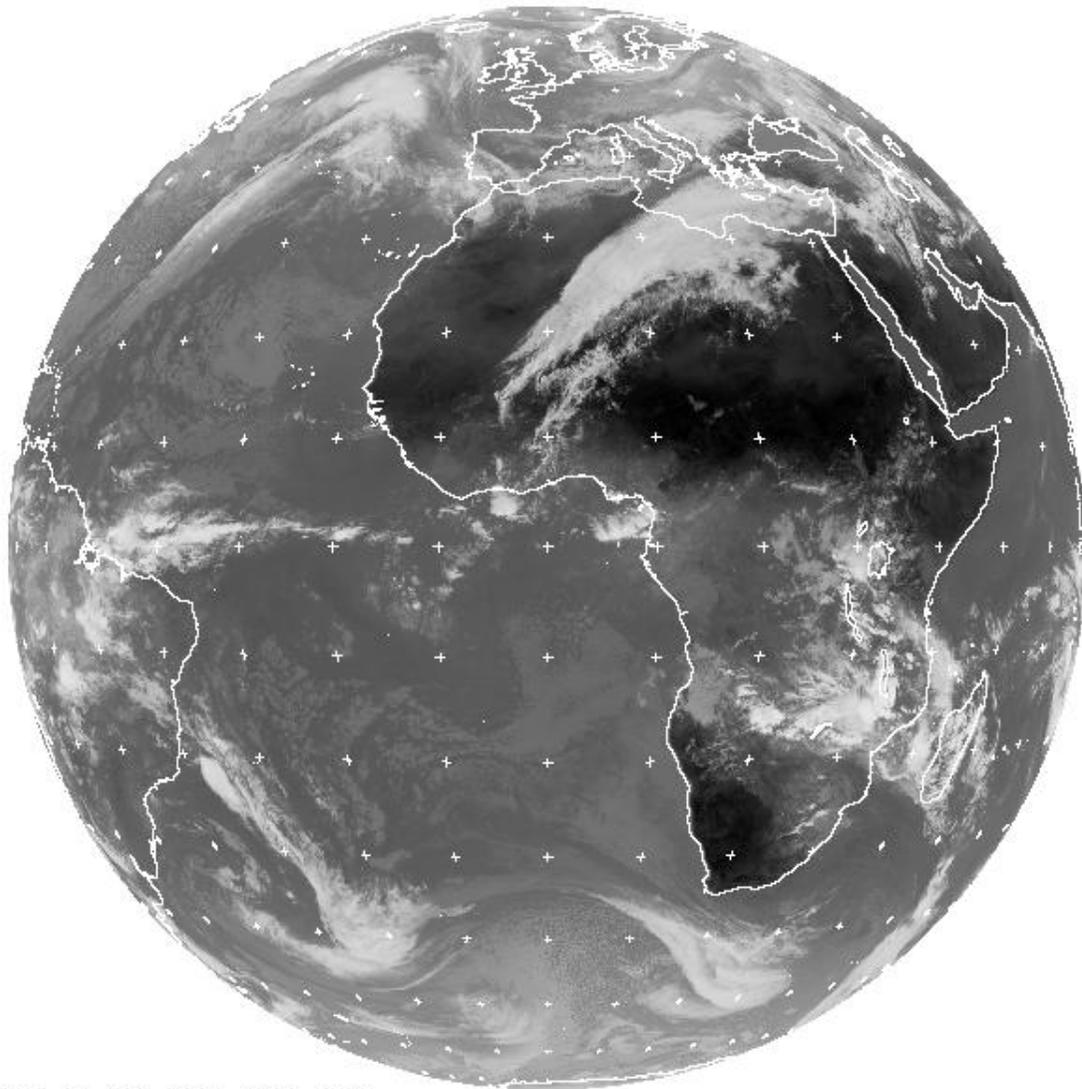


Profil vertical de l'atmosphère

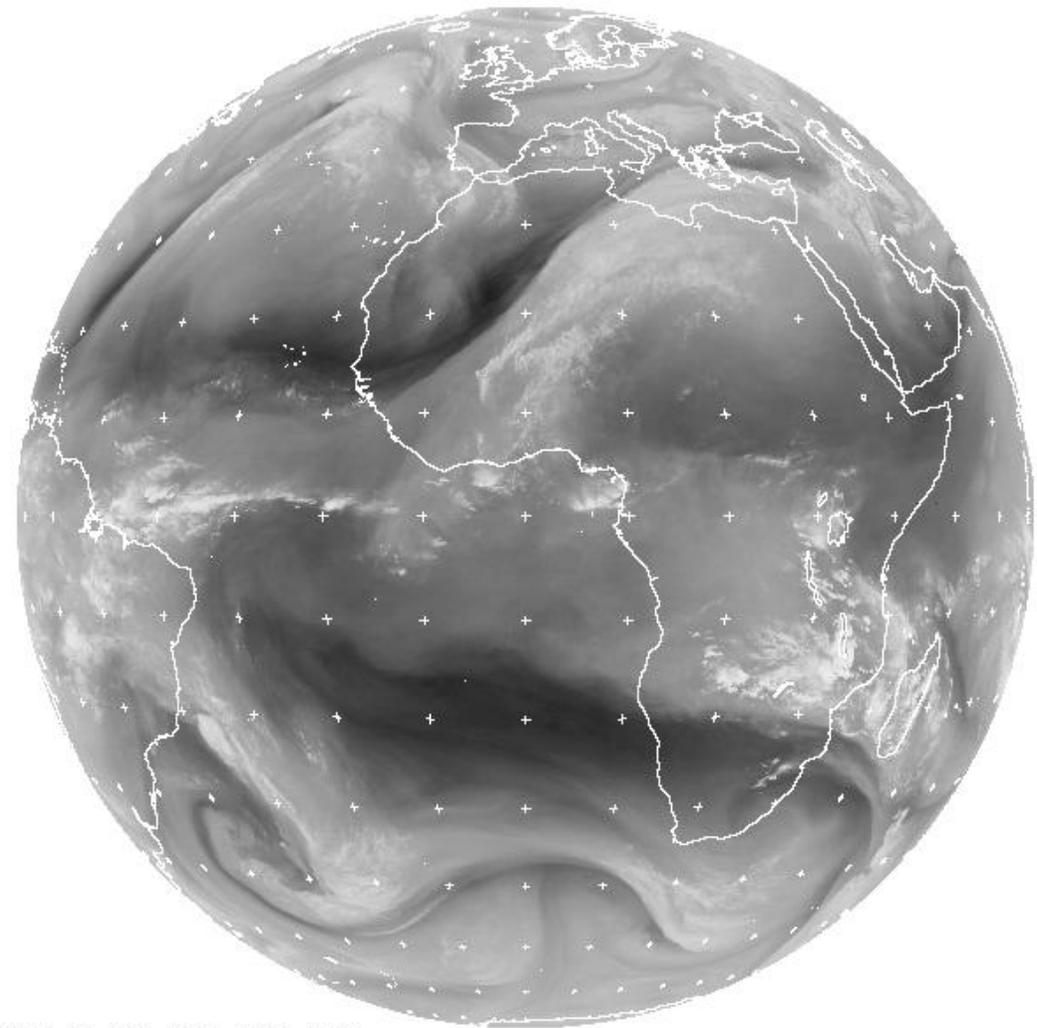


Flux sortant

Canal visible de Météosat



Canal vapeur d'eau de Météosat



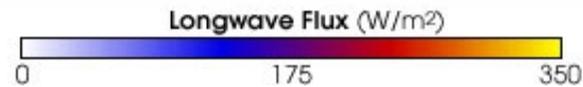
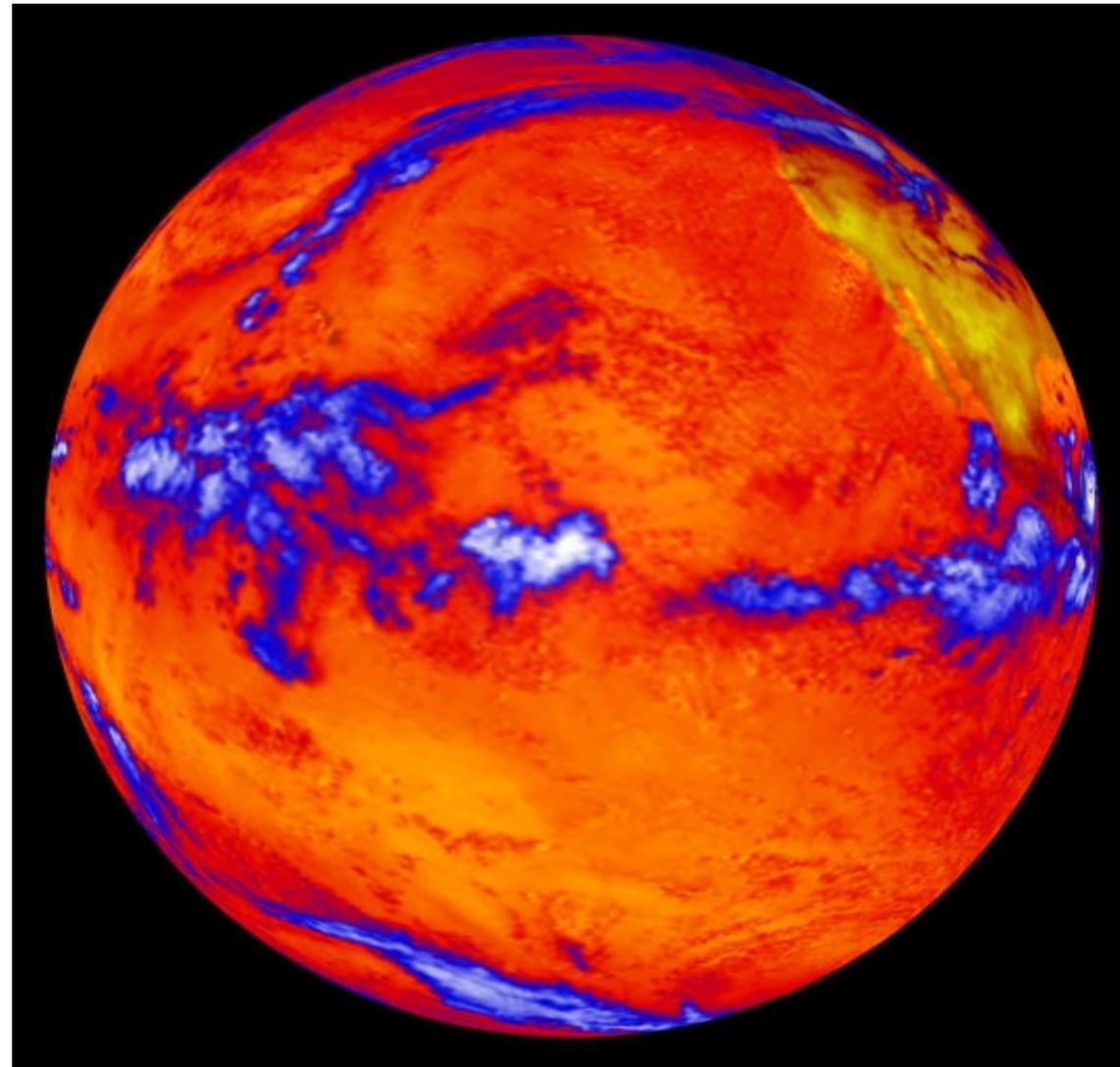
MET7 01 MAR 2004 1200 ETOT

MET7 01 MAR 2004 1200 DTOT

Flux infra-rouge sortant Sommet de l'atmosphère

$$\text{Flux} = \sigma T^4$$

T émission



Plan

- Bilan radiatif et circulation générale atmosphérique
- Circulation atmosphérique et cycle de l'eau
- Echanges radiatifs et effet de serre
- **Modélisation du climat et estimation des changements climatiques**
- Estimation des changements climatiques dus aux activités humaines

Modélisation numérique 3D du climat

- Modèles météorologiques / modèles climatiques
- Les différentes composantes d'un modèle climatique
- Comment et pourquoi développe-t-on un modèle climatique?
- Comment « tourne » un modèle?
- Quels sont les « forçages » de ces modèles?

Modélisation météorologique/climatique

- *un objet d'étude commun, des objectifs d'étude différents*

même outil de modélisation de base, mais avec des approximations différentes pour répondre à des objectifs différents:

- météo: problème de prévisibilité, de définition d'état initial
- climat: problème de solution « asymptotique », de sensibilité à des perturbations

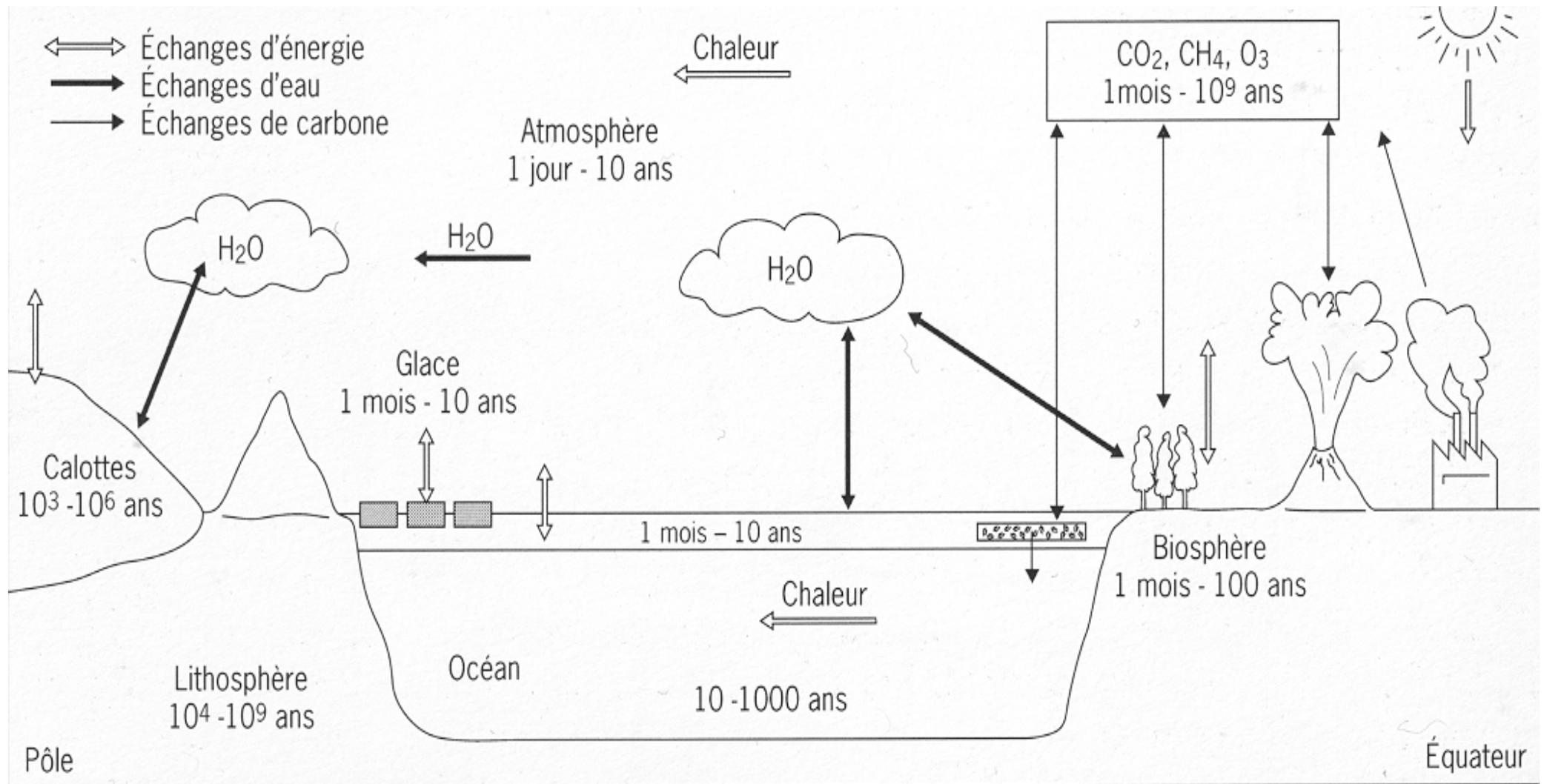
- *prévision météorologique / projection climatique*

ou comment faire du climat quand on ne sait pas prévoir le temps à plus de quelques jours

ex: variation d'un jour à l'autre / variation d'une saison à l'autre

hypothèse de base de la climatologie: le climat est une superposition d'une composante déterministe et d'une composante purement aléatoire

Les différentes composantes d'un modèle météorologique ou climatique



Les différentes composantes d'un modèle météorologique ou climatique

- atmosphère (qqs heures à qqs années)
- surface continentale (qqs heures à qqs années)
- océan superficiel et glace de mer (jour à qqs dizaine années)
- océan profond (jour à qqs années)

Modèles météorologiques: atmosphère + surfaces continentales (+ océan superficiel)

Modèles climatiques: atmosphère + surfaces continentales + océan + glace de mer + glacier

Modèles pour la prévision saisonnière: intermédiaire

Pollution, chimie atmosphérique: composantes supplémentaires

Comment et pourquoi développe-t-on un modèle climatique?

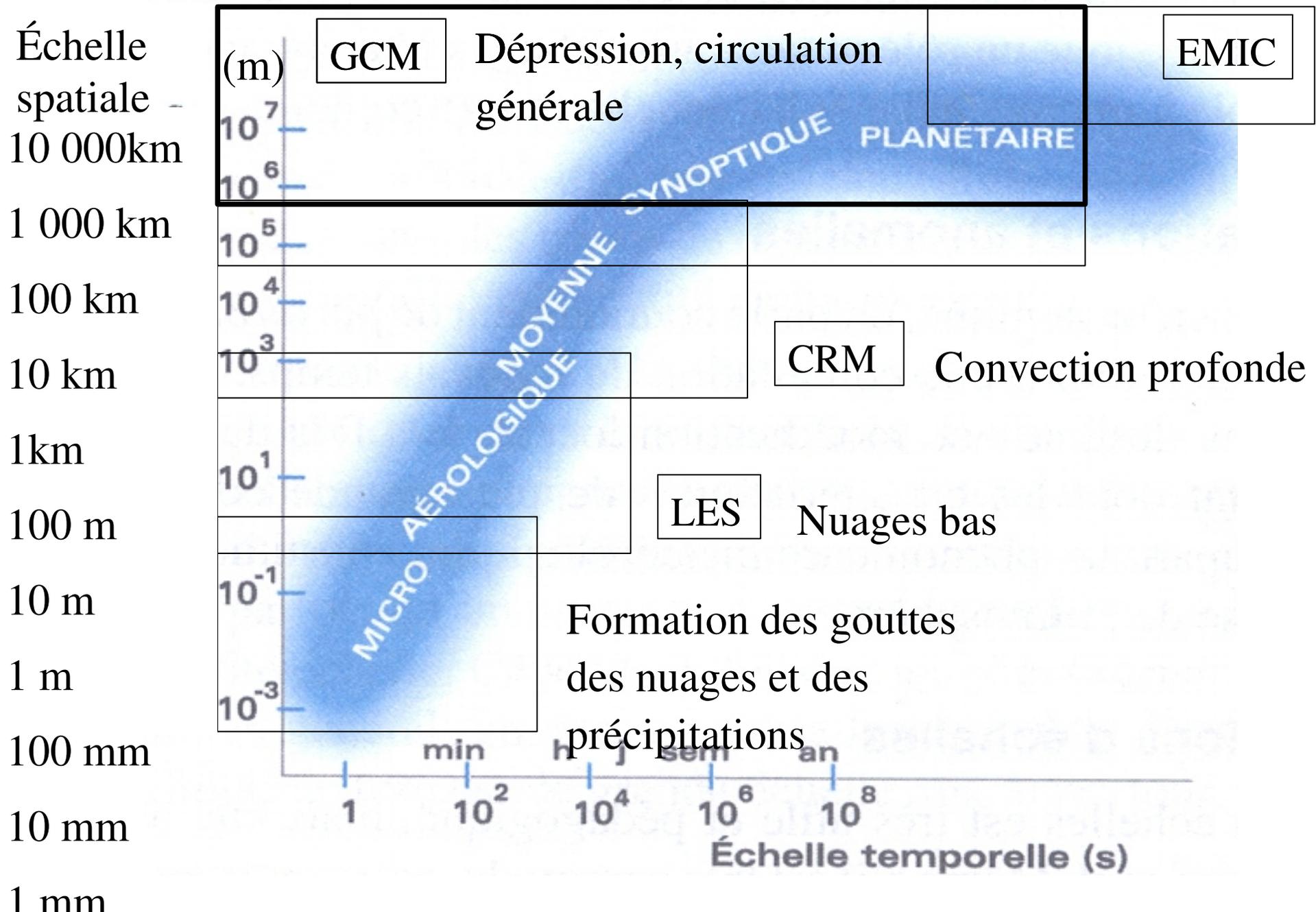
Préliminaire:

- il n'est pas possible de bâtir un modèle climatique ou météorologique complet à partir des lois physiques fondamentales
- construire un modèle c'est construire une représentation simplifiée des phénomènes physiques dans le but de répondre à des objectifs donnés
- les choix pour les simplifications et approximations peuvent être très différents

Les principales étapes:

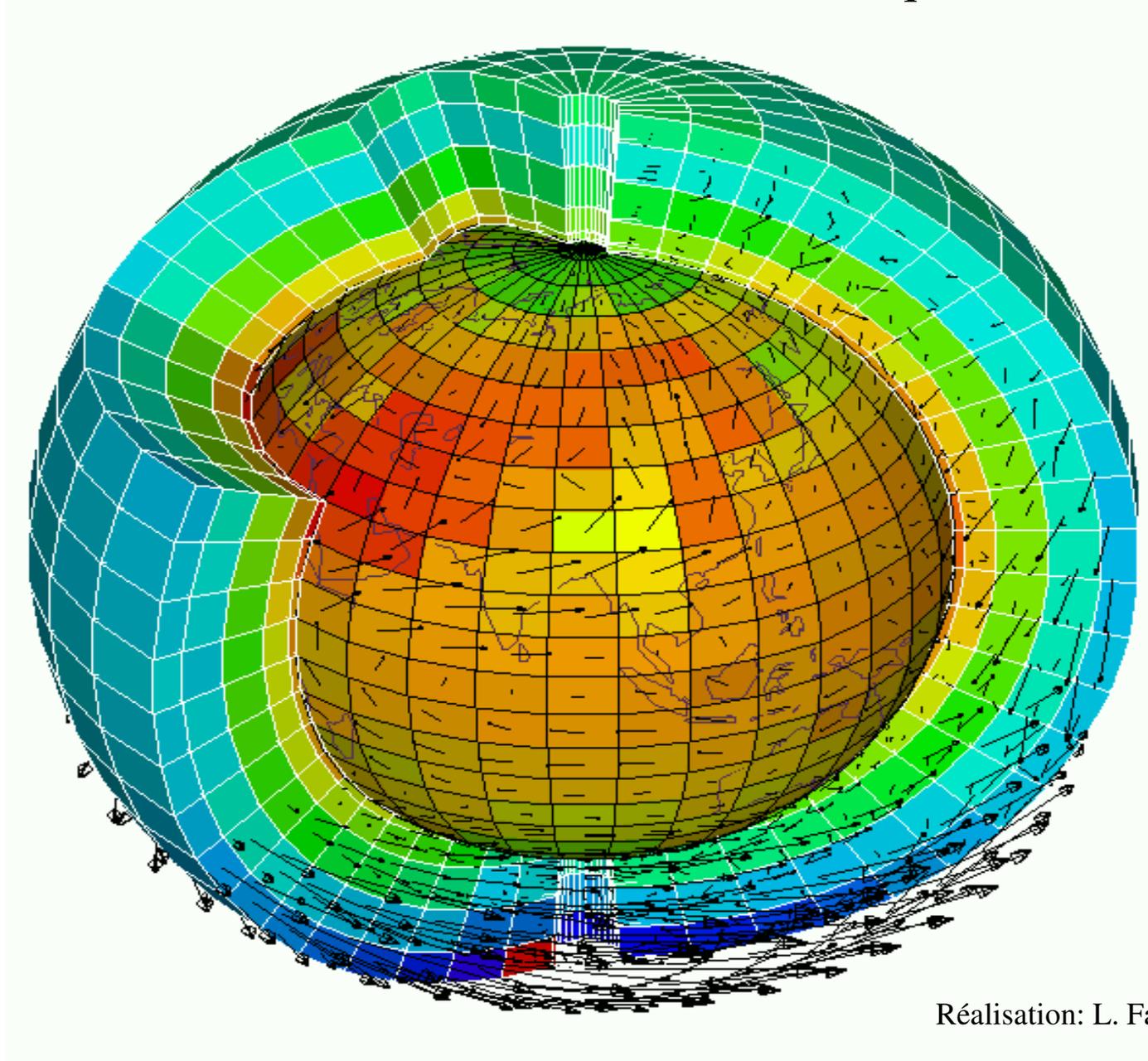
- 1- choix des objets et des phénomènes à prendre en compte
- 2- approximation physique
- 3- formulation mathématique
- 4- discrétisation, résolution numérique
- 5- programmation informatique

Échelles spatiales et temporelles



Modélisation numérique 3D du climat

Discretisation et résolution numérique



Modèles de circulation générale (GCM)

Equations de GCM atmosphérique (extraits)

Equations dynamiques en coordonnées pression

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \partial_t \vec{V} = \underbrace{-(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V}}_{\text{transport}} - \omega \partial_p \vec{V} \underbrace{- \vec{\nabla} \Phi}_{\text{gravité}} \underbrace{- f \vec{k} \times \vec{V}}_{\text{Coriolis}} + \vec{S}_V \\
 \vec{\nabla} \cdot \vec{V} + \partial_p \omega = 0 \\
 \partial_t q = -\vec{V} \cdot \vec{\nabla} q - \omega \partial_p q + \underbrace{S_q}_{\text{Sources}}
 \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l}
 \Phi = gz \quad \text{geopotentiel} \\
 \omega = \partial_t p \quad \text{vitesse vert.} \\
 q = \text{humidité spécifique}
 \end{array} \right. \quad (1)$$

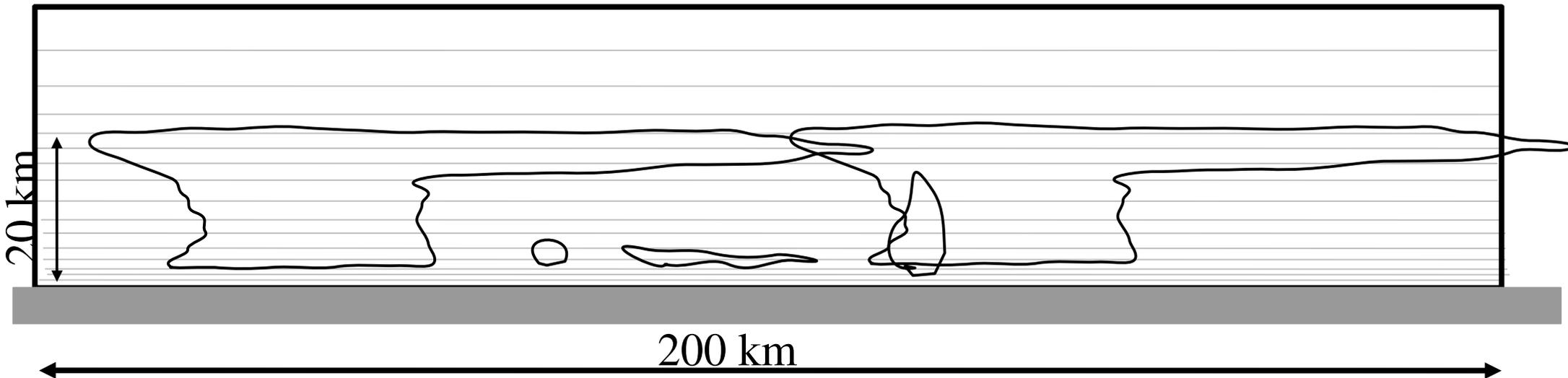
\vec{S}_v et S_q : termes source déterminés par les **paramétrisations physiques** :

- couche limite planétaire
- convection profonde (Gros cumulus et cumulonimbus)
- nuages
- processus radiatifs
- orographie
- sol

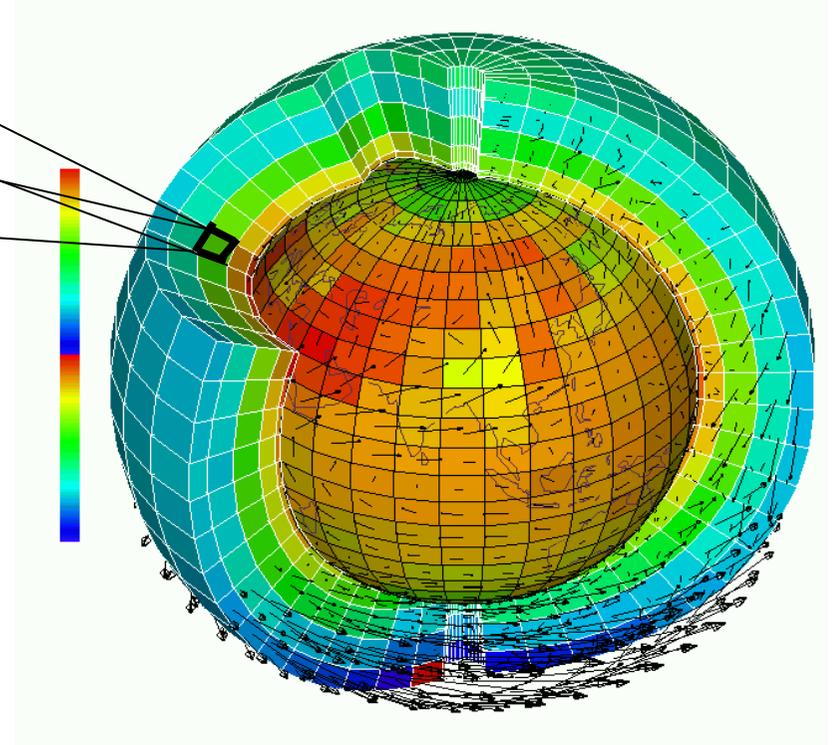
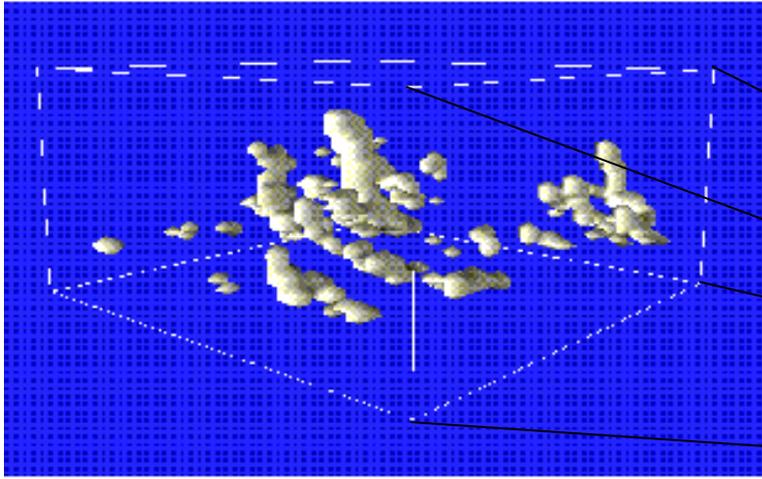
Discrétisation

- Incrément temporel : de quelques minutes à une demi-heure, selon la technique d'intégration.
- Grille horizontale : maille allant de 100 à 300 km.
- Grille verticale : maille allant de 100m (ou moins) au niveau du sol, à quelques kilomètres dans la stratosphère.

