

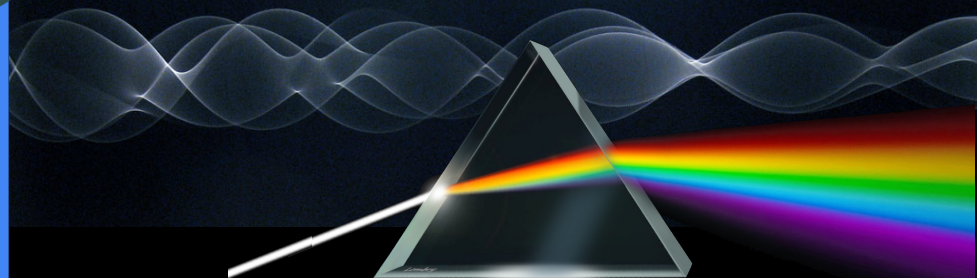
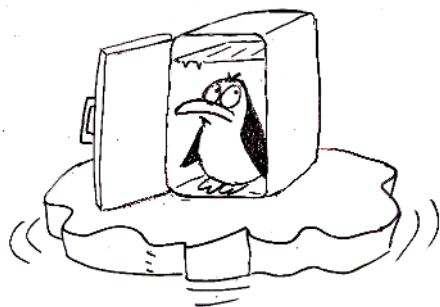
physiquepourtous.unistra.fr



**Physique
pour Tous !**

Physique pour Tous !

Saison 6 - 2023-24



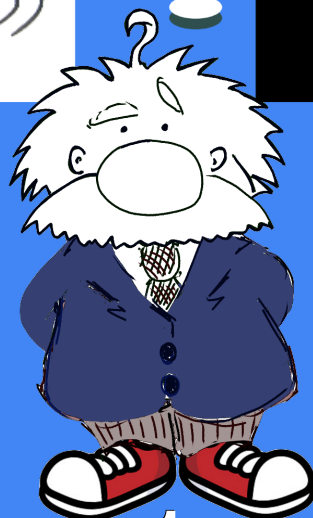
Cycle de Rentrée

Les calottes sont cuites

Physique du changement climatique

T. Pradier (Unistra/IPHC)

À partir du 19 Septembre 2023



Cycle d'Automne

L'emprise des sens

Ecouter & Regarder

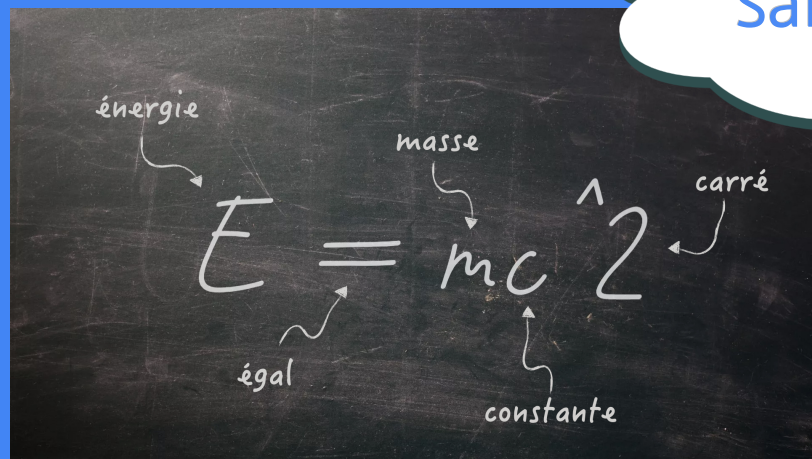
P. Gilliot (CNRS/IPCMS)

À partir du 21/11/2023

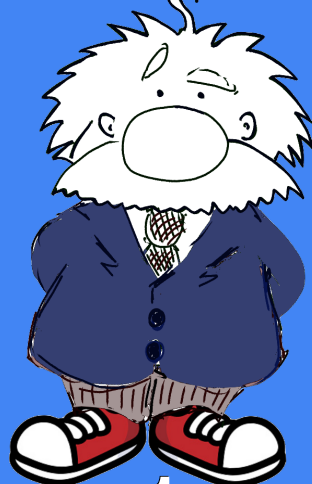
physiquepourtous.unistra.fr

Physique pour Tous !

Saison 6 - 2023-24



Cycle de Printemps
Pourquoi $E = mc^2$
Histoire d'une formule
Y. Schutz (CNRS/IPHC)
À partir du 12 mars 2024

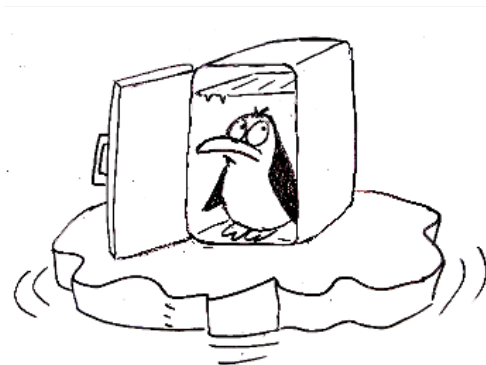


Cycle d'Été
Des expériences ...
...à réaliser chez soi !
Collectif (CNRS/UnistraIPHC)
À partir de mai 2024

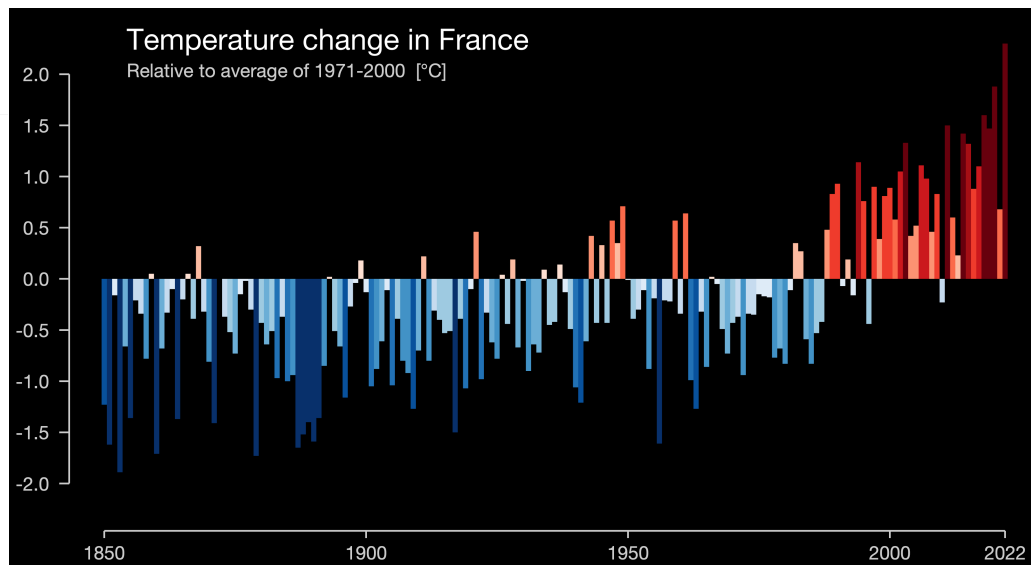
physiquepourtous.unistra.fr



Les calottes sont cuites ! ...ou la physique du changement climatique

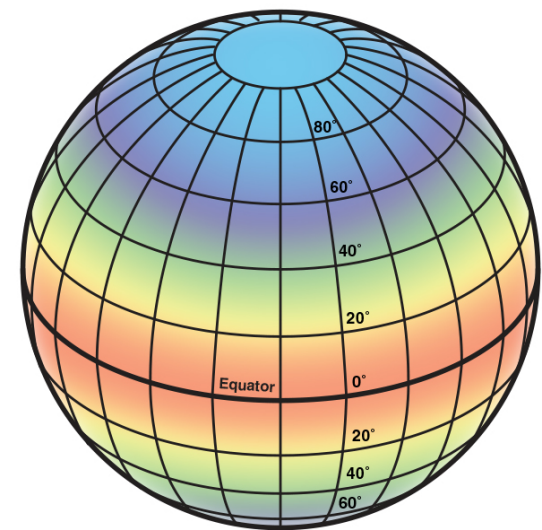


ANNÉE 2023-2024
DE LA PHYSIQUE



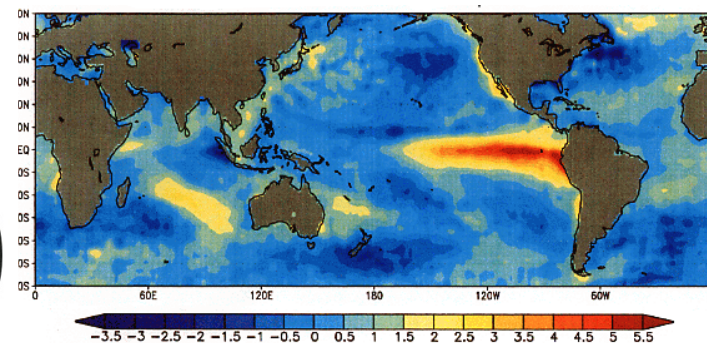


Mardi 26/09 – Il fait bon vivre sur Terre ! *Ou la machine climatique terrestre*



- A Tropical
- B Dry
- C Temperate
- D Continenta
- E Polar

ANNÉE 2023-2024
DE LA PHYSIQUE



18h15 → 19h45

Amphithéâtre Fresnel
Institut de Physique
3-5 rue de l'université

Aussi en visio !



Introduction : climat ou météo ?

MÉTÉOROLOGIE

→ Détermine le temps qu'il fait
ou le temps qu'il va faire
dans les tout prochains jours

→ Prévisions effectuées en
résolvant numériquement des
équations décrivant l'évolution
de l'état de l'atmosphère

→ Essentiellement lié aux
conditions initiales du système



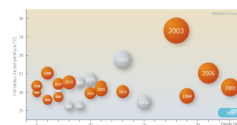
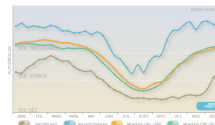
Quels vêtements mettre ?

CLIMATOLOGIE

→ Porte sur les éléments qui
déterminent le temps moyen
et ses changements

→ Fondé sur la description
statistique de grandeurs pertinentes
→ Evolution du climat contrainte
par un forçage extérieur

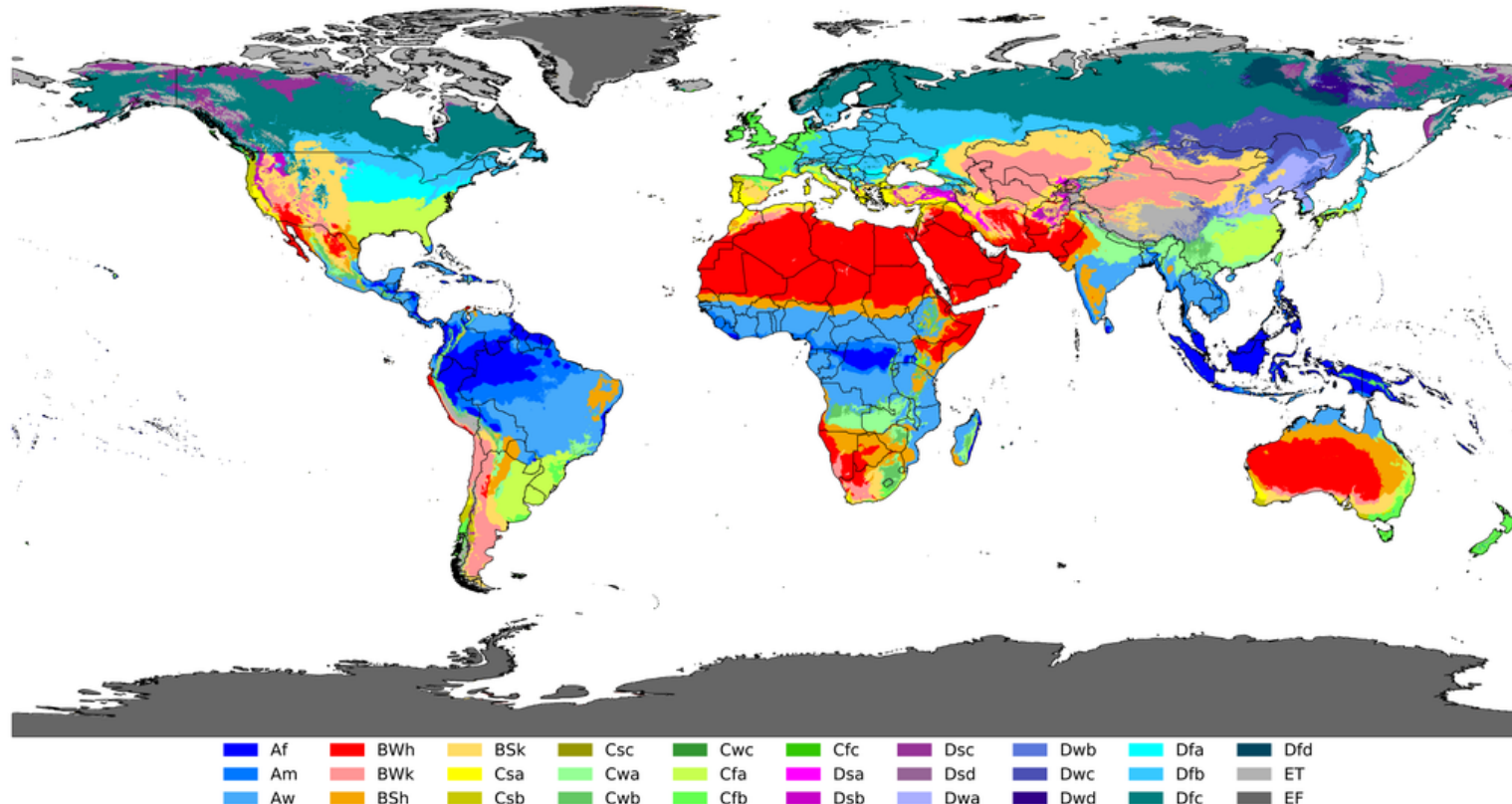
→ Indépendant des conditions initiales
du système



Ma garde-robe

Introduction : DES climats...

Köppen-Geiger climate classification map (1980-2016)



Source: Beck et al.: Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution, Scientific Data 5:180214, doi:10.1038/sdata.2018.214 (2018)

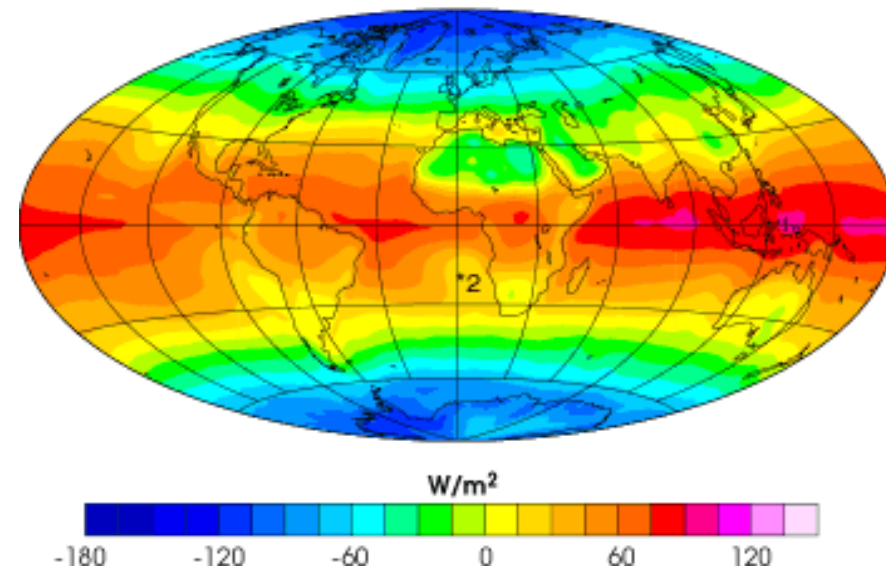
Quelques ordres de grandeurs

- Rayon Terre $R_T \sim 6400 \text{ km}$
→ Surface terrestre $S_T = 4 \pi R_T^2 \sim 5,1 \times 10^8 \text{ km}^2$
- Accélération de la pesanteur $g \sim 10 \text{ m/s}^2$
- Pression atmosphérique au sol $P_{\text{sol}} \sim 10^5 \text{ Pa}$
= Force / Surface = $(M_{\text{atm}} \times g) / S_T$
→ Masse l'atmosphère $M_{\text{atm}} \sim 5,1 \times 10^{18} \text{ kg} = 5,1 \times 10^6 \text{ Gtonnes}$
- Concentration de $\text{CO}_2 \sim 400 \text{ ppm} = 400 \text{ molécules / millions de molécules d'air}$
→ $\sim 280 \text{ ppm}$ en 1870
→ 1 ppm de $\text{CO}_2 = 5,1 \times 10^6 \text{ Gt} / 10^6 / (M_C / M_{\text{air}}) \sim 2 \text{ Gt C}$
→ il faut ajouter 2 Gt de C pour augmenter la concentration en CO_2 de 1 ppm(v)
- Emissions humaines actuelles $\sim 8 \text{ Gt de C}$
→ 50 % reste dans l'atmosphère
→ **chaque année + 2ppm de CO_2 !**
→ **Environ 500 Gt C depuis 1870**

→ **activités humaines commensurables avec évolution planétaire**

Net Radiation

1985-1986



Rapide historique

Découverte du rayonnement infrarouge

Terre = équilibre chauffage solaire refroidissement radiatif

Détermination de la « constante solaire »

Gaz à effet de serre = vapeur d'eau, CO_2

Spectre d'absorption de l'atmosphère terrestre dans l'IR

Doublement de CO_2 → accroissement de T de 5°C

Mise en évidence de l'accroissement de CO_2

W. Herschel (1800)

J. Fourier (1824)

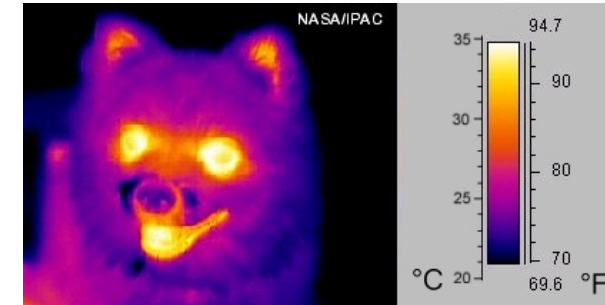
C. Pouillet (1838)

J. Tyndall (1863, 1865)

S. Langley (1886)

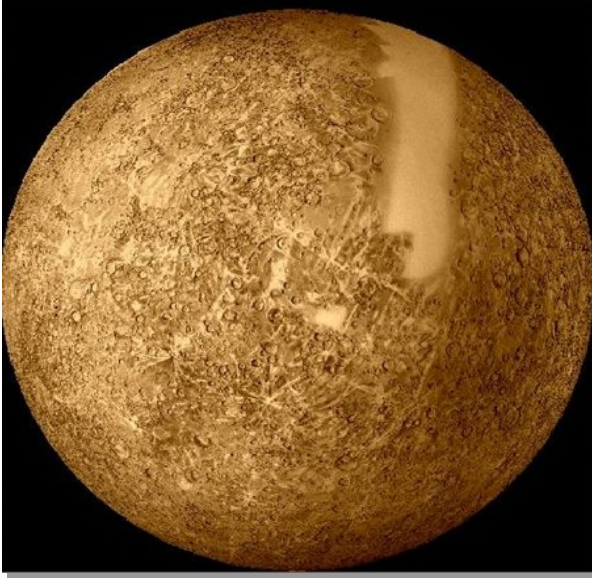
S. Arrhenius (1896)