Colonne atmosphérique typique:



Discrétisation

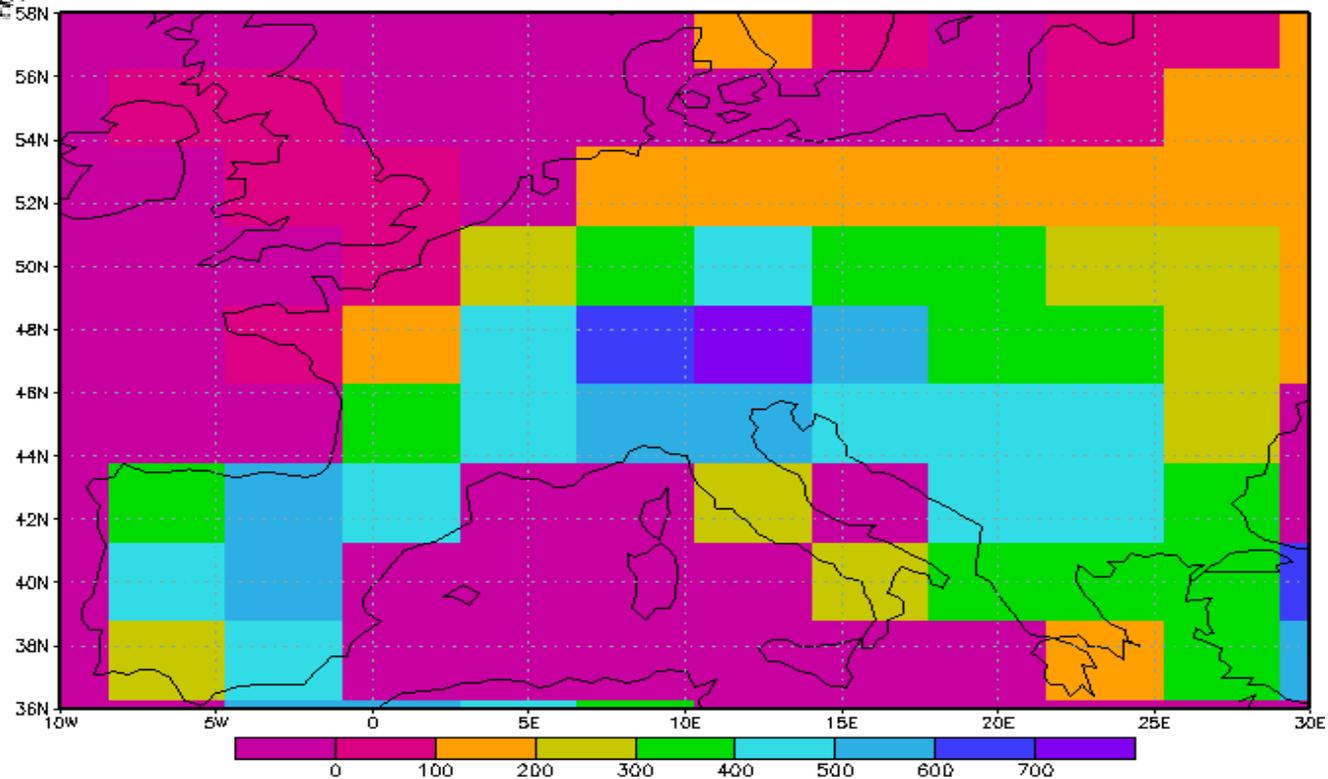


Modélisation des phénomènes sous-maîlles,
ou paramétrisation

Exemple de paramétrisation

Orography

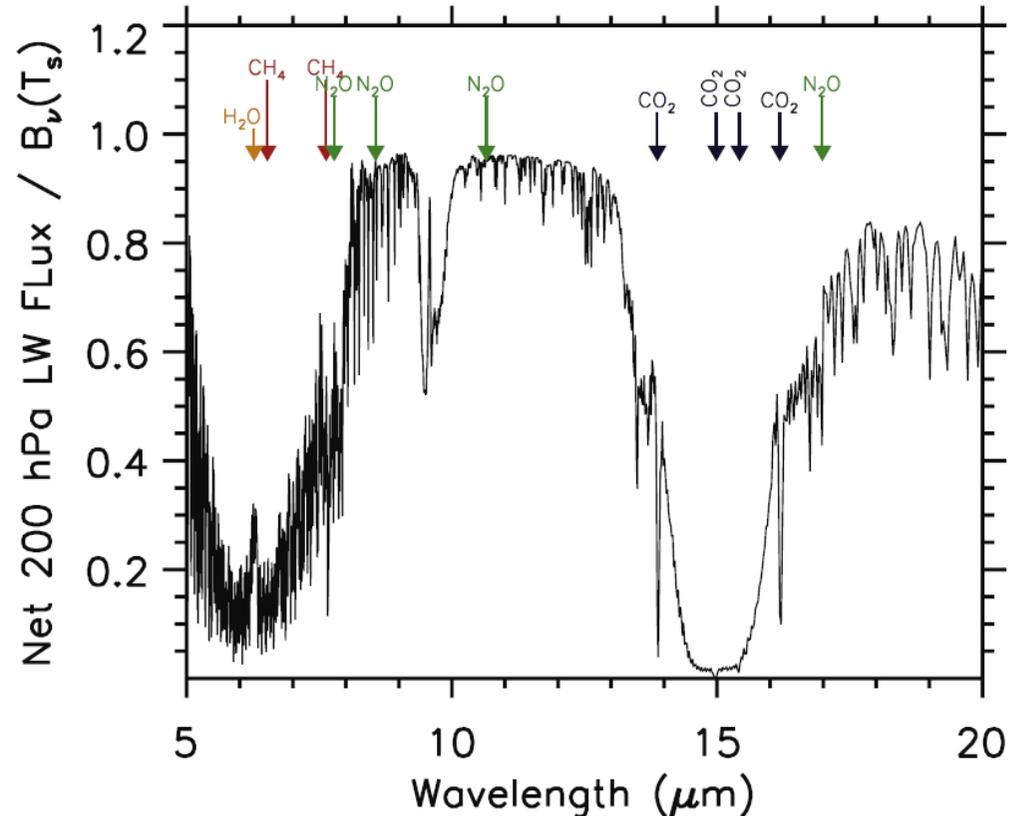
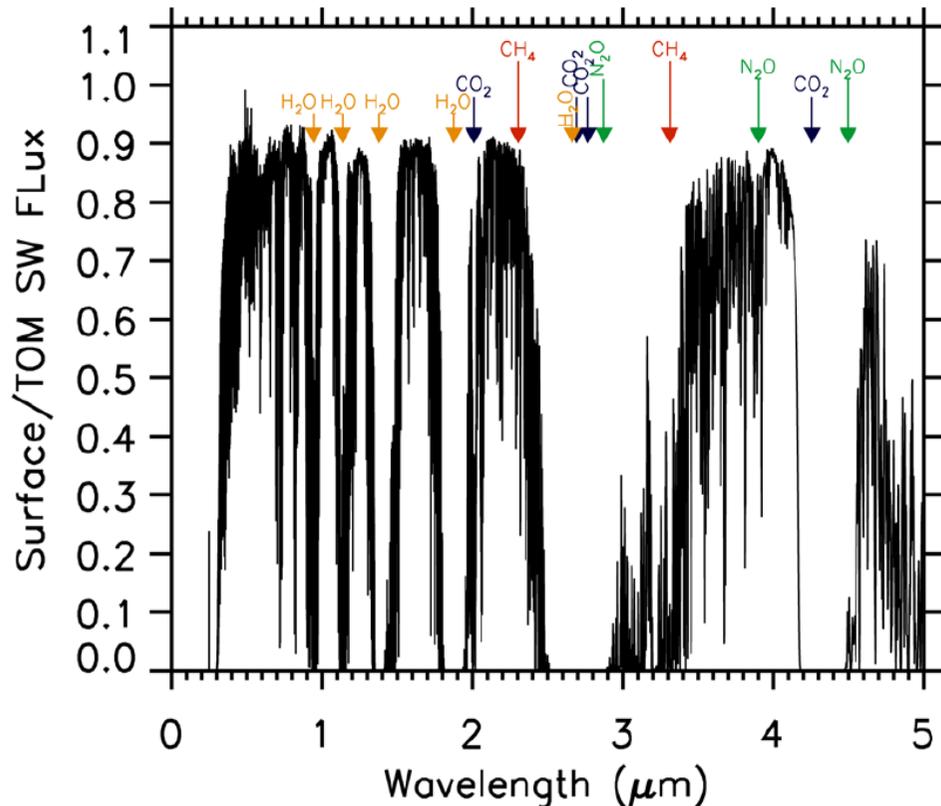
At the model grid scale, orography is poorly represented; e.g. Europe orography for 3.5x2.5 grid is:



The purpose of the parametrization of orography effect is to determine the **drag** and the **lift** due to mountains and acting on atmospheric flow. → use of high resolution orography data base.

Note that snow is still a problem.

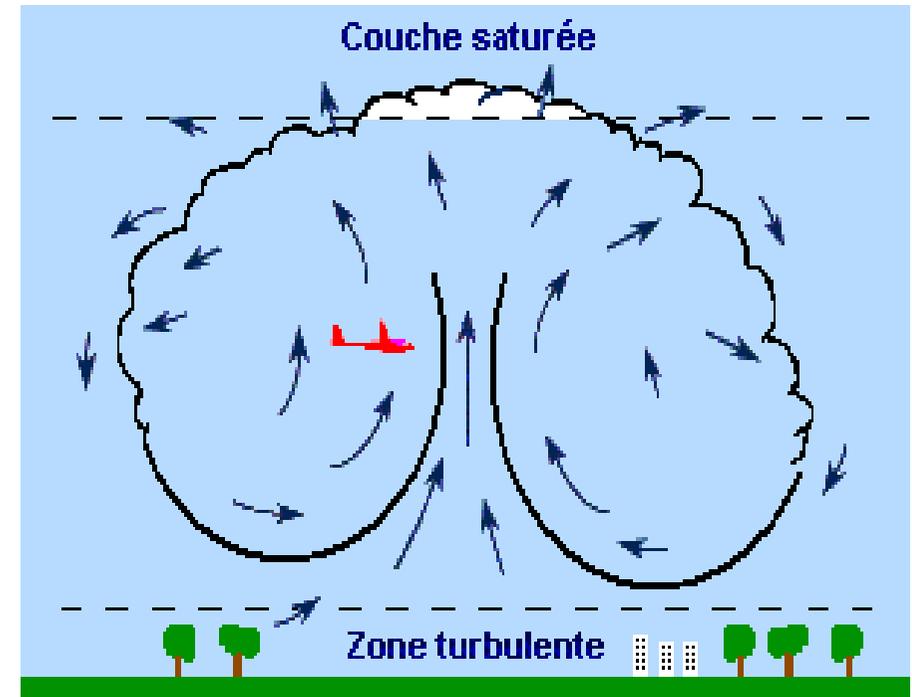
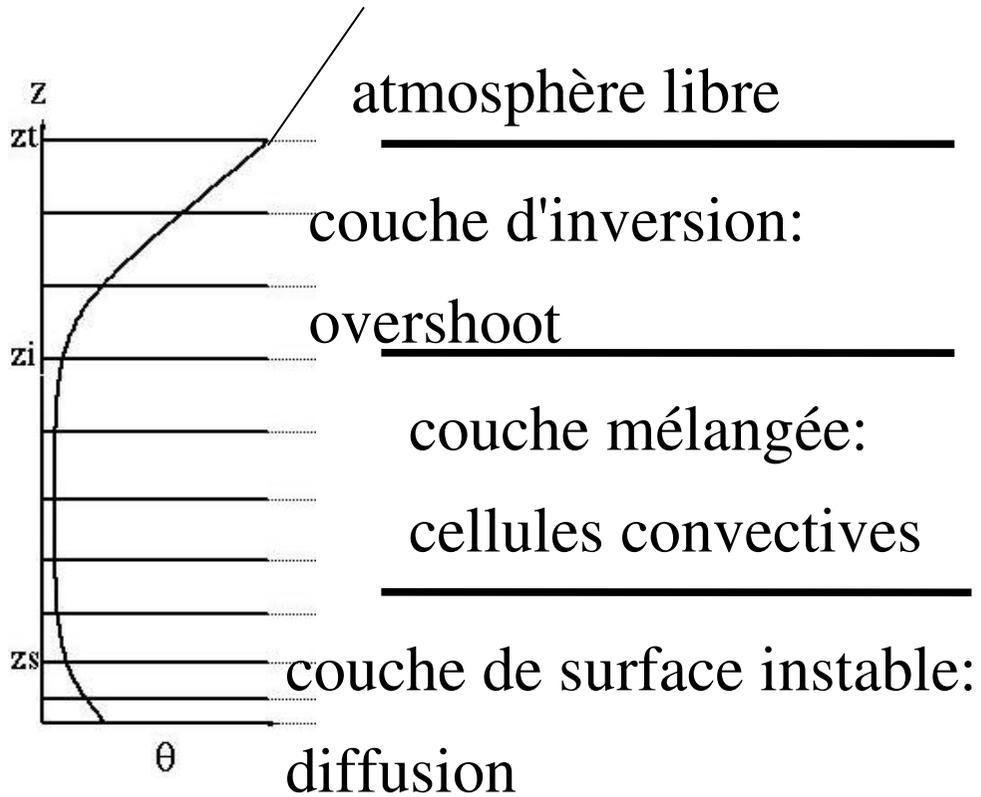
Rayonnement



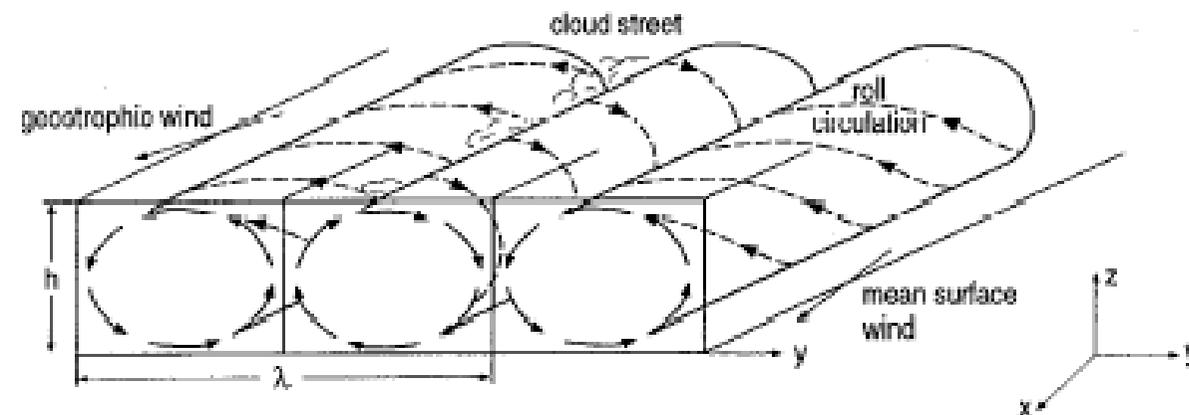
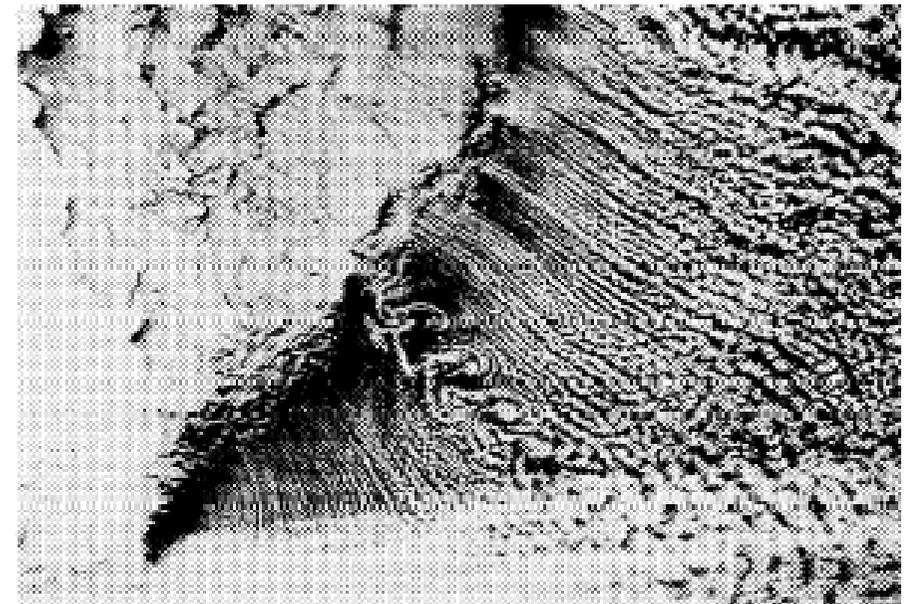
[Collins et al., 2006]

- Développement de modèles réduits, bandes larges, ajustés sur les résultats de modèles de références (modèle raie par raie)
- Modèle réduits doit être redéfini pour les différentes planètes

La couche limite atmosphérique convective

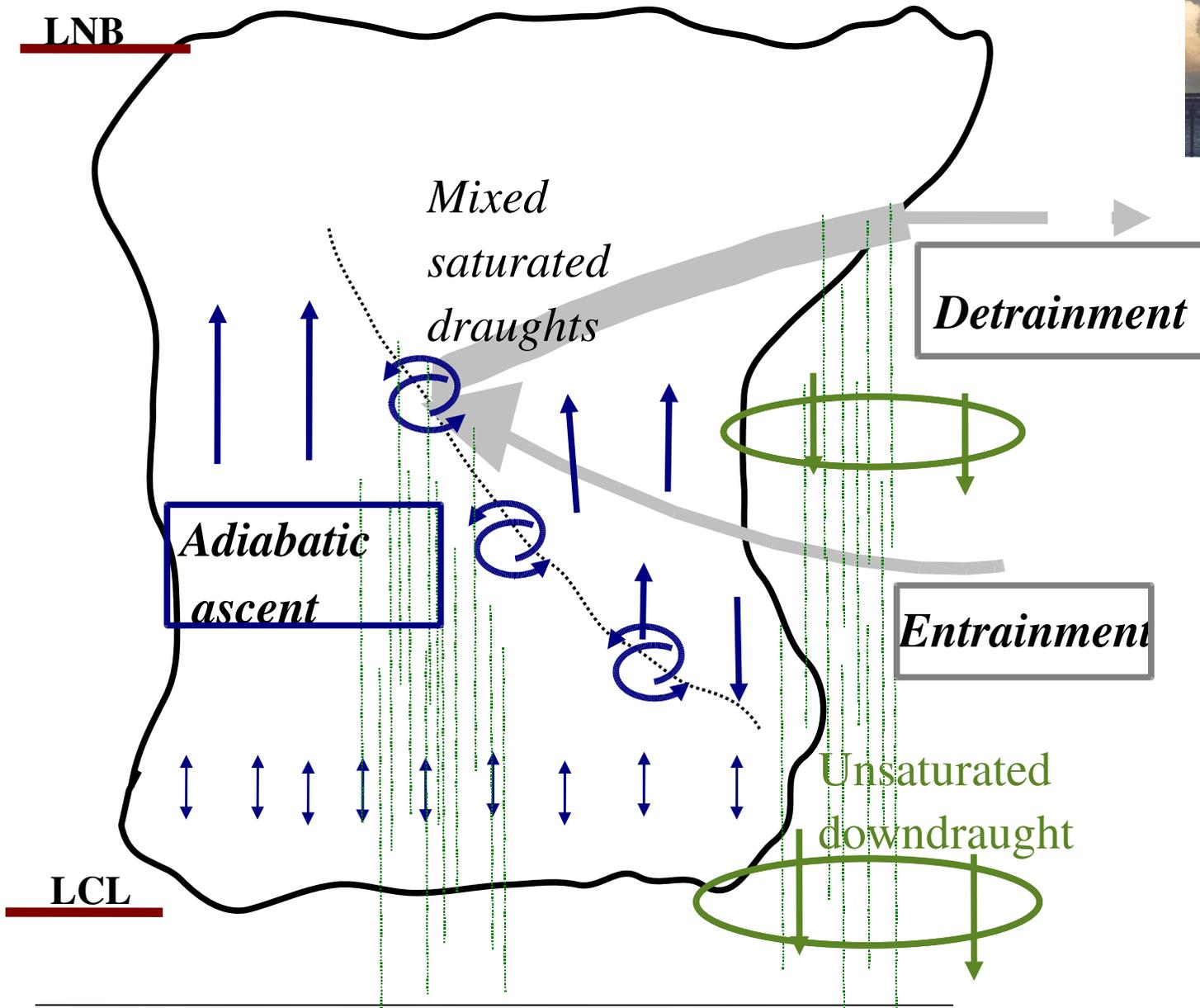


<http://www.astrosurf.org/lombry/meteo-vol-a-voile.htm>

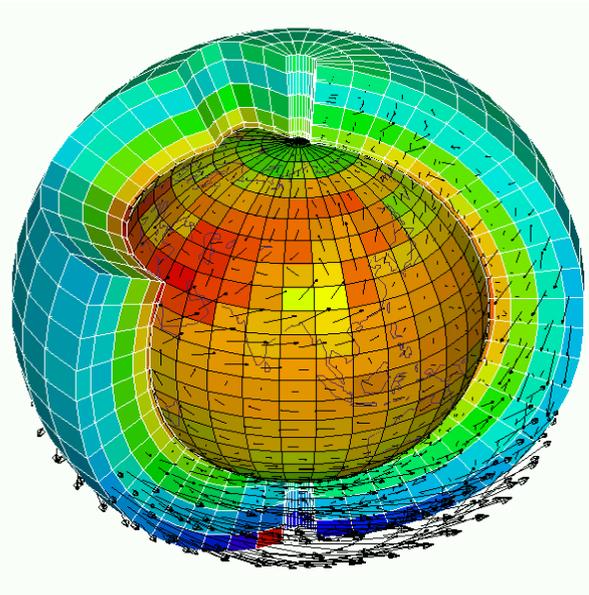


(Atkinson & al., 1996)

Paramétrisation de la convection profonde – Schéma d'Emanuel

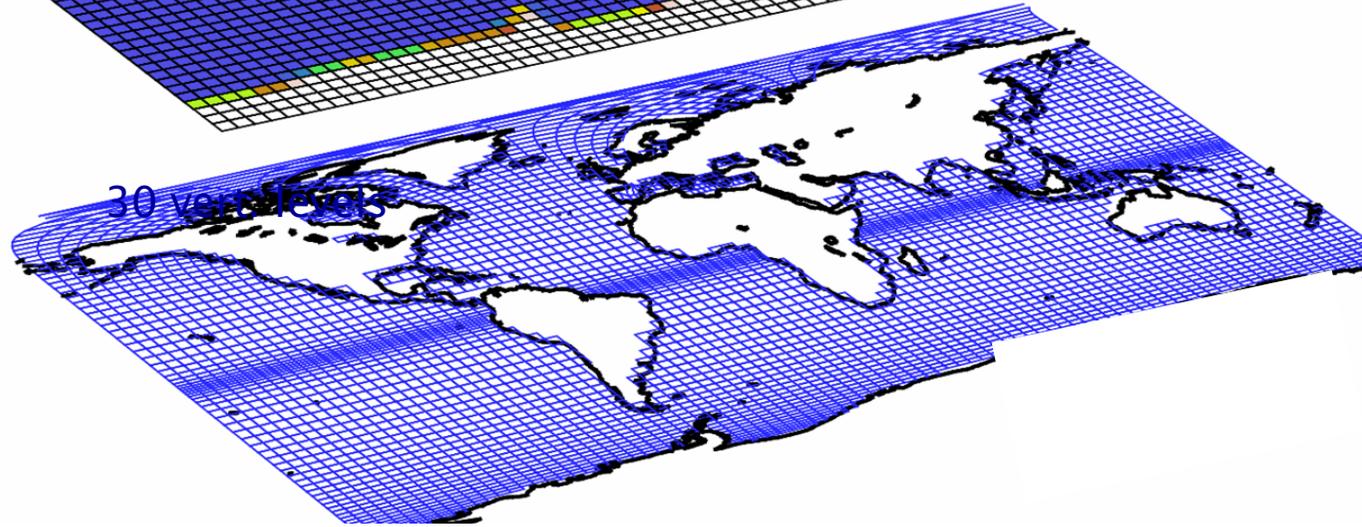
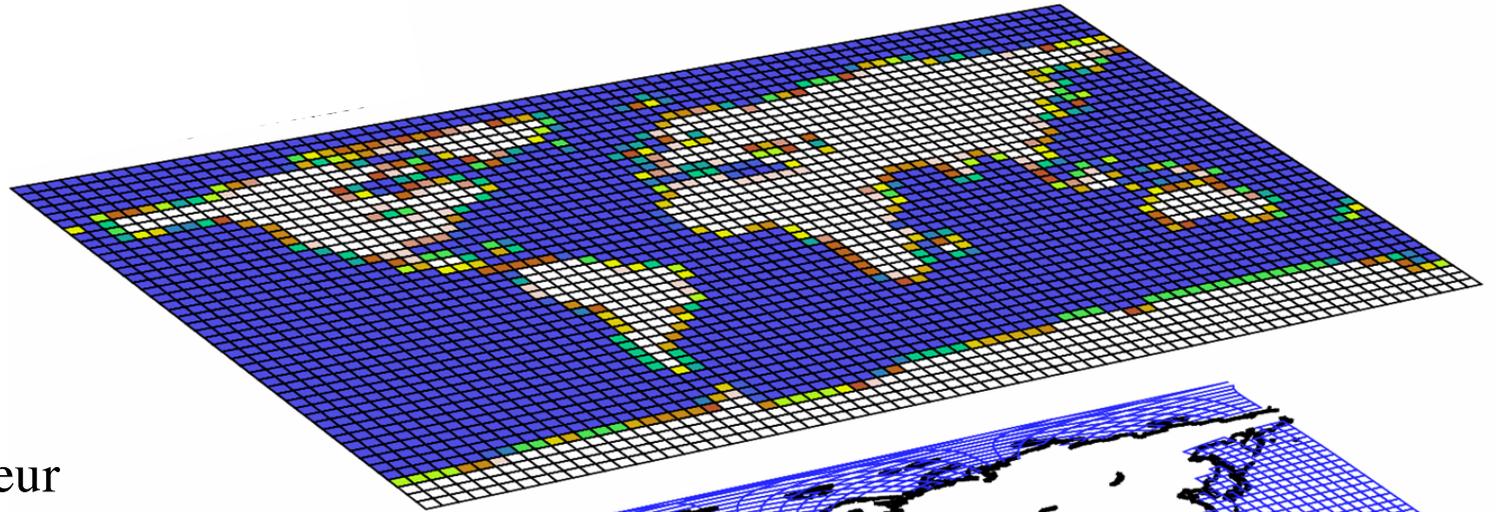


Modèle climatique de l'IPSL



Atmosphère et surf. continentale
(LMDZ - ORCHIDEE)

coupleur
(OASIS)



Résolution:

Atm: $3.75^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (~350 km)

Oce: $2^{\circ} \times 2^{\circ}$

Océan et glace de mer
(ORCA-LIM)

Comment « tourne » un modèle?

- On part d'un *état initial*, et on effectue une simulation avec des conditions aux limites (des forçages) fixes ou variables avec le temps

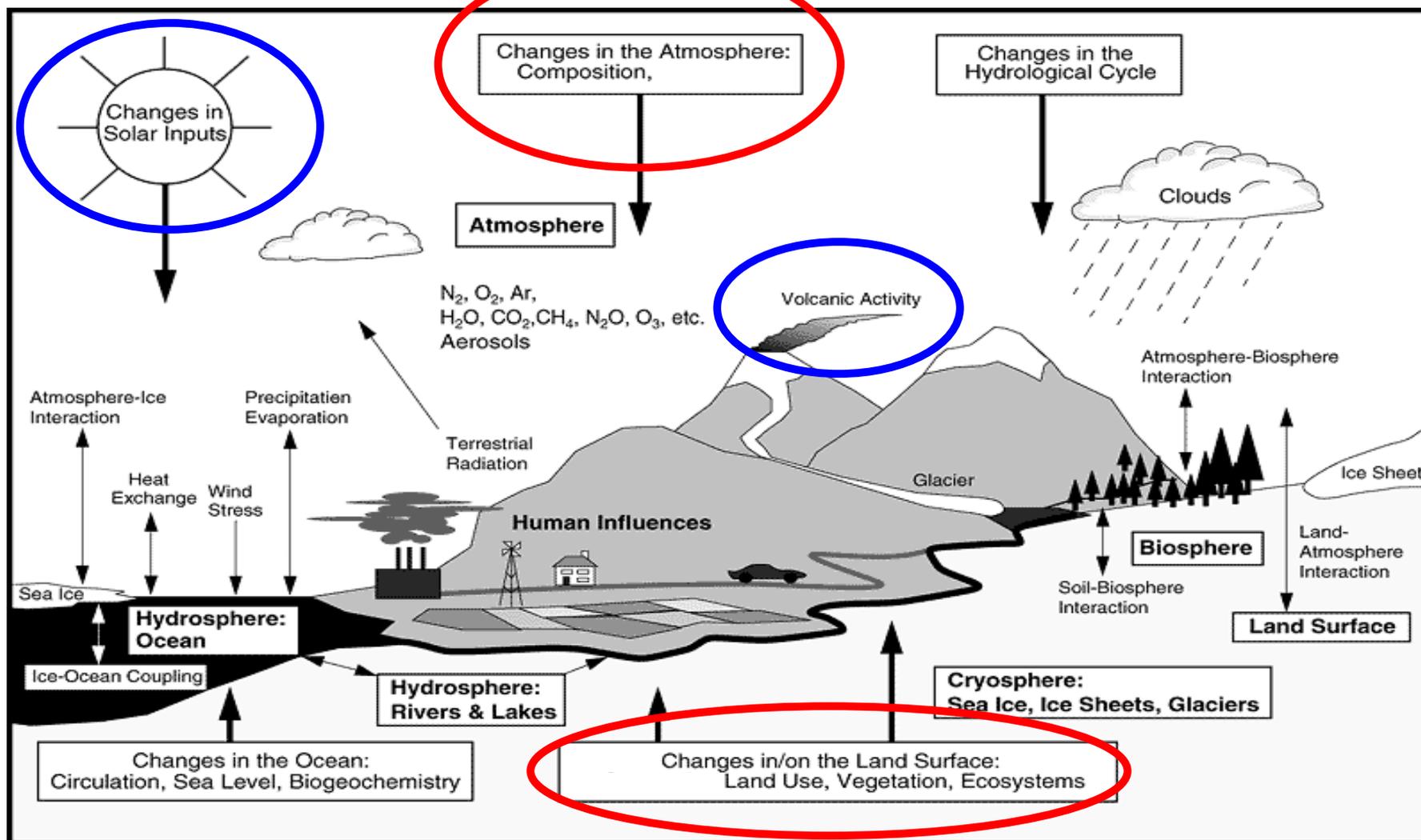
Méthode:

- **Réalisation de simulations numériques** avec différentes conditions aux limites (différents forçages) ou différentes conditions initiales
- **Analyses statistiques des résultats** de simulations
- **Exemple:** simulation de l'évolution du climat de 1850 à 2100 sous l'effet d'un accroissement des gaz à effet de serre

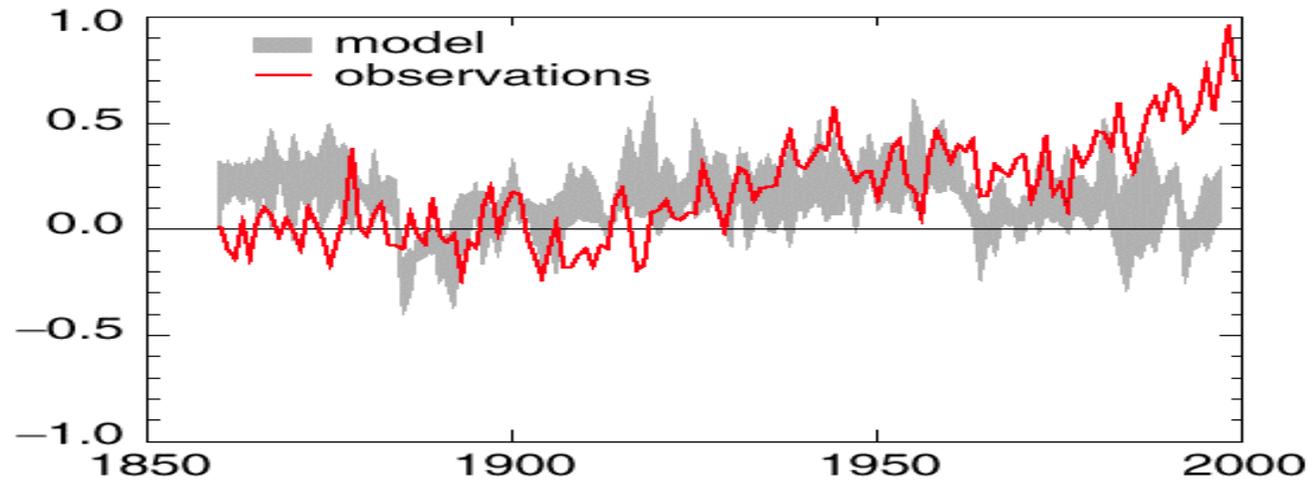
Les perturbations du climat

naturelles

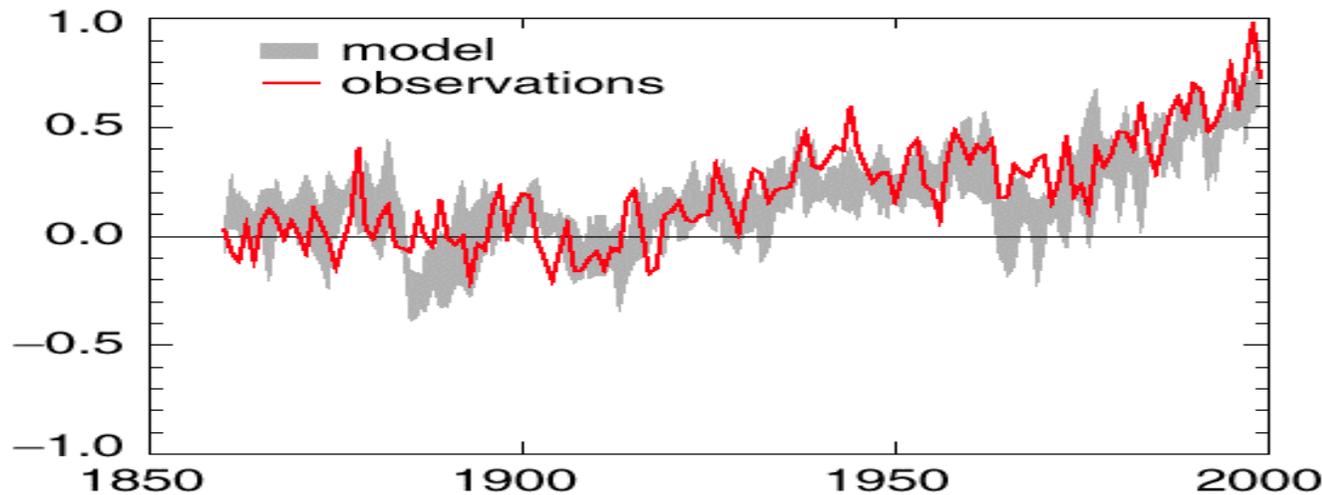
anthropiques



L'homme a-t-il déjà changé le climat ?



Anomalie de température de la surface de la Terre observée et calculée en prenant en compte *uniquement les perturbations naturelles* (éruptions volcaniques, activité solaire...)



Anomalie de température de la surface de la Terre observée et calculée en prenant en compte les mêmes *perturbations naturelles* et l'accroissement observé de la quantité de *gaz à effet de serre et des aérosols anthropiques*

Plan

- Bilan radiatif et circulation générale atmosphérique
- Circulation atmosphérique et cycle de l'eau
- Echanges radiatifs et effet de serre
- Modélisation du climat et estimation des changements climatiques
- **Estimation des changements climatiques dus aux activités humaines**

Les changements climatiques: une prévision théorique

19^{ème} siècle: découverte de “l'effet de serre” de l'atmosphère



J. Fourier

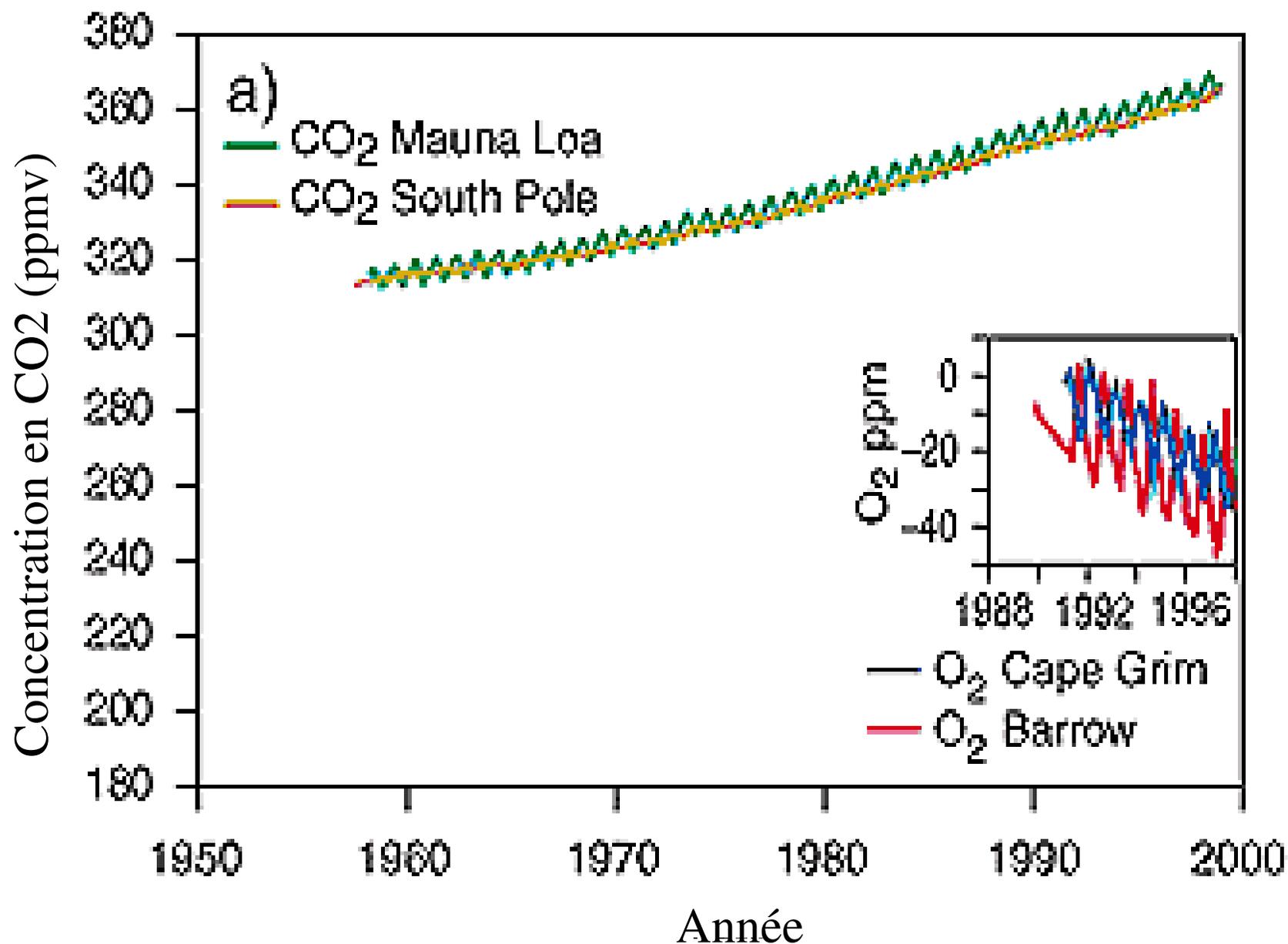
Début du 20^{ème} siècle: hypothèses:

- les changements du CO₂ dans le passé ont pu influencer le climat
- les activités humaines peuvent entraîner un accroissement du CO₂ atmosphérique, ce qui modifiera le climat

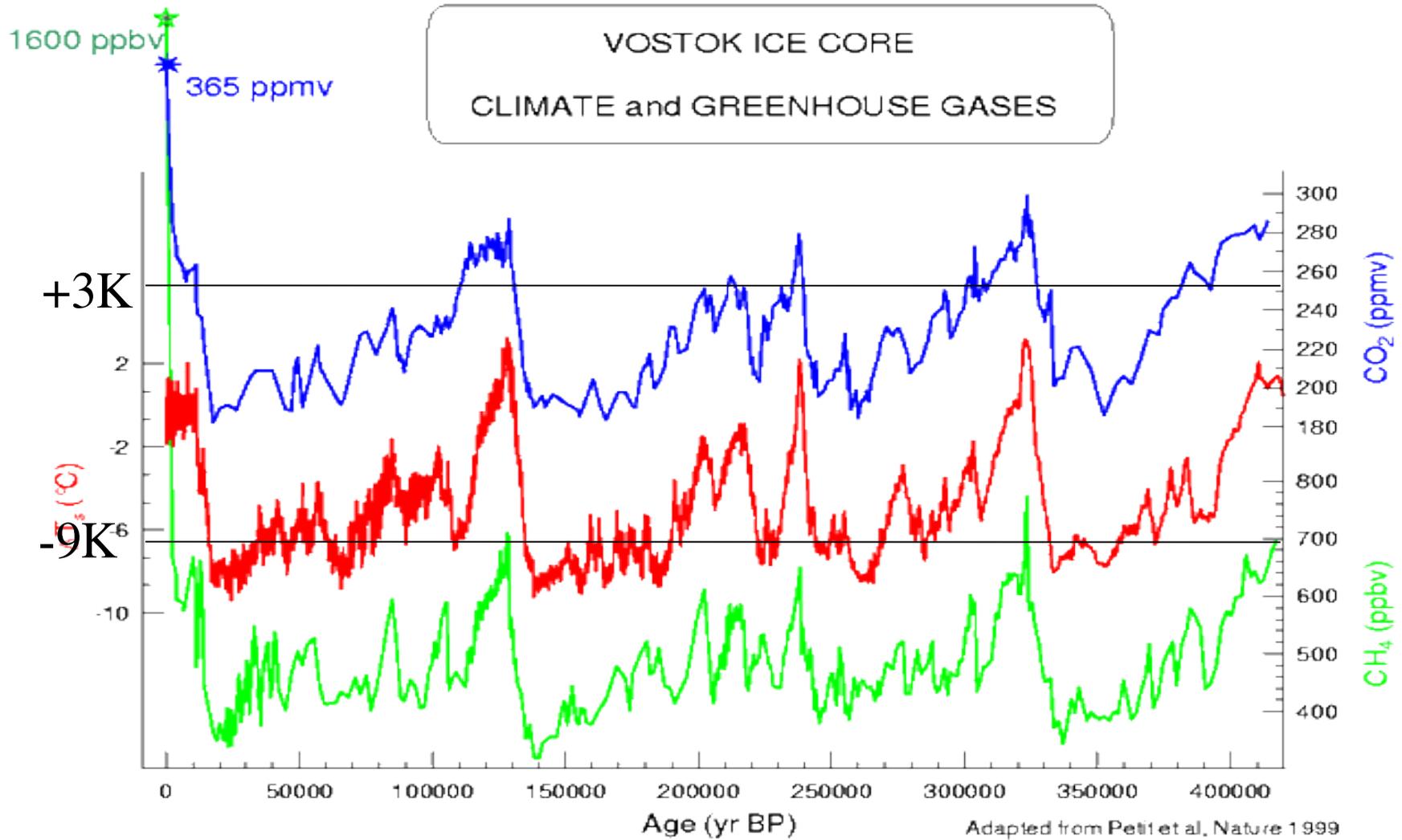


S. Arrhenius

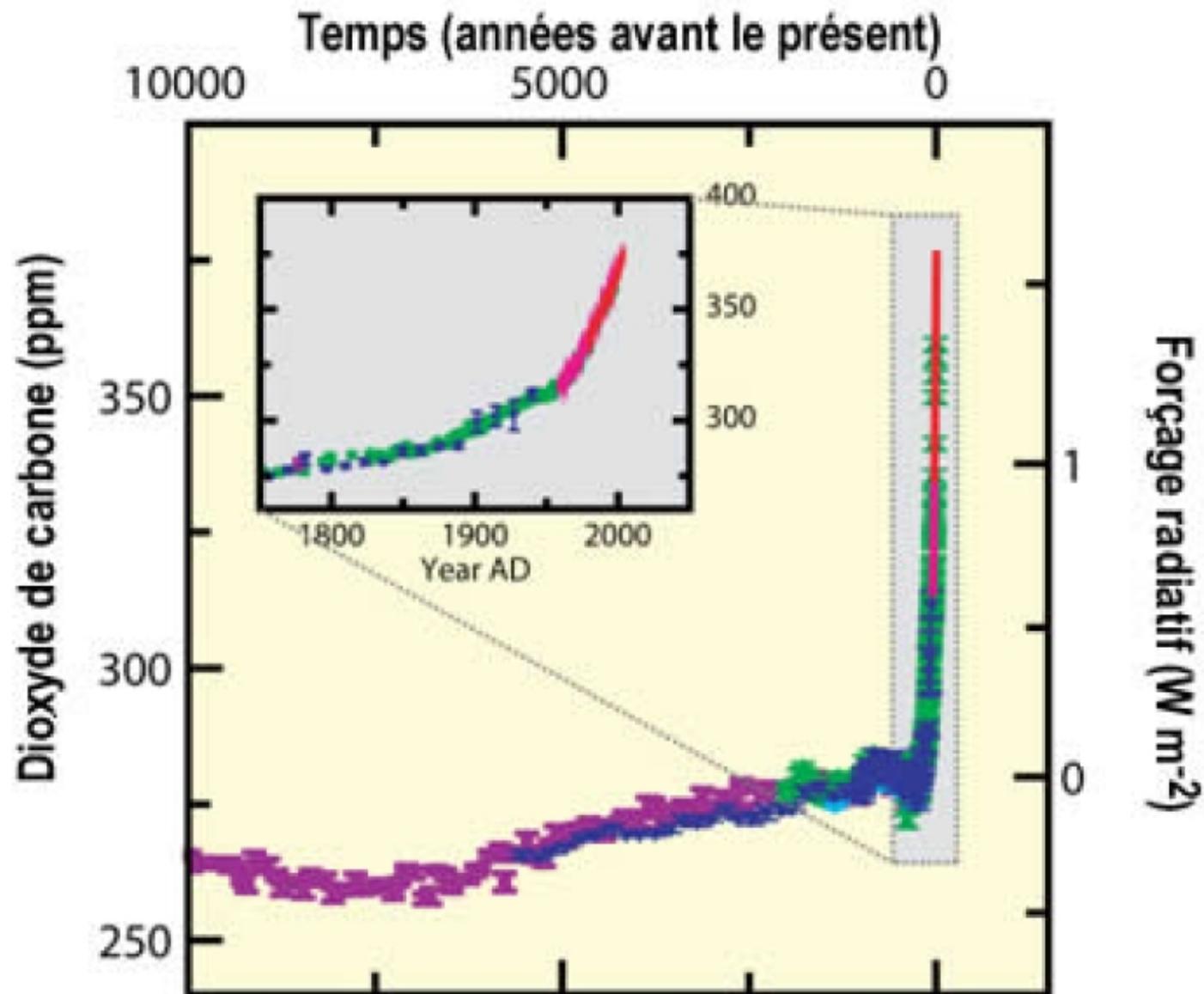
Les perturbations anthropiques: une observation récente



Comparaison à la température sur les précédents 400kY

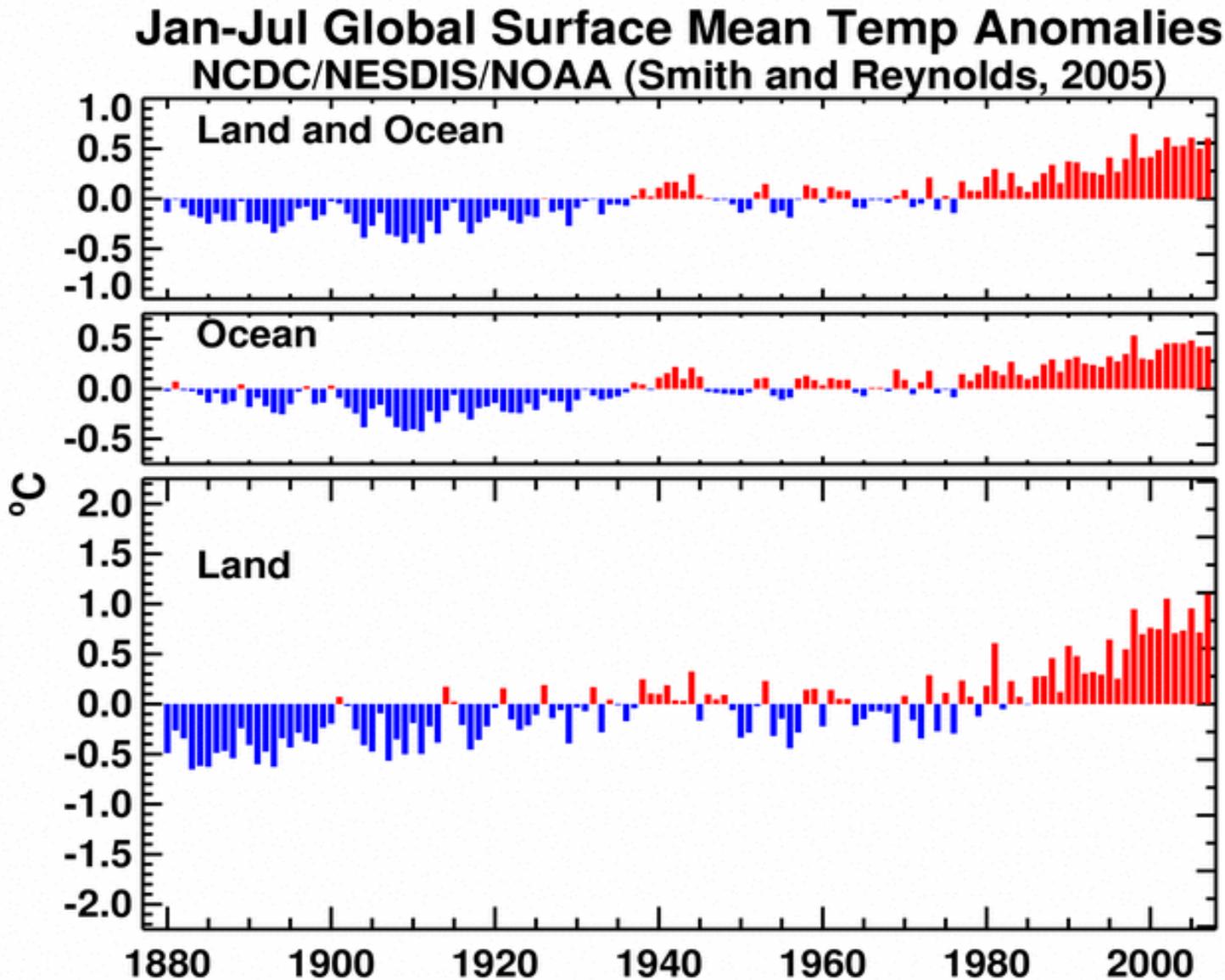


Les perturbations anthropiques: des variations sans précédents récents



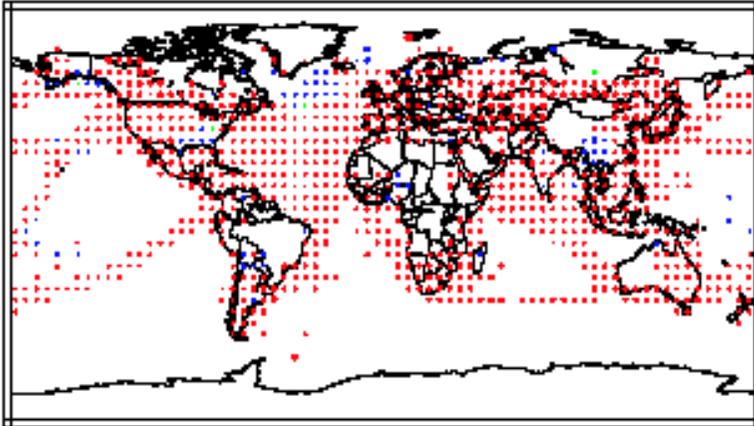
Mise à jour jusqu'à
Juillet 2007

Température globale

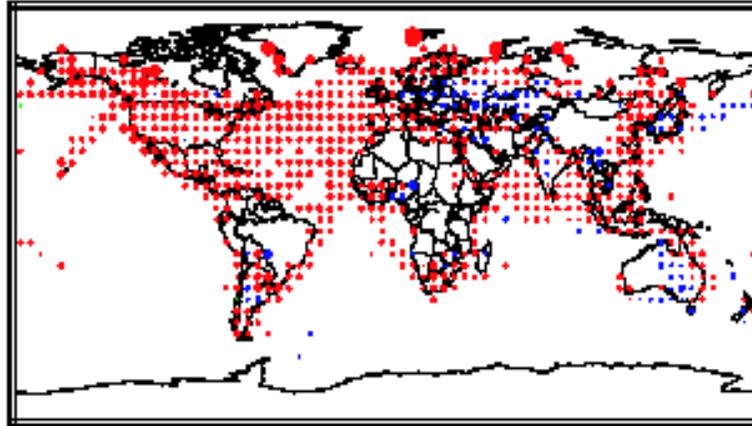


Distribution spatiale de la tendance séculaire de la température

(a) Annual temperature trends, 1901 to 2000

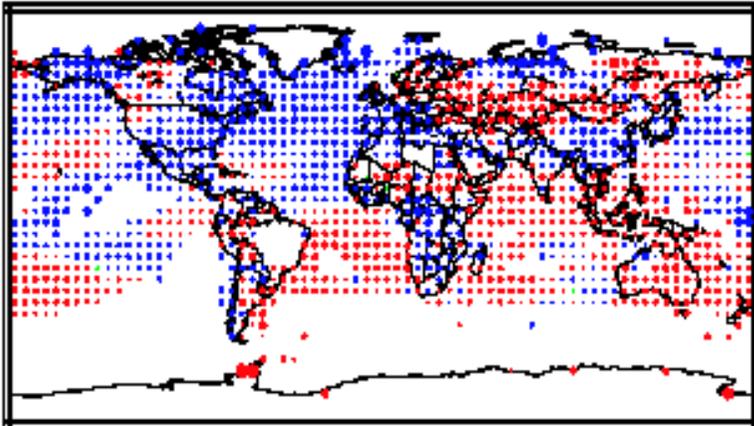


(b) Annual temperature trends, 1910 to 1945

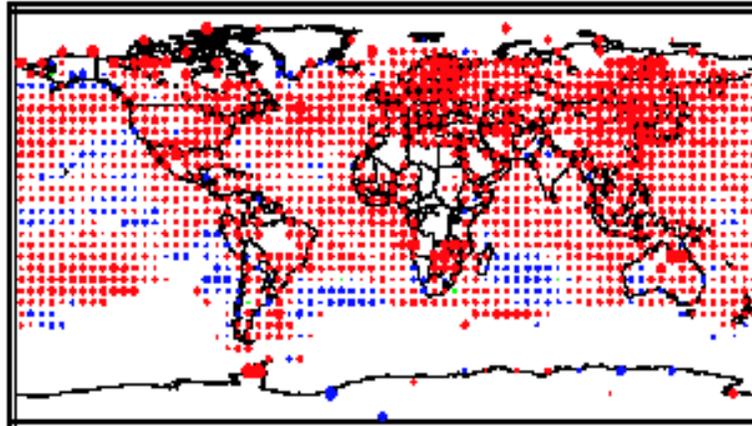


Atlantique Nord

(c) Annual temperature trends, 1946 to 1975



(d) Annual temperature trends, 1976 to 2000

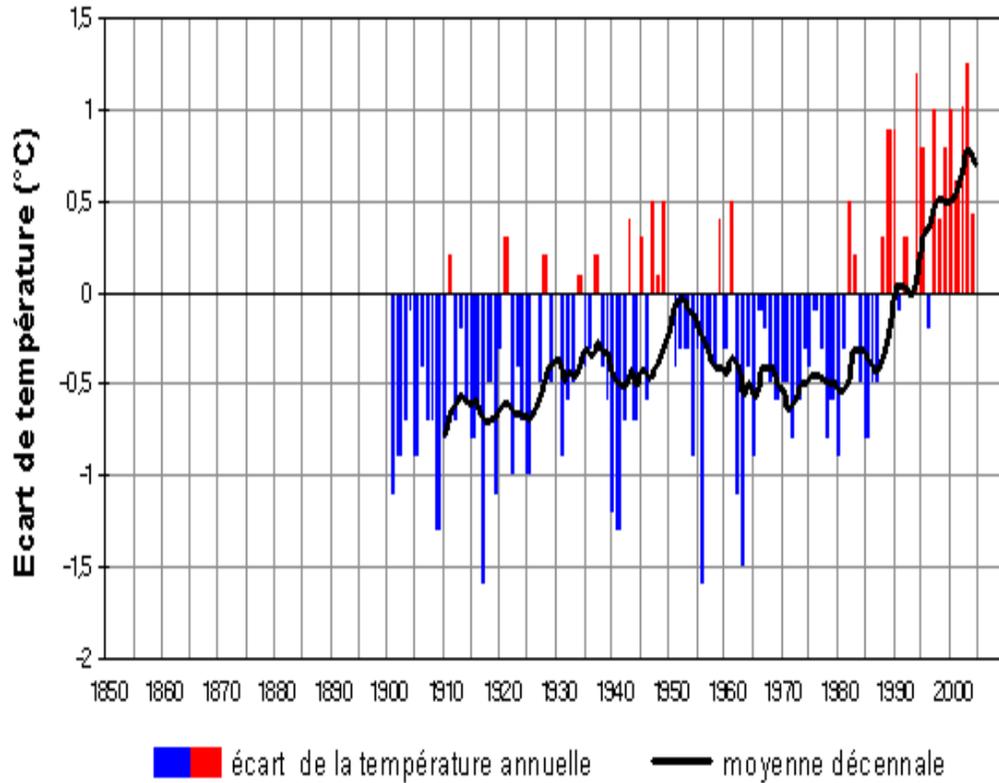


Continent
Hémisphère Nord

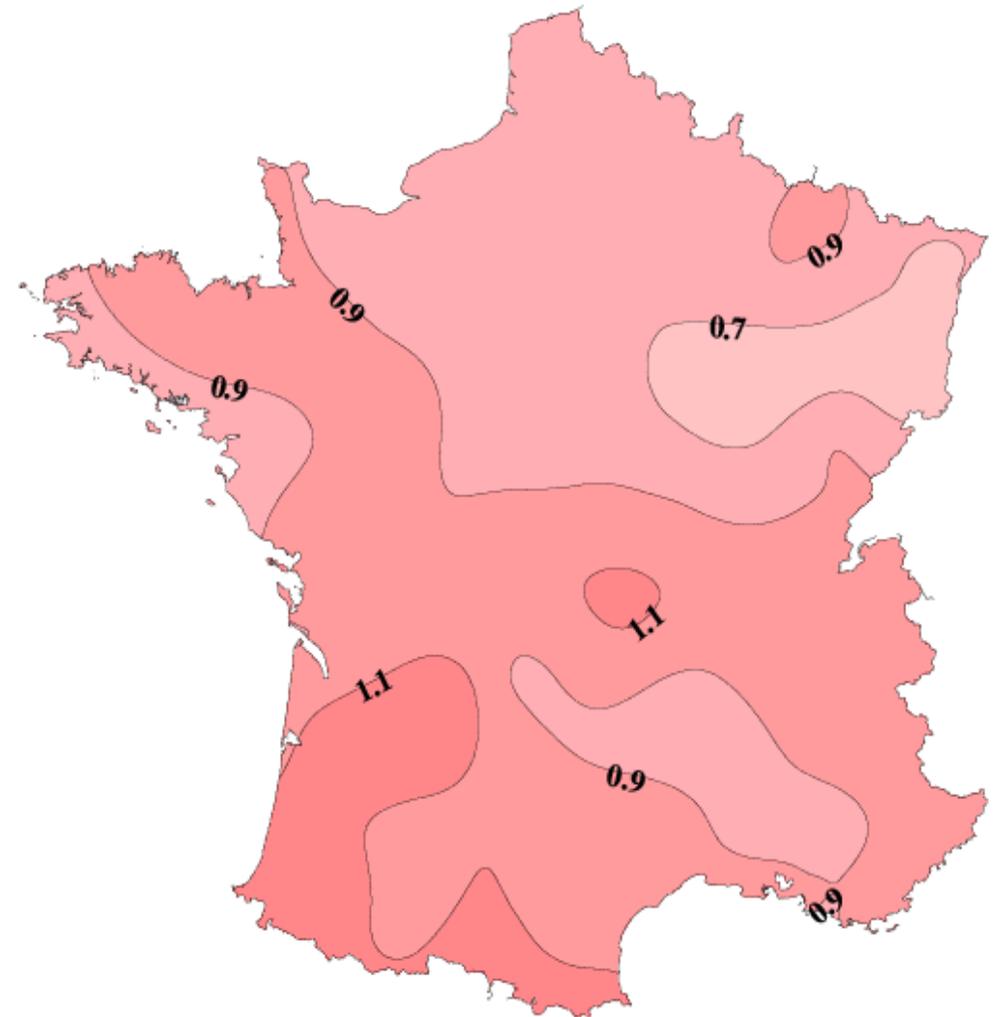


Différence dans les distributions spatiales des 2 phases de réchauffement

Changements locaux

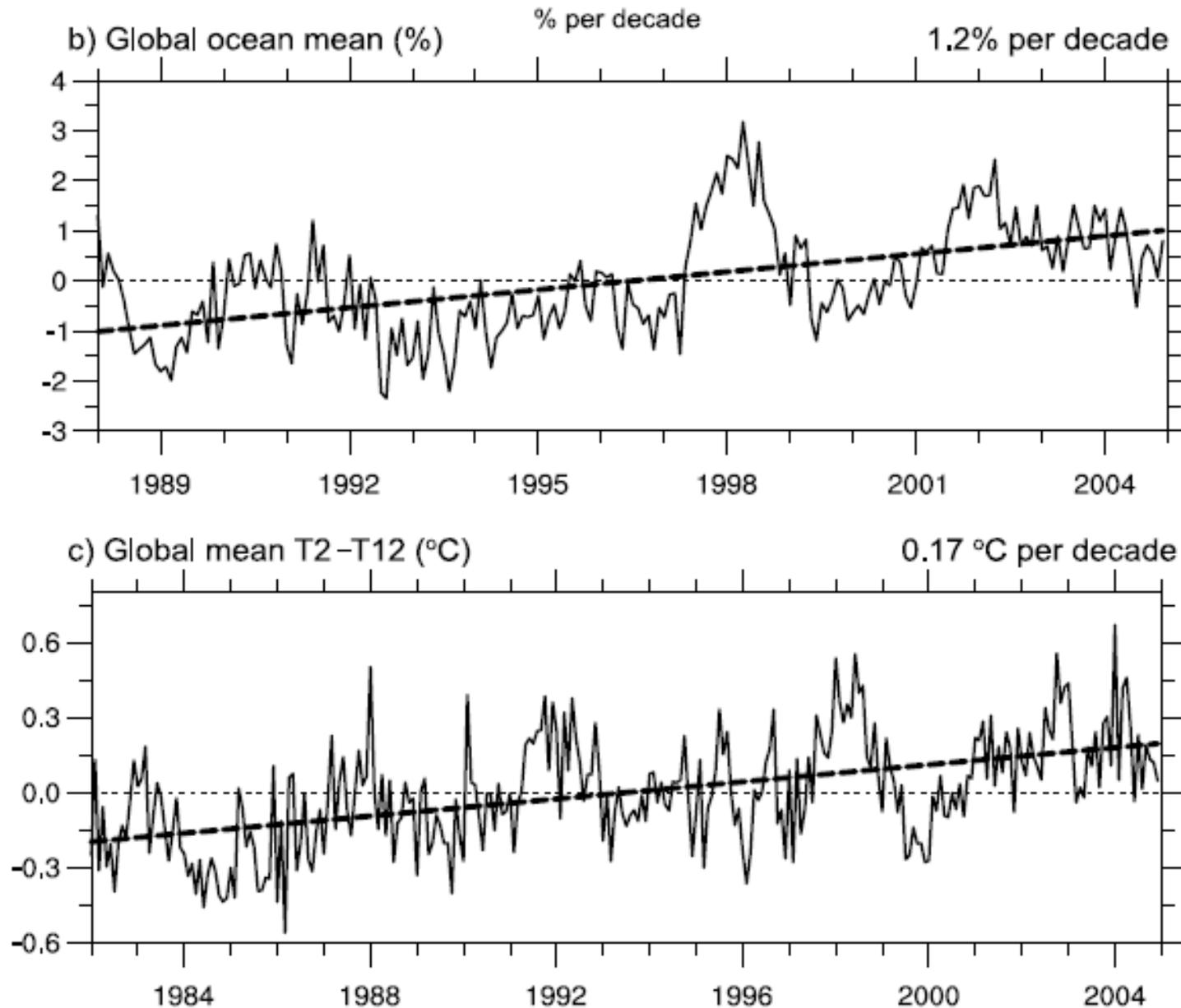


La température a augmenté d'environ 1°C en 1 siècle



Les observations passées

Analyses globales: humidité atmosphérique



Basses couches

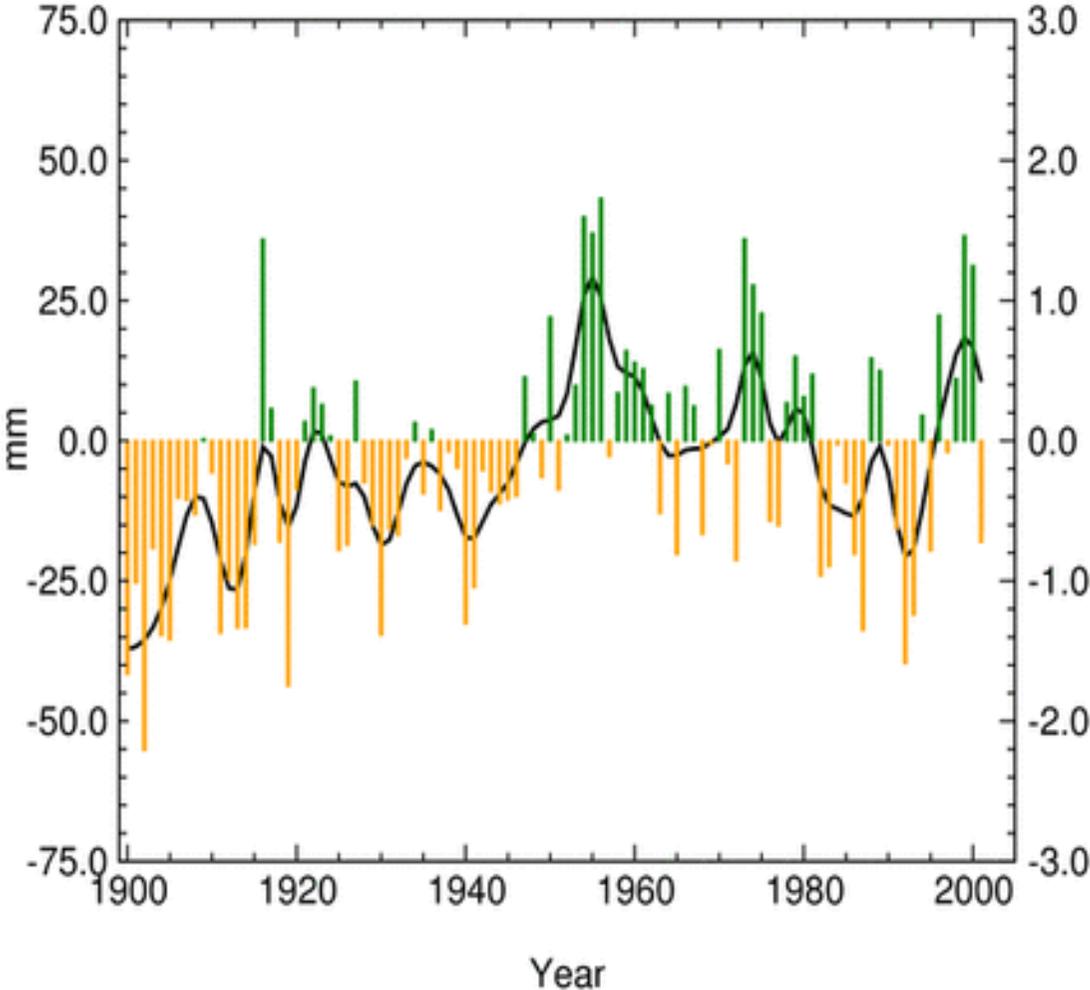
Moyenne et Haute
Troposphère
(Température
de brillance)