D. Keeling (1976)



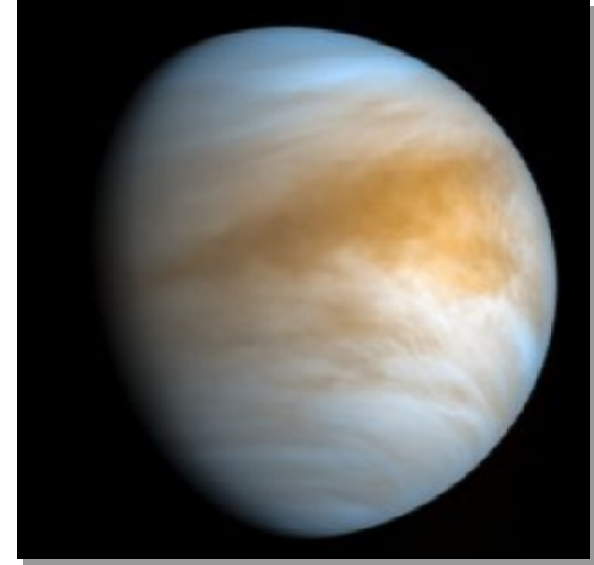
1 – Effet de serre

MERCURE

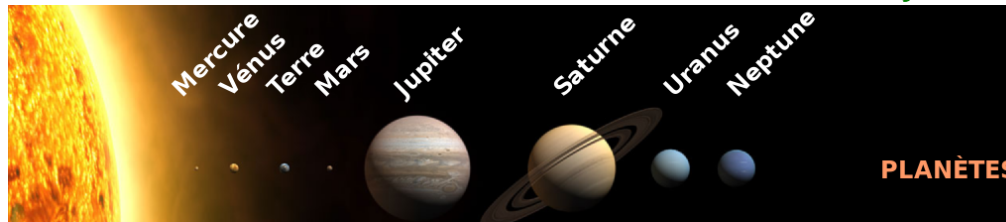


- pas d'atmosphère / **pas d'effet de serre**
- **-180°C la nuit et +430°C le jour**

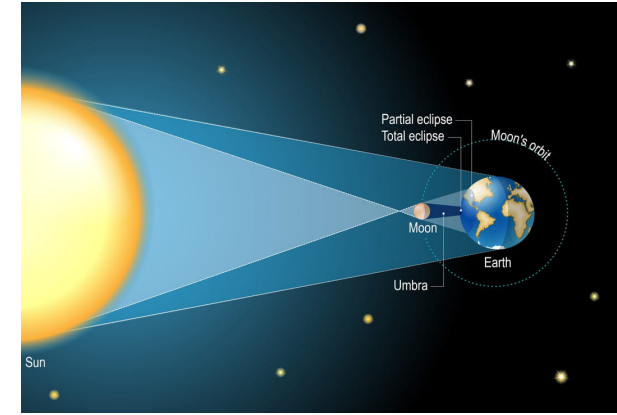
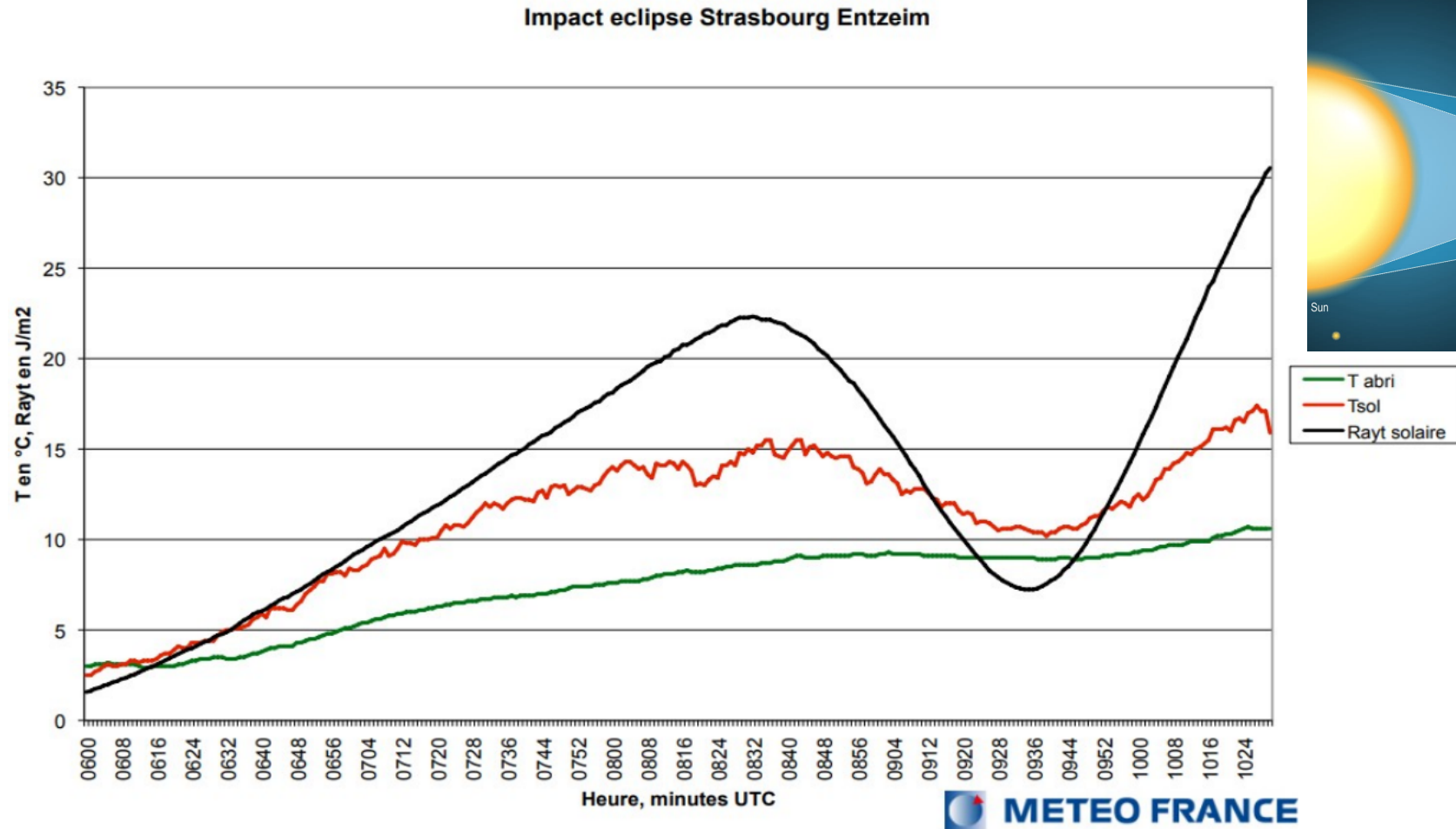
VENUS



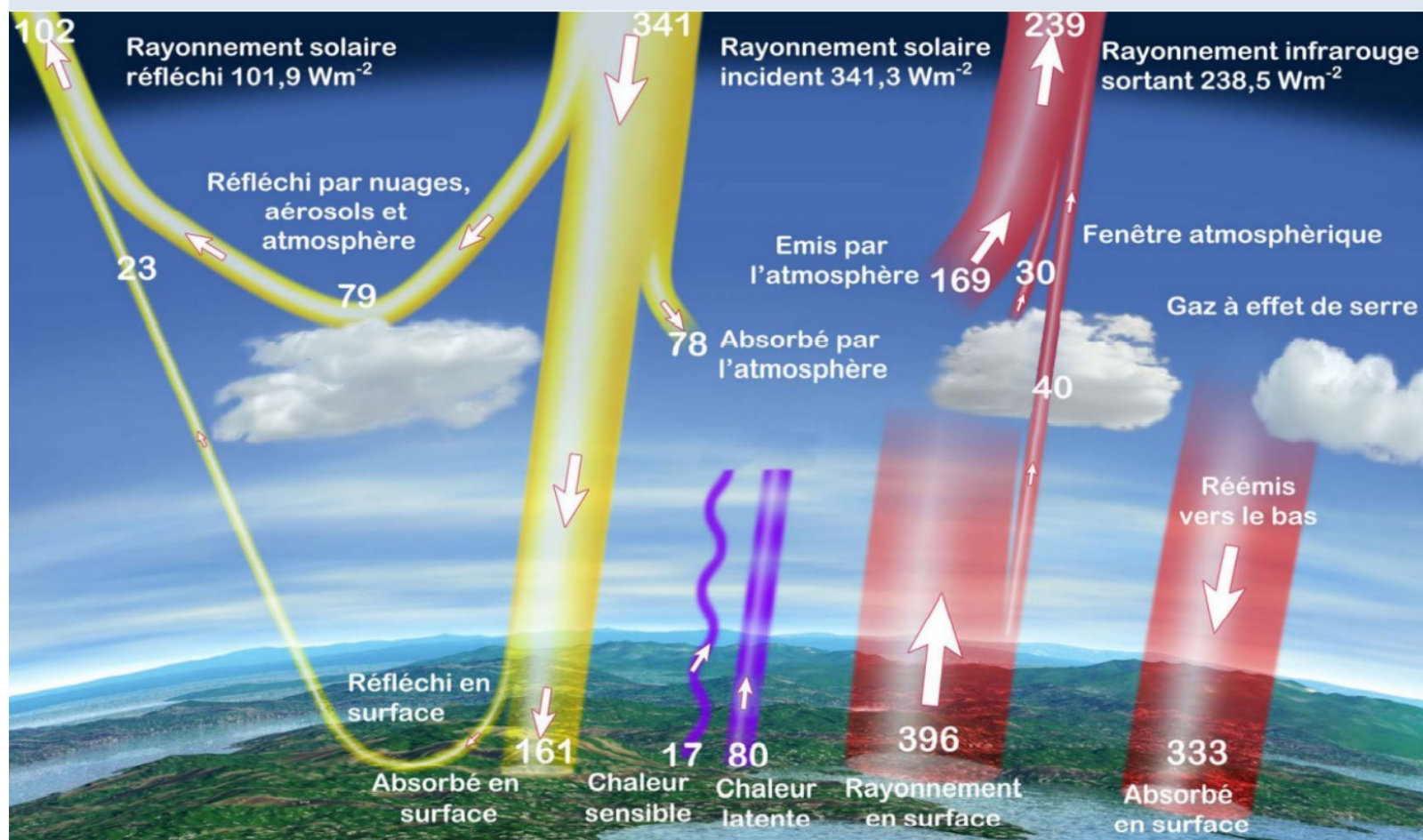
- atmosphère très dense/ **effet de serre intense**
- **+450°C de jour comme de nuit**



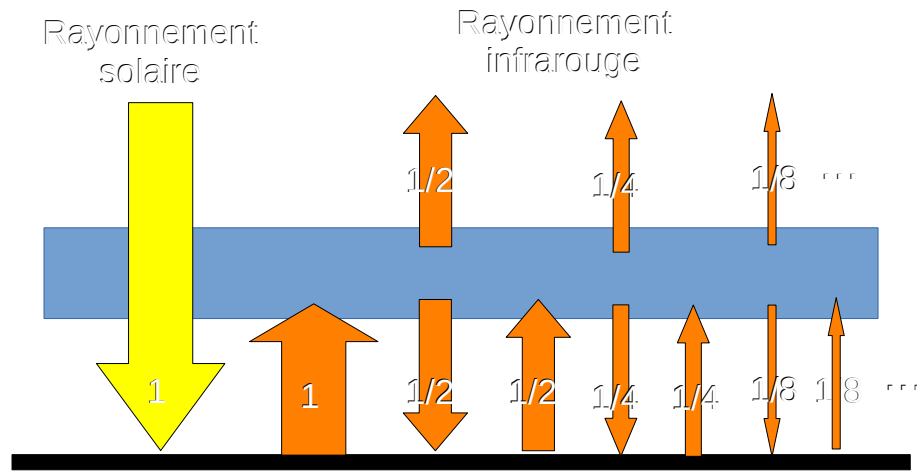
1 – Effet de serre



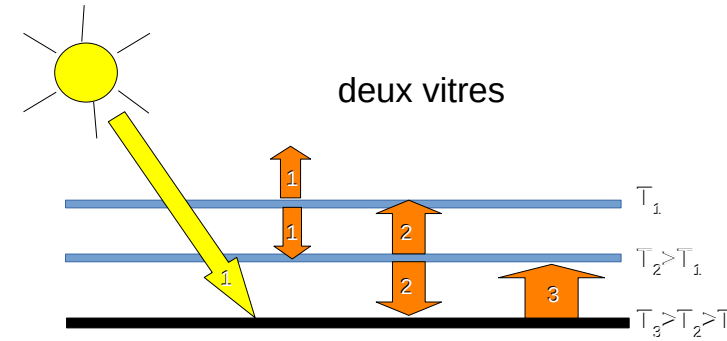
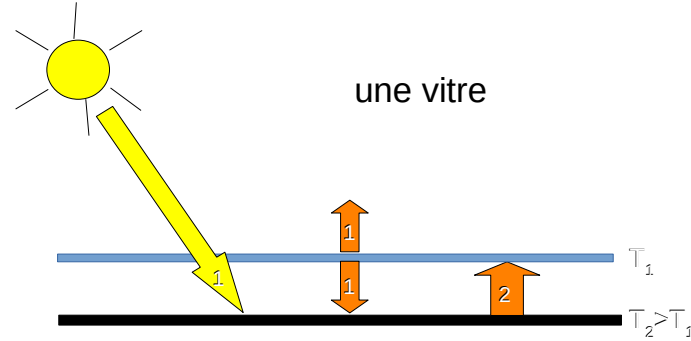
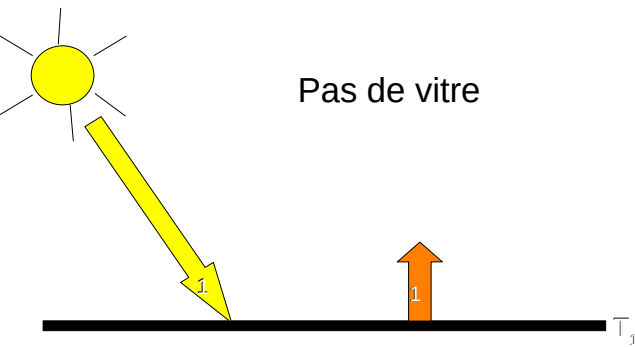
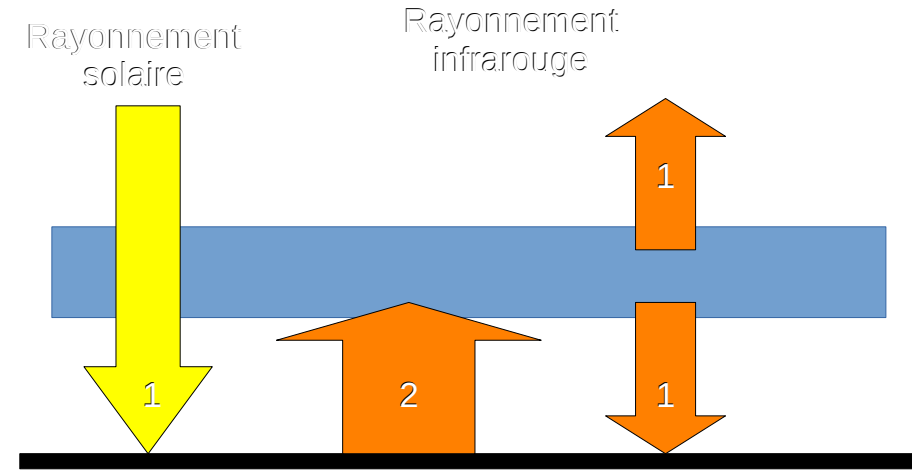
1 – Effet de serre



1 – Effet de serre

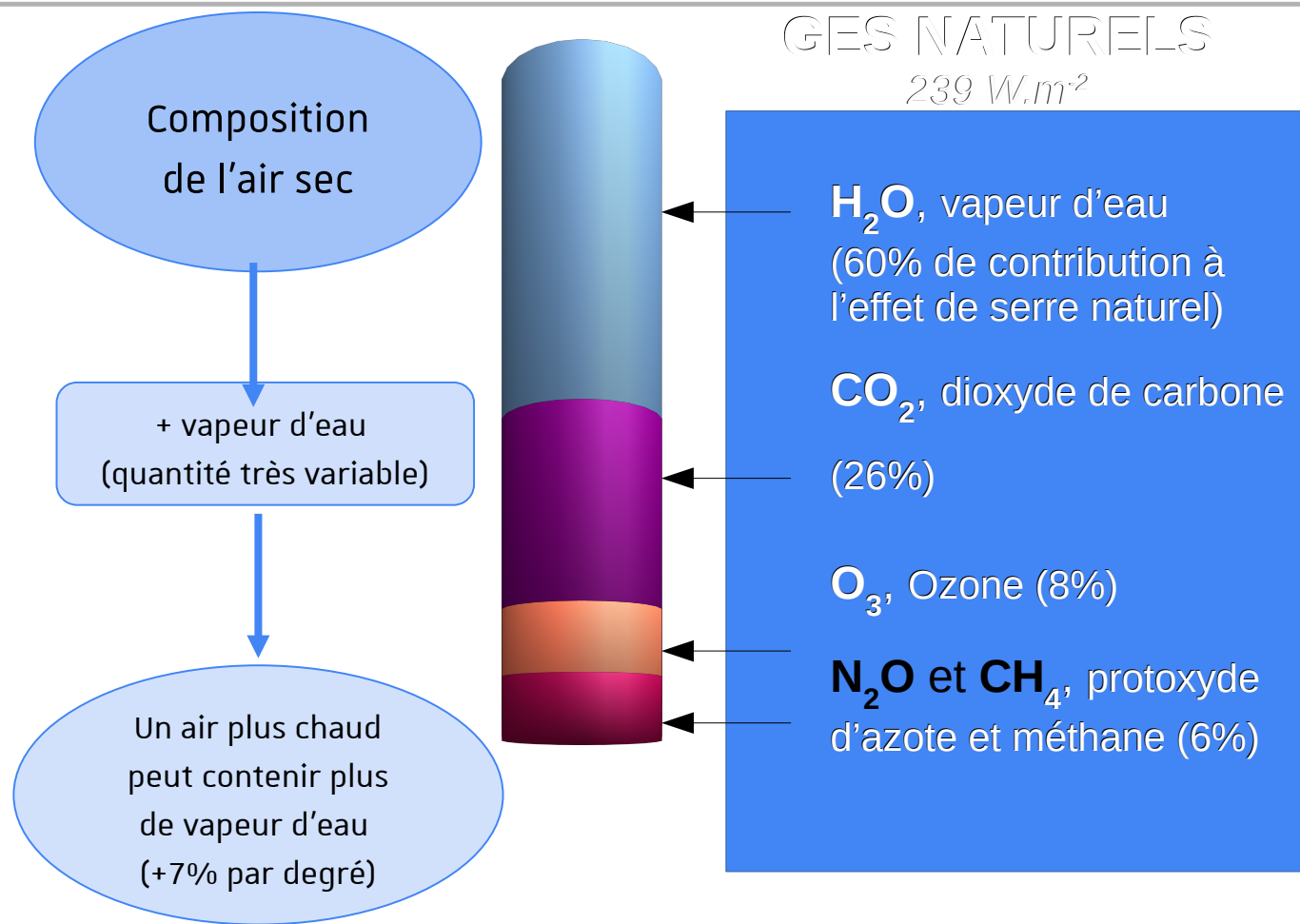


]]