Source: GIEC 2007

Le contenu en vapeur d'eau dans l'atmosphère augmente depuis les années 1980

Précipitation globale

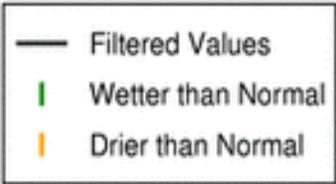
Annual Global Precipitation Anomalies January - December, 1900 - 2001



National Climatic Data Center / NESDIS / NOAA

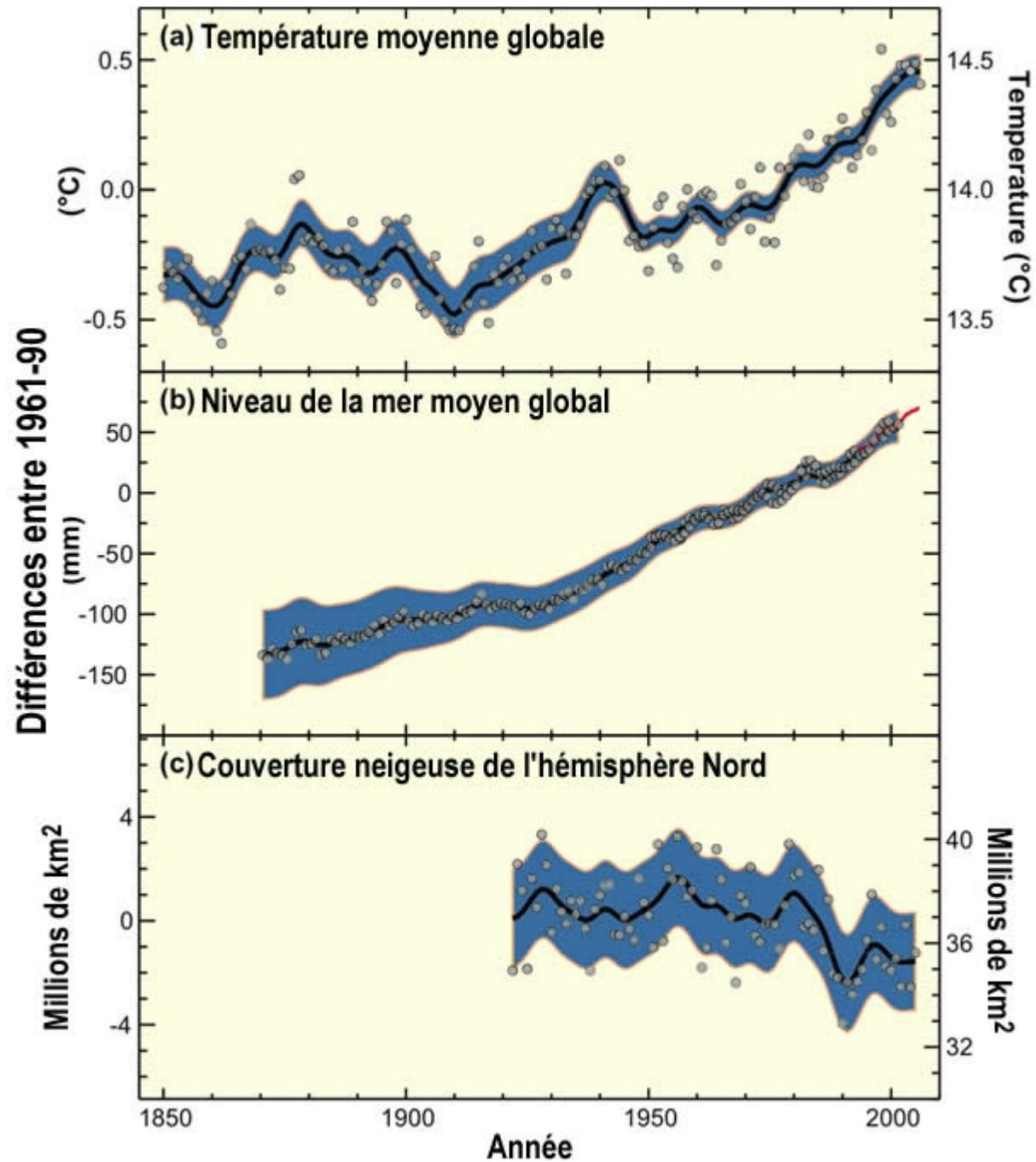


Based on
1900-2000 mean



Tendance difficile à estimer

Variations climatiques à l'échelle globale



Changements climatiques:

- une prévision théorique
- une indication des observations
- y a-t-il encore vraiment des questions?

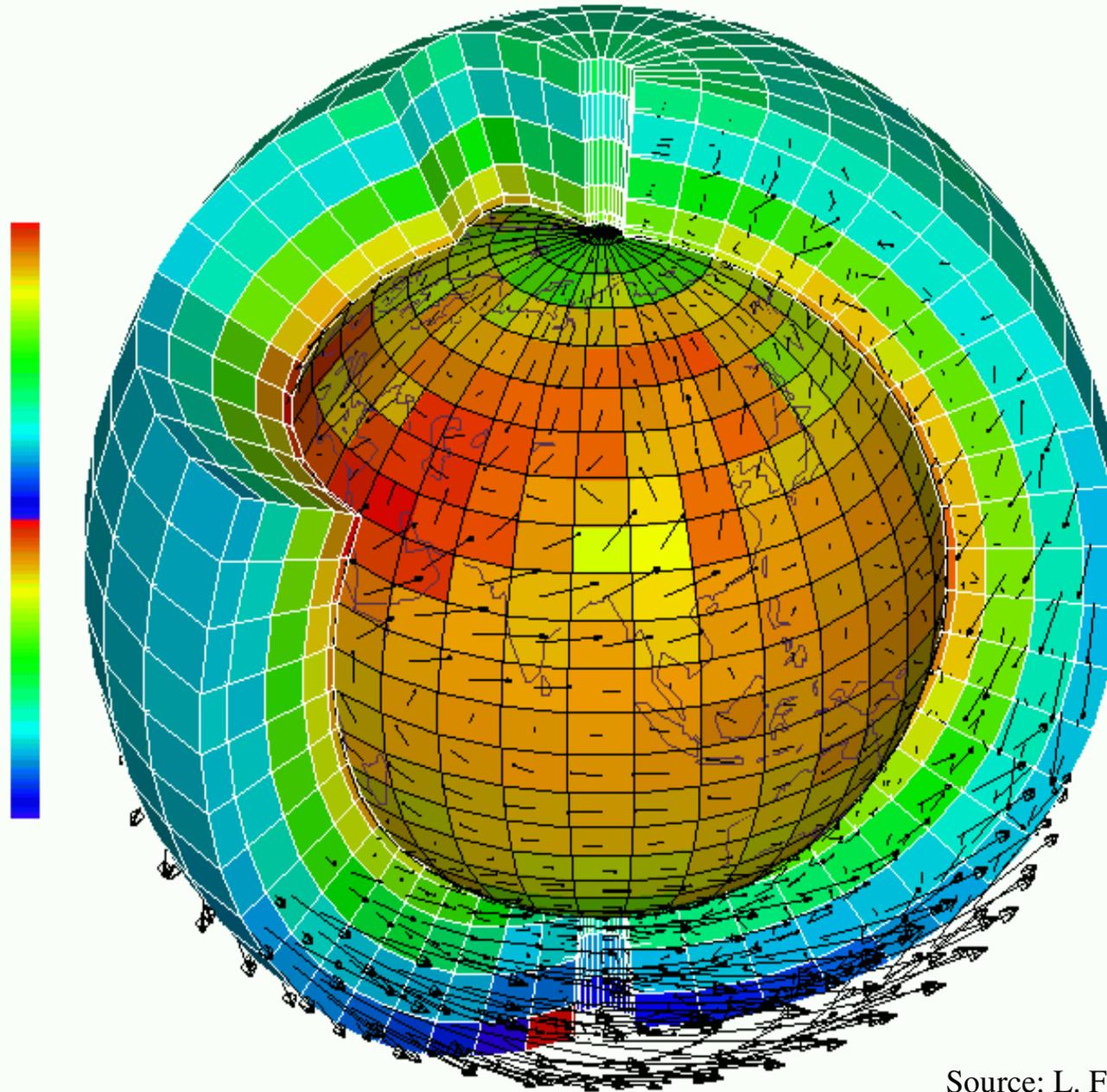
Quels changements climatiques accompagnent ces changements de température?

La théorie de l'effet de serre est simple... si le climat ne change pas.

Par exemple, accroissement de température dû à un doublement de CO₂:

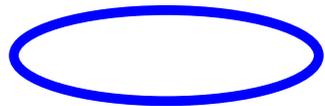
- si l'humidité *absolue* de l'atmosphère reste constante: 1.2°C
- si l'humidité *relative* de l'atmosphère reste constante: $\simeq 2.5^\circ\text{C}$

Modélisation numérique 3D du climat

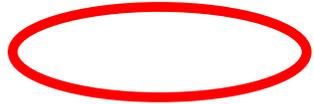


Source: L. Fairhead, LMD/IPSL

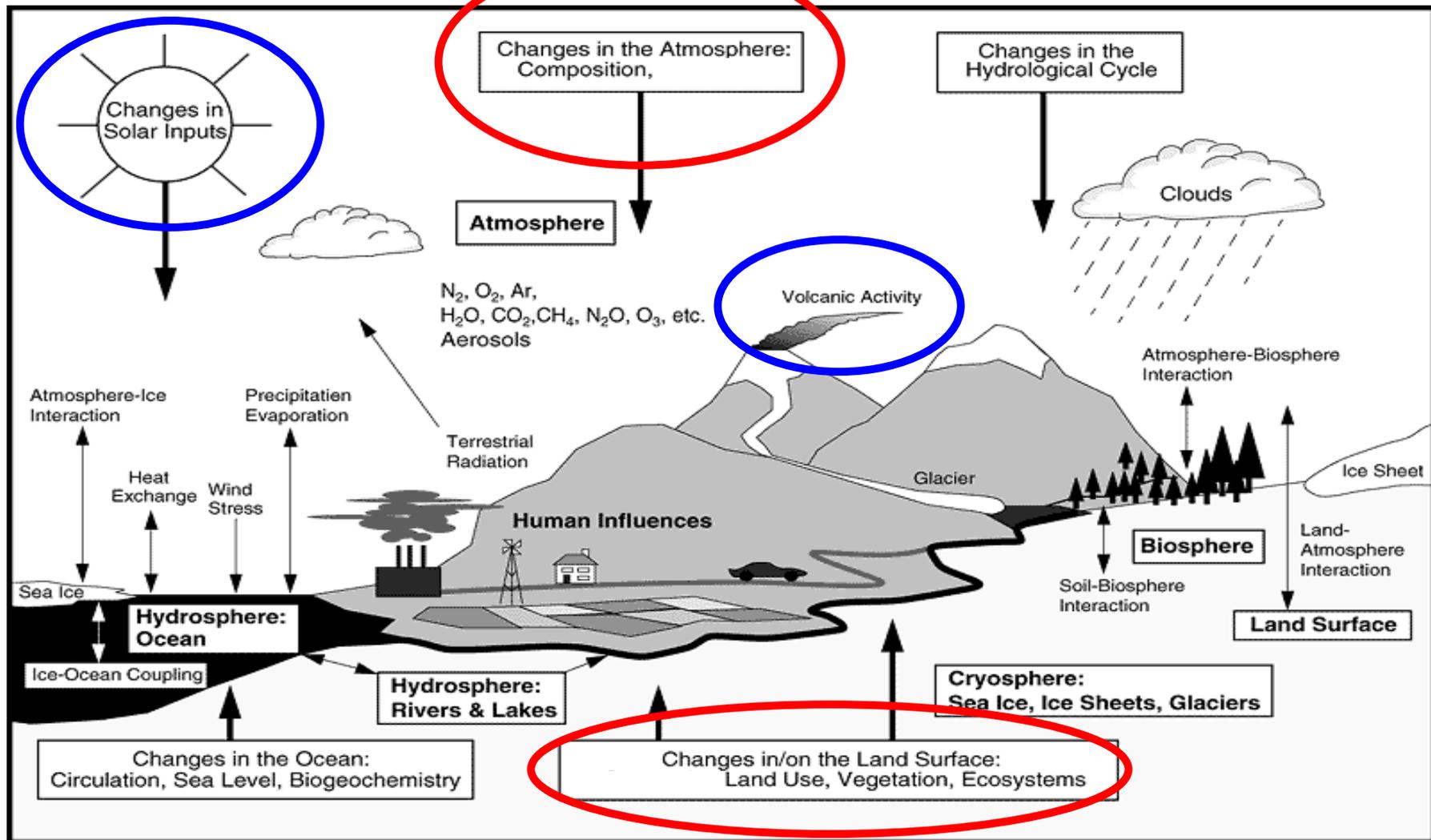
Les perturbations du climat



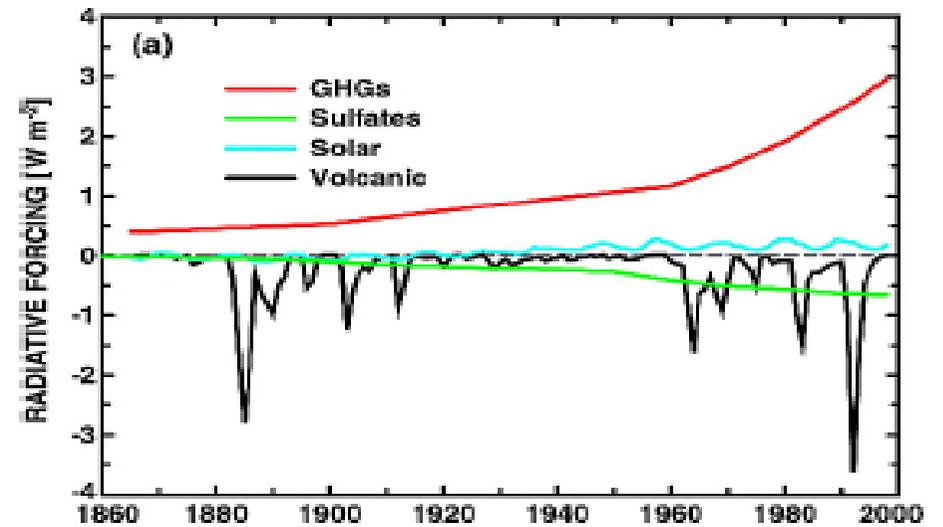
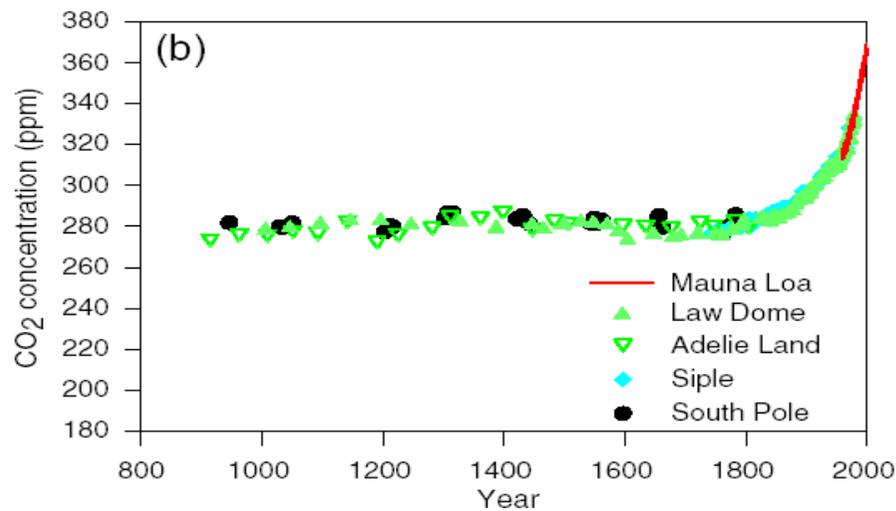
naturelles



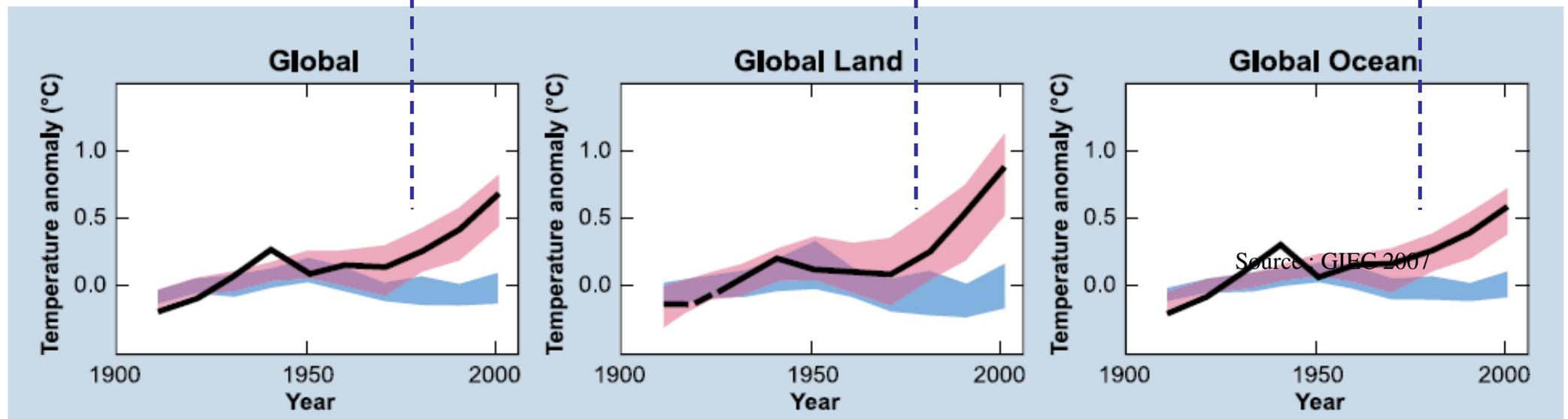
anthropiques



L'homme a-t-il déjà changé le climat ?



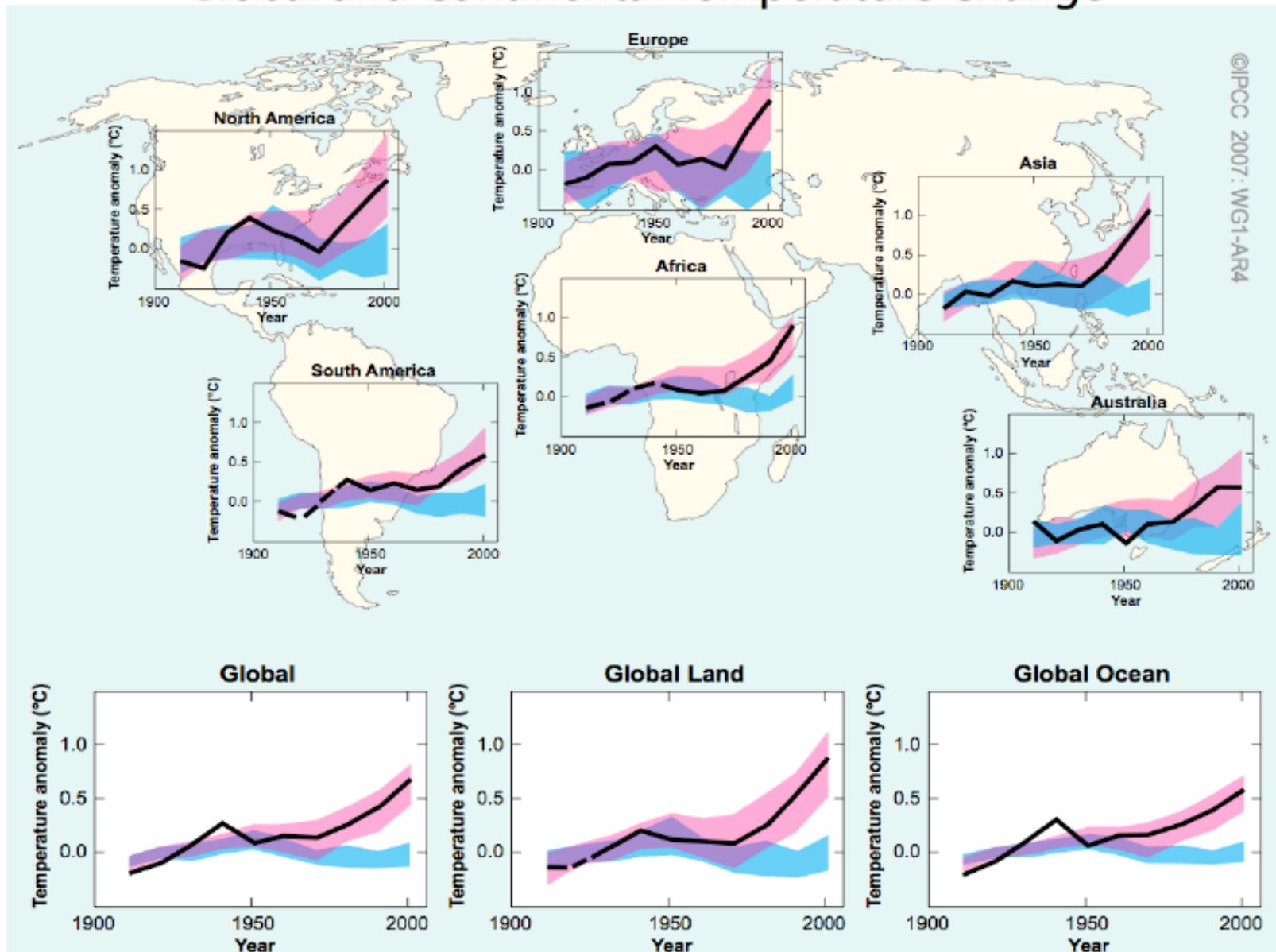
Source : GIEC 2001



Noir: observations; bleu: forçages naturels; magenta: forçages anthropiques+naturels

L'homme a-t-il déjà changé le climat ?

Global and Continental Temperature Change



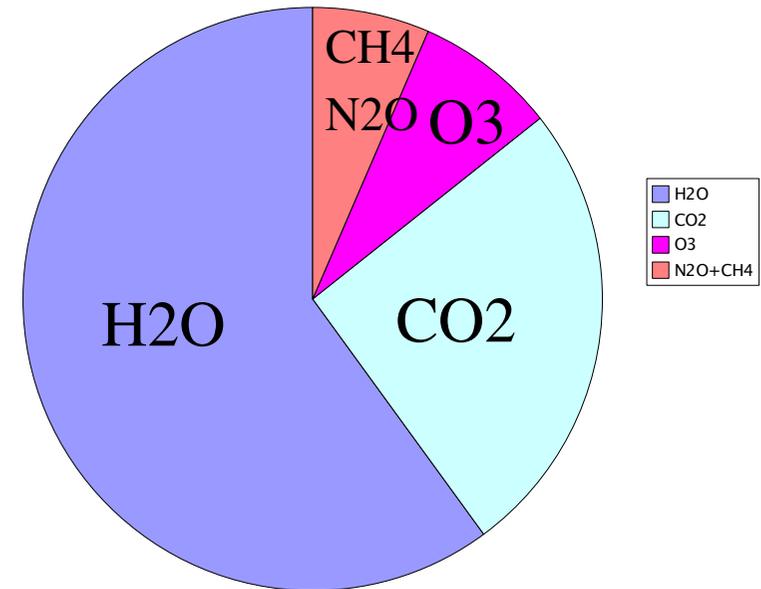
Noir: observations; bleu: forçages naturels; magenta: forçages anthropiques+naturels

Les contributions à l'effet de serre

Effet de serre ($W.m^{-2}$):

Vapeur d'eau	75	60%
CO ₂	32	26%
ozone	10	8%
N ₂ O+CH ₄	8	6%

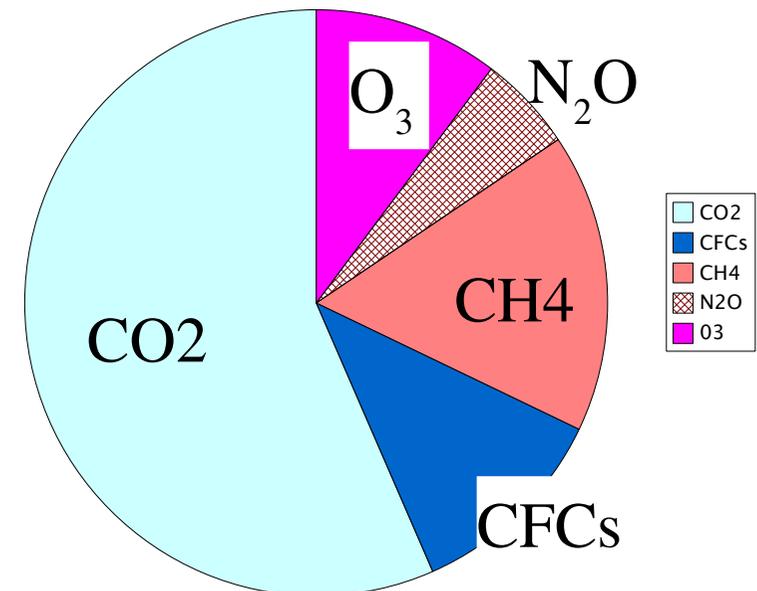
Contribution à l'effet de serre



Effet de serre du aux activité humaine

Contributions à l'accroissement de l'effet dus aux activités humaines:

- CO₂ 56%
- CFCs 12%
- méthane (CH₄) 16%
- ozone (O₃) 11%
- N₂O 5%



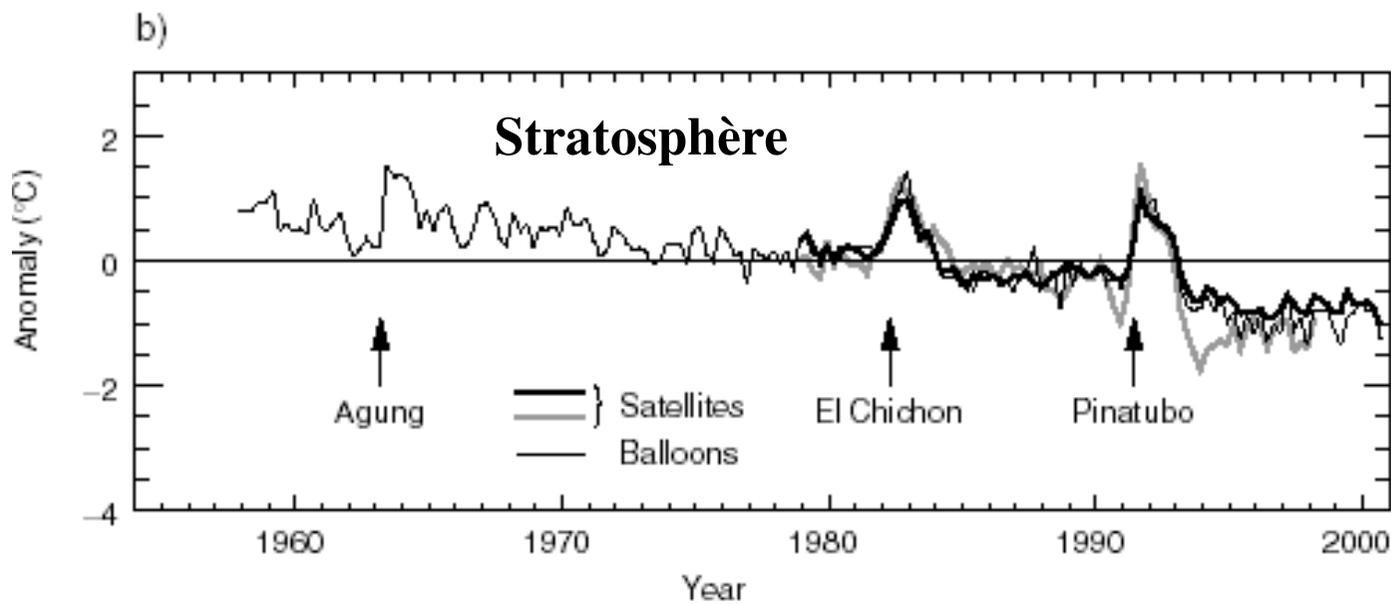
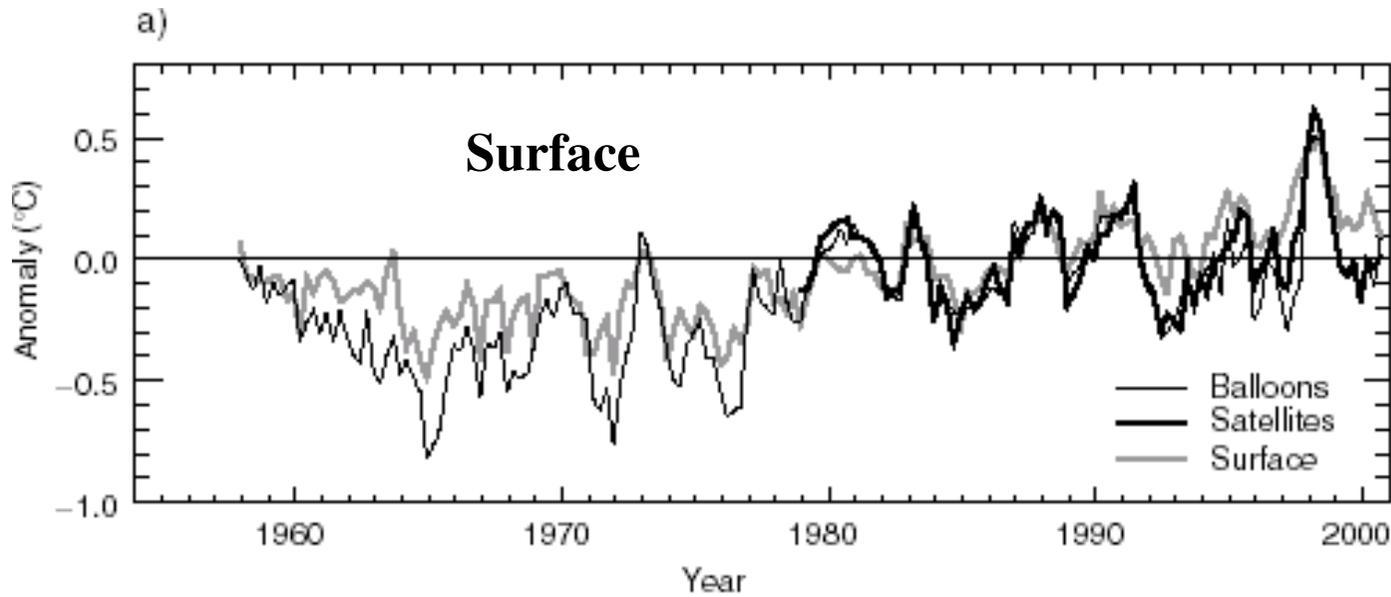
Température en altitude

La surface se réchauffe

Mais

La stratosphère se refroidit

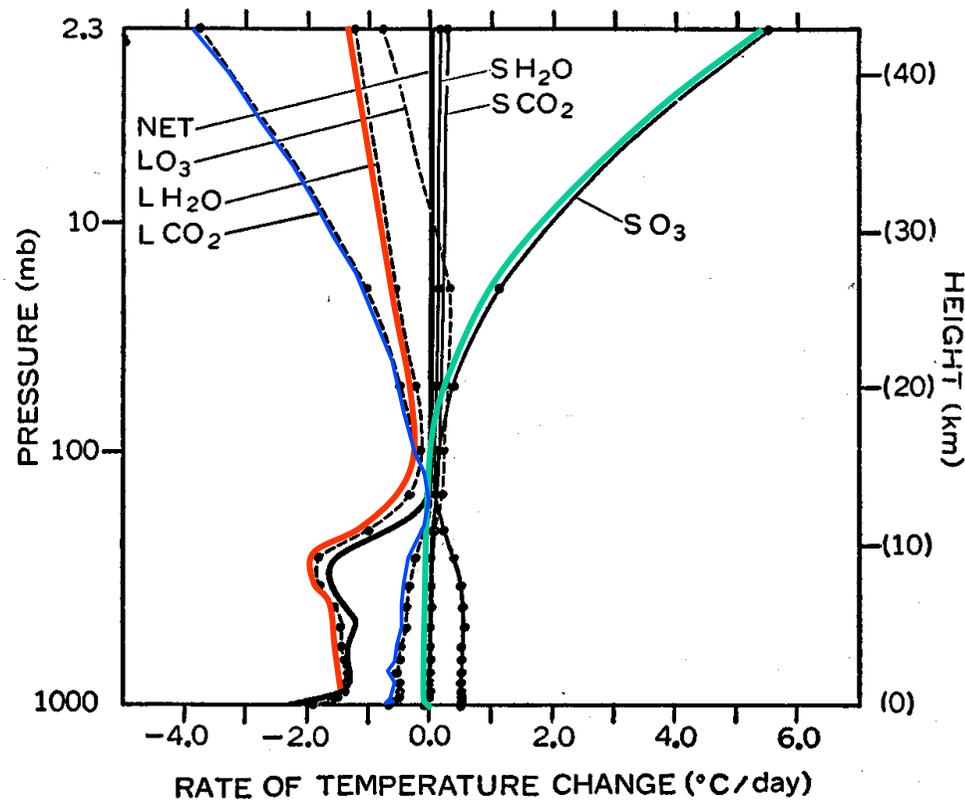
POURQUOI ???????



Décomposition des contributions respectives des absorbants et des domaines spectraux

L: rayonnement IR

S: rayonnement solaire



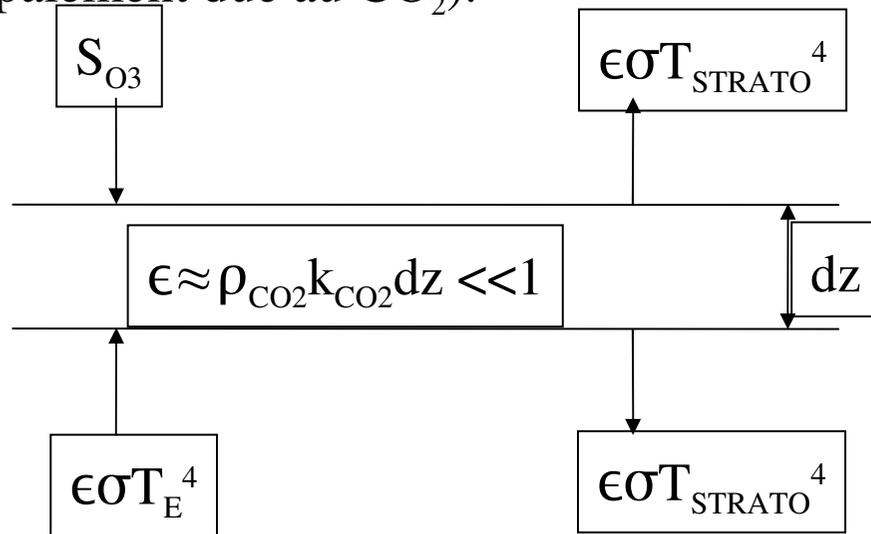
La stratosphère:

- chauffage radiatif absorption ray. Solaire par O₃ et O₂
- refroidissement radiatif emission IR par CO₂

La troposphère se refroidit radiativement, H₂O y joue un rôle central. Ce refroidissement entraîne des zones instables (ajustement convectif)

Refroidissement de la stratosphère quand la concentration de CO₂ augmente

La stratosphère est en équilibre radiatif pur où l'absorption des ondes courtes (principalement due à l'ozone) est compensée par l'émission ondes longues vers l'espace et vers la troposphère (principalement due au CO₂).



A l'équilibre:

$$S_{O_3} + \epsilon \sigma T_E^4 = 2 \epsilon \sigma T_{STRATO}^4$$

Donc

$$T_{STRATO} = \left(\frac{\frac{S_{O_3}}{\epsilon} + \sigma T_E^4}{2\sigma} \right)^{1/4}$$

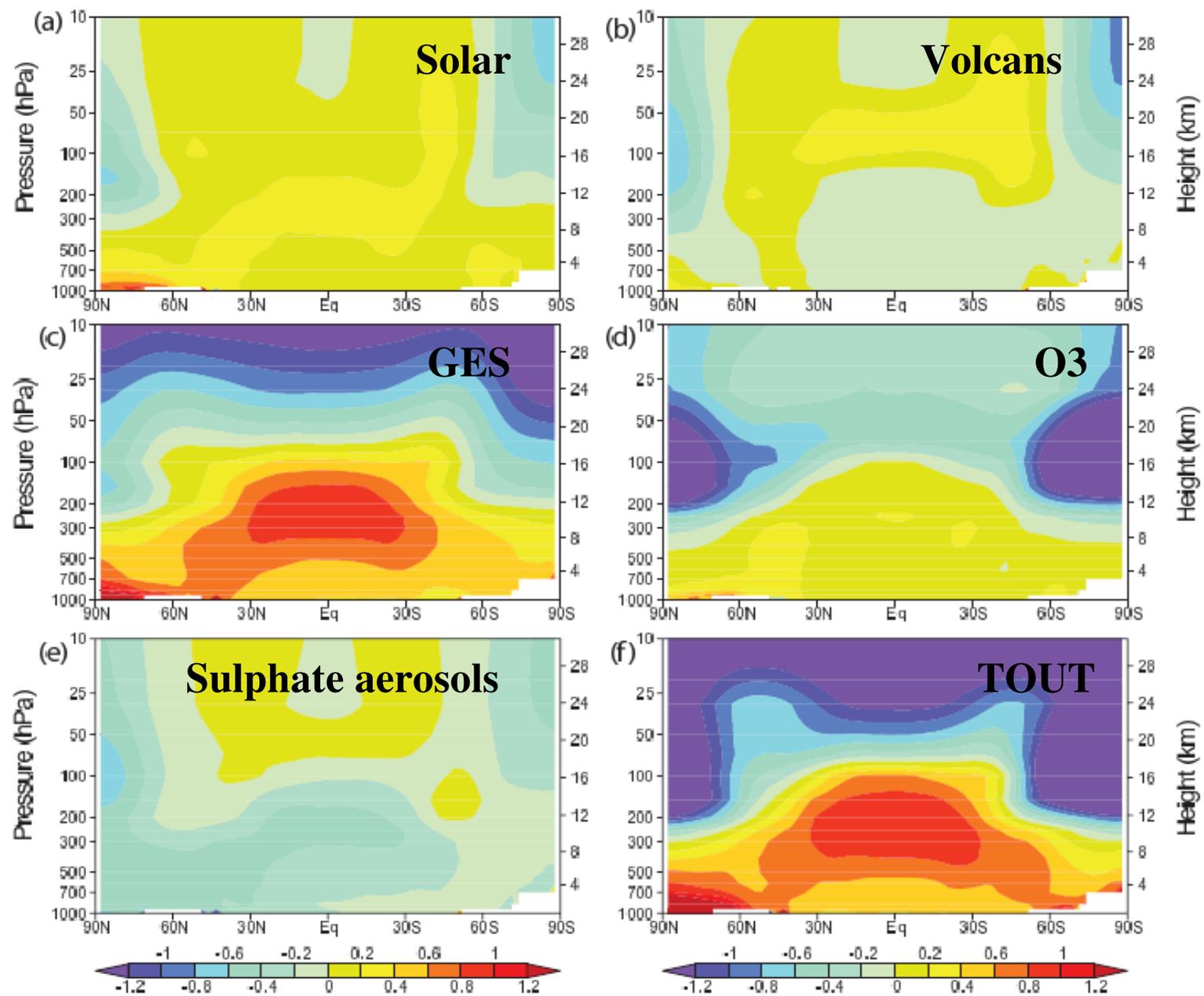
Si la concentration de CO₂ augmente, alors $\epsilon \approx \rho_{CO_2} k_{CO_2} dz$, augmente.

En supposant : que la concentration d'ozone reste constante,
que l'albédo planétaire reste constant (donc T_E aussi)

alors T_{STRATO} diminue.

Refroidissement de la stratosphère

Moyenne zonale de la différence 1999-1980 en °/siècle



L'ozone refroidit la basse stratosphère aux hautes latitudes

Les GES refroidissent la stratosphère globalement

Source GIEC 2007

Aérosols anthropiques

Les aérosols :

- Réfléchissent le rayonnement solaire
- Modifient la taille des gouttes des nuages
- Modifient la formation des précipitations ?

Figure 7 Effect of aerosol on cloud droplet and reflectance derived from POLDER and AVHRR spaceborne measurements. **a**, Seasonal (March–May 1997) average droplet size in liquid water clouds estimated from the POLDER measurements³¹. **b**, The dependence of the droplet size on the aerosol index, also derived from POLDER over land (red) and ocean (blue). **c**, Analysis of AVHRR data for the dependence of the droplet size (purple) and cloud reflectance (brown and red) on aerosol optical thickness over the Amazon Basin during the dry burning season of 1987 (refs 16, 19). The reflectance of low-level clouds (brown) with reflectance of 0.35 increases with the aerosol concentration and the reflectance of bright clouds (red) decreases.

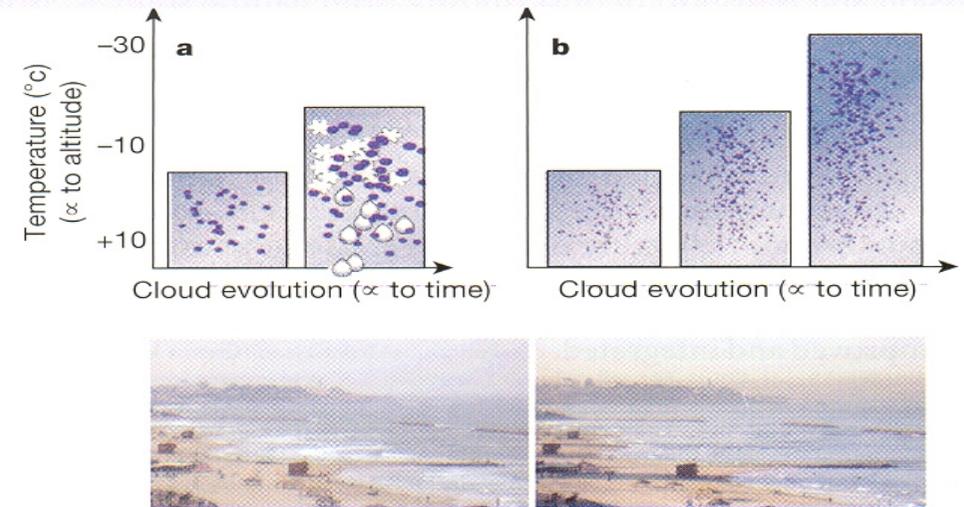
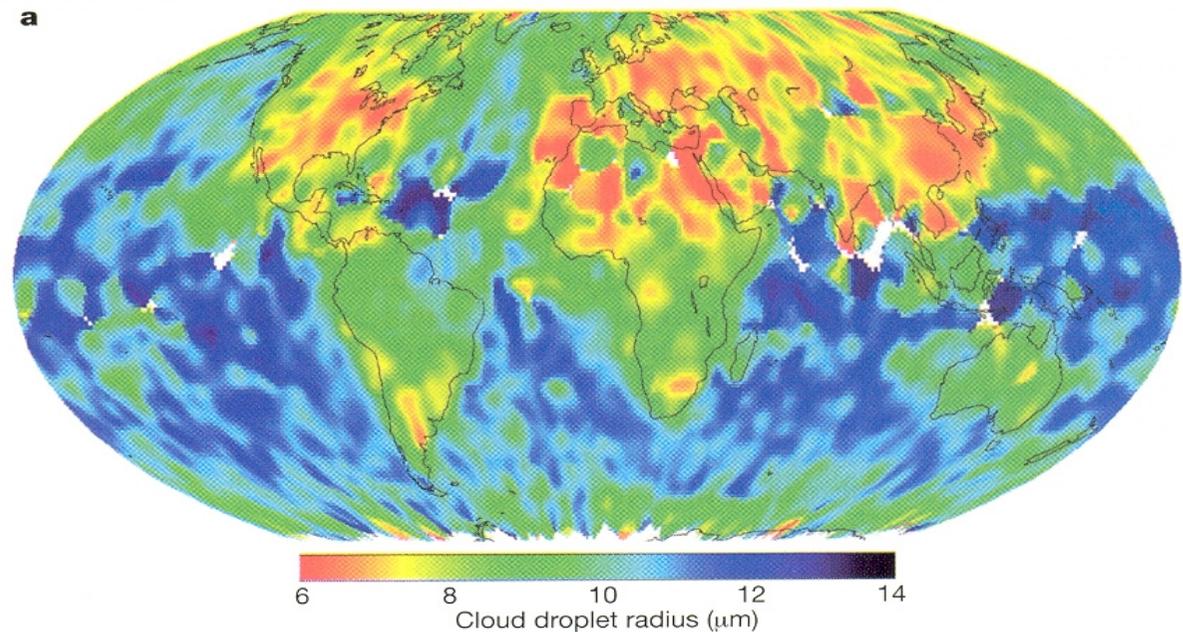
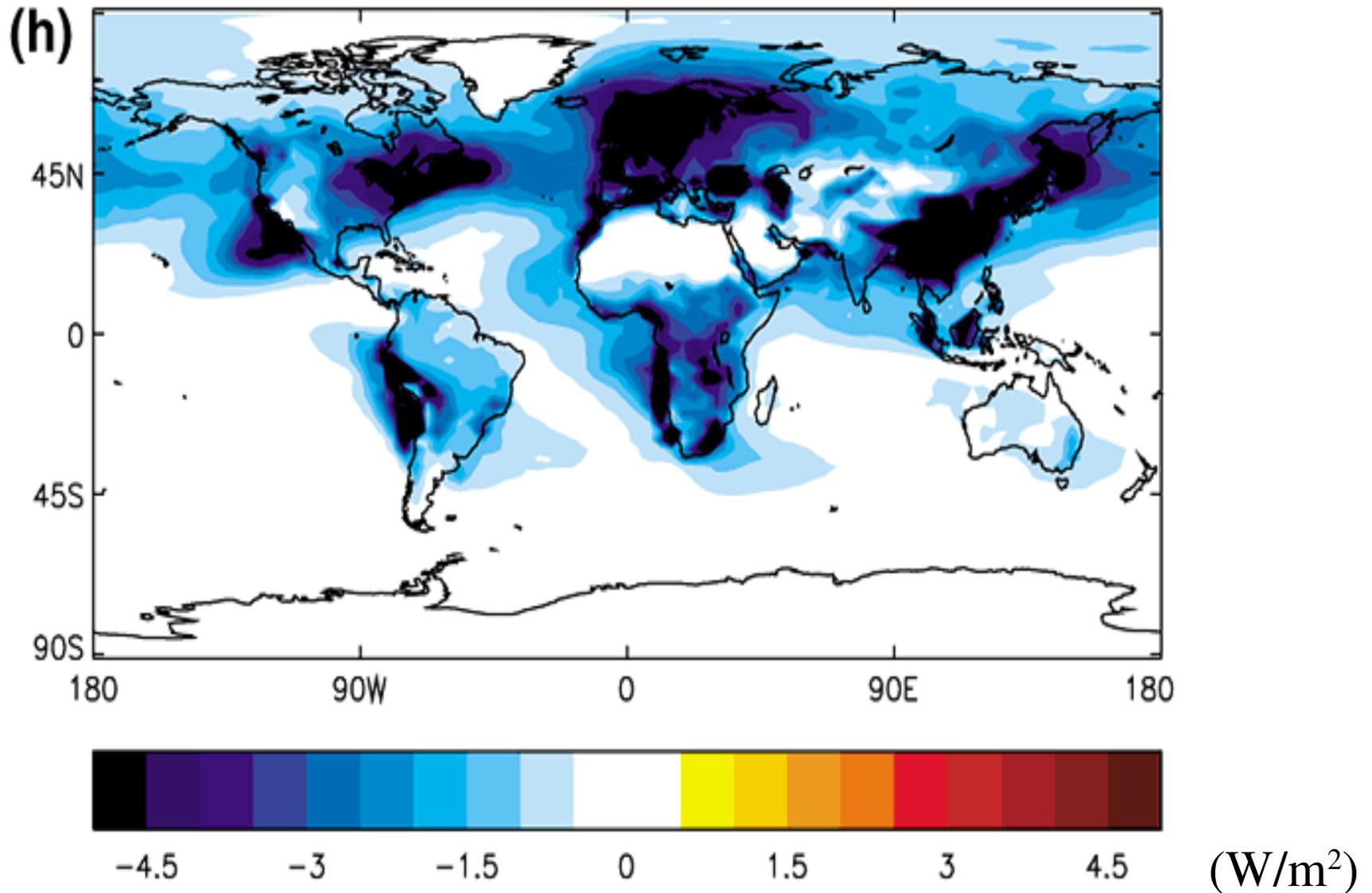


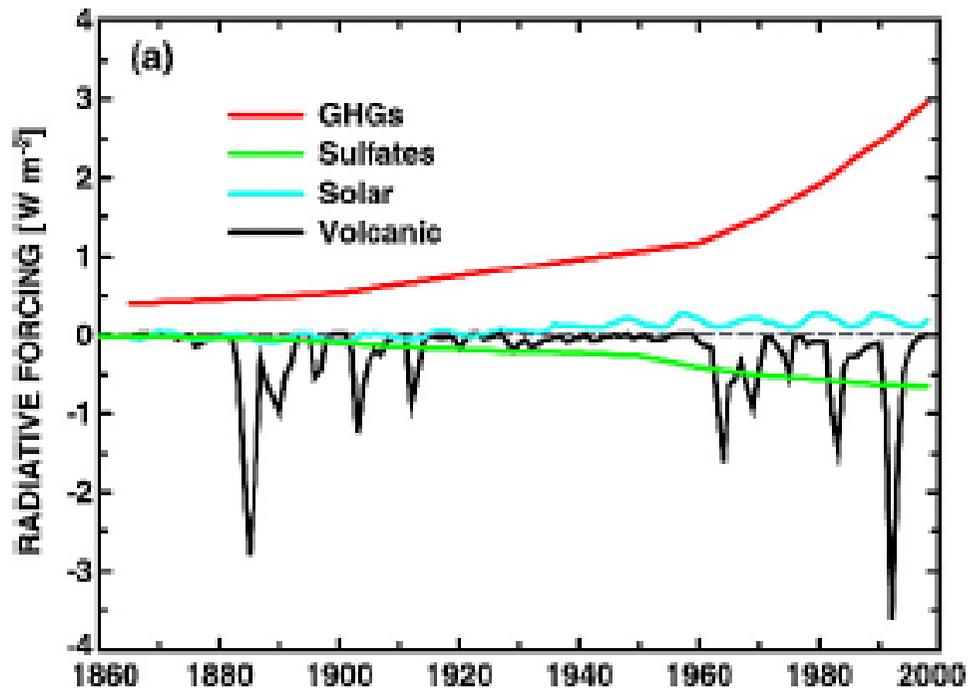
Figure 6 Schematic diagram of cloud formation in a clean and polluted atmosphere. **a**, In a clean atmosphere, the cloud droplet size increases with cloud development until liquid precipitation or glaciation and precipitation take place. **b**, In polluted clouds, the availability of cloud condensation nuclei decreases cloud droplet development. In clouds with strong updrafts the developed cloud can be supercooled with no glaciation down to -37.5 °C. The filled circles show the location of droplets of varying size, the asterisks show the location of ice crystals, and the oval shapes indicate rain drops.

Aérosols anthropiques

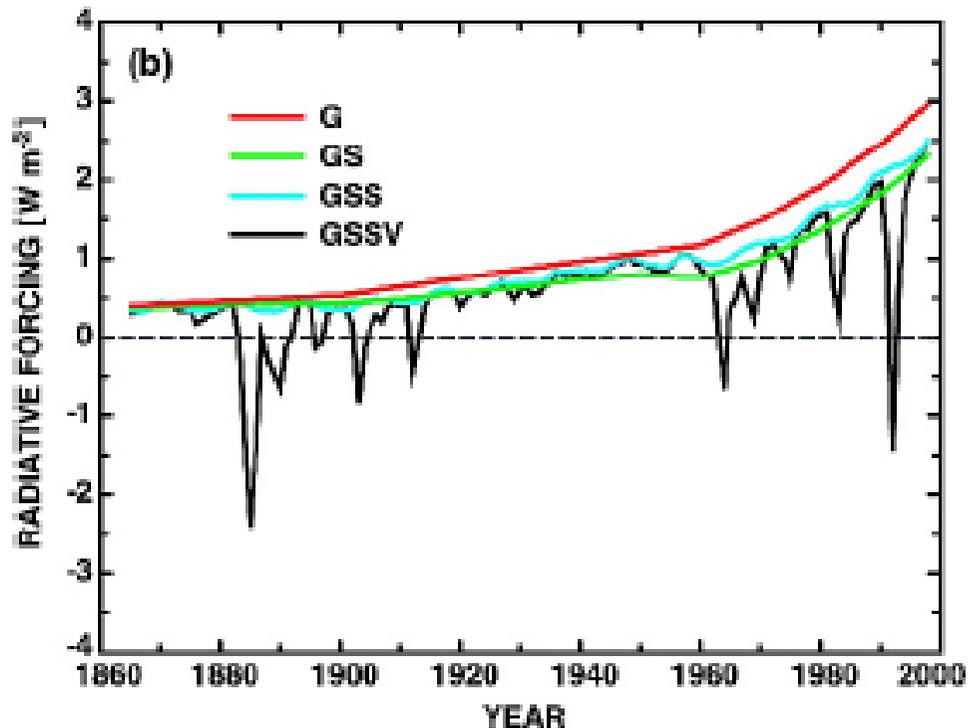
Effet radiatif des aérosols sulfatés (direct et indirect)



Mais aussi carbone suie, poussières minérales...

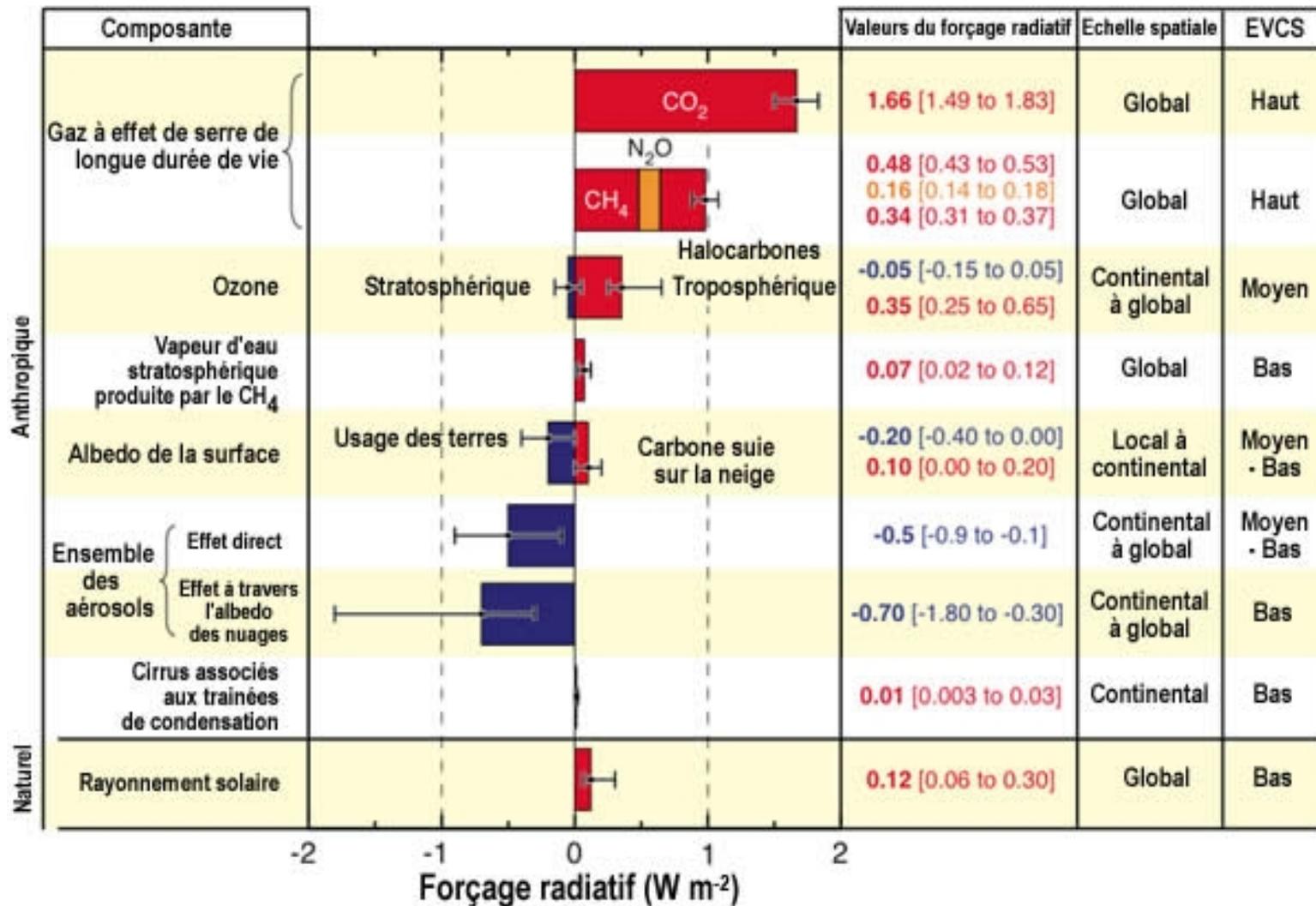


Les différents facteurs externes ayant affecté le climat au cours du 20ème siècle



S'ajoutent au "forçage" solaire (240 W/m²)

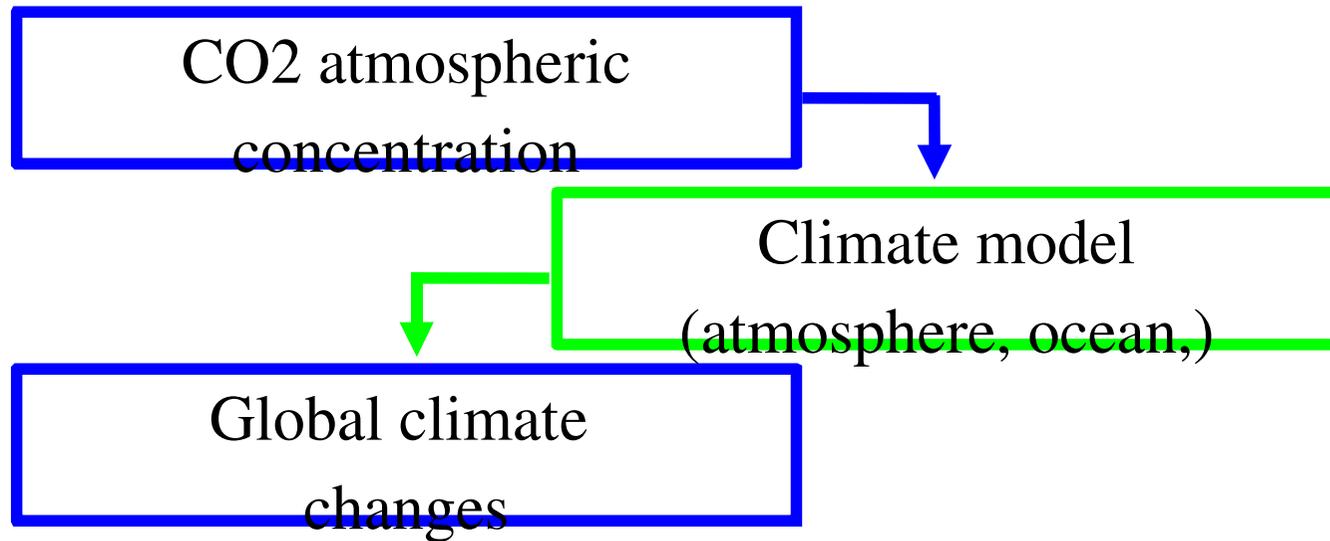
Le forçage des perturbations anthropiques



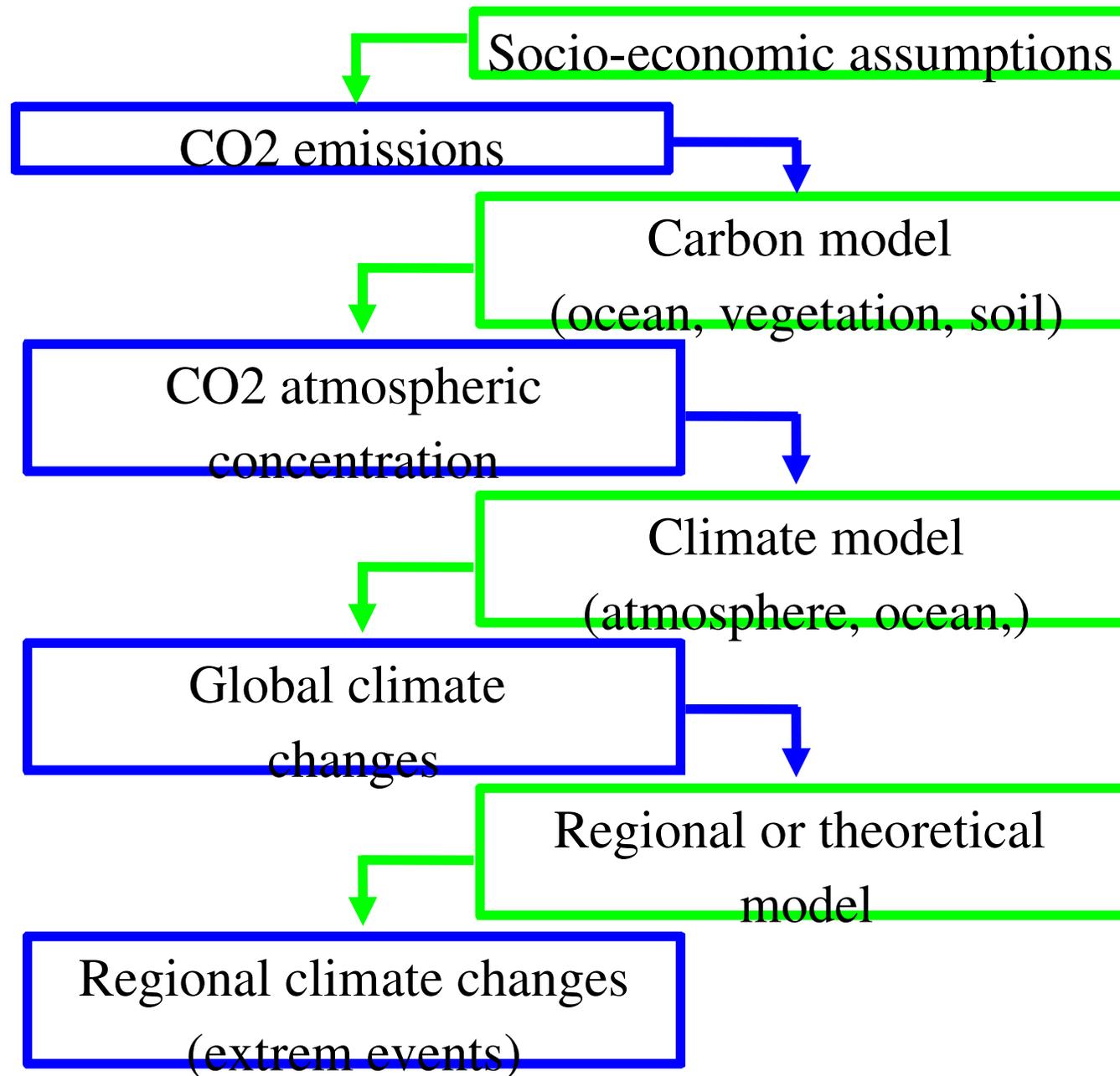
Les aérosols masquent aujourd'hui 1/3 à 1/2 de l'effet de serre additionnel, et leurs effets sont incertains.