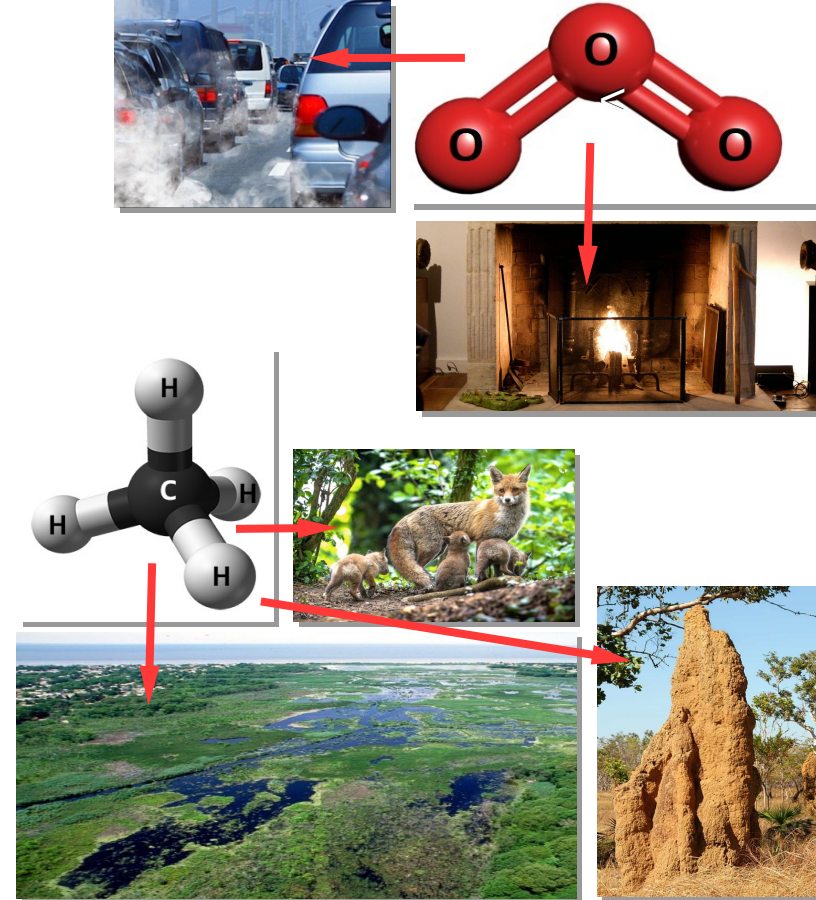
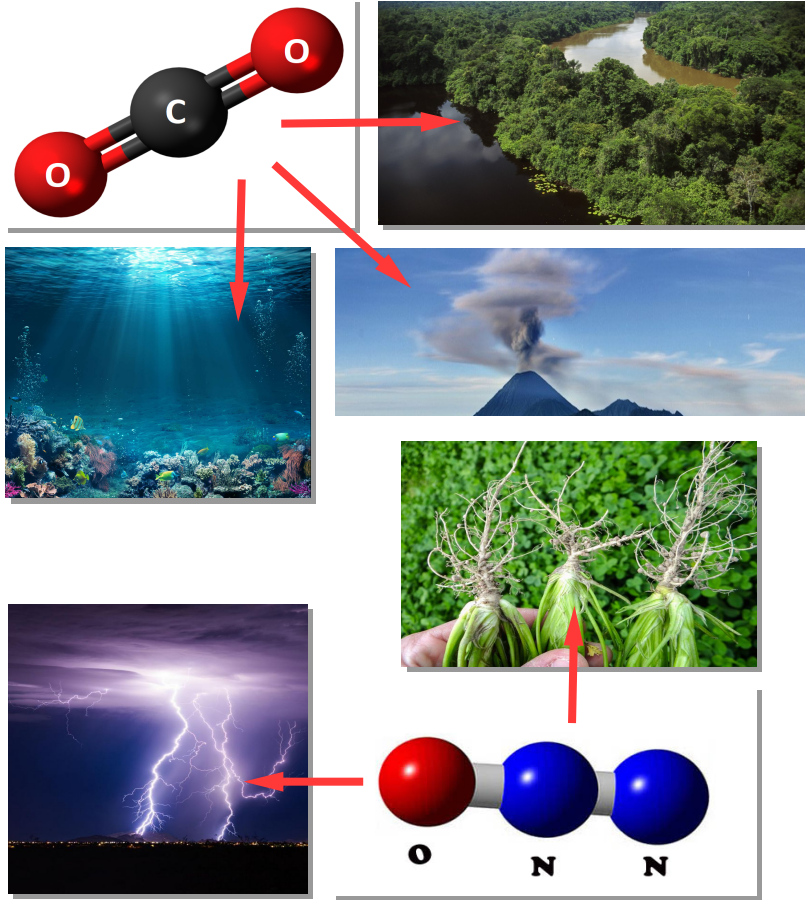


1 – Effet de serre

Azote N ₂	78,09 %
Oxygène O ₂	20,95 %
Argon Ar	0,93 %
Dioxyde de Carbone CO ₂	Environ 0,03 % aujourd'hui : 0,0412 %
Hélium He	5,24 · 10 ⁻⁴
Krypton Kr	1,0 · 10 ⁻⁴
Hydrogène H ₂	5,0 · 10 ⁻⁵
Xénon Xe	8,0 · 10 ⁻⁶
Ozone O ₃	1,0 · 10 ⁻⁶
Radon Rn	6,0 · 10 ⁻¹⁸



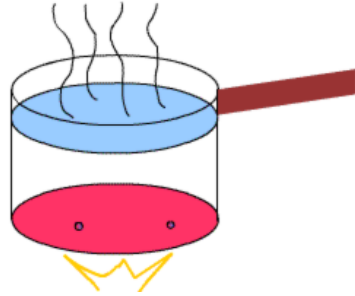
1 – Effet de serre



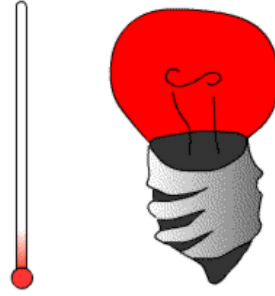
1 – Effet de serre



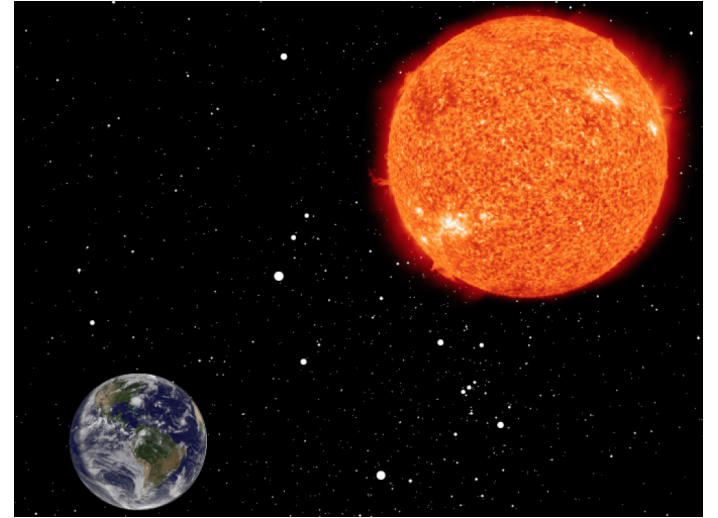
Conduction



Convection



Rayonnement

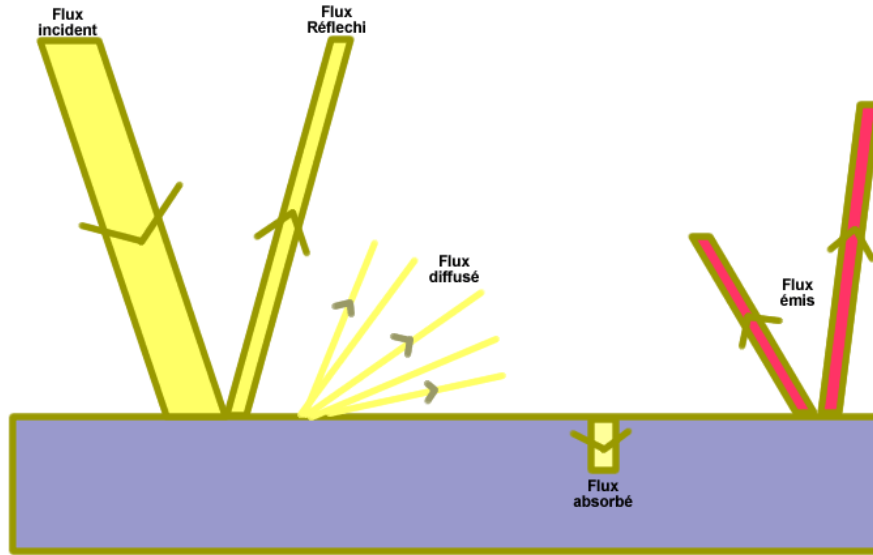


Soleil → Terre

Vide !

→ Rayonnement prépondérant

1 – Effet de serre

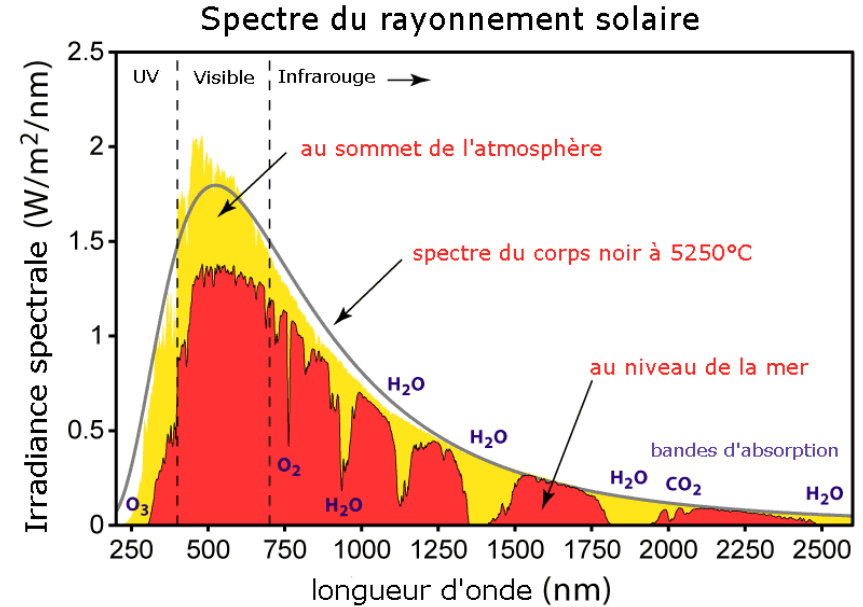


$$F_{\text{ref}} = F_{\text{réfléchi}} + F_{\text{diffusé}}$$

$$\text{Flux incident } F_{\text{incident}} = F_{\text{ref}} + F_{\text{absorbé}}$$

$$\text{Flux partant } F_{\text{partant}} = F_{\text{ref}} + F_{\text{émis}}$$

$$\text{Equilibre radiatif} \rightarrow F_{\text{incident}} = F_{\text{partant}} \rightarrow F_{\text{émis}} = F_{\text{absorbé}}$$



Corps noir :

$$F_{\text{ref}} = 0 \rightarrow F_{\text{partant}} = F_{\text{émis}}$$

Loi de Planck $\rightarrow$ loi Wien $\lambda T \propto \frac{hc}{k_B}$

$$F_{\text{émis}} = \sigma T^4$$

1 – Effet de serre

Absorption a = $F_{\text{abs}}/F_{\text{incident}}$

dépend de la longueur d'onde $\rightarrow a_{\text{corps noir}} = 1$

Emission e = $F_{\text{réel émis}}/F_{\text{corps noir émis}} \propto F_{\text{réel émis}}/T^4$

Mais absorption et émission à des longueurs d'ondes différentes....

Surface	0.6 μm (Soleil)	10 μm (25°C)
Marbres blancs	0,5	0,97
Verre	0,1	0,9
Papier blanc	0,3	0,95
Océan	0,9	
Sol enneigé	0,3	
Végétation	0,8	0,85

Albédo = $F_{\text{ref}}/F_{\text{émis}}$

$\rightarrow A = 1 - a(0.6\mu\text{m})$ (Soleil)

Parfaitement noire $A = 0$

Parfaitement blanche $A = 1$

Océans $A = 5-10 \%$

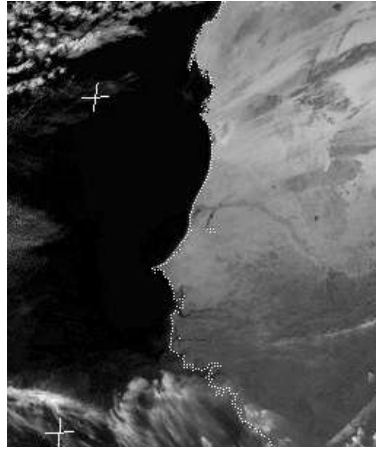
Sable $A = 25-40 \%$

Glace $A = 60 \%$

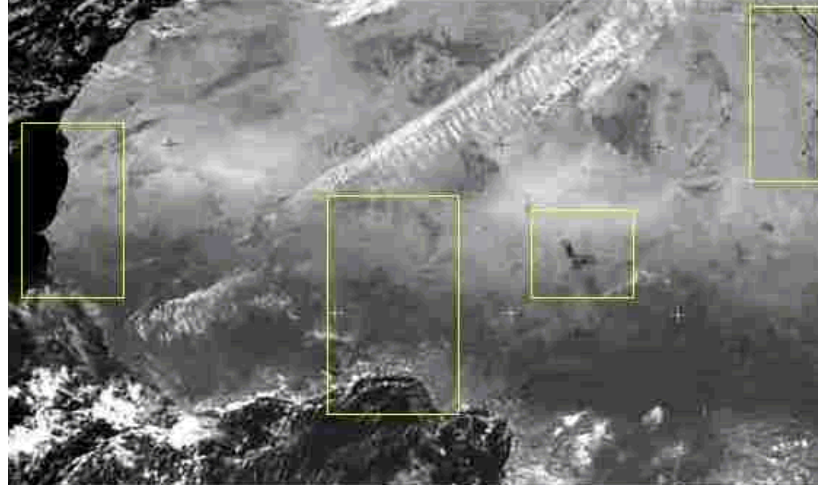
Neige $A = 90 \%$

Moyen $A = 30 \%$

1 – Effet de serre



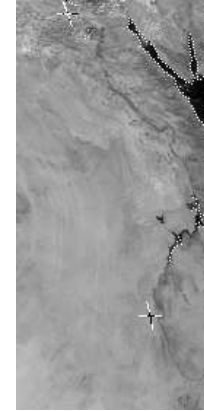
Fleuve Sénégal
→ Végétation diminue
l'albédo



Fleuve Niger
→ Végétation diminue
l'albédo



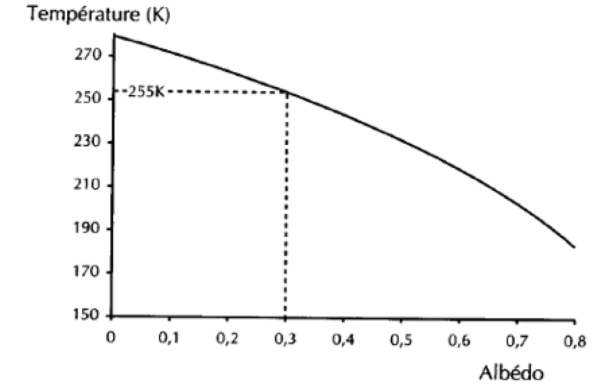
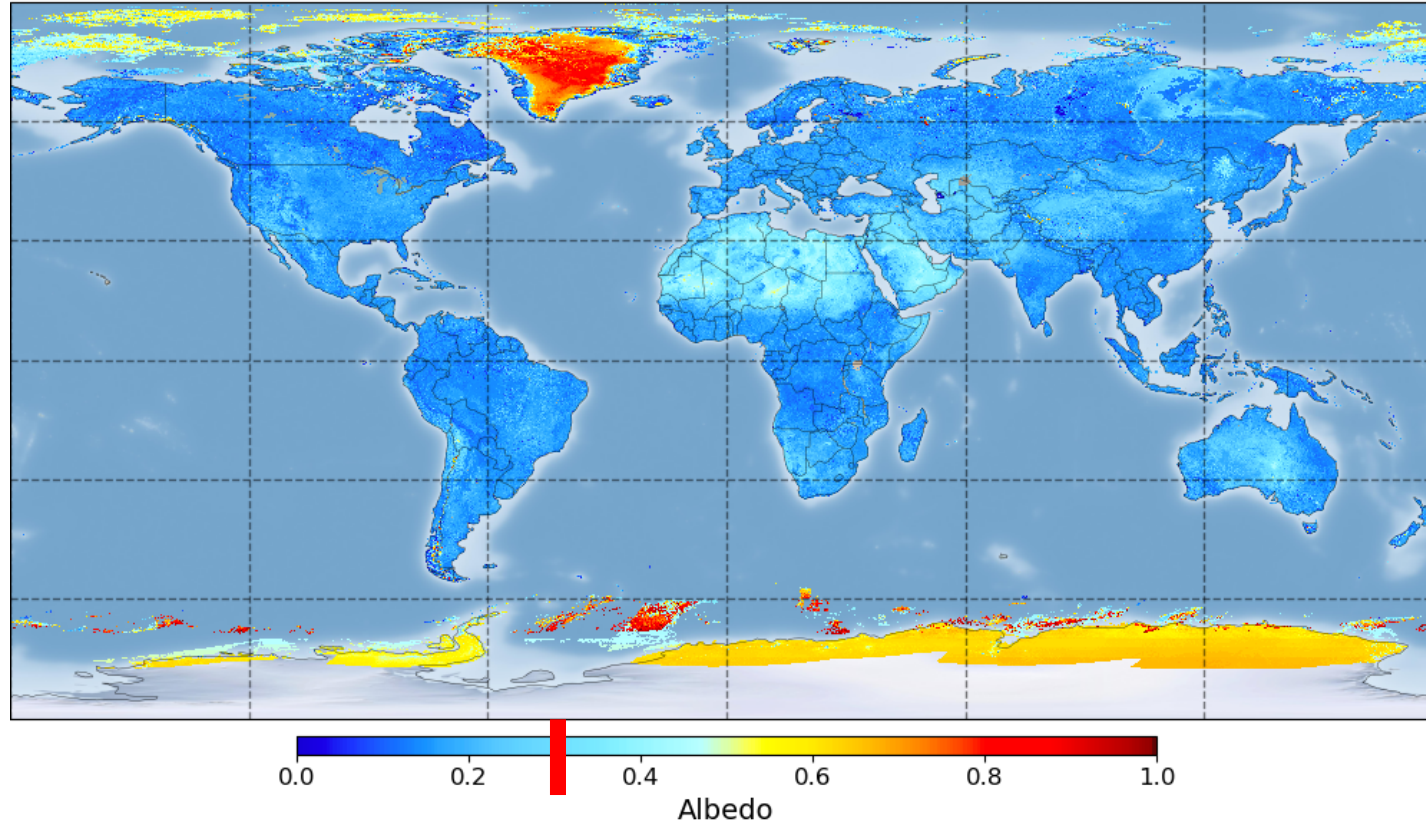
Lac Tchad
→ faible albédo de la
surface aquatique



Nil
→ faible albédo de la
Mer Rouge

1 – Effet de serre

NOAA-20 VIIRS Global Albedo (Daily Composite): Aug 01, 2021



Sans effet de serre

→ 255K = -18°C

1 – Effet de serre

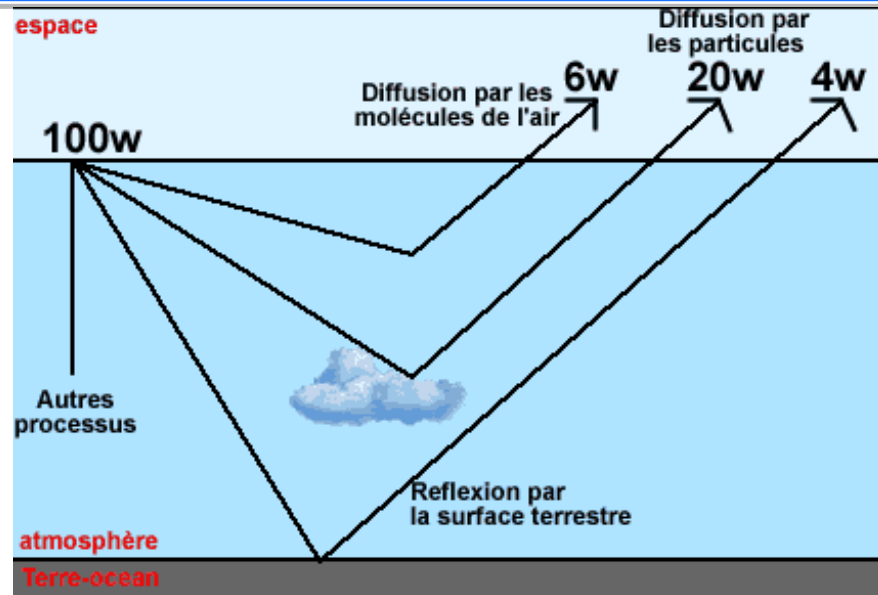
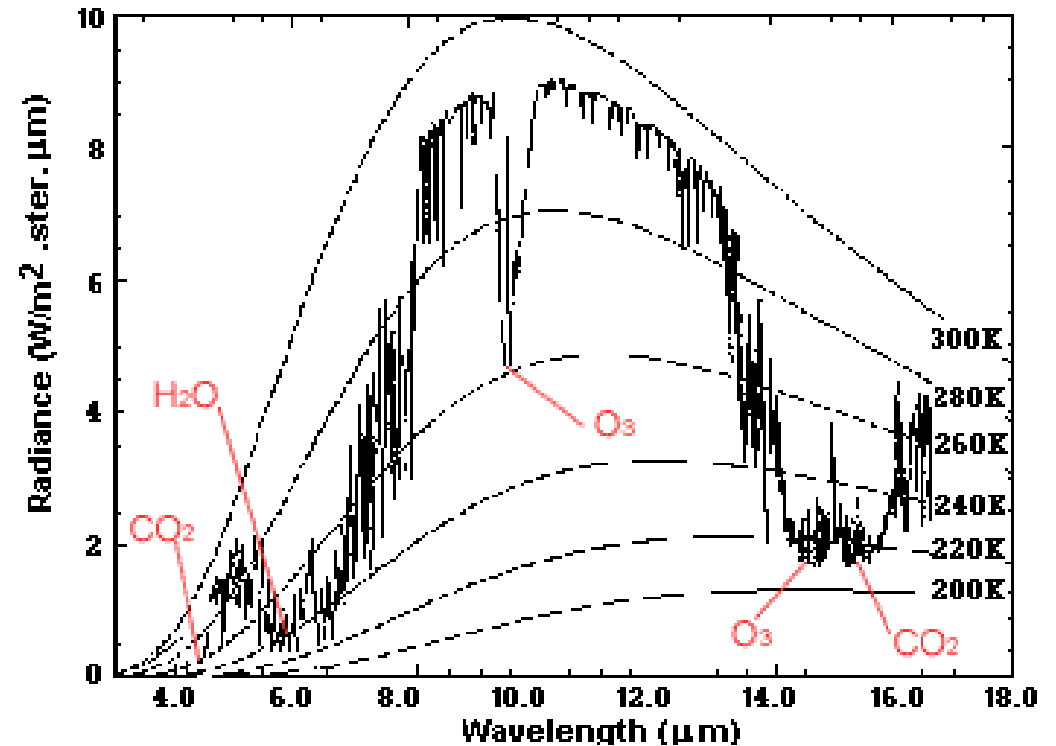
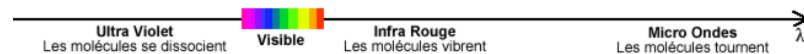


Fig. 1a

High resolution atmospheric absorption spectrum and comparative blackbody curves

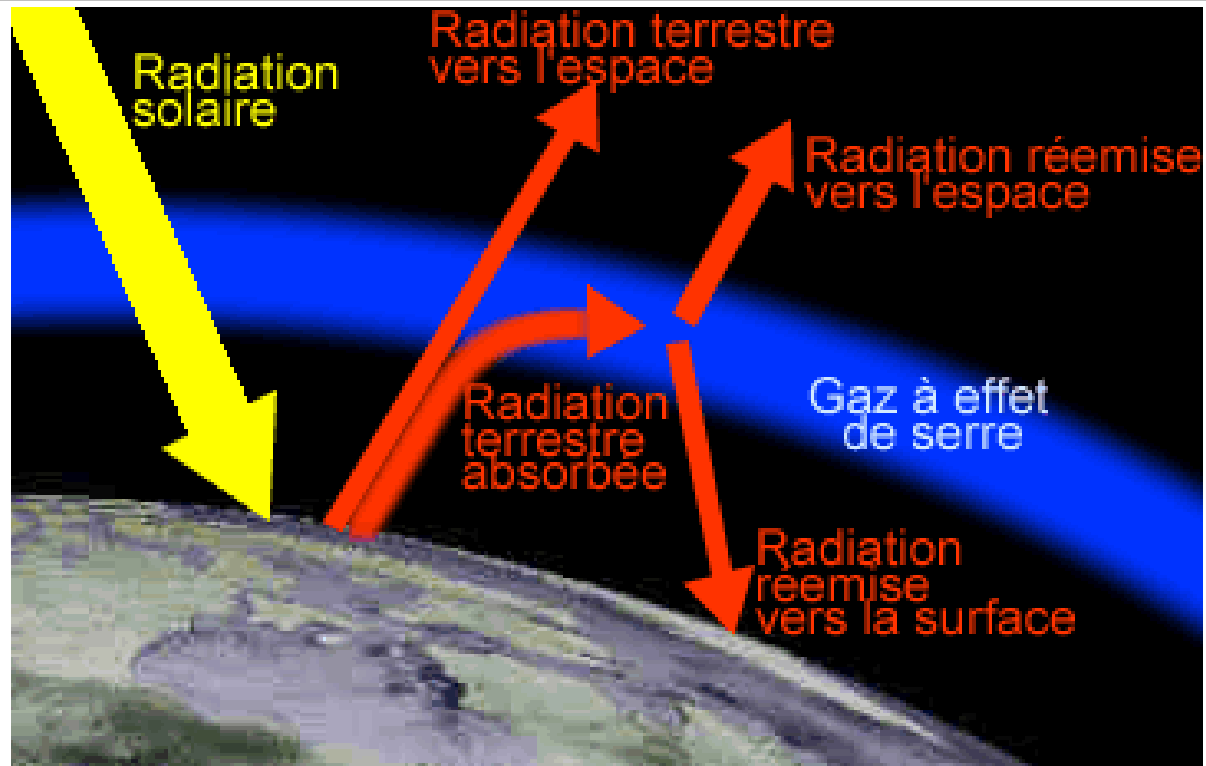


Absorption par GES dans l'atmosphère



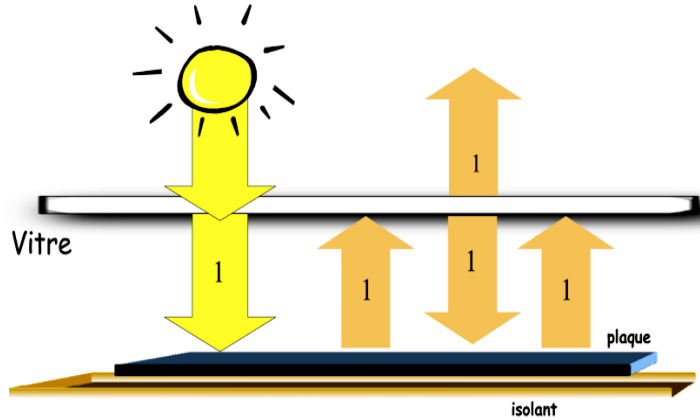
Absorption par GES dans l'atmosphère
→ émission de rayonnement

1 – Effet de serre

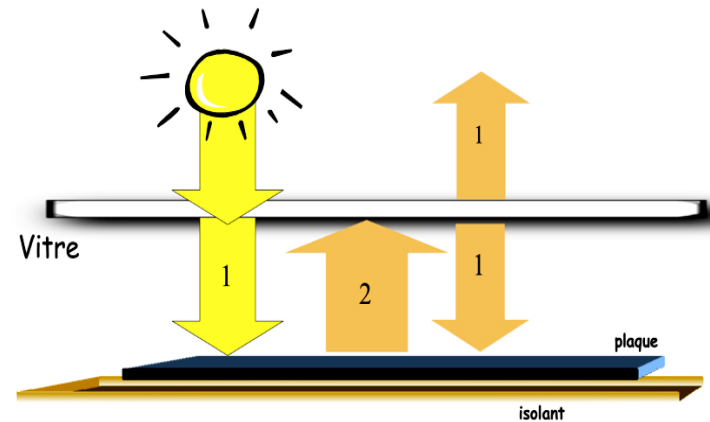


Absorption par GES dans l'atmosphère
→ émission de rayonnement
→ une partie vers la surface !

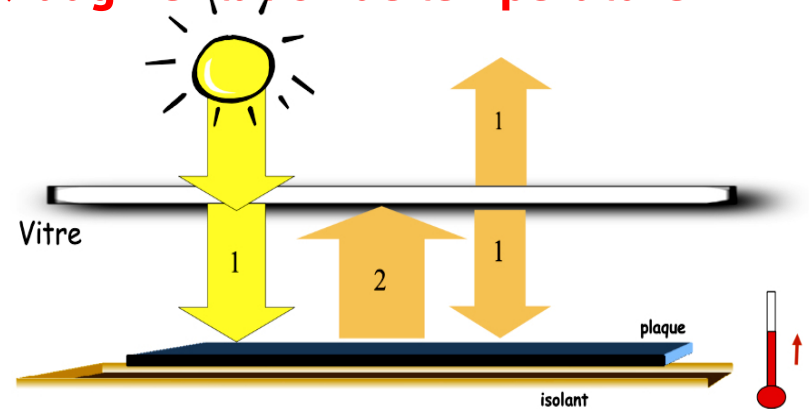
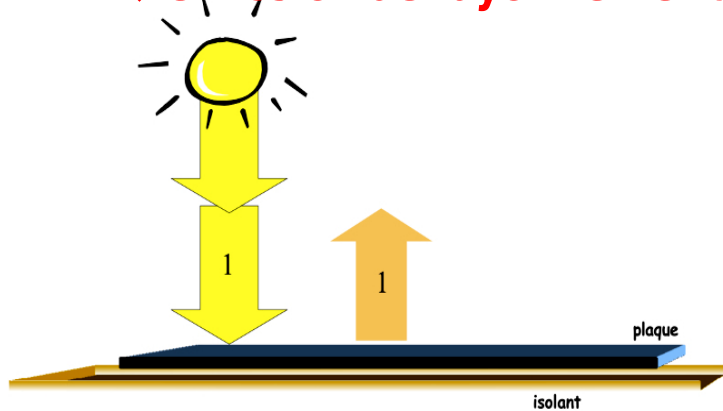
1 – Effet de serre



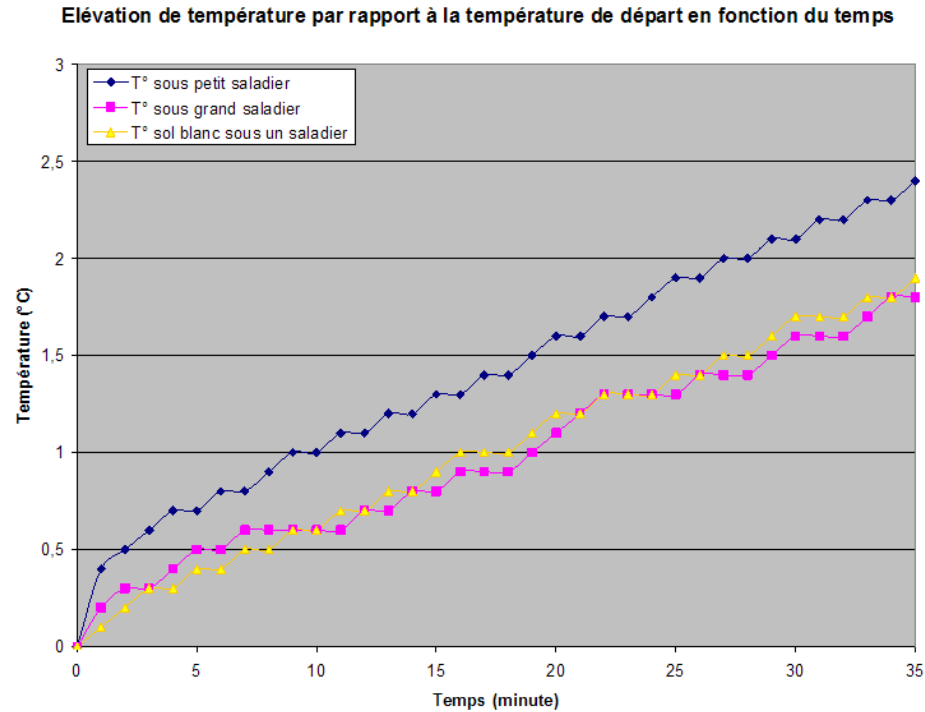
=



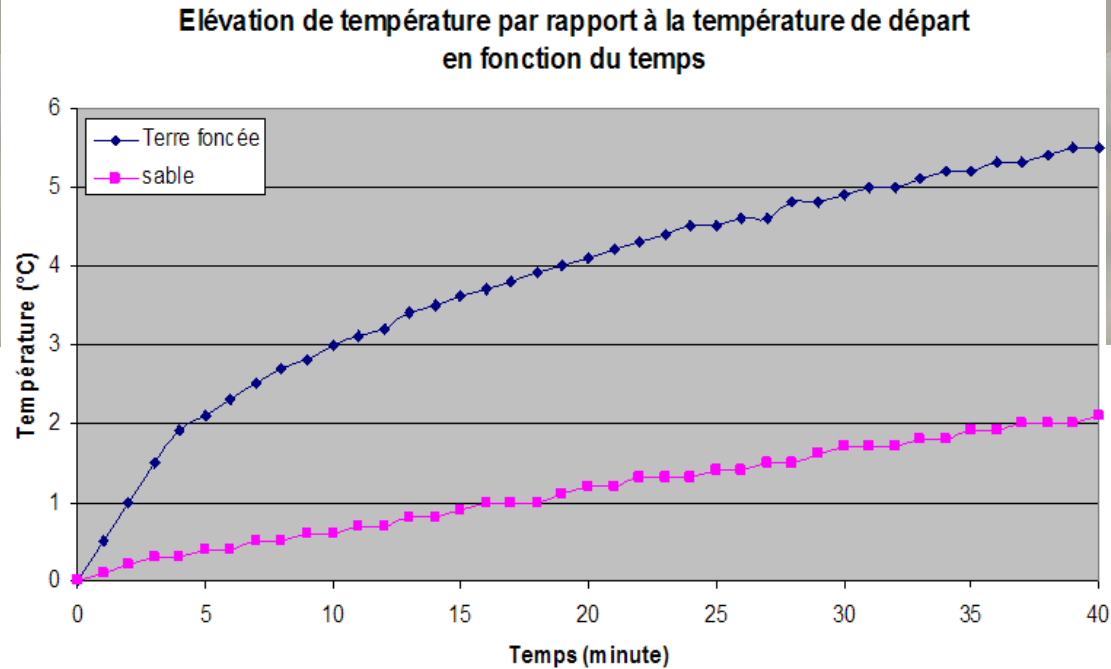
Placer une vitre (= Gaz à Effet de Serre) créer une « résistance au refroidissement »
→ émission de rayonnement infrarouge → augmentation de température



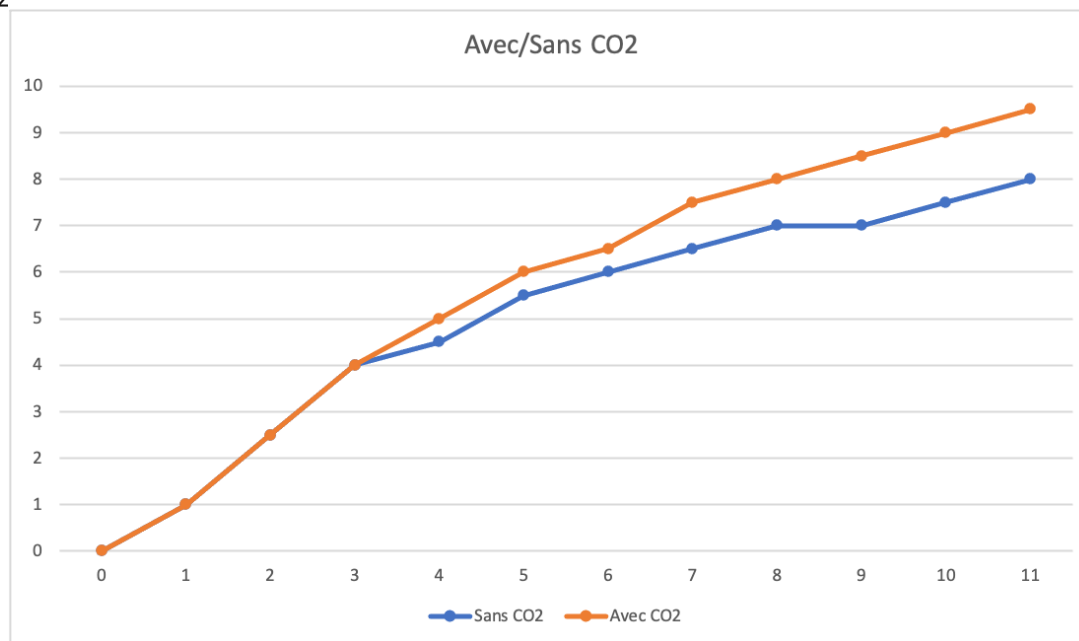
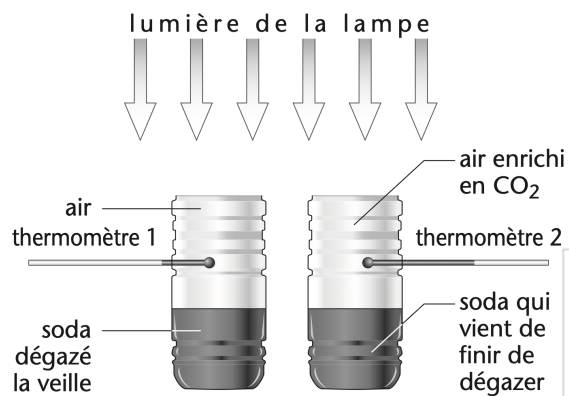
1 – Effet de serre - expériences



1 – Effet de serre - expériences



1 – Effet de serre - expériences

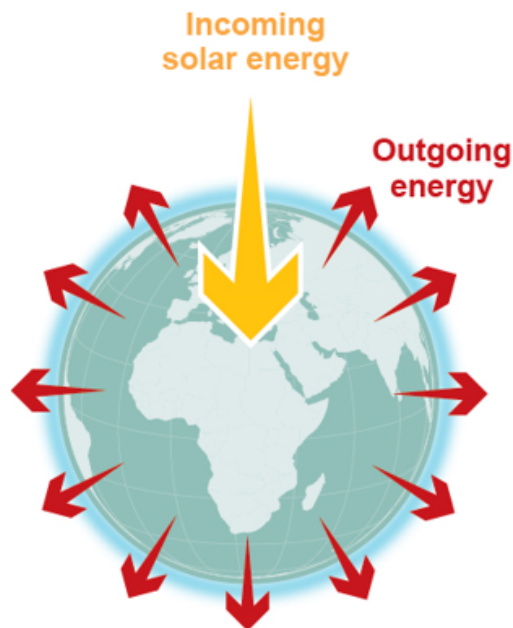


2 – Transport de chaleur

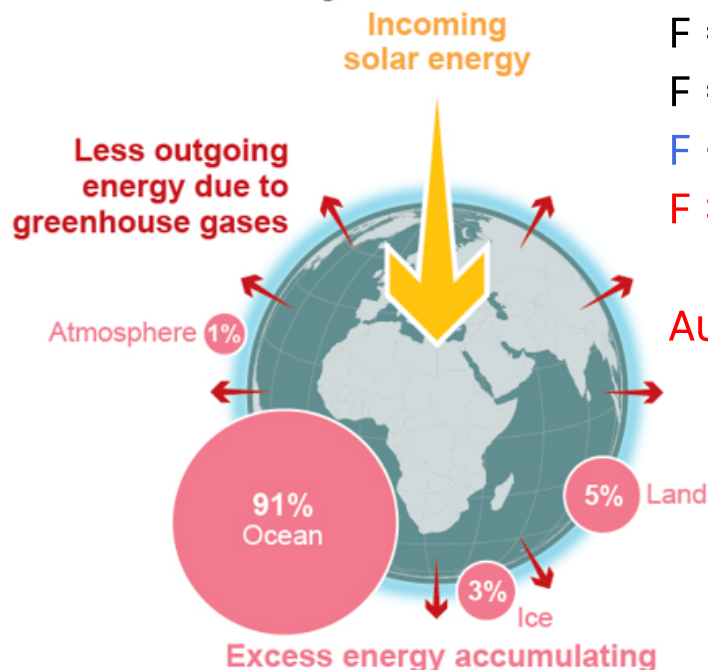
FAQ 7.1: The Earth's energy budget and climate change

Since at least 1970, there has been a persistent imbalance in the energy flows that has led to **excess energy being absorbed by different components of the climate system**.