Projections pour le futur

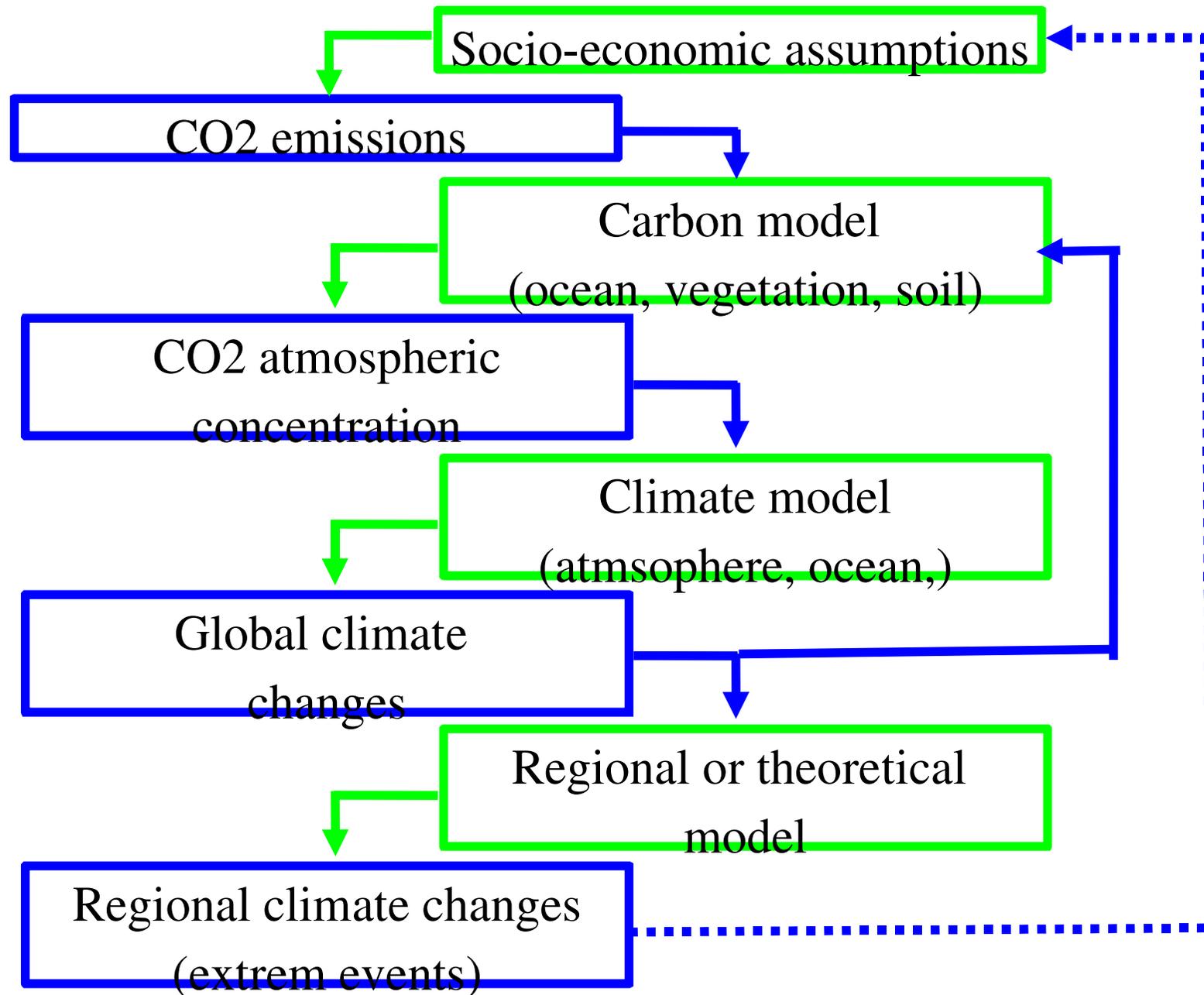
The various steps to estimate the Global climate changes in the futur



The various steps to estimate the Global climate changes in the futur

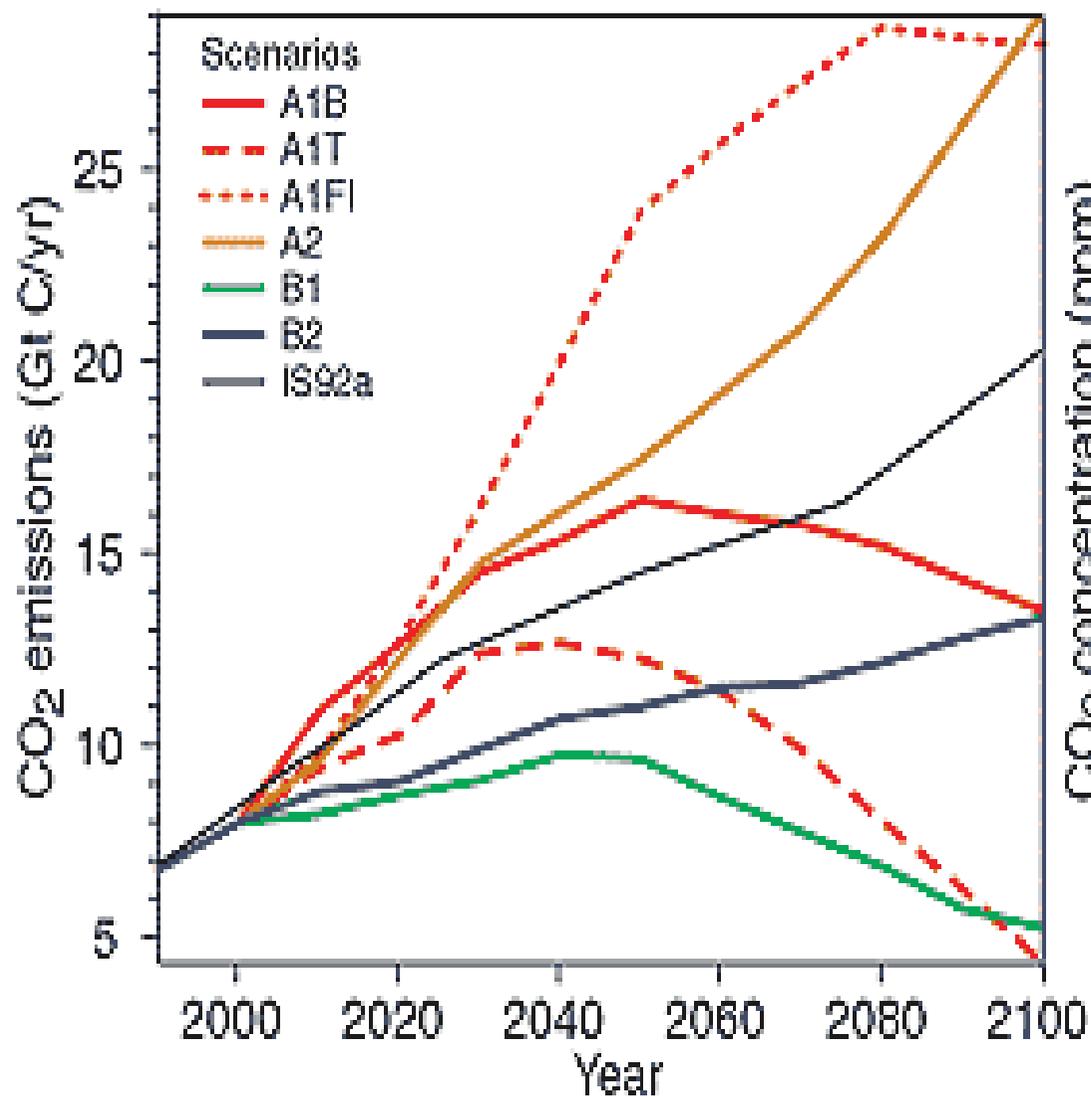


The various steps to estimate the Global climate changes in the futur

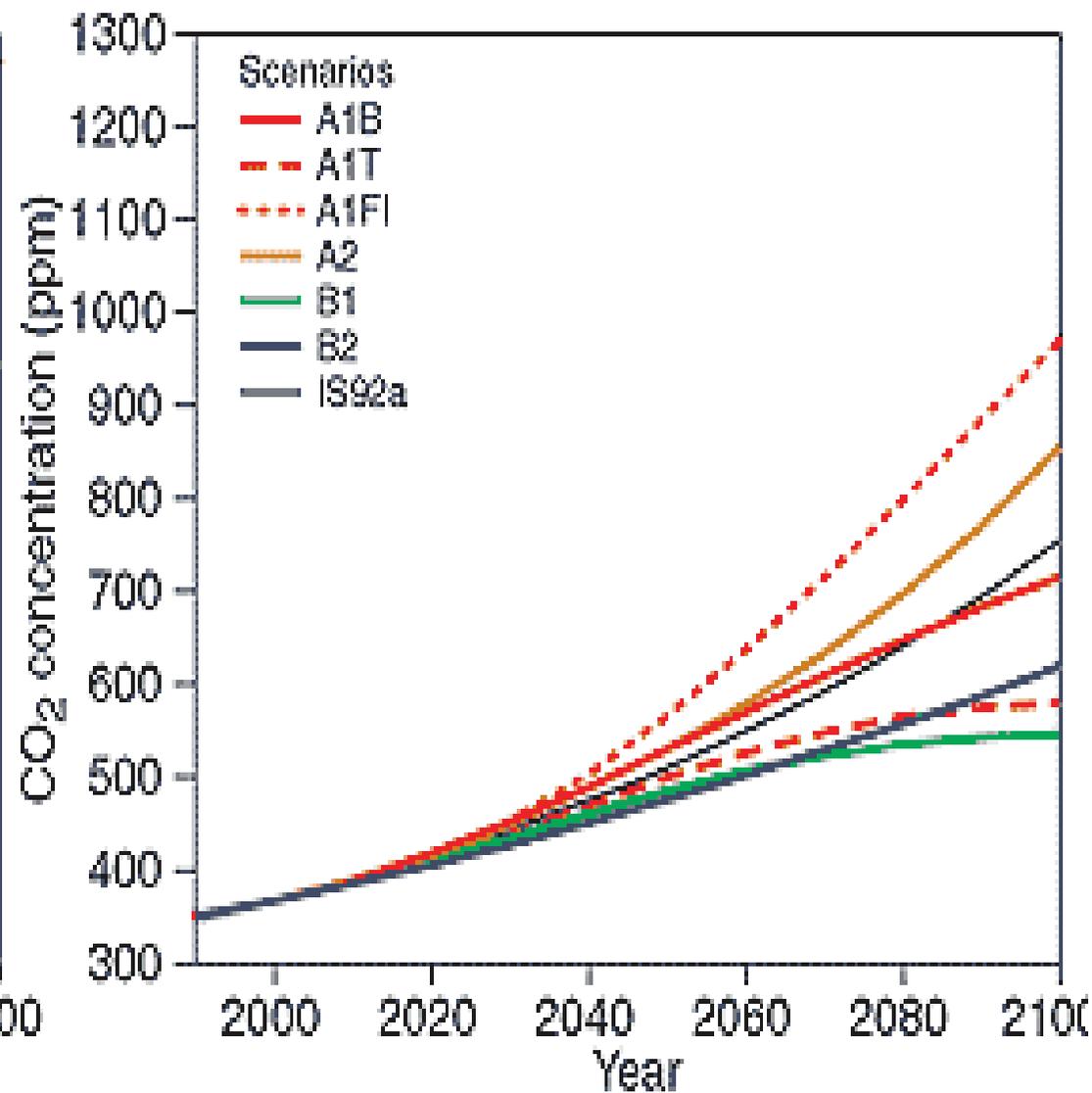


Emissions et concentrations de CO₂: utilisation de scénarios

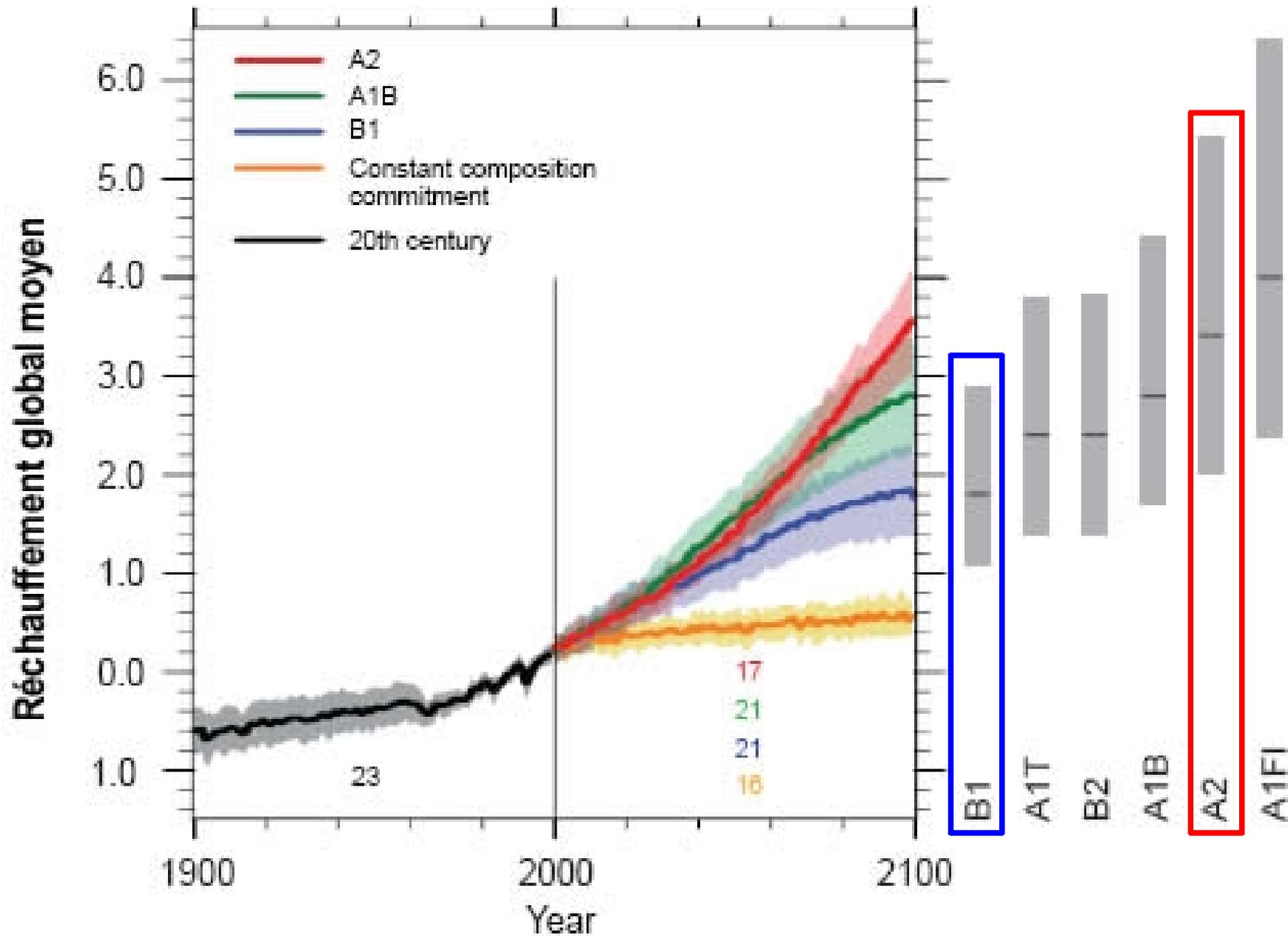
(a) CO₂ emissions



(b) CO₂ concentrations

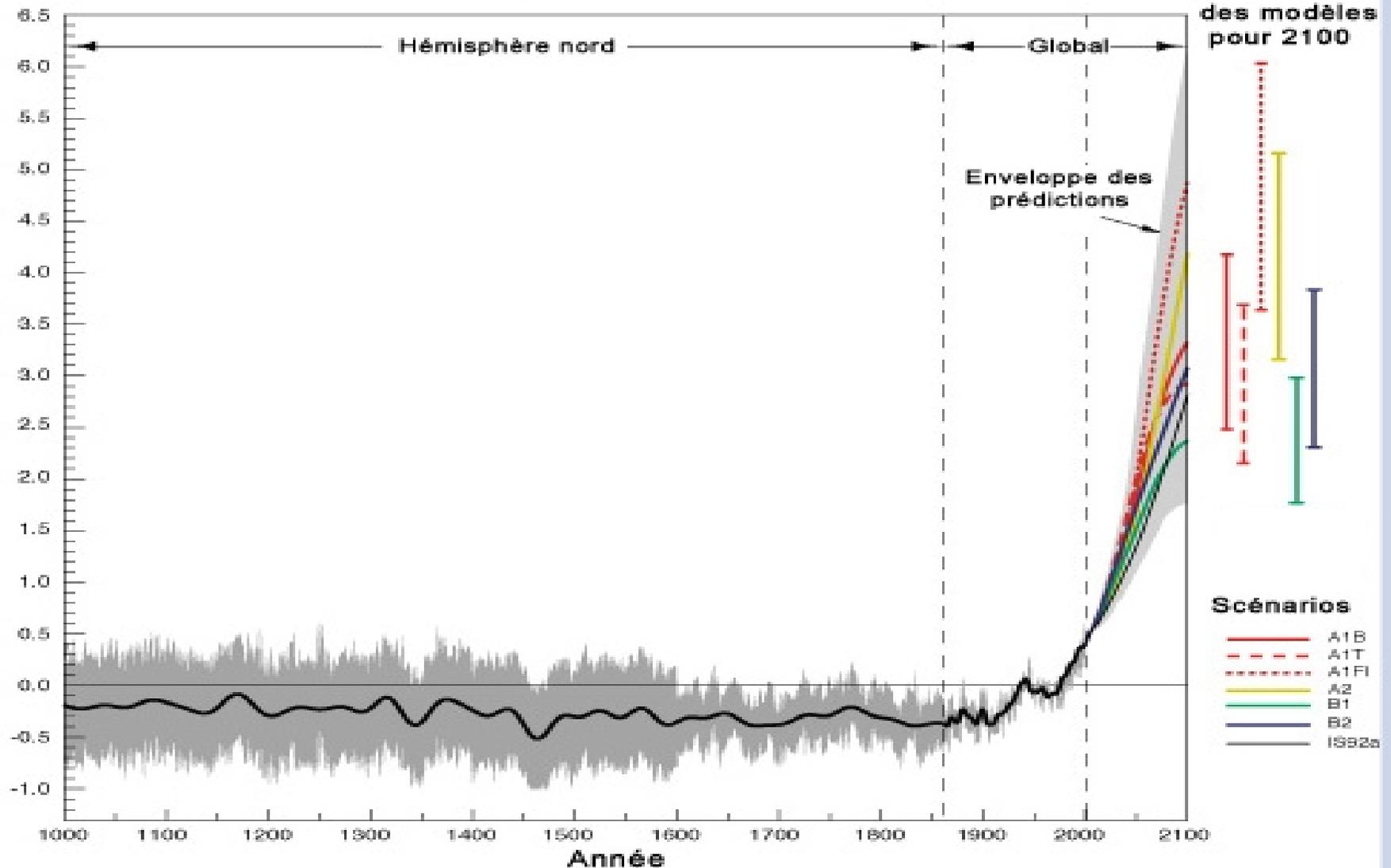


Évolutions de la température globale



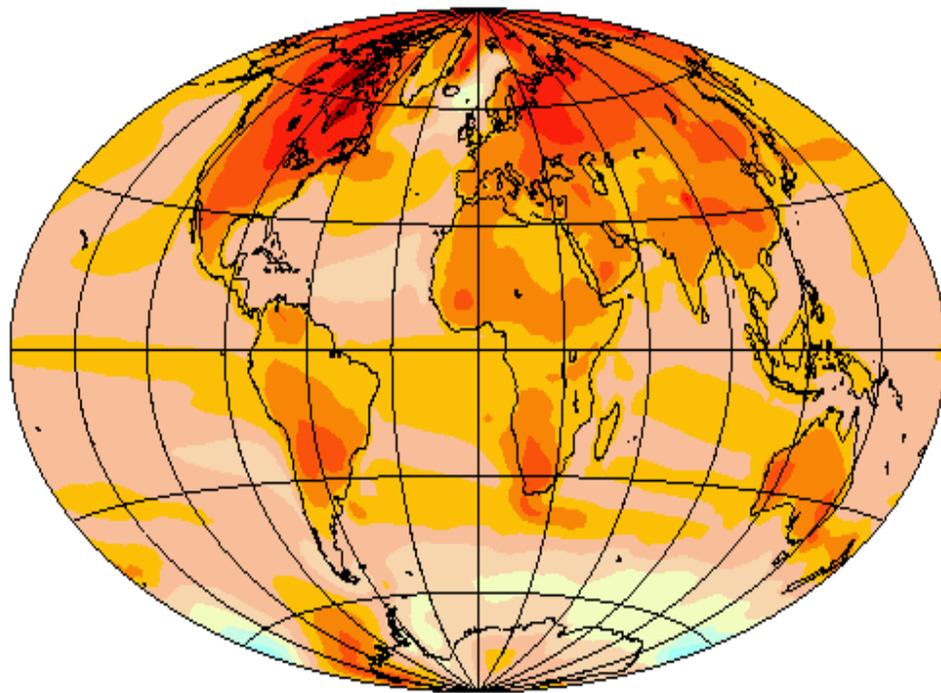
Et dans 100 ans ?

Variations de la température de surface de la Terre de l'an 1000 à l'an 2100

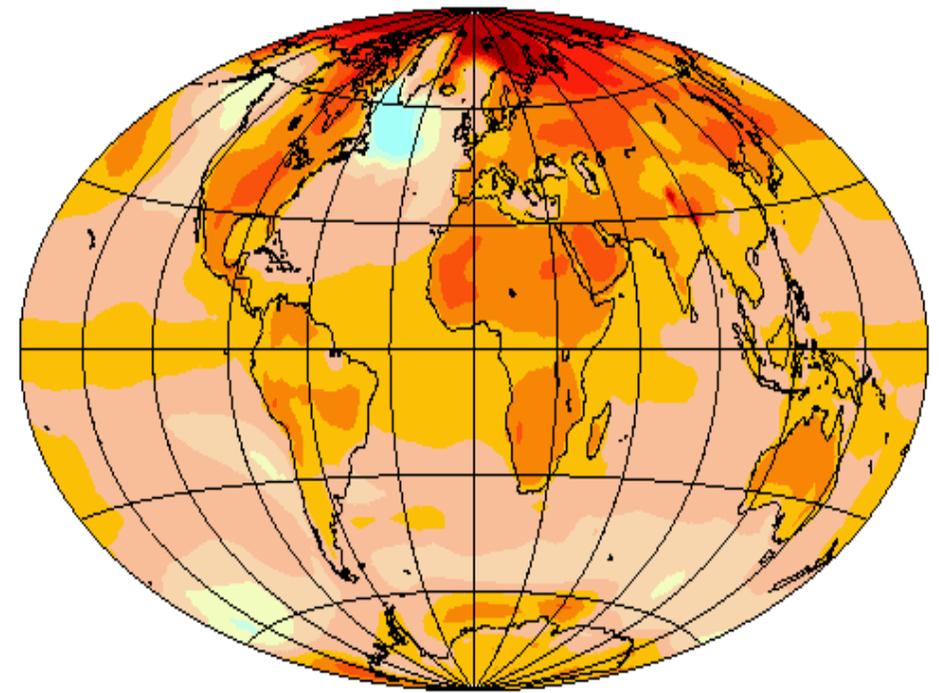


Projection pour l'an 2100

Changement des températures pour le scénario A2



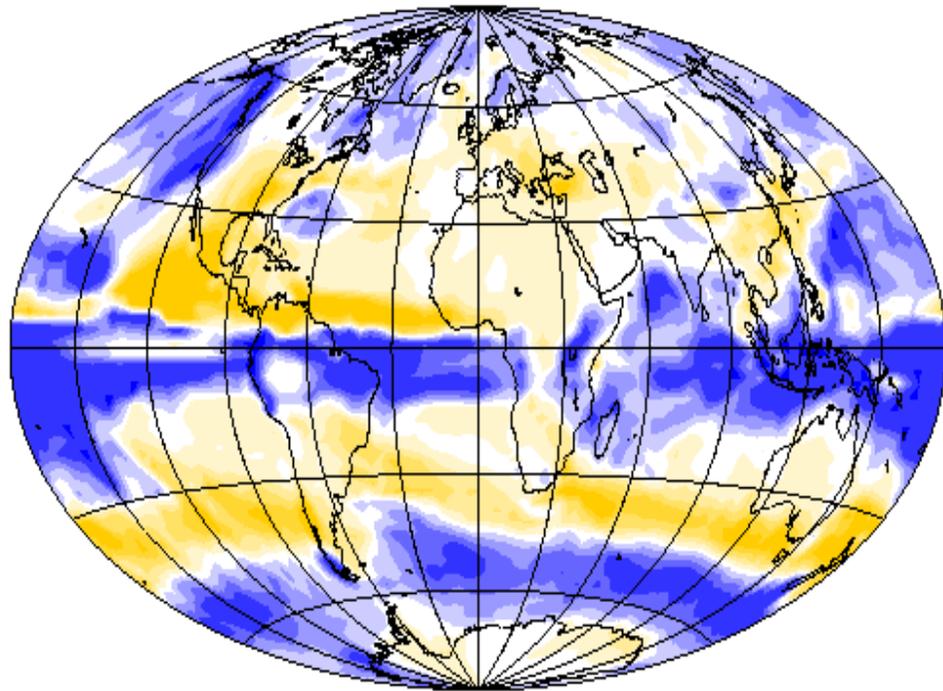
IPCC / IPSL - SRESA2 scenario - Anomalies de la temperature (deg C)
(2090-2099) comparee a (2000-2009)



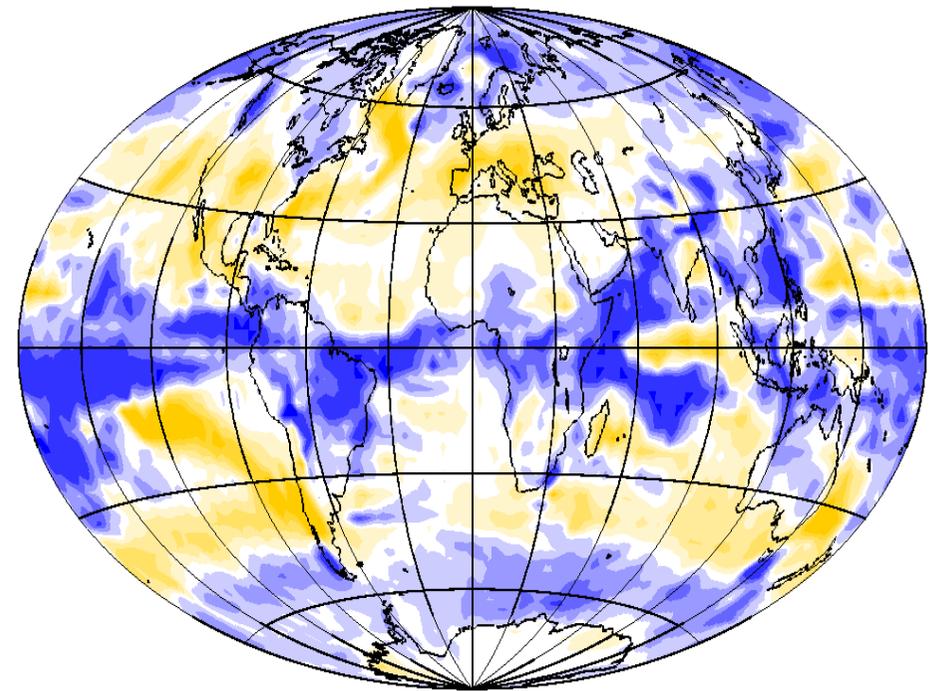
IPCC / CNRM - SRESA2 scenario - Anomalies de la temperature (deg C)
(2090-2099) comparee a (2000-2009)

Projection pour l'an 2100

Changement de précipitations pour le scénario A2

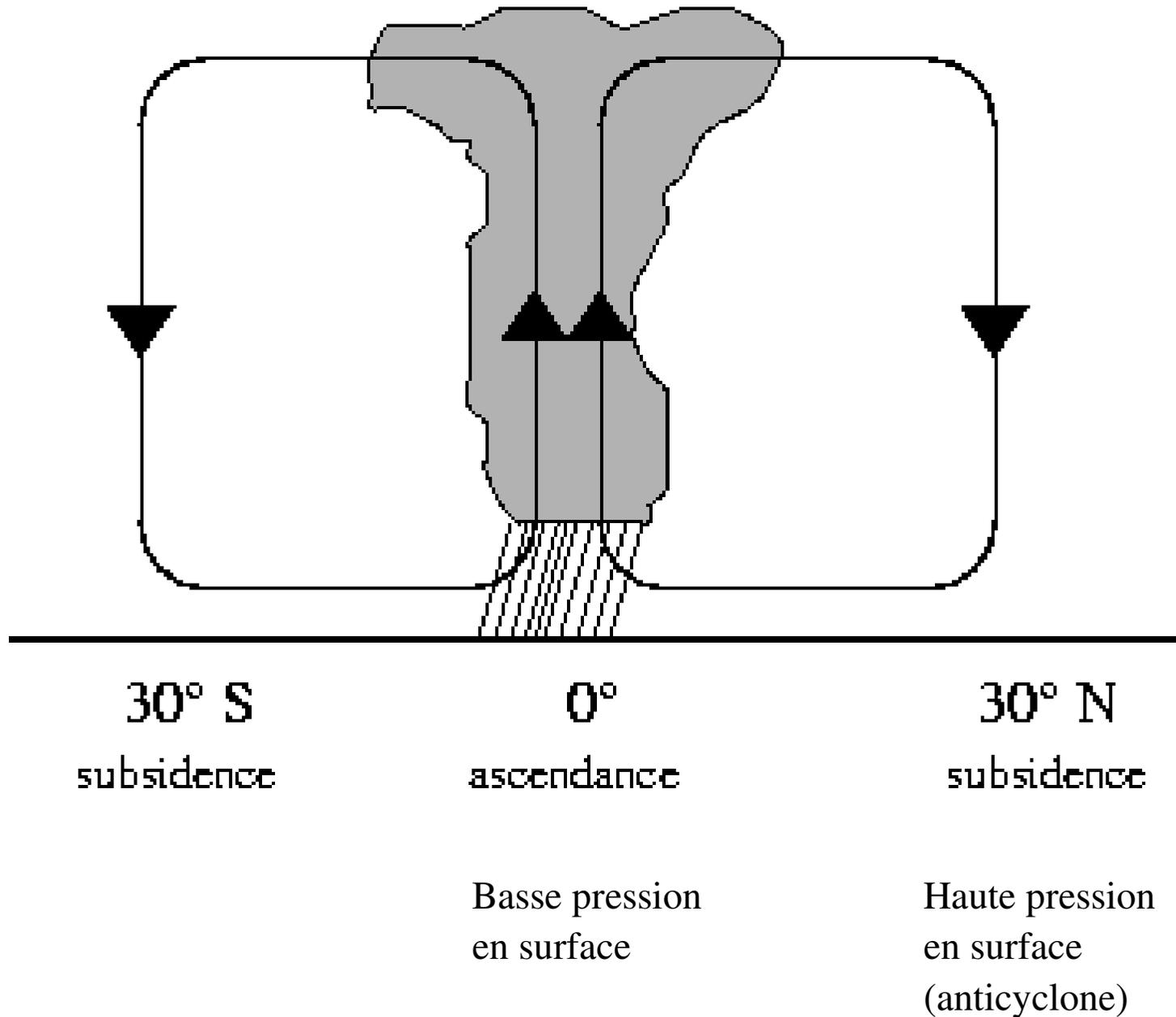


IPCC / IPSL – SRESA2 scénario – Anomalies de la précipitation (mm/jour)
(2090–2099) comparée à (2000–2009)