Stable climate: in balance



Today: imbalanced



Forçage radiatif

$$F = P_{\text{reçue}} - P_{\text{sortante}}$$

$F = 0 \rightarrow \text{équilibre} \rightarrow T = \text{constante}$

$F < 0 \rightarrow \text{refroidissement}$

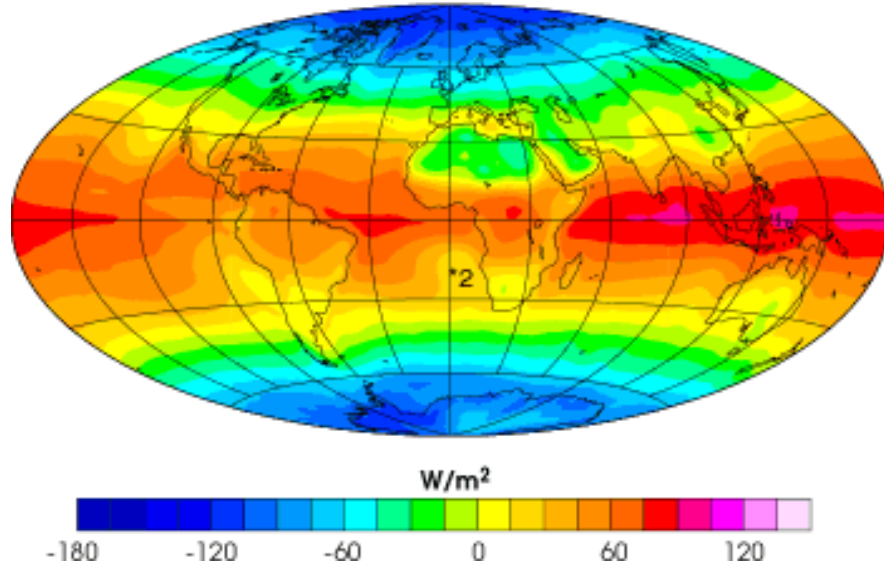
$F > 0 \rightarrow \text{réchauffement}$

Aujourd'hui $F = 2.7 \text{ W/m}^2$ (AR6)

2 – Transport de chaleur

Net Radiation

1985-1986

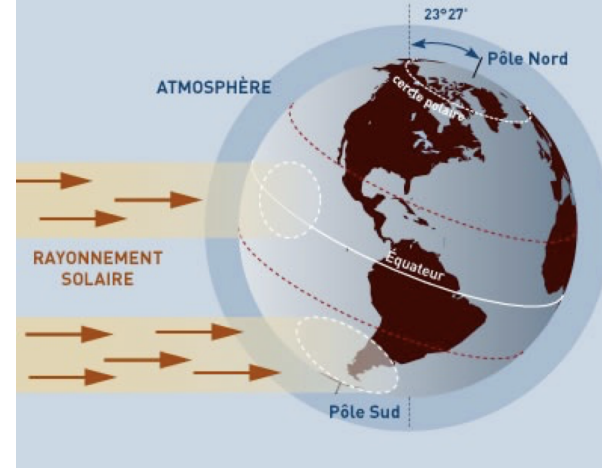


L'Equateur reçoit plus d'énergie que les pôles

- Océan et atmosphère mis en mouvement pour transporter la chaleur de l'Equateur vers les pôles
- Différence de température ainsi amoindrie
- Océan 50% Atmosphère 50%

ÉCLAIREMENT AUX PÔLES

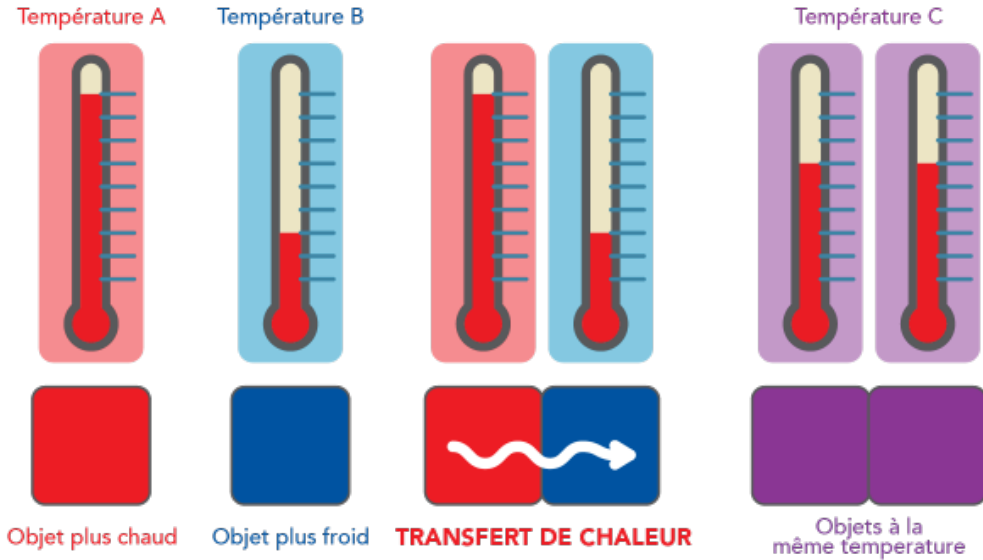
L'énergie solaire reçue par $1m^2$ de sol est plus réduite aux pôles qu'à l'Equateur, à cause de l'inclinaison terrestre et de l'atmosphère.



2 – Transport de chaleur

En lien avec l'entropie et la Thermodynamique !

TRANSFERT DE CHALEUR



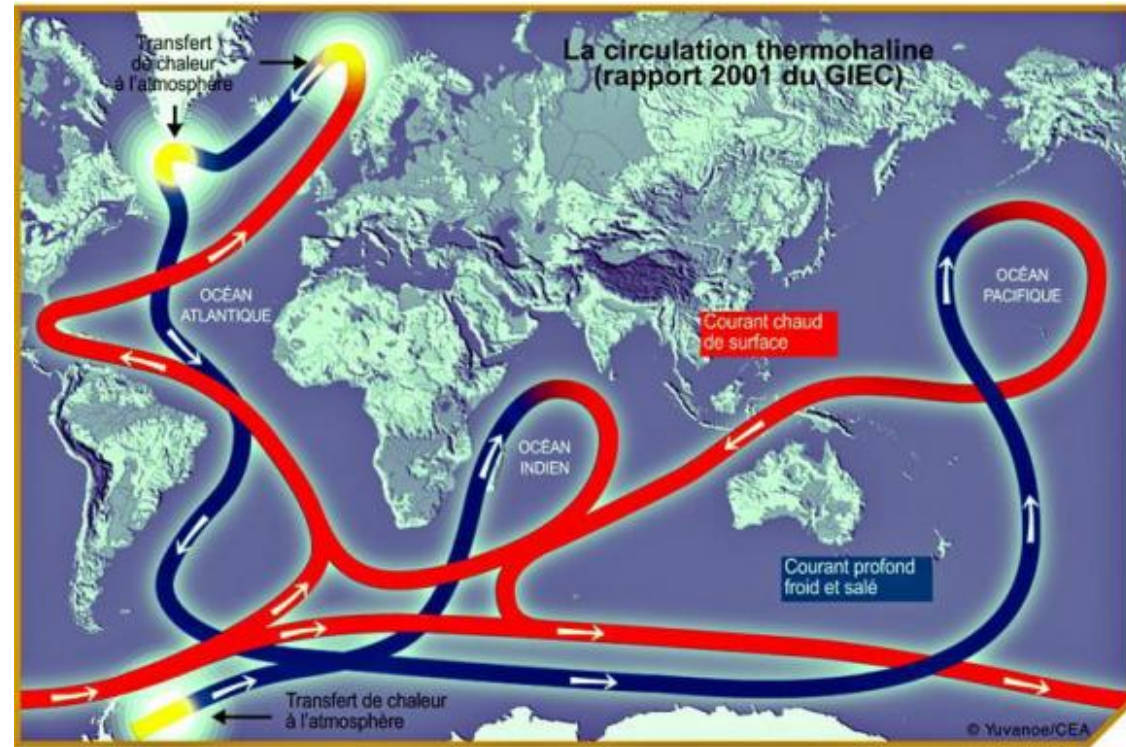
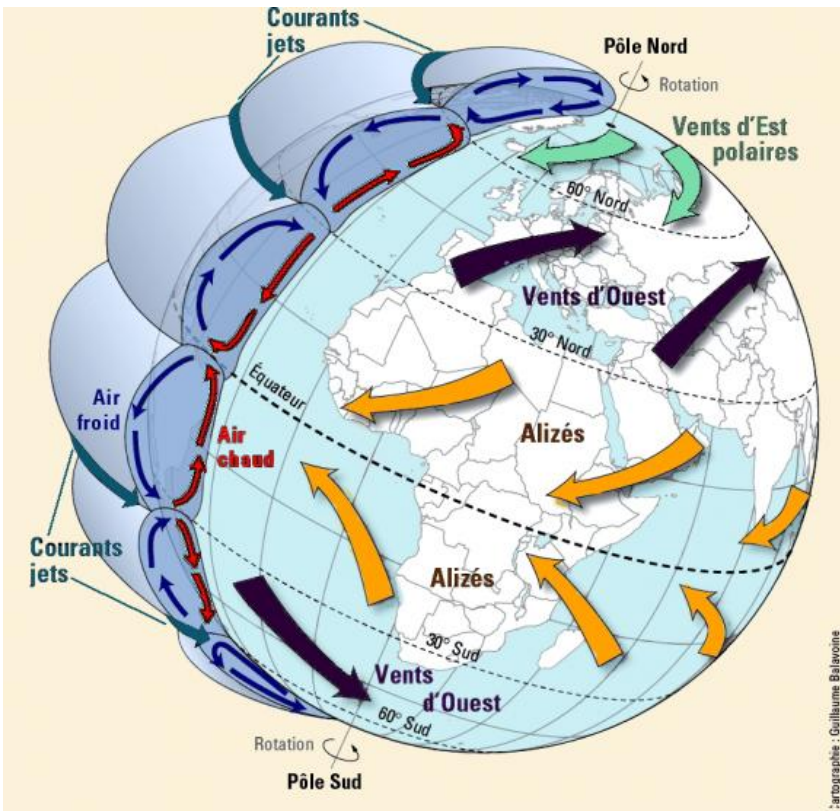
- air à 25°C
- un verre d'eau à 80°C va refroidir
- l'air va se réchauffer (un peu)



- air à 25°C
- eau à 80°C peut-elle se réchauffer ?
- et l'air se refroidir ?

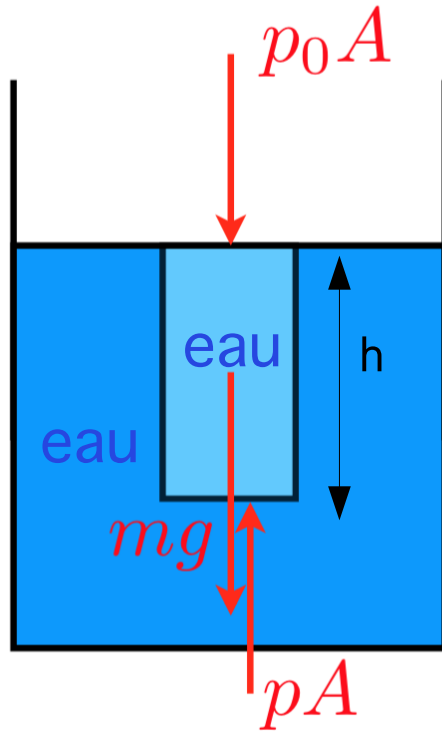
- Non !
- Pas de création d'entropie !
- Du chaud vers le froid, pas l'inverse !

2 – Transport de chaleur



2 – Transport de chaleur

Que se passe-t-il en s'enfonçant dans l'eau ?



Une pression = Force / unité de surface

Isolons (en pensée) un volume d'eau dans le récipient d'eau...

→ cylindre de hauteur h , section A

Ce volume d'eau étant à l'équilibre :

→ Force vers le haut $p.A$ = Force vers le bas $p_0 A + mg$ (Poids)

→ $p.A - p_0 A = mg$

ici g = accélération de la pesanteur $\approx 9,81 \text{ m/s}^2 \approx 10 \text{ m/s}^2$

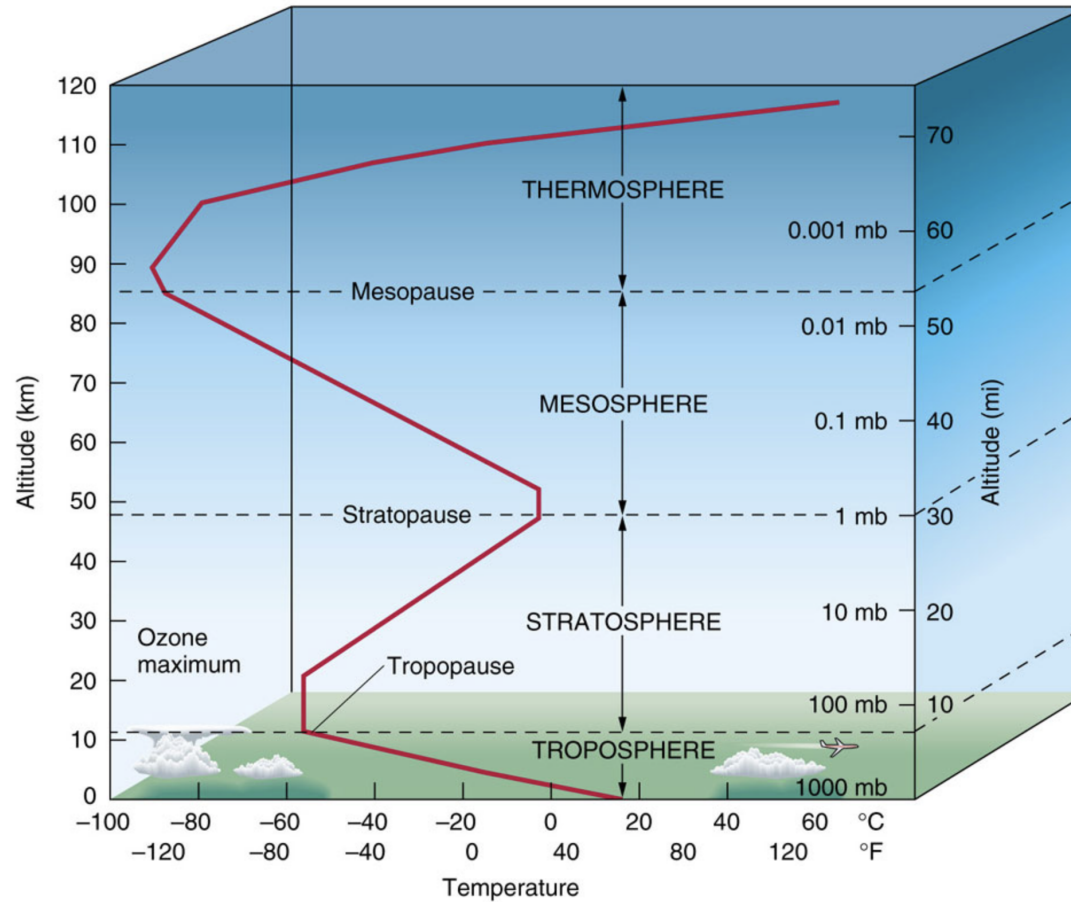
avec $m = \rho \times \text{Volume} = \rho \times A \times h$

→ $(p - p_0).A = \rho g A h$

→ $p - p_0 = \rho g h$

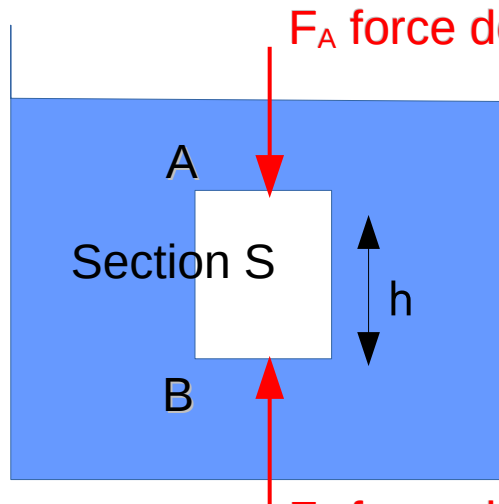
→ **La pression augmente lorsque l'on descend !**

2 – Transport de chaleur



2 – Transport de chaleur

Immergeons un corps de volume V dans un liquide de masse volumique ρ_{liquide}
Pour simplifier, prenons un cylindre de hauteur h et de section S



F_A force de pression sur la face supérieure $A = P_A \times S$

$$P_B - P_A = \rho_{\text{liquide}} g h$$

$$F_A = P_A \cdot S \text{ vers le bas, } F_B = P_B \cdot S \text{ vers le haut}$$

Avec $h \times S = V$ volume du corps immergé

→ Poussée d'Archimède π = Force totale

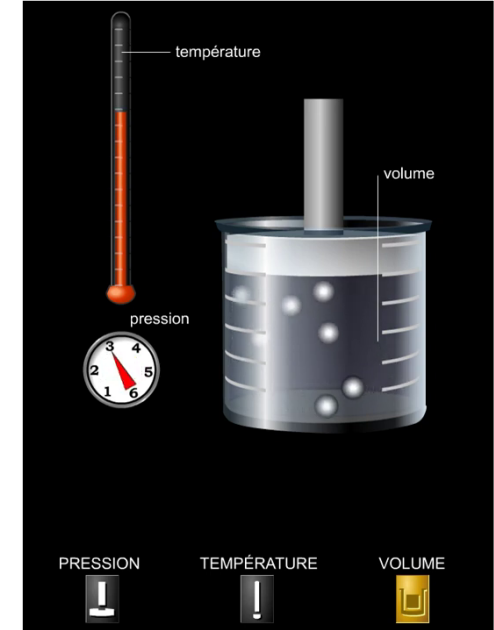
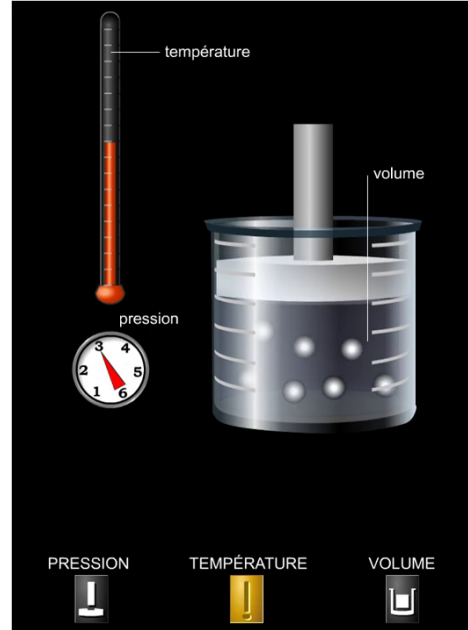
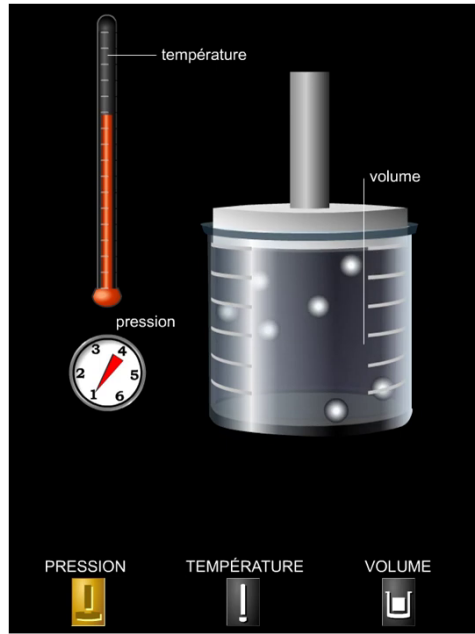
F_B force de pression sur la face inférieure $B = P_B \times S$

Poussée d'Archimède **vers le haut** $= (P_B - P_A) \cdot S = \rho_{\text{liquide}} g h S = \rho_{\text{liquide}} g V = m_{\text{liquide}} g$

(m_{liquide} = masse de liquide qui occupe le volume occupé par le solide)

La Poussée d'Archimède sur le solide = poids du liquide qui occuperait le même volume !

2 – Transport de chaleur

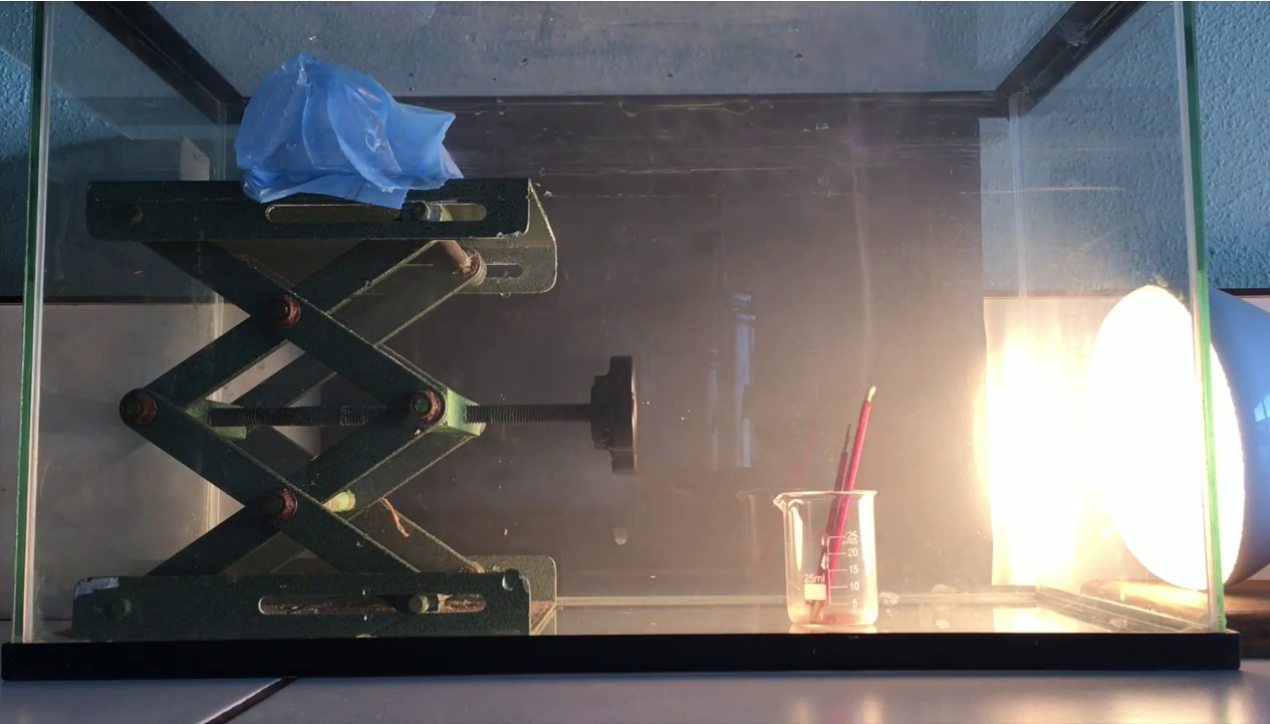


Pression x Volume = constante x Température

- Si $P = \text{constante}$, $V \nearrow$ si $T \nearrow$
- Si $T = \text{constante}$, $V \searrow$ si $P \nearrow$
- Si $V = \text{constante}$, $P \nearrow$ si $T \nearrow$

<https://www.youtube.com/watch?v=2ekq2bmWhFE>

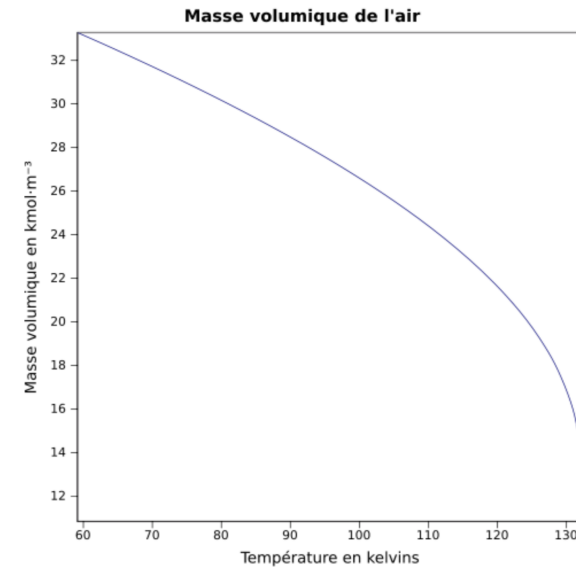
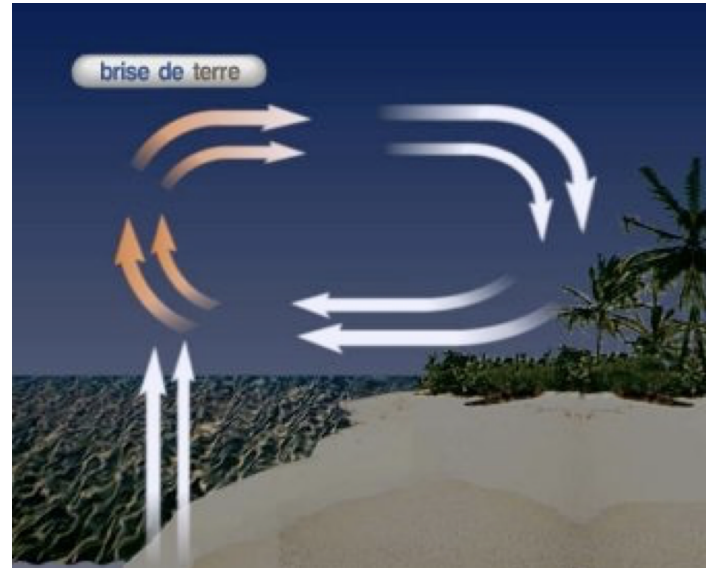
2 – Transport de chaleur



L'air chaud s'élève
→ se refroidit au contact de la glace
→ redescend

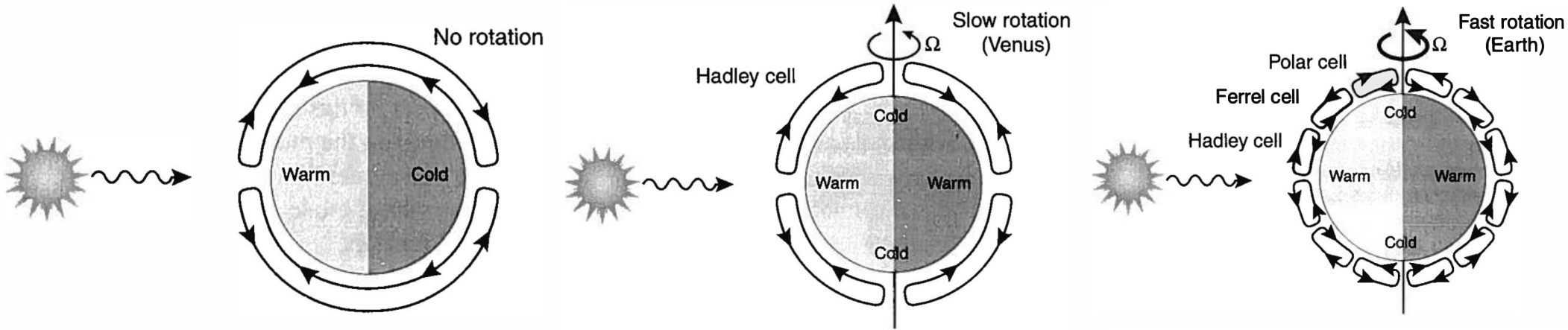
https://www.youtube.com/watch?v=hWhgR6ufH_s

2 – Transport de chaleur



Air chaud s'élève puis se refroidit (perte d'énergie)
L'air froid s'alourdit et redescend

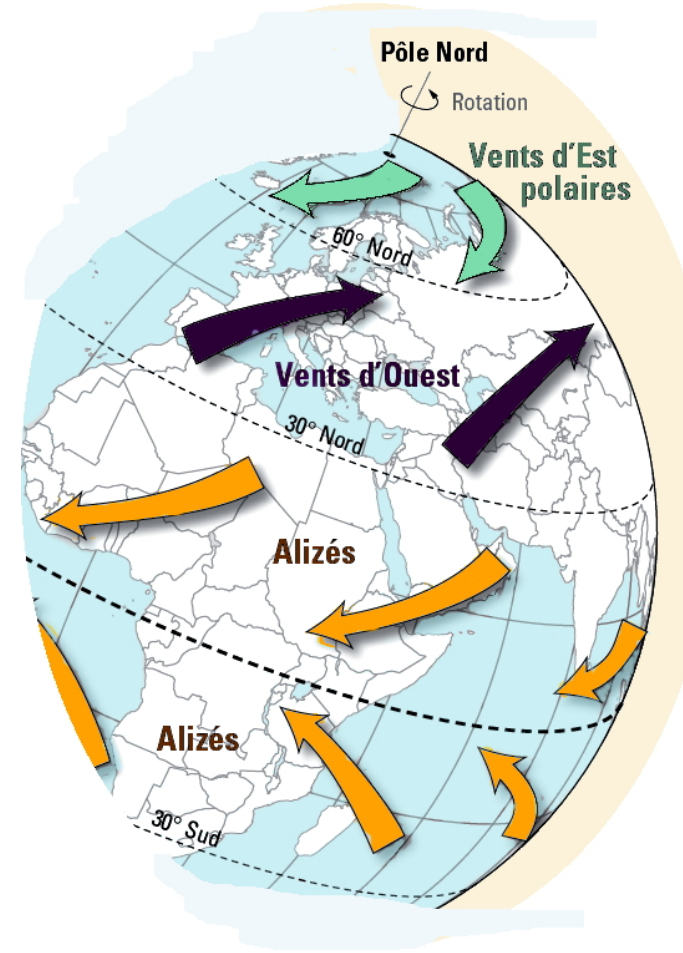
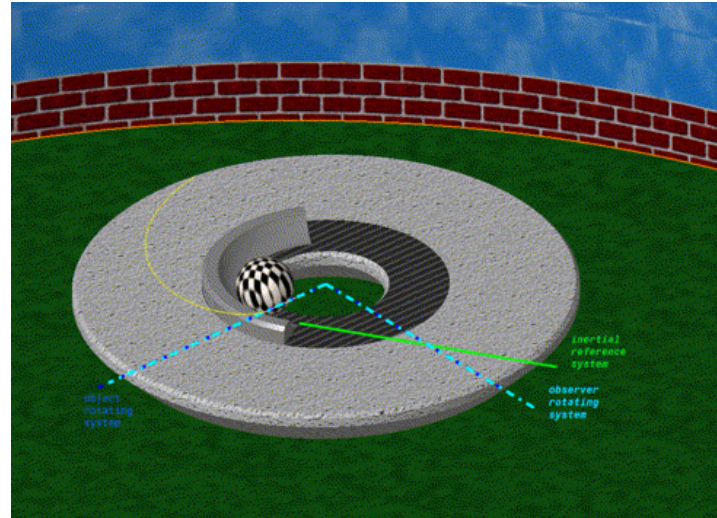
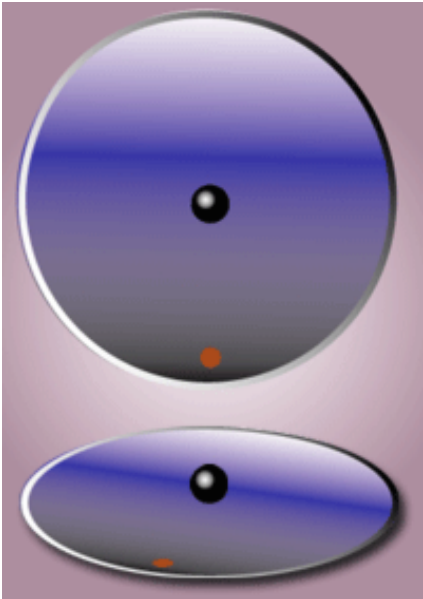
2 – Transport de chaleur



Des différences selon la rotation de la planète

- Si même face vers le soleil → un seul motif de circulation
- Vénus : axe de symétrie = axe de rotation
- Terre : circulation thermique défléchie par **force de Coriolis**

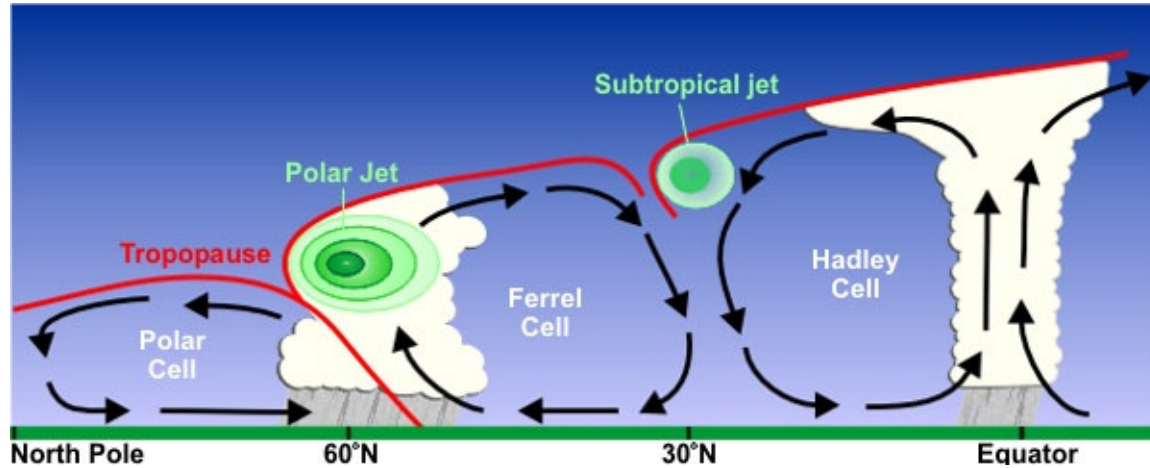
2 – Transport de chaleur



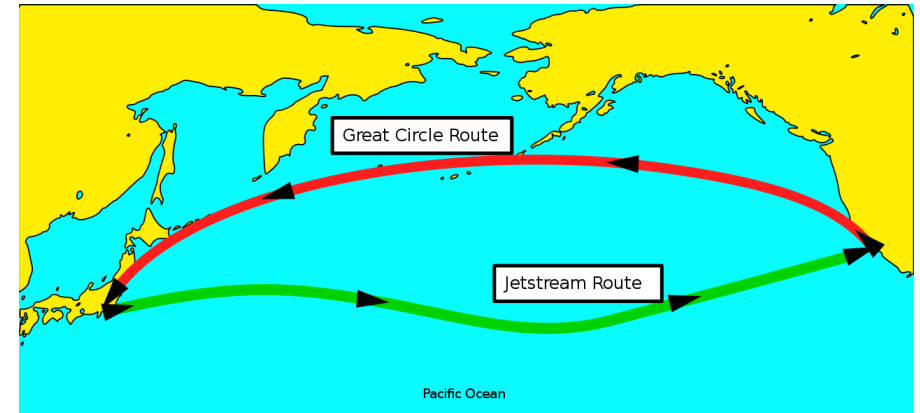
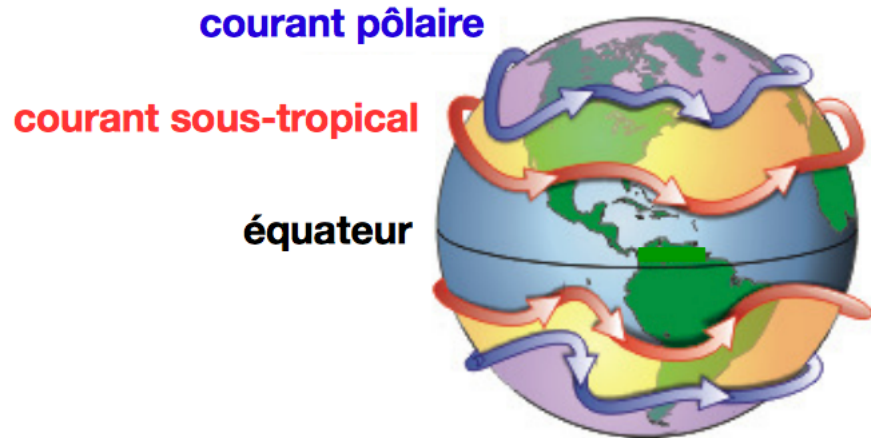
« **force** » de Coriolis

https://fr.wikipedia.org/wiki/Force_de_Coriolis

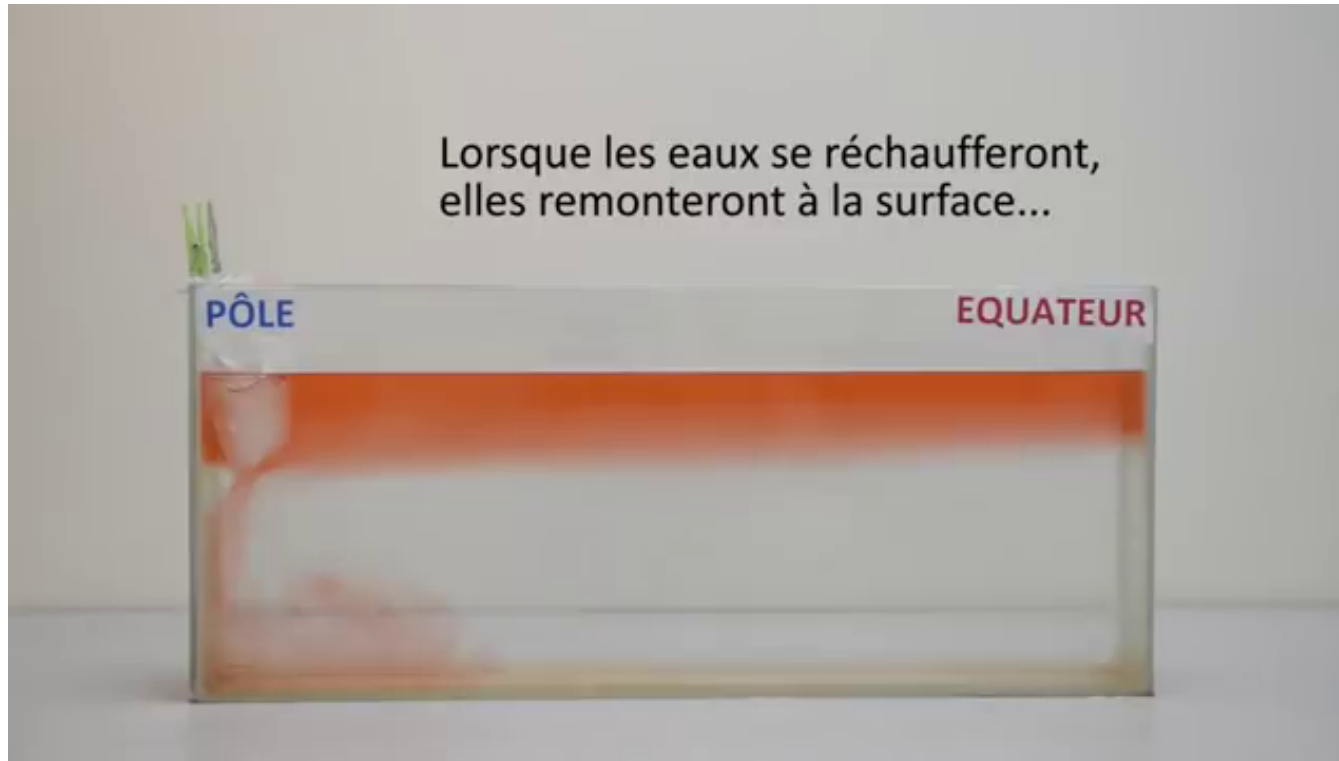
2 – Transport de chaleur



Air chaud des tropiques s'élève
→ vers hautes latitudes → plus rapide
→ vent en altitude plus forts
Au sol, air se dirige vers l'équateur
→ déviés vers l'ouest – Alizés