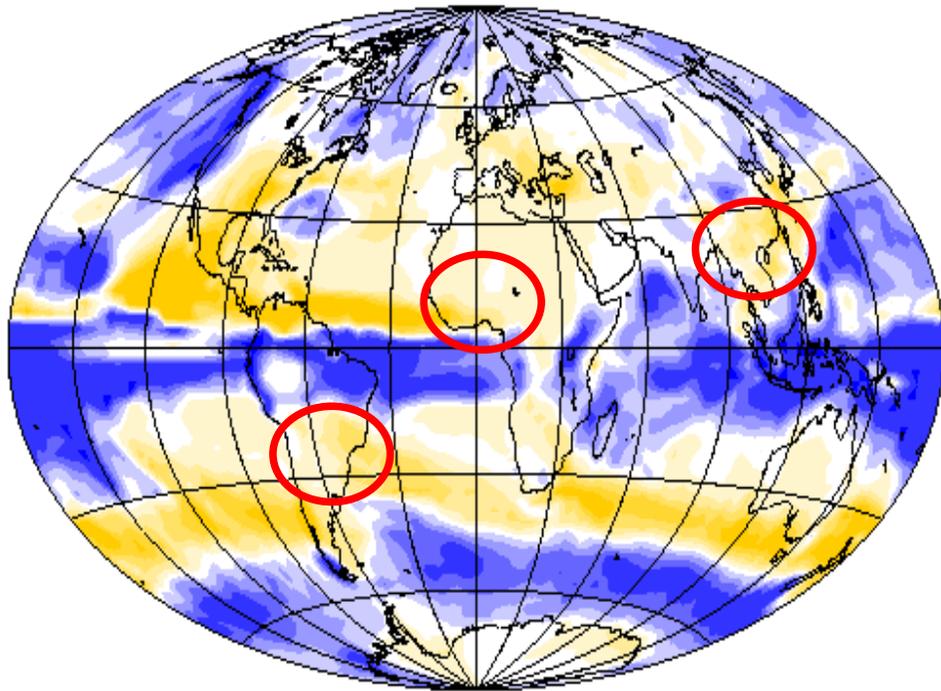
IPCC / CNRM – SRESA2 scénario – Anomalies de la précipitation (mm/jour)
(2090–2099) comparée à (2000–2009)

La circulation de Hadley

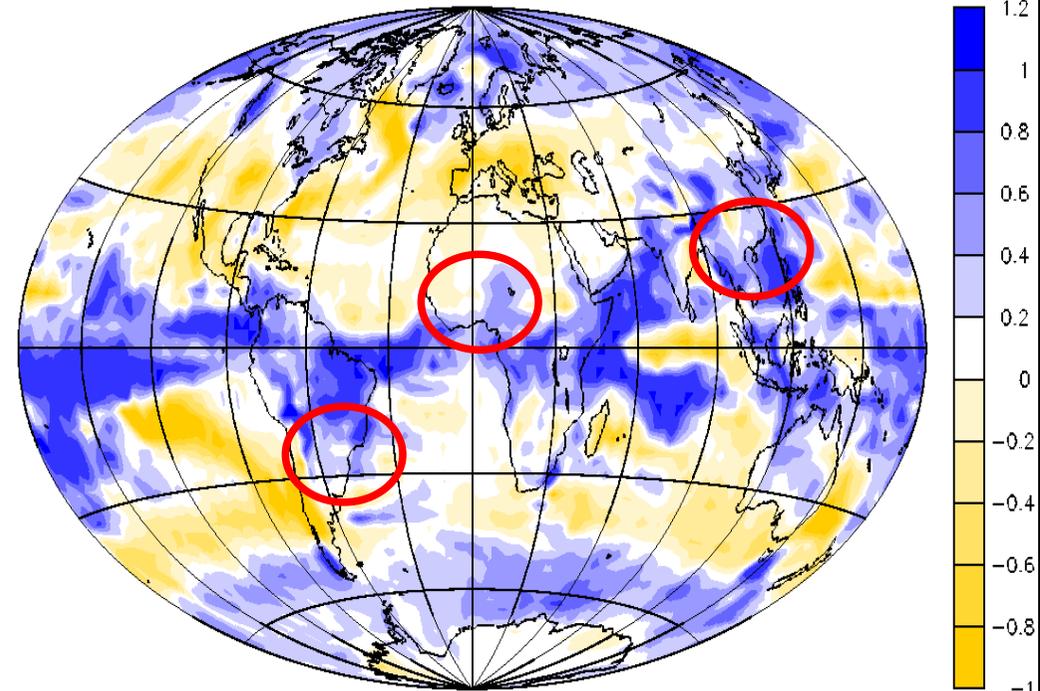


Projection pour l'an 2100

Changement de précipitations pour le scénario A2



IPCC / IPSL – SRESA2 scénario – Anomalies de la précipitation (mm/jour)
(2090–2099) comparée à (2000–2009)



IPCC / CNRM – SRESA2 scénario – Anomalies de la précipitation (mm/jour)
(2090–2099) comparée à (2000–2009)

Projected Patterns of Precipitation Changes

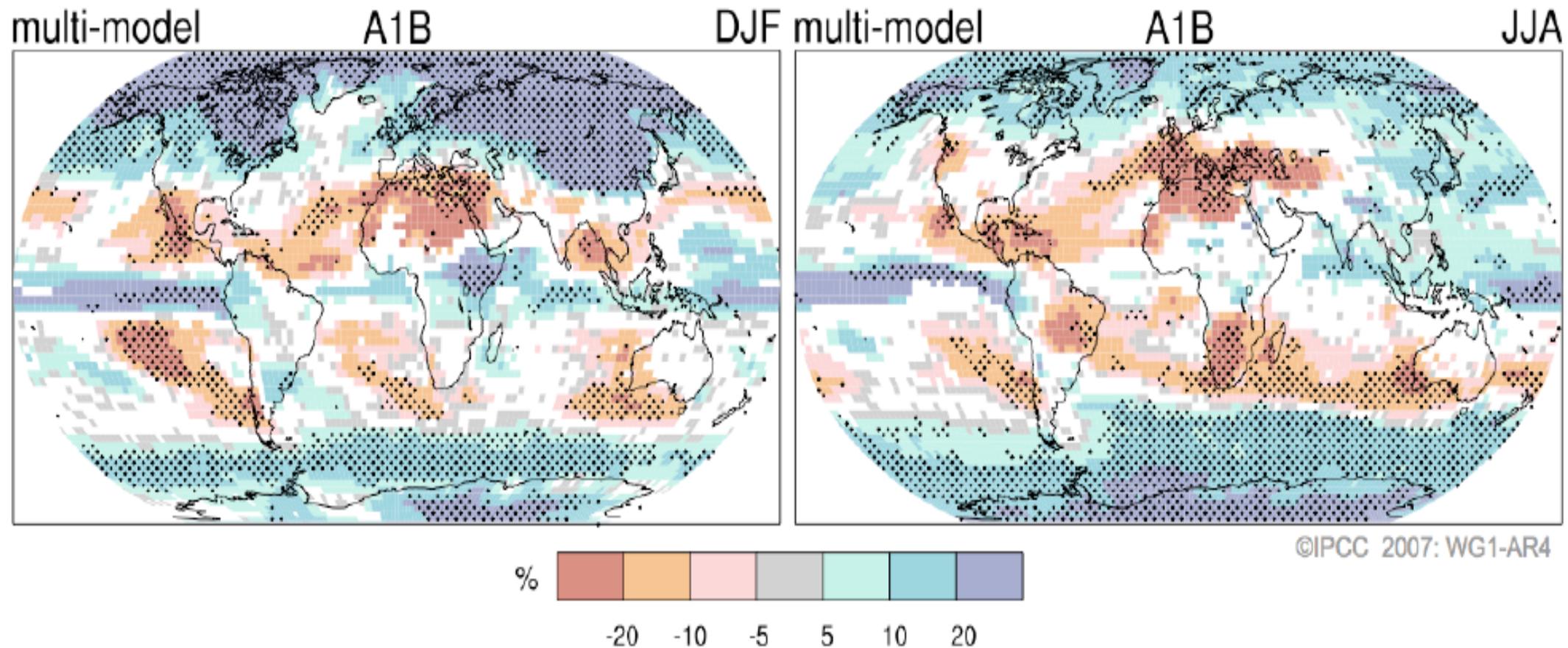


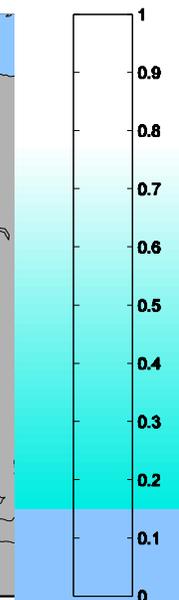
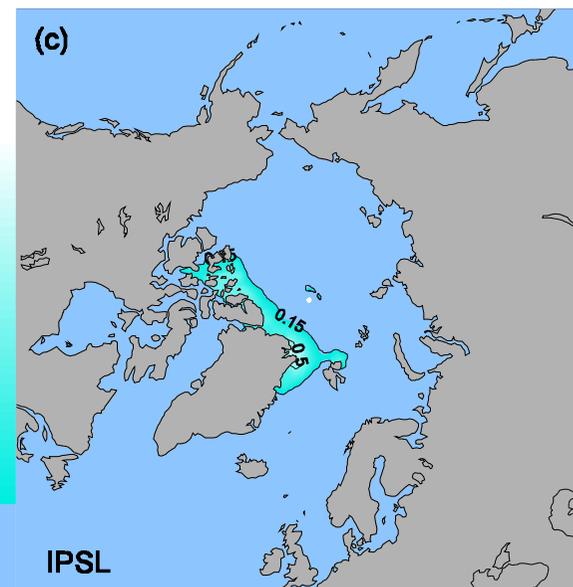
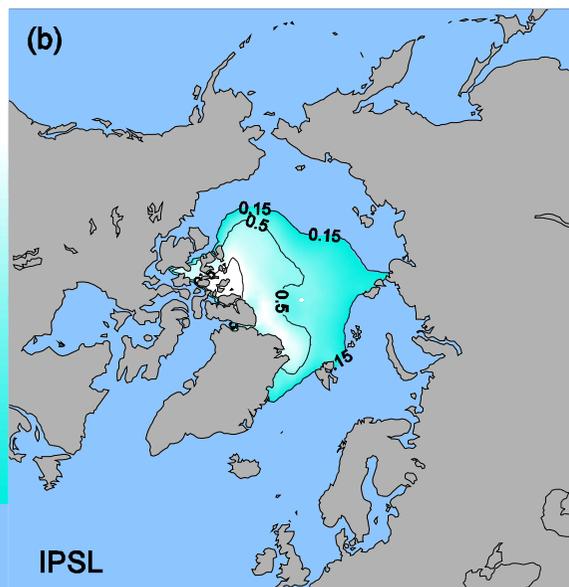
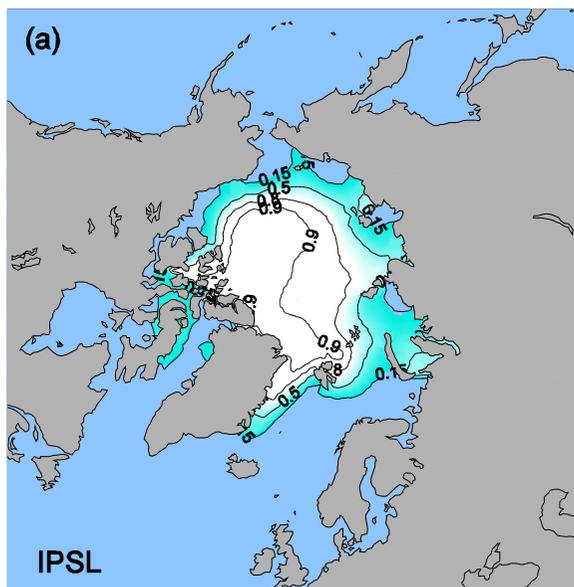
FIGURE SPM-6. Relative changes in precipitation (in percent) for the period 2090–2099, relative to 1980–1999. Values are multi-model averages based on the SRES A1B scenario for December to February (left) and June to August (right). White areas are where less than 66% of the models agree in the sign of the change and stippled areas are where more than 90% of the models agree in the sign of the change.

{Figure 10.9}

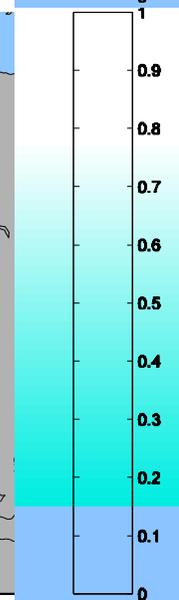
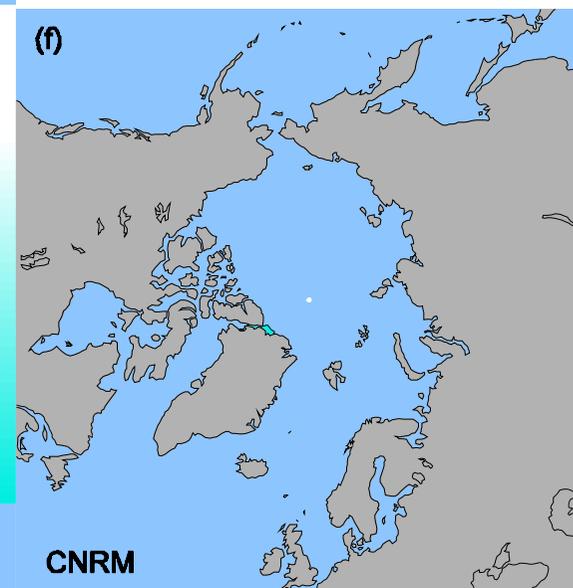
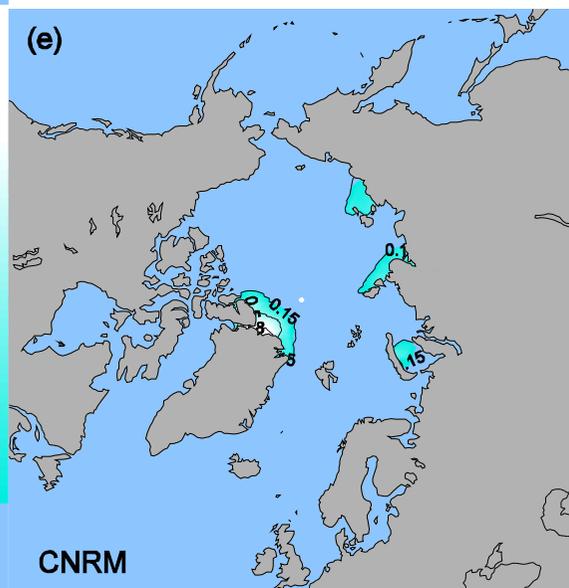
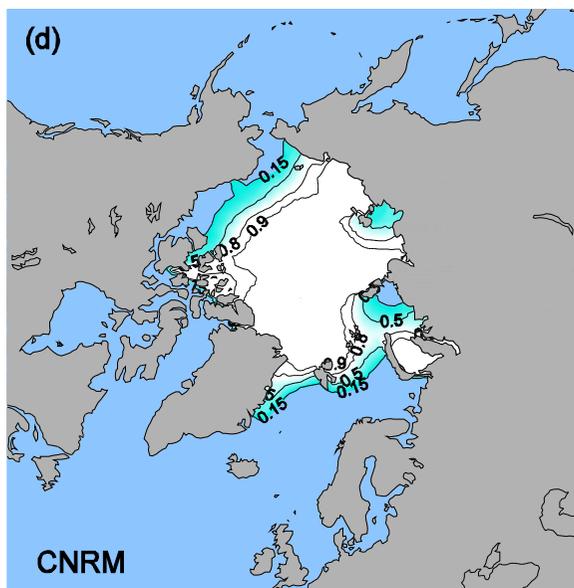
Extension minimale de la glace de mer (été)

Climat 21^e

IPSL



CNRM



1960-1989

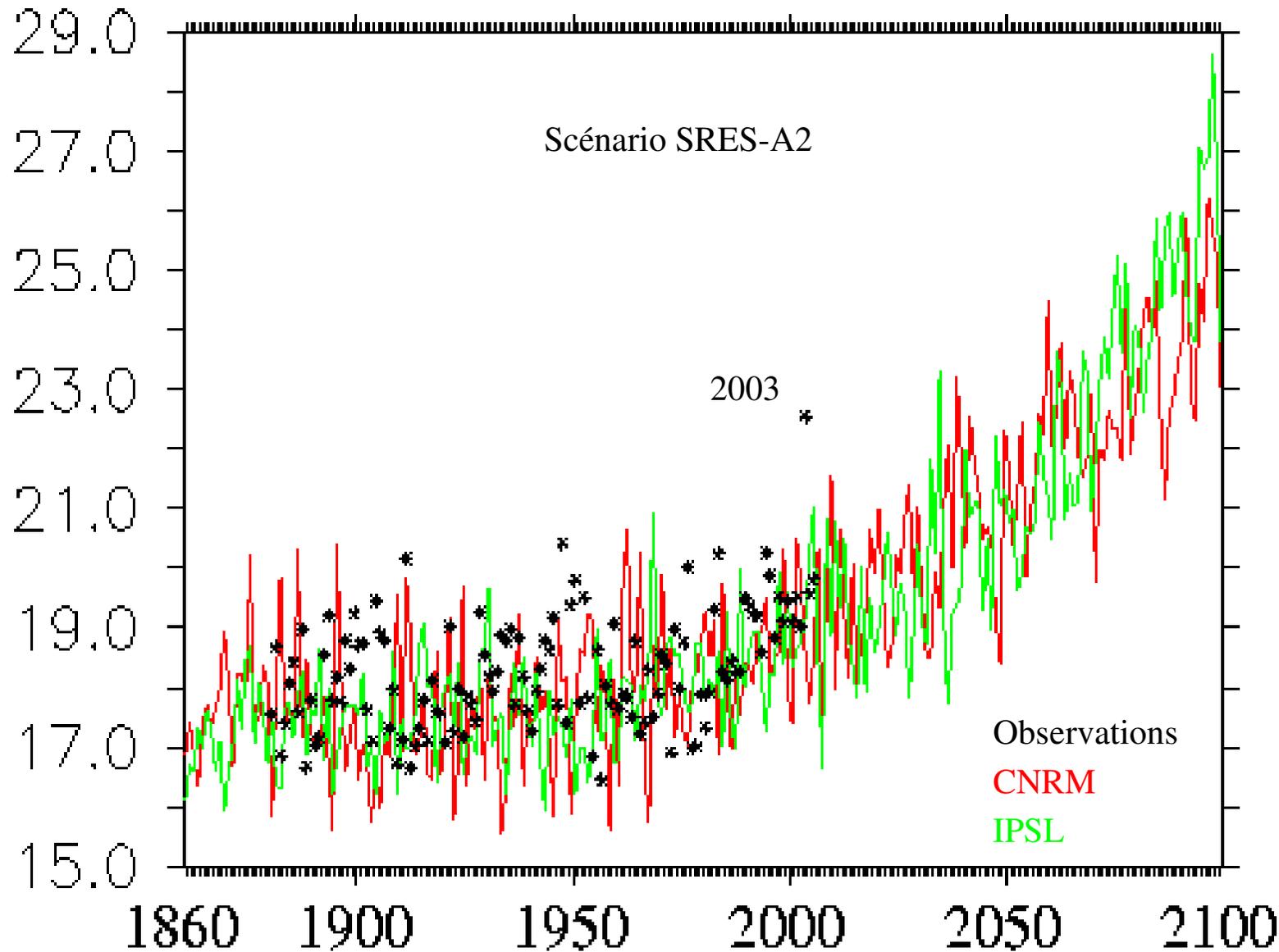
2070-2099; B1

2070-2099; A2

[Dufresne et al., 2006]

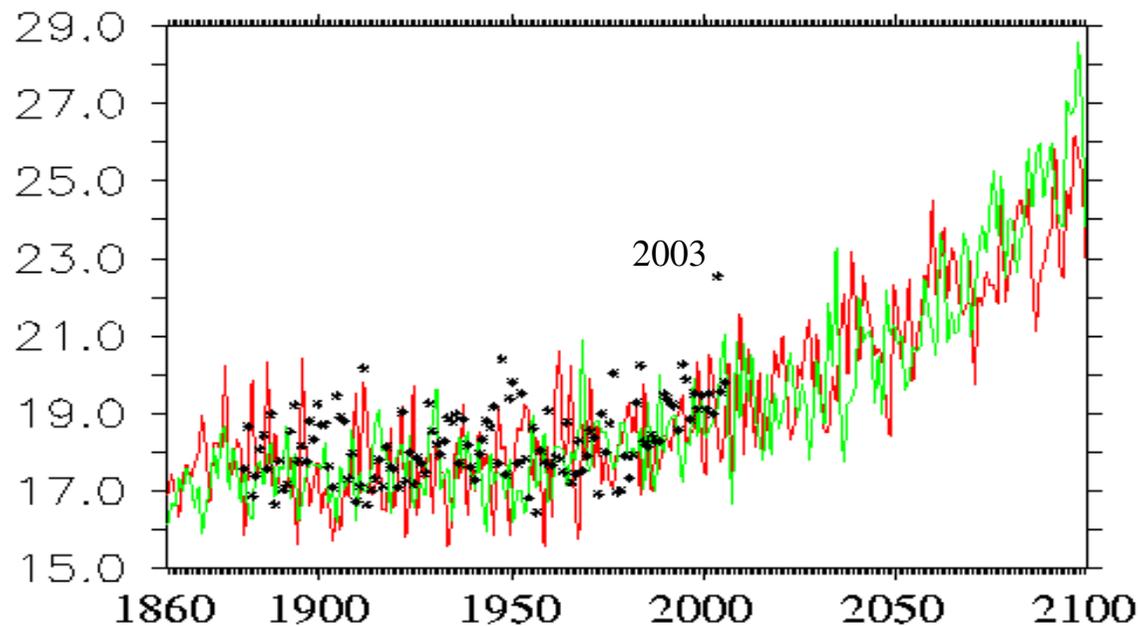
Que représentent ces changements de température?

Evolution de la température moyenne en été en France de 1860 à 2100



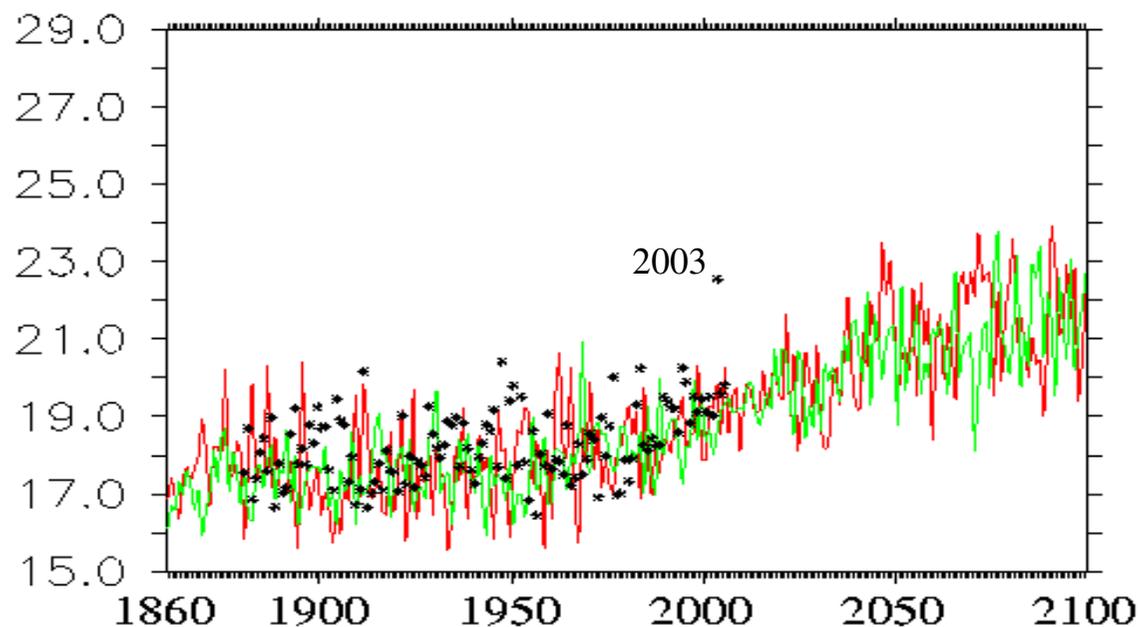
Température estivale, moyennée sur la France, pour deux scénarios

SRES-A2



Observations
CNRM
IPSL

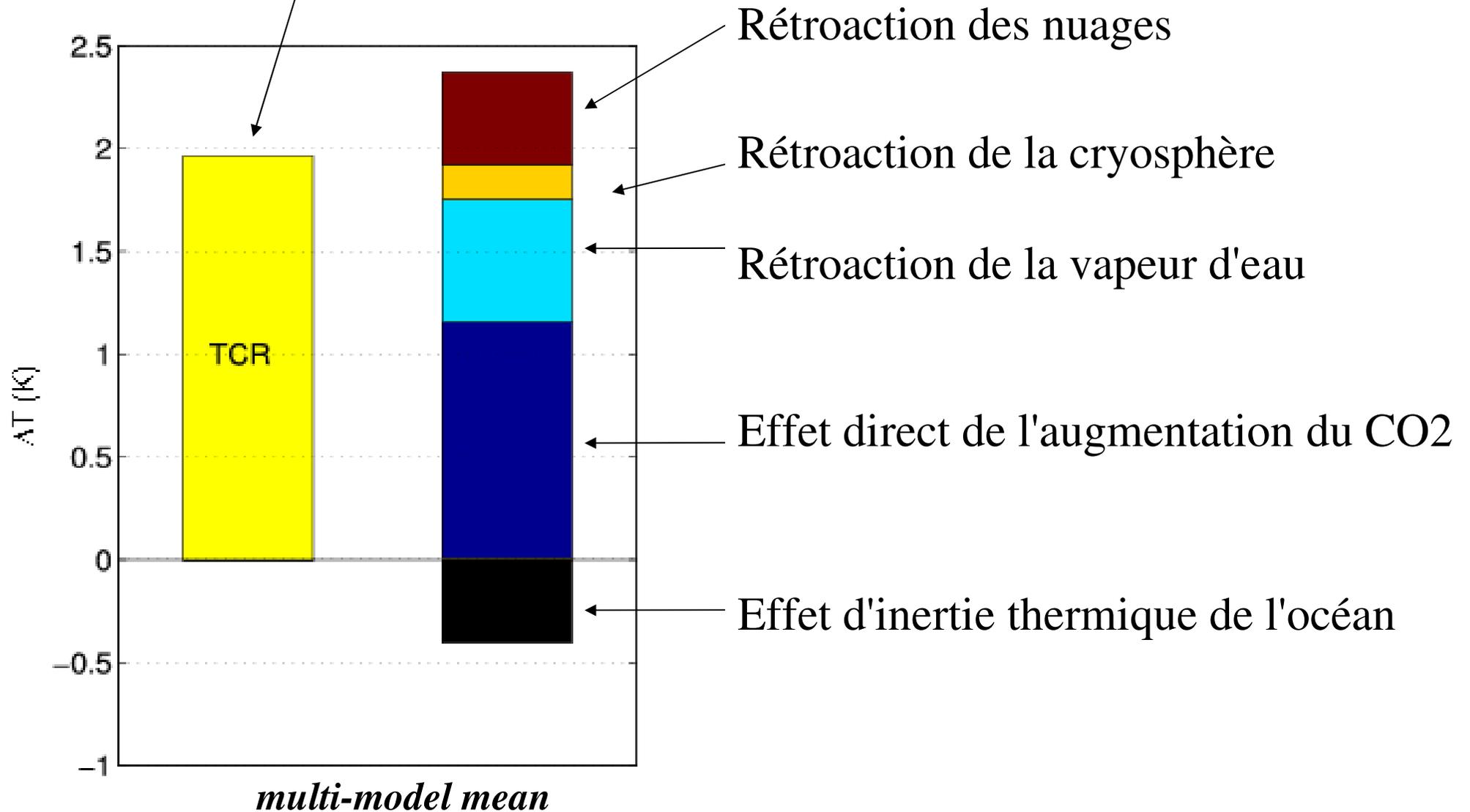
SRES-B1



Observations
CNRM
IPSL

Importances des rétroactions

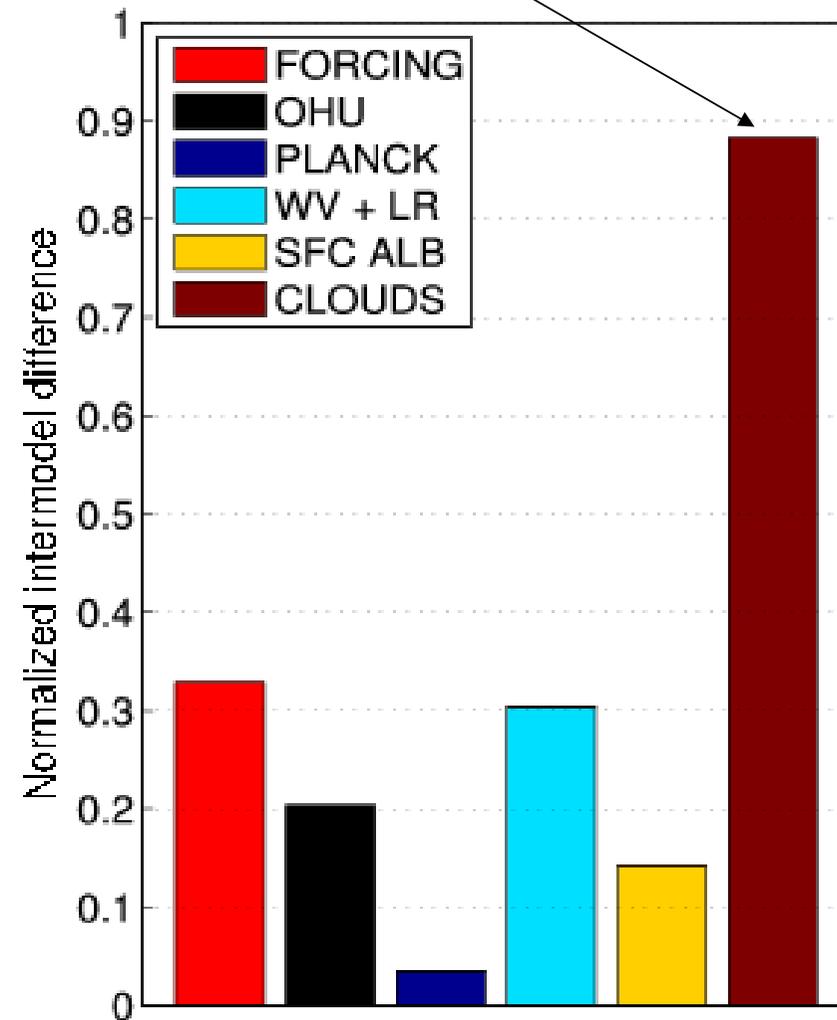
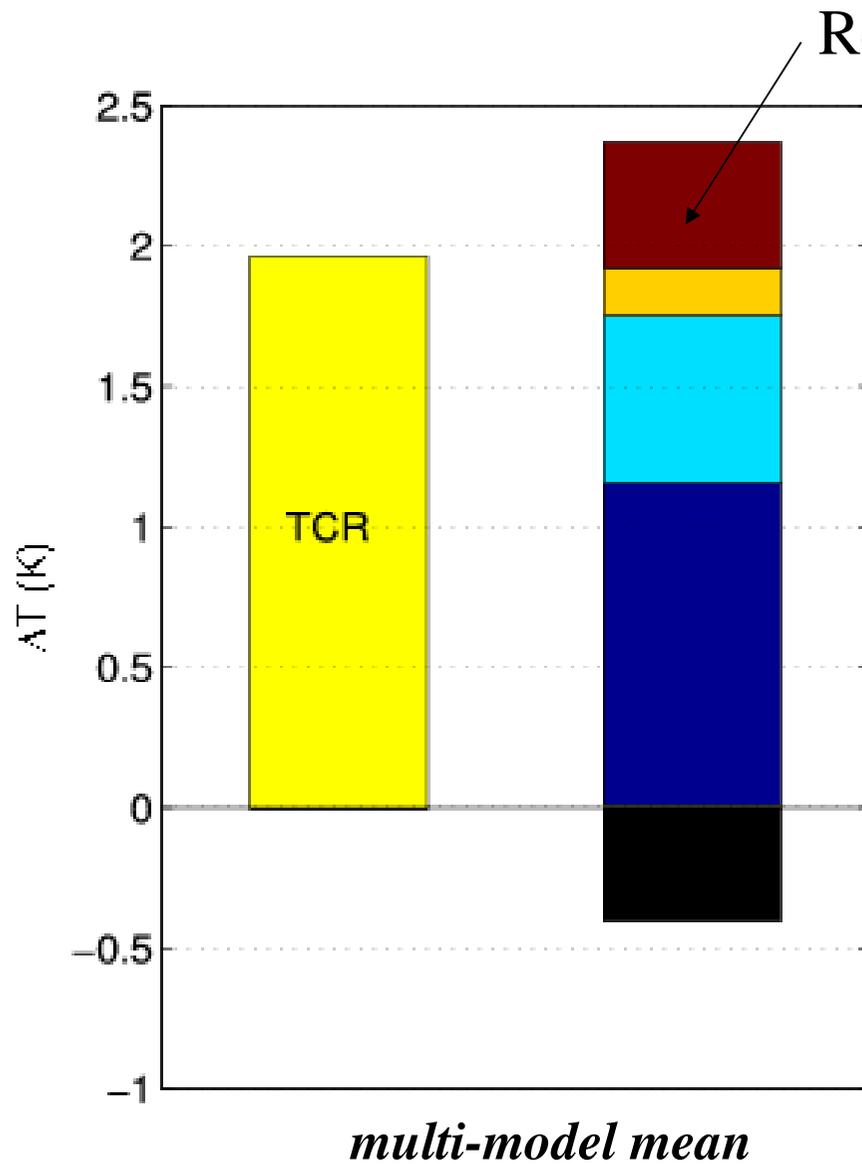
Réchauffement global pour un doublement de CO₂