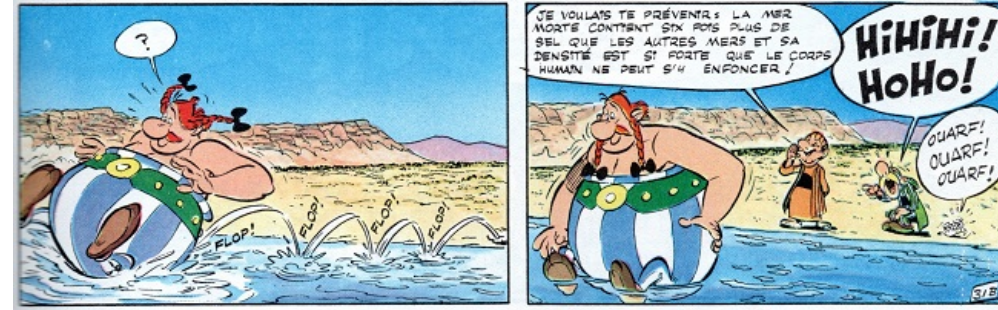
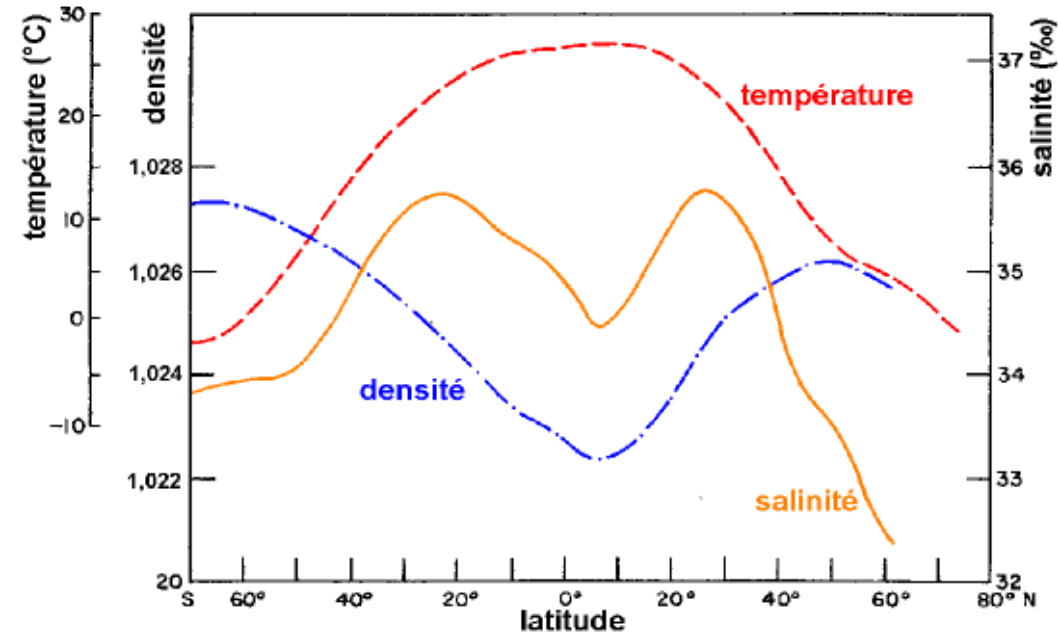


2 – Transport de chaleur



<https://www.youtube.com/watch?v=nhmposeF2gk>

2 – Transport de chaleur



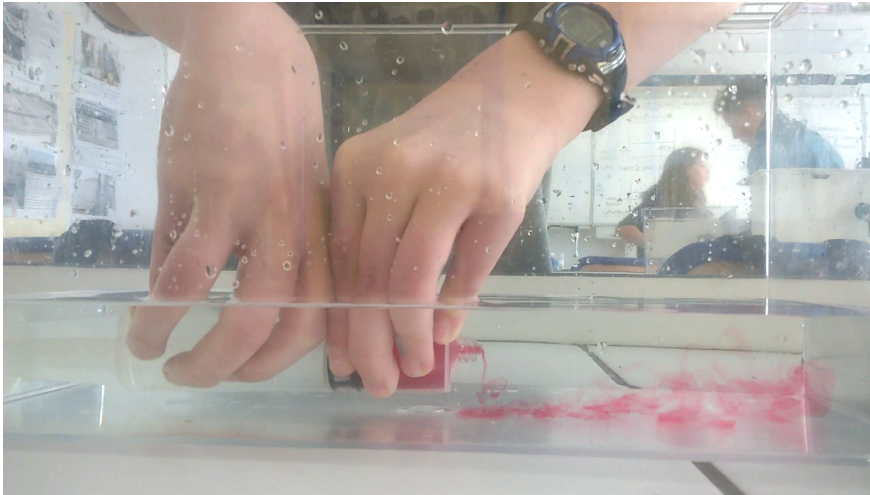
Mer morte

$$\rho_{\text{mer morte}} = 1,3 \times \rho_{\text{eau salée}}$$

On y flotte beaucoup mieux !
(ici effet un peu exagéré)

→ convection des océans plus grande aux pôles

2 – Transport de chaleur

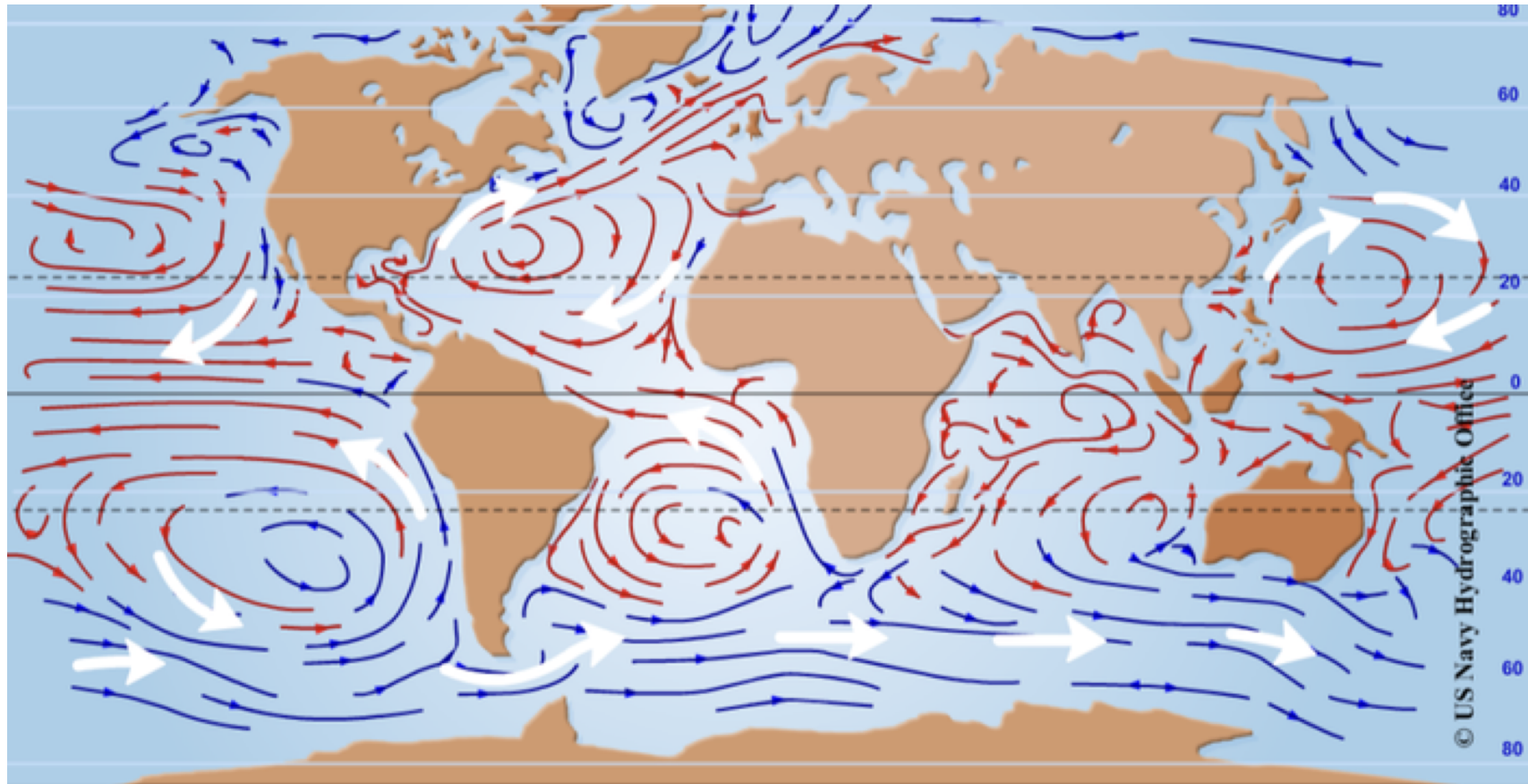


Eau salée dans eau douce

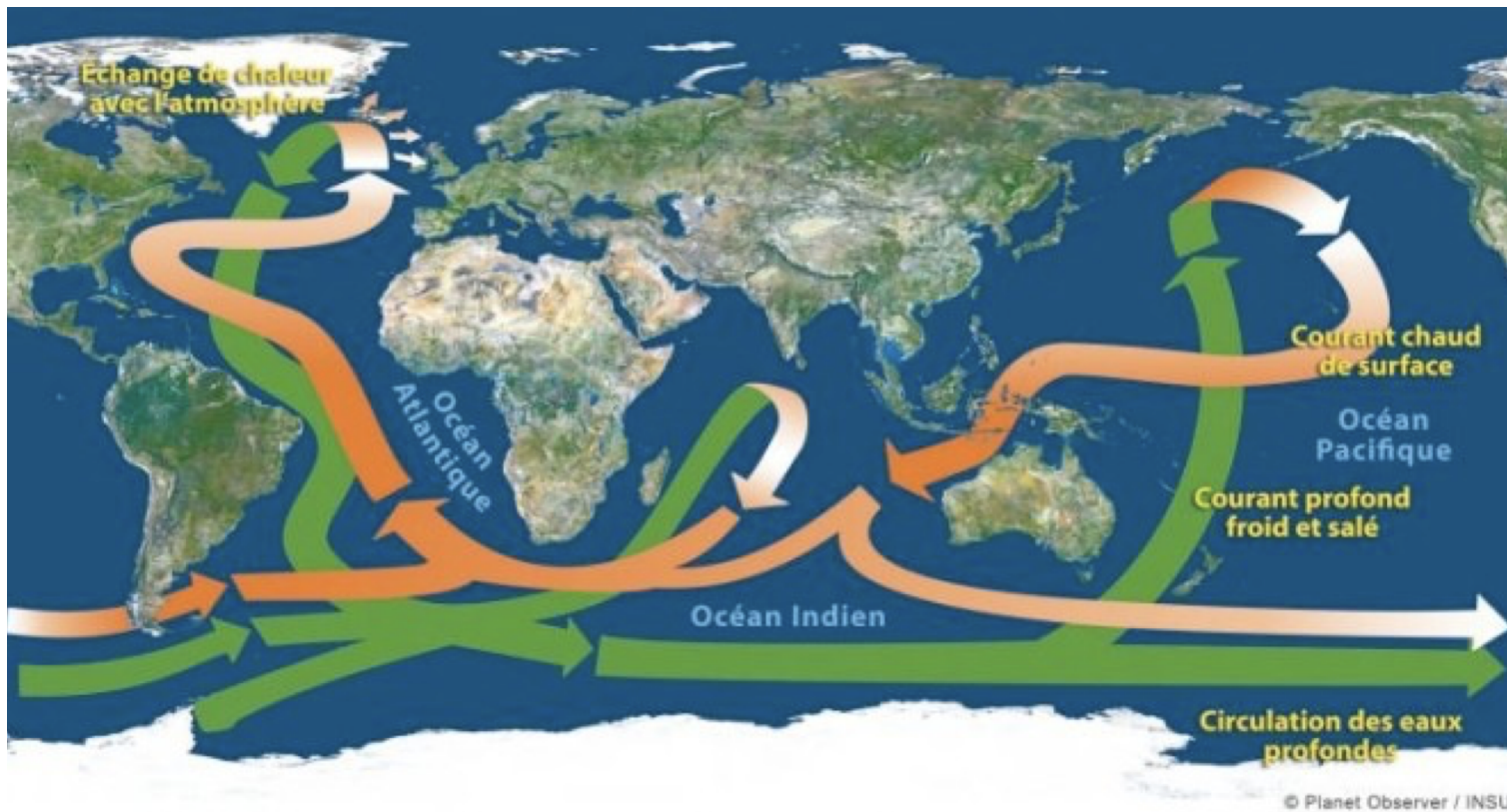


D'Anabelle Kremer-Lecointre, Enseignante SVT

2 – Transport de chaleur



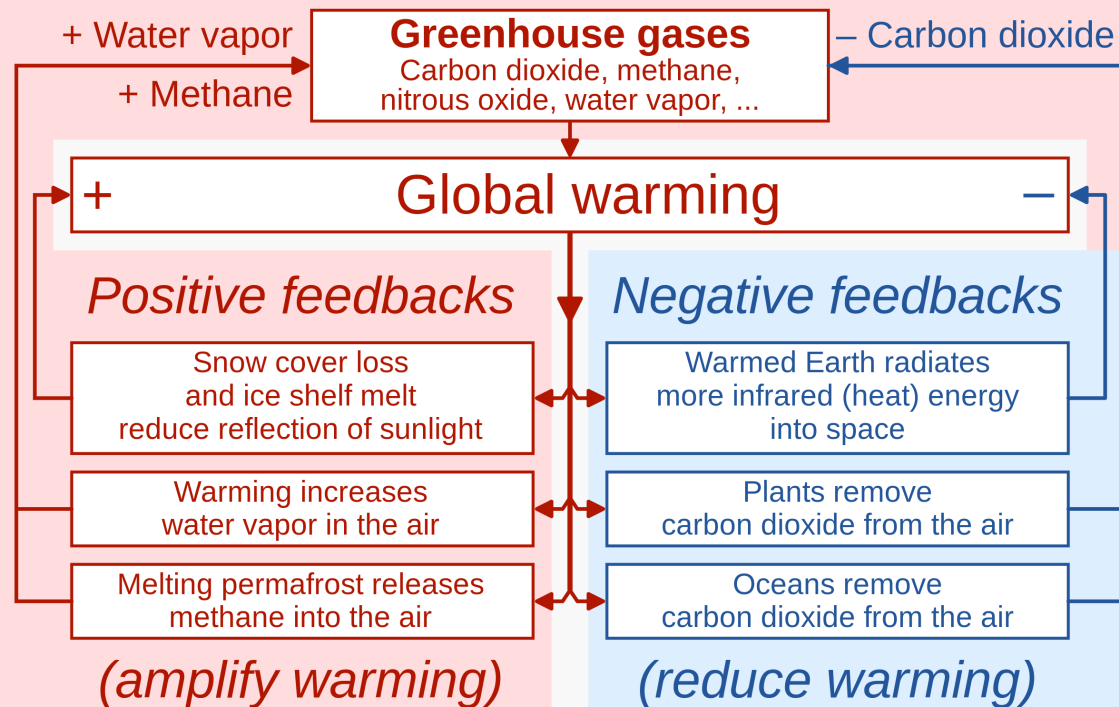
2 – Transport de chaleur



Fonte des glaces aux pôles
→ eau douce réduit densité
→ ralentissement plongée

2 – Transport de chaleur

Climate change feedbacks



Rétroaction positive

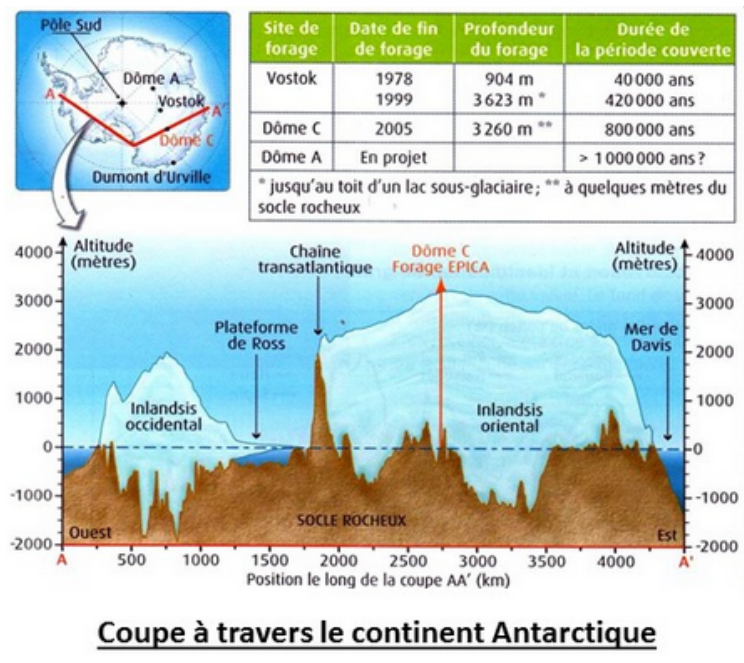
- $T \nearrow$: fonte des glaces
→ albédo $\searrow$ et $T \nearrow$
- $T \nearrow$: vapeur d'eau → effet de serre
→ $T \nearrow$
- $T \nearrow$: permafrost fond → $\text{CH}_4 \nearrow$
→ $T \nearrow$

Rétroaction négative :

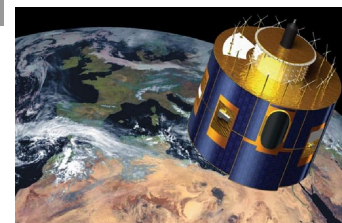
- $T \nearrow$: pertes par rayonnement $\nearrow$
→ $T \searrow$

3 – Les climats du passé

- Reconstitution : **paléoclimatologie**, sédimentologie, palynologie, climato-histoire...



foraminifères



- Mesure directe : **observation instrumentale**
- Téledétection : **satellites, radar...**