Importances des rétroactions

Moyenne des modèles

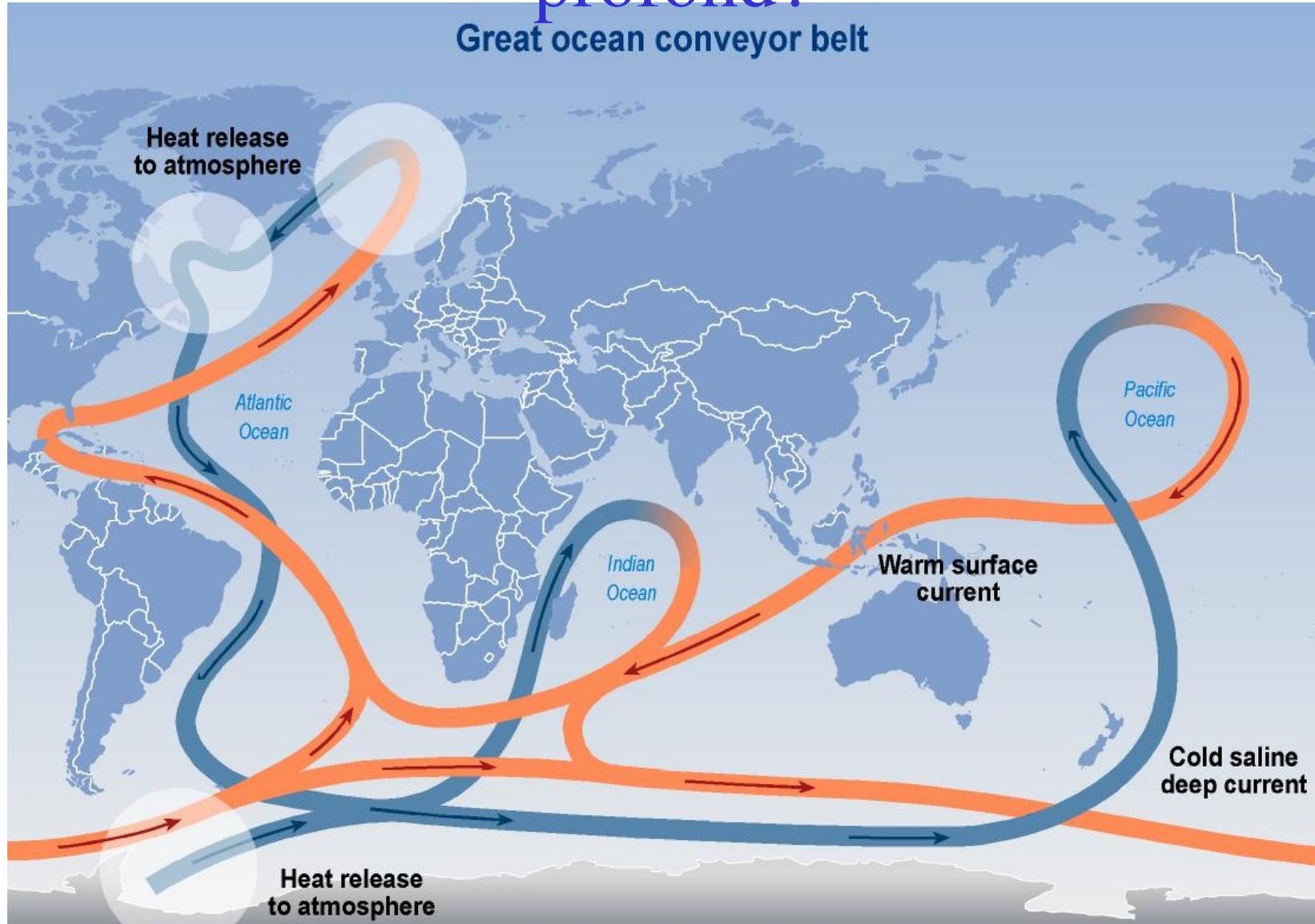
Dispersion entre les modèles



Quelques incertitudes

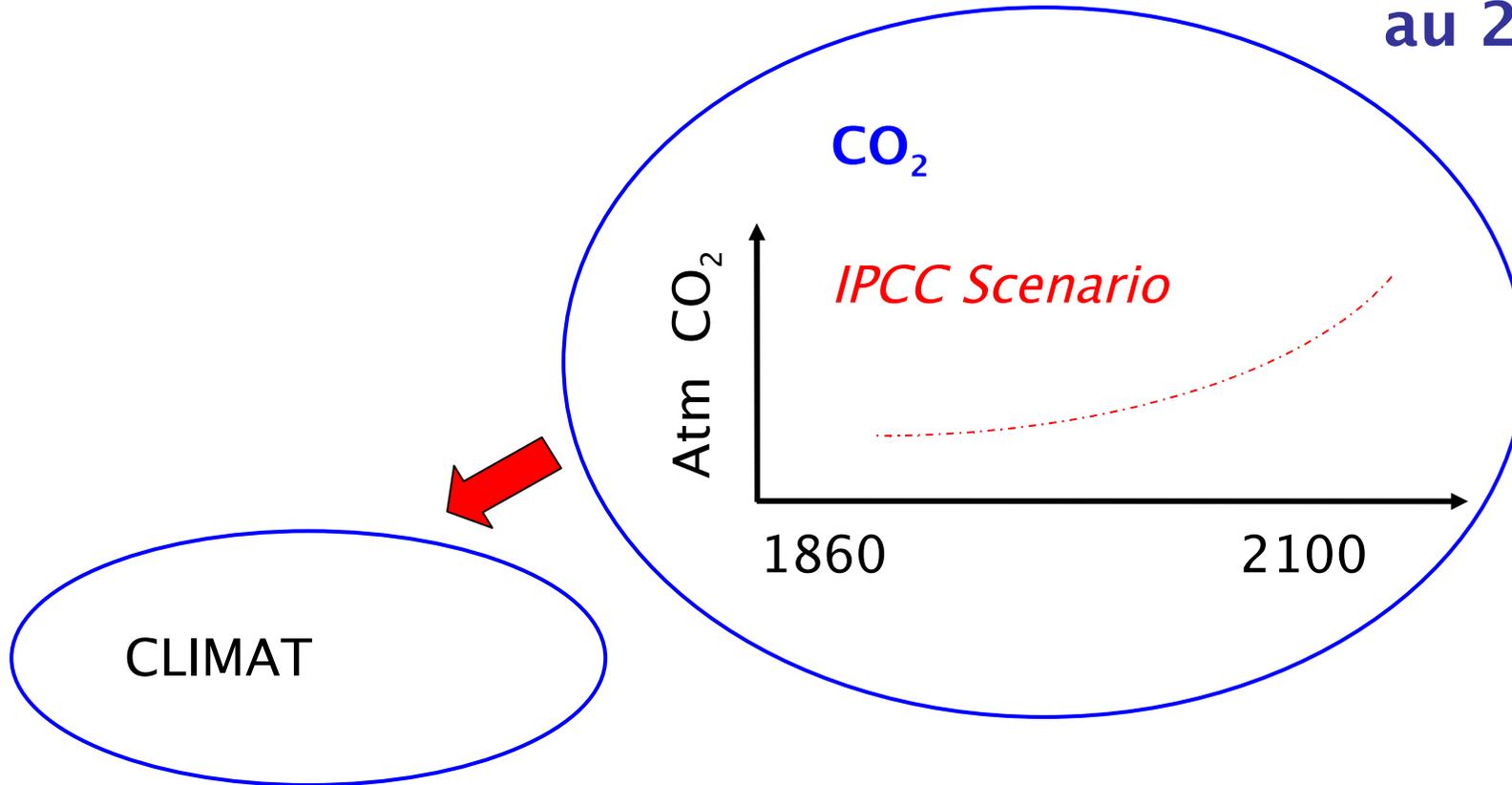
Changement drastique de la circulation de l'océan

profond?



Quelques incertitudes: Rétroaction climat-carbone

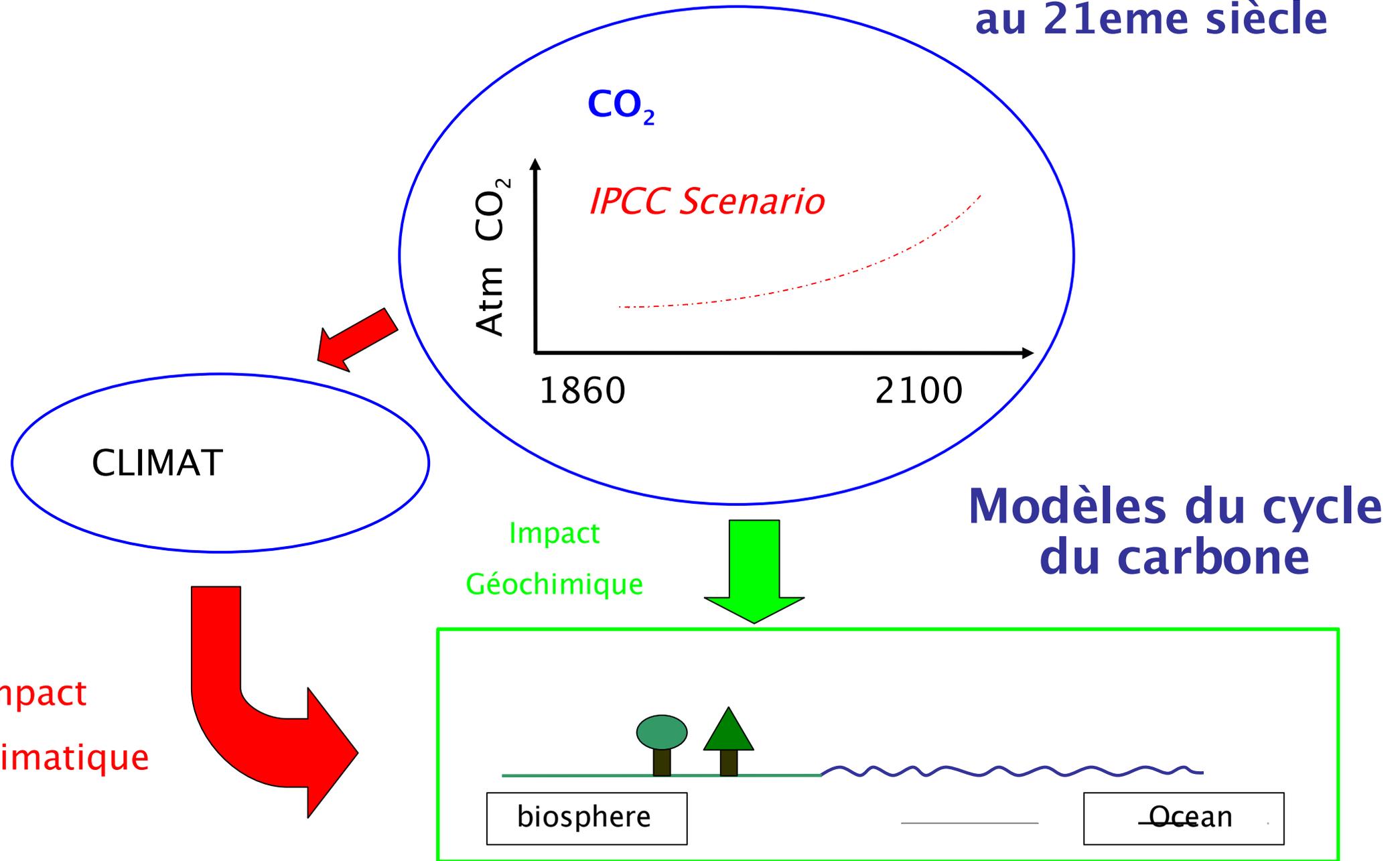
L'évolution du CO₂
au 21ème siècle



Modèles de
circulation générale

Quelques incertitudes: Rétroaction climat-carbone

L'évolution du CO₂
au 21eme siècle



Quelques incertitudes: Rétroaction climat-carbone

Modèles couplés
climat carbone

Source fossile

CO₂

Atm CO₂

IPCC Scenario

1860

2100

rétroaction
Climatique

CLIMAT

Impact
Géochimique

Impact
climatique

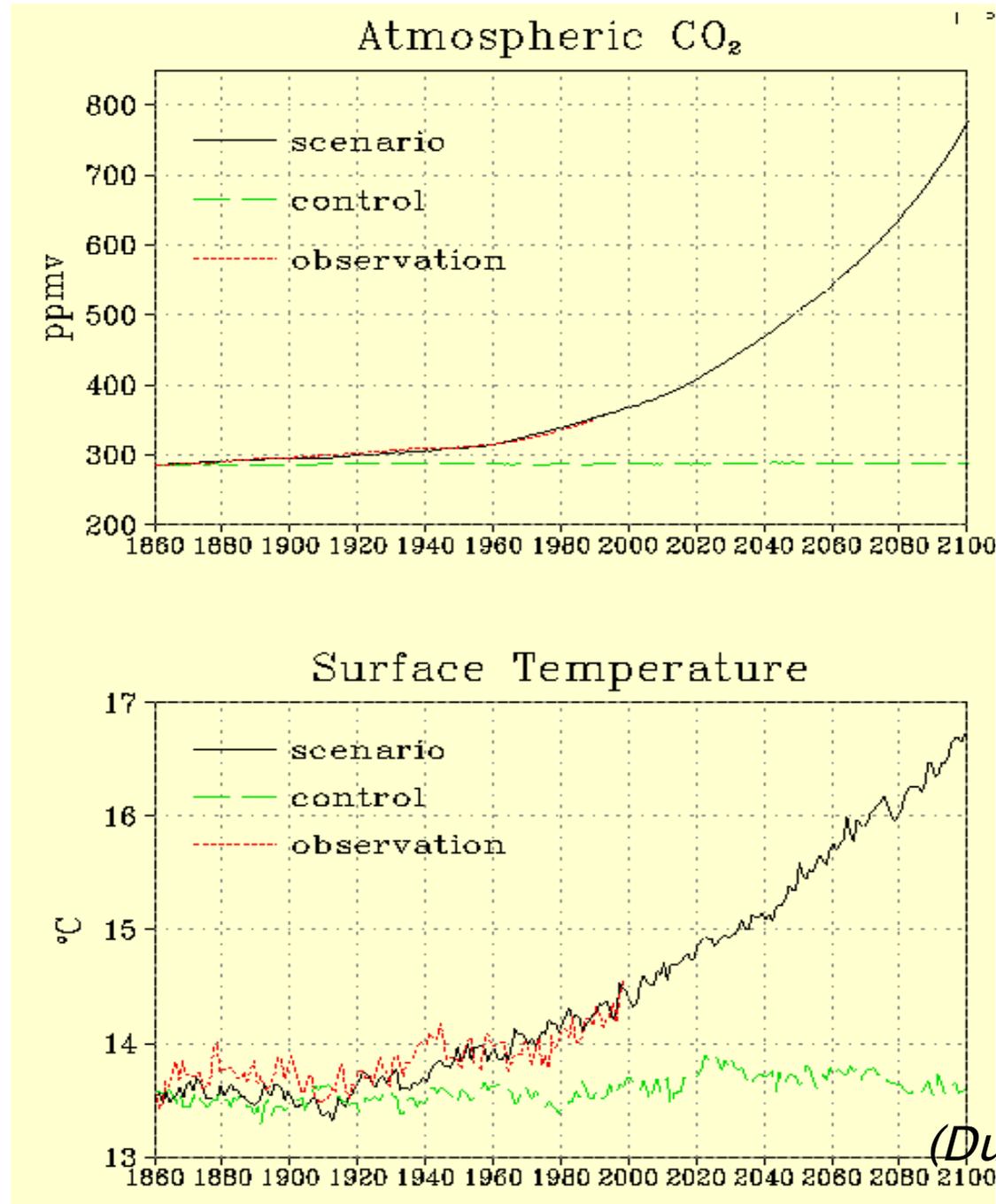
biosphere

Ocean

Rétroaction climat-carbone

Modélisation
couplée
climat-
carbone

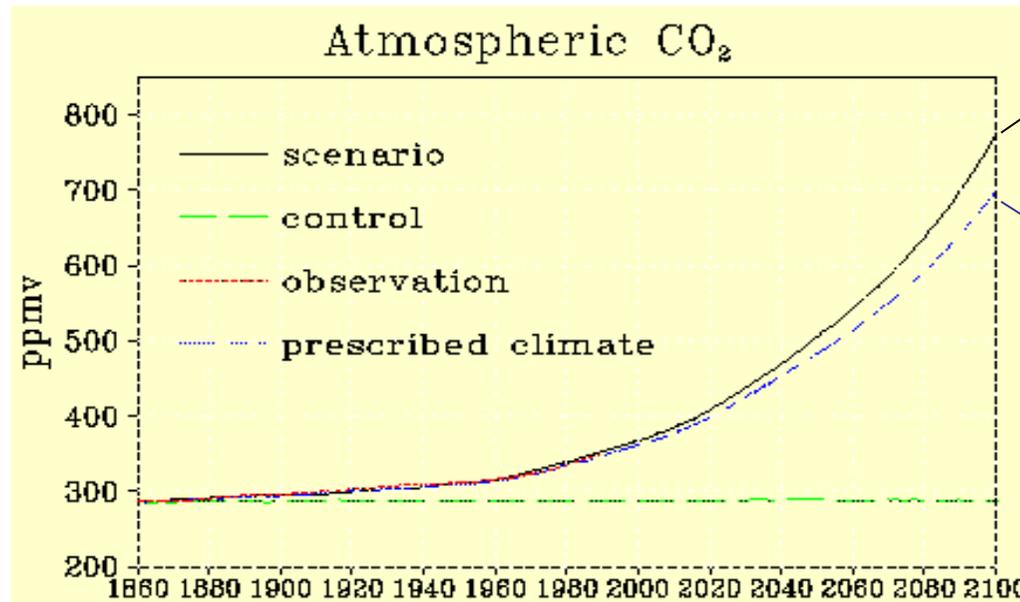
Scenario A2



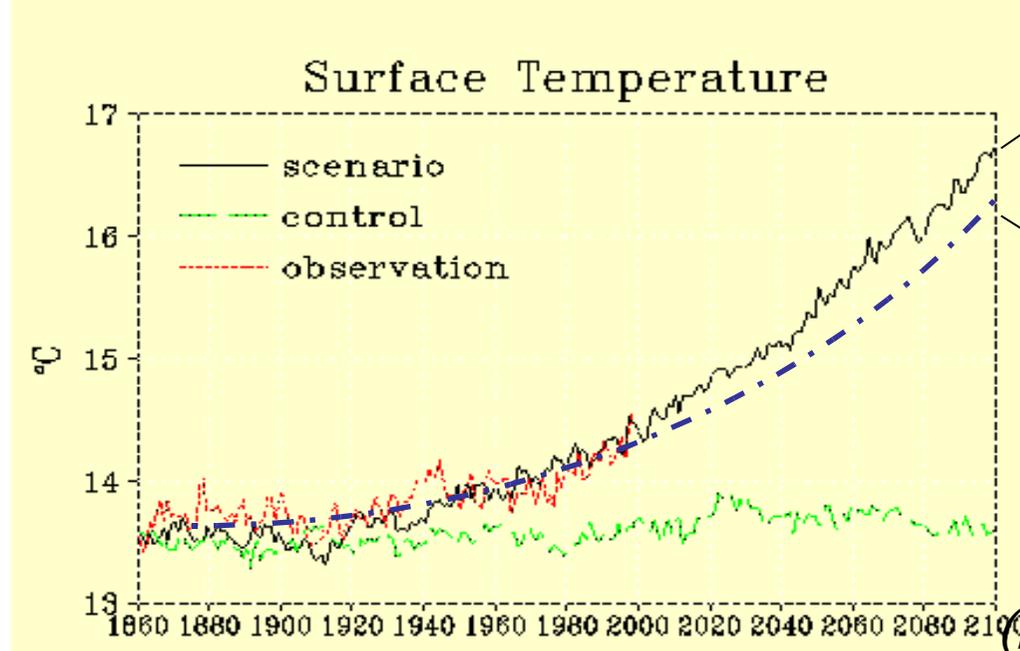
(Dufresne et al, 2002)

Rétroaction climat-carbone

Modélisation
couplée
et découplée
climat-
carbone



couplée
rétroaction Positive
découplée



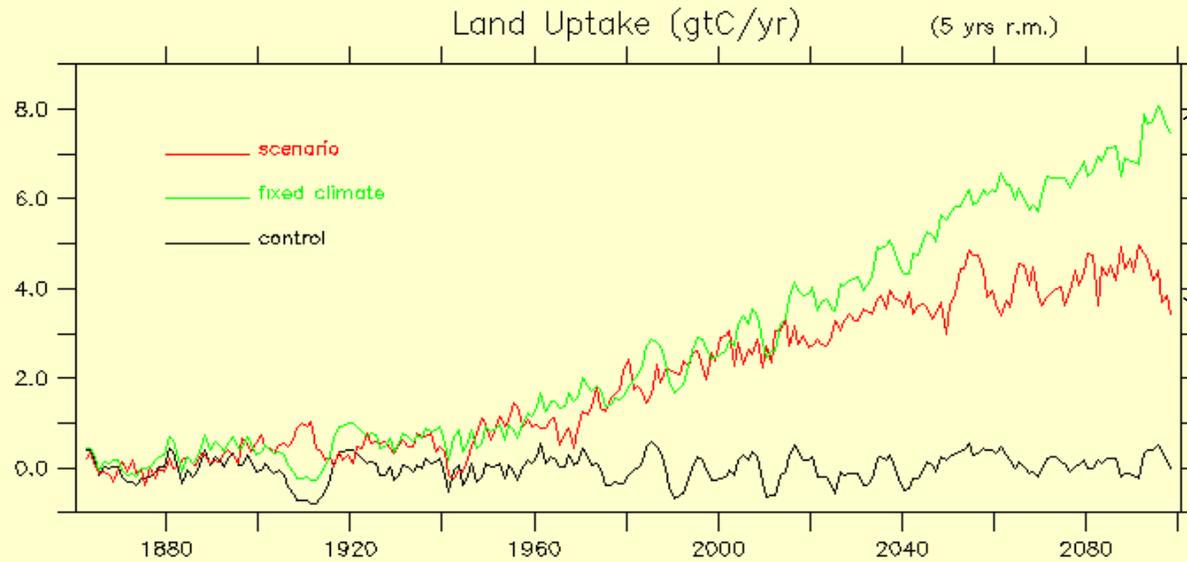
couplée
rétroaction Positive
découplée

(Dufresne et al, 2002)

Rétroaction climat-carbone

Impact climat sur cycle C

Biosphère

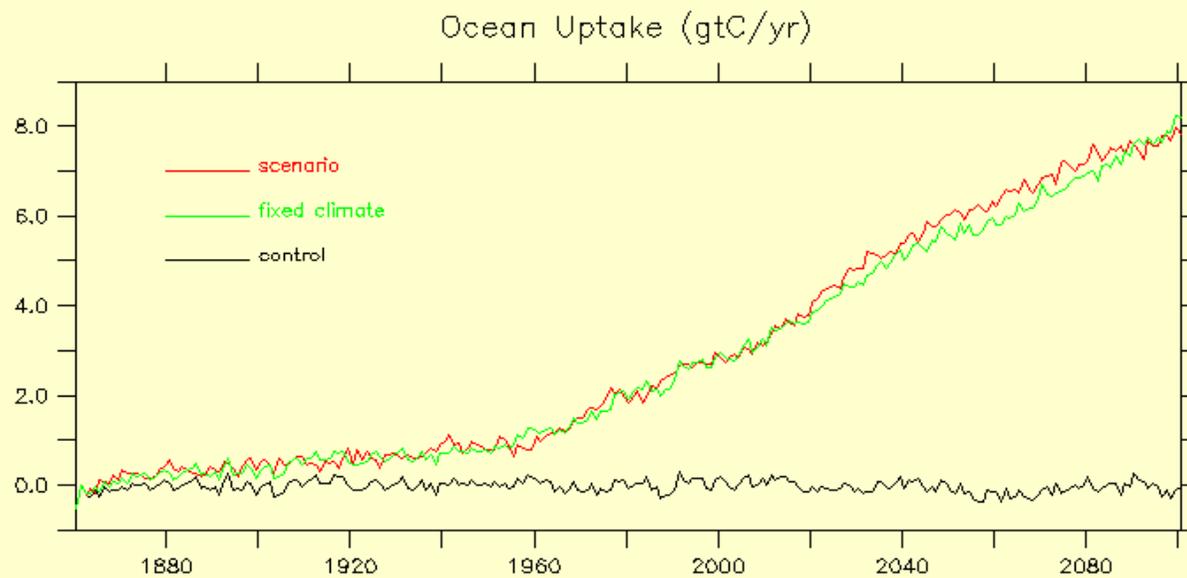


découplée

*Impact
Négatif*

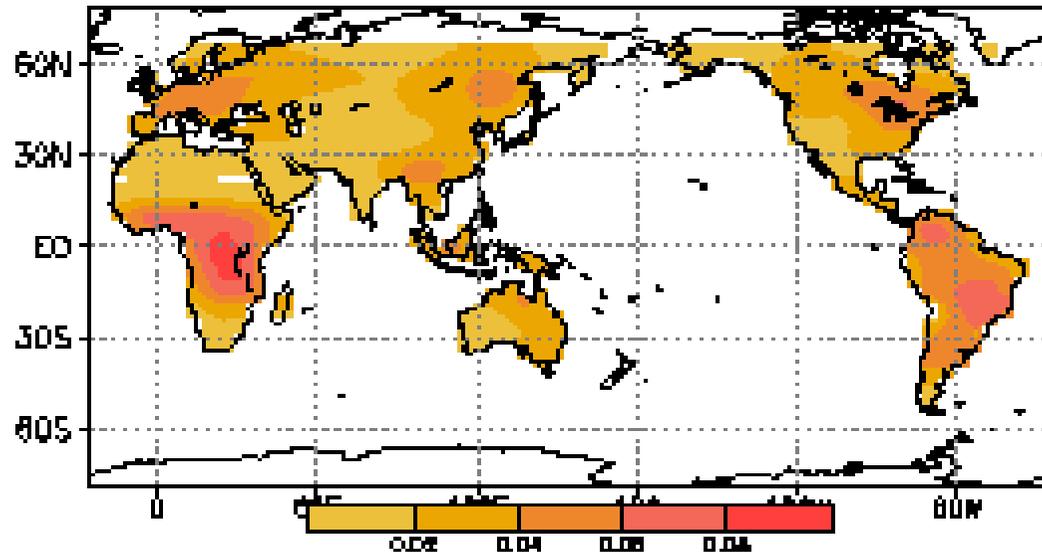
couplée

Océan



Variation du bilan net de carbone vers 2100

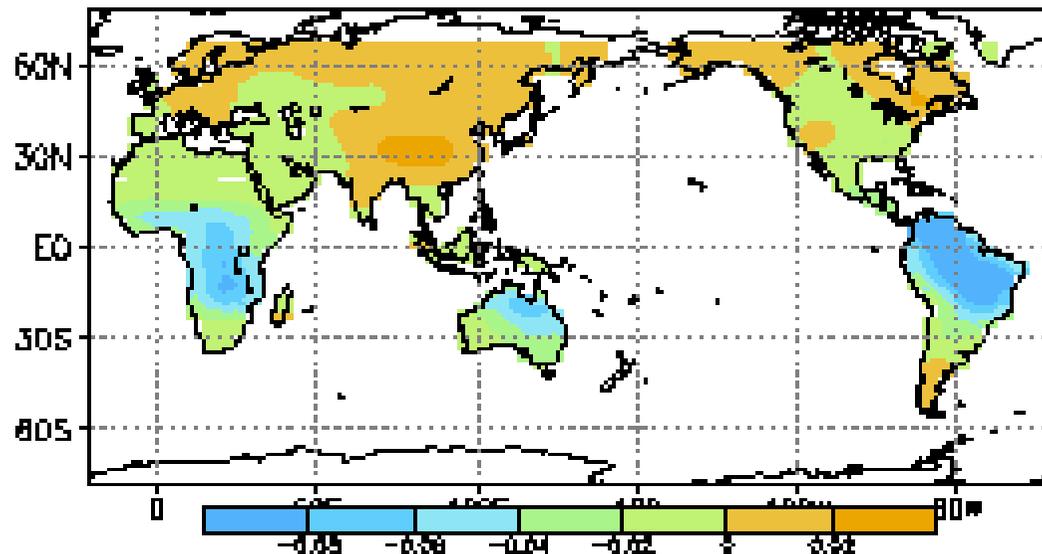
without climate feedback



Simulation découplée.

Impact de l'accroissement de CO₂ sur le puit de carbone

Climate impact



Différence entre simulation couplée et découplée.

Impact du changement climatique le puit de carbone

Conclusions

- Le climat va changer de façon importante si les émissions de CO₂ et d'autres gaz ne sont pas réduites
- la distribution géographique du changement de température est assez bien connue
- ceci n'est pas le cas pour les précipitations
- le stress hydrique des plantes va augmenter (accroissement de l'évaporation)
- le cycle saisonnier de l'eau disponible va changer
- le niveau de la mer va augmenter
- Cyclones? Tempêtes? Orages ?
- L'océan et la végétation continueront-ils à capter la moitié du CO₂ émis par l'homme?

Bibliographie

- **Le climat est-il devenu fou?**, Robert Sadourny, ed. Le Pommier, Paris, 2002. Un excellent petit livre, simple et clair, qui résume les connaissances scientifiques actuelles sur les conséquences climatiques d'une augmentation des gaz à effet de serre.
- **Le réchauffement climatique.** Robert Kandel, ed. PUF, "Que Sais-je ?", Paris, 2002 (rééd. 2004). Un livre plus complet, mais plus difficile d'accès.
- **L'effet de serre. Allons-nous changer le climat ?** Hervé Le Treut, Jean-Marc Jancovici – ed. Flammarion, collection Champs, 2004, 217pp. Un livre qui présente les mécanismes des changements climatiques, les conséquences mais aussi les causes, les pays et les secteurs qui ont les plus fortes émissions...
- **L'effet de serre et l'évolution du climat**, J-L Dufresne, *in Graines de Sciences 8*, Edition Le Pommier, à paraître août 2007.
- **Climat: jeu dangereux**, Jean Jouzel, Anne Debroye, Dunod, Paris, 2004, 212pp.
- **Le réchauffement climatique.** Sciences et Avenir Hors Série N°150, mar-avril 2007.

Sites web

- www.educnet.education.fr/meteo/default.htm Météorologie et enseignement, pour une pédagogie par la météorologie, site Educnet du Ministère de l'Éducation Nationale
- Galileo.CyberScol.qc.ca/InterMet/accueil.html, InterMet (Canada), et notamment ses ressources éducatives.
- www.ens-lyon.fr/Planet-Terre Site Planet-Terre
- www.cnrs.fr/dossiers/dosclim/index.htm, dossier climat du site du CNRS
- www.effet-de-serre.gouv.fr Mission Interministérielle de l'Effet de Serre
- www.ecologie.gouv.fr/Observatoire-national-sur-les.html Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique(ONERC). On y trouve notamment des traductions françaises de textes du GIEC
- www.ipcc.ch Le site du Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC). Site essentiellement en anglais.

An aerial photograph of a vast, snow-covered mountain range. The terrain is rugged with numerous peaks and valleys, all blanketed in white snow. The lighting creates soft shadows, highlighting the contours of the mountains. The overall color palette is dominated by various shades of white and light blue, with some darker blue tones in the shadows and the sky. The word "FIN" is centered in the middle of the image in a white, serif font.

FIN

Prise de vue depuis la navette spatiale