3 – Les climats du passé

1000 000 000 années

→ Evolution du Soleil

10 000 000-100 000 000 années

→ Tectonique & Dérive des continents

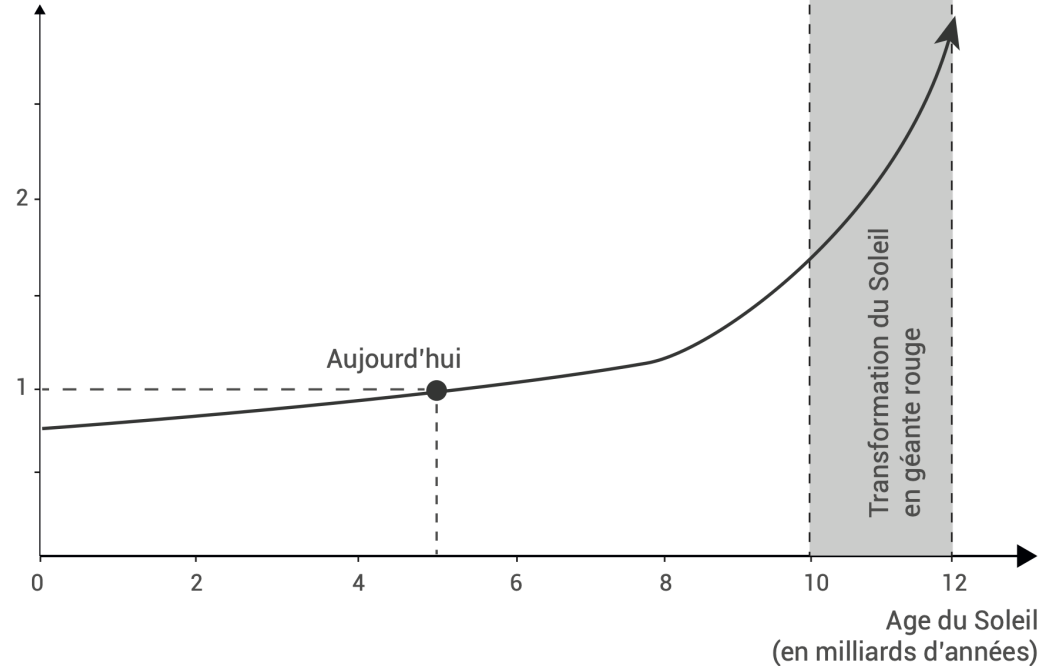
10 000 – 100 000 années

→ Paramètres orbitaux

~100 ans

→ Effet de l'Humain

Luminosité solaire
normalisée
à la valeur actuelle



3 – Les climats du passé

1000 000 000 années

→ **Evolution du Soleil**

10 000 000-100 000 000 années

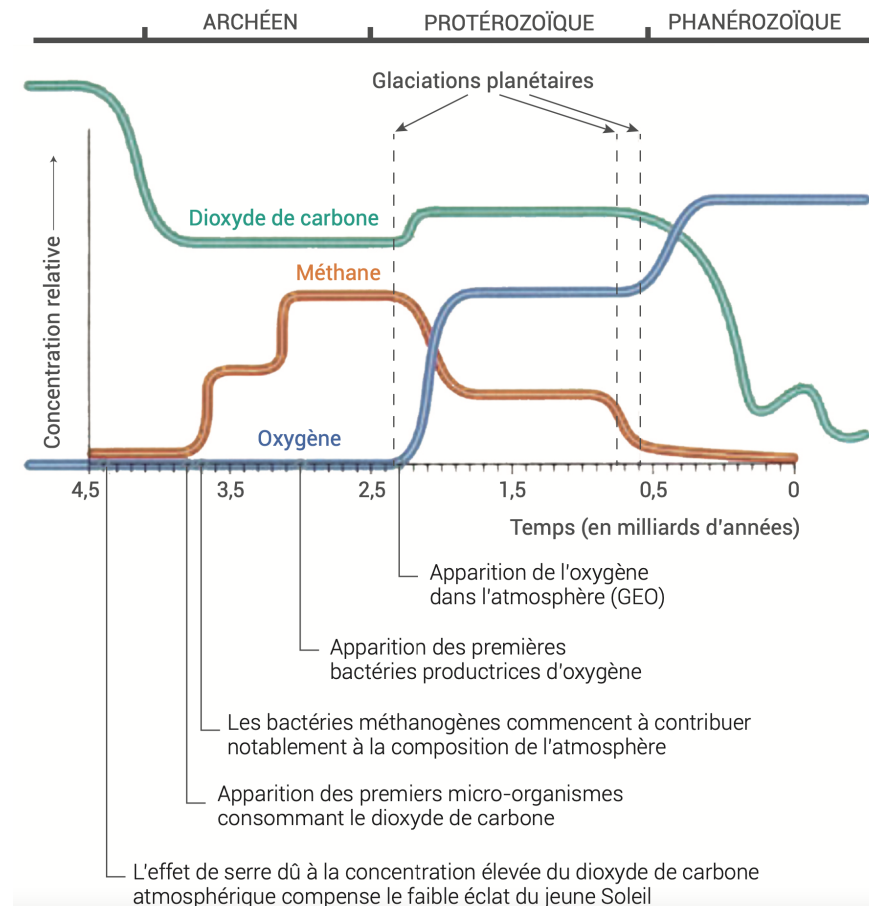
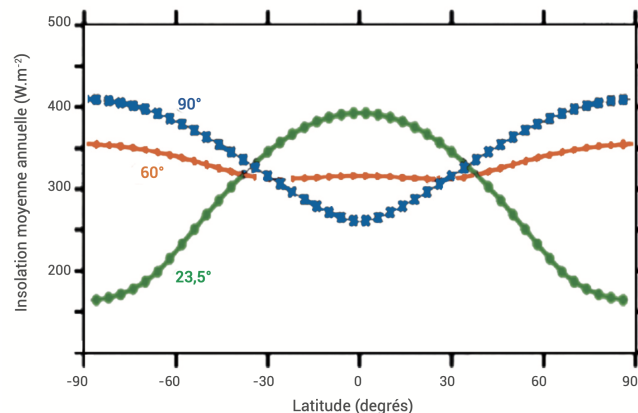
→ Tectonique & Dérive des continents

10 000 – 100 000 années

→ Paramètres orbitaux

~100 ans

→ Effet de l'Humain



3 – Les climats du passé

1000 000 000 années

→ Evolution du Soleil

10 000 000-100 000 000 années

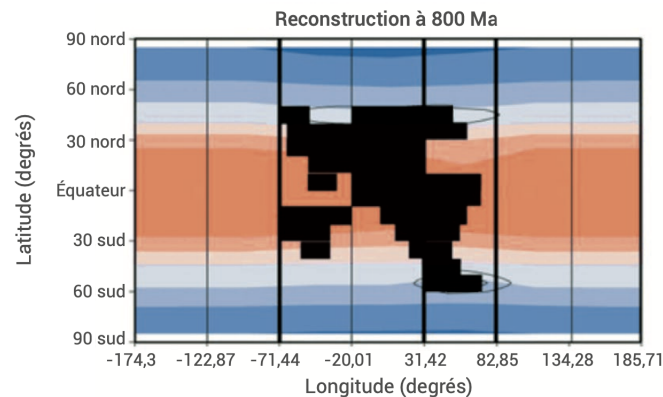
→ Tectonique & Dérive des continents

10 000 – 100 000 années

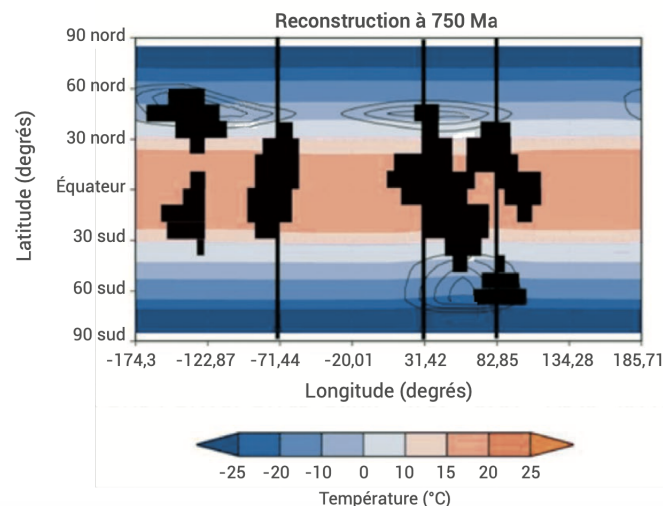
→ Paramètres orbitaux

~100 ans

→ Effet de l'Humain



CO2 ~1800ppm



CO2 ~ 500ppm

3 – Les climats du passé

1000 000 000 années

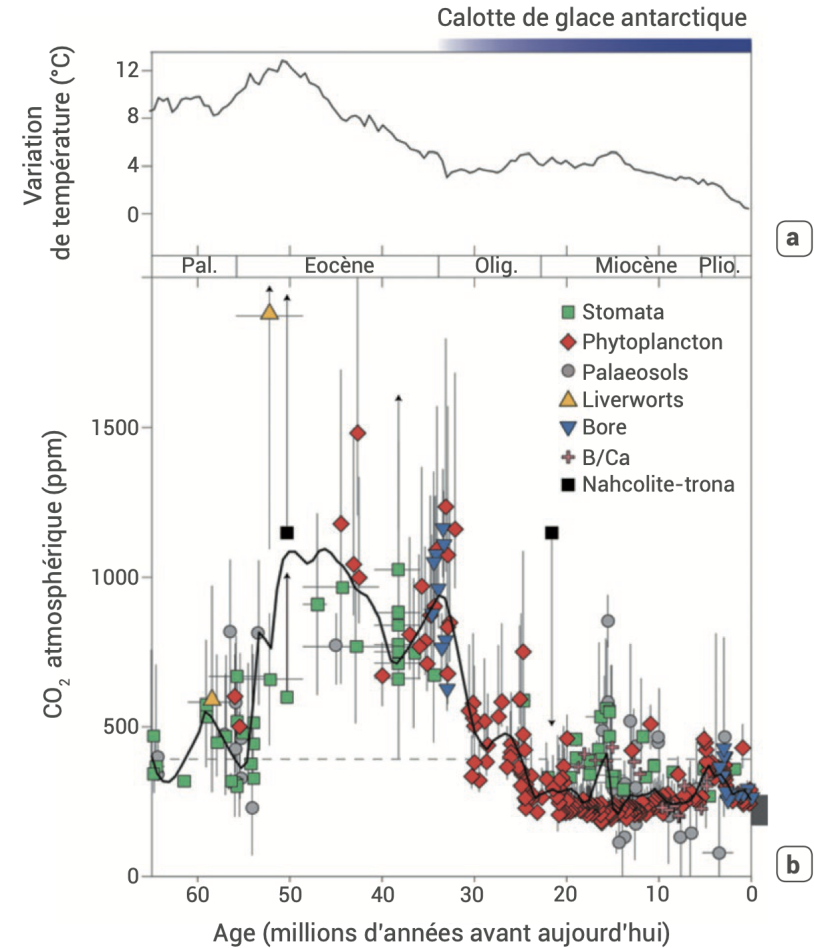
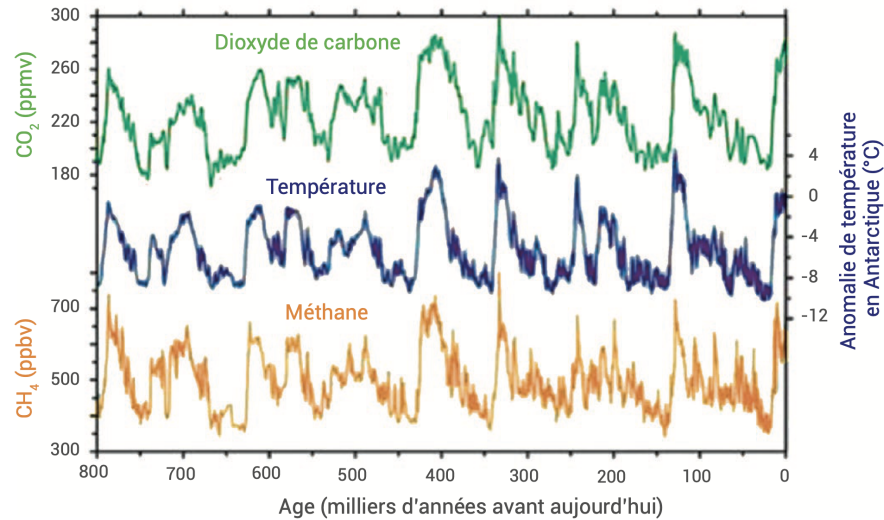
→ Evolution du Soleil

10 000 000-100 000 000 années

→ Tectonique & Dérive des continents

10 000 – 100 000 années

→ Paramètres orbitaux



3 – Les climats du passé

1000 000 000 années

→ Evolution du Soleil

10 000 000-100 000 000 années

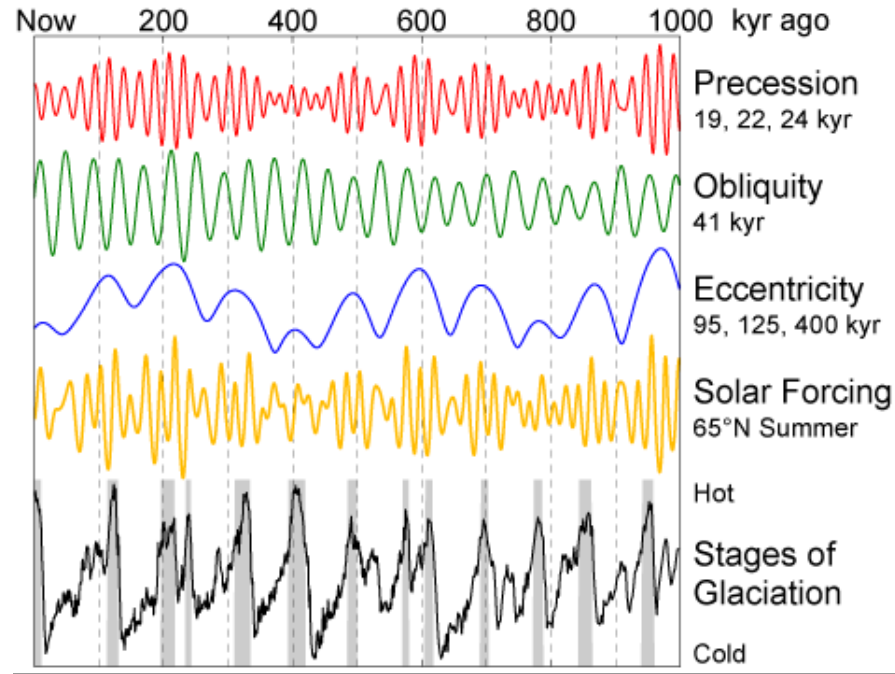
→ Tectonique & Dérive

10 000 – 100 000 années

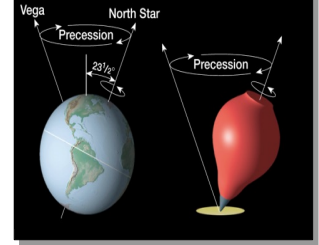
→ Paramètres orbitaux

~100 ans

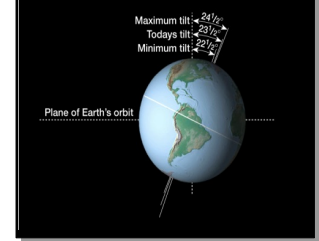
→ Effet de l'Humain



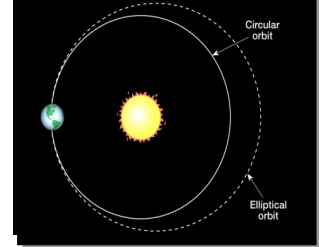
Précession des équinoxes



Inclinaison de l'axe



Excentricité de l'orbite



3 – Les climats du passé

1000 000 000 années

→ Evolution du Soleil

10 000 000-100 000 000 années

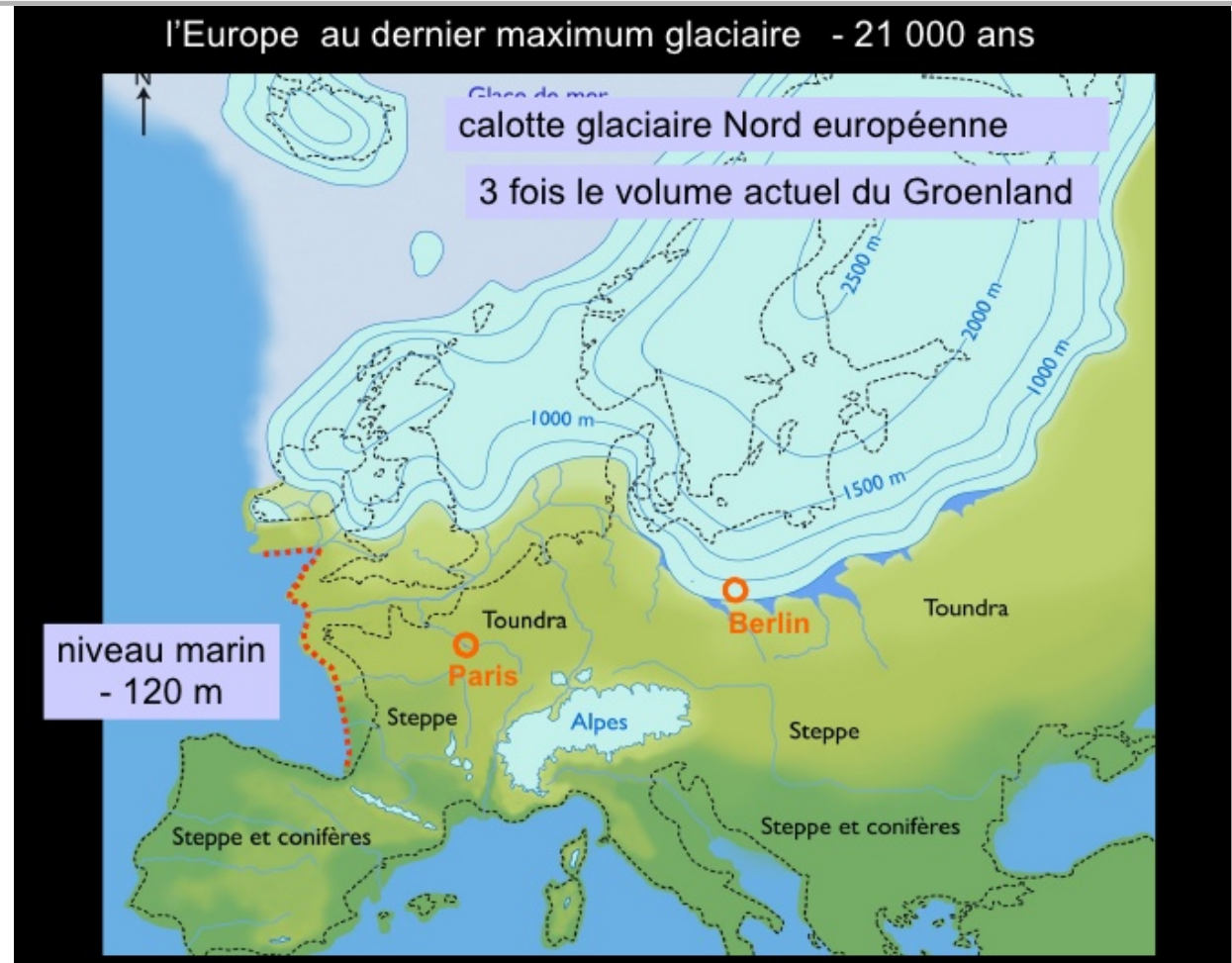
→ Tectonique & Dérive

10 000 – 100 000 années

→ Paramètres orbitaux

~100 ans

→ Effet de l'Humain



3 – Les climats du passé

1000 000 000 années

→ Evolution du Soleil

10 000 000-100 000 000 années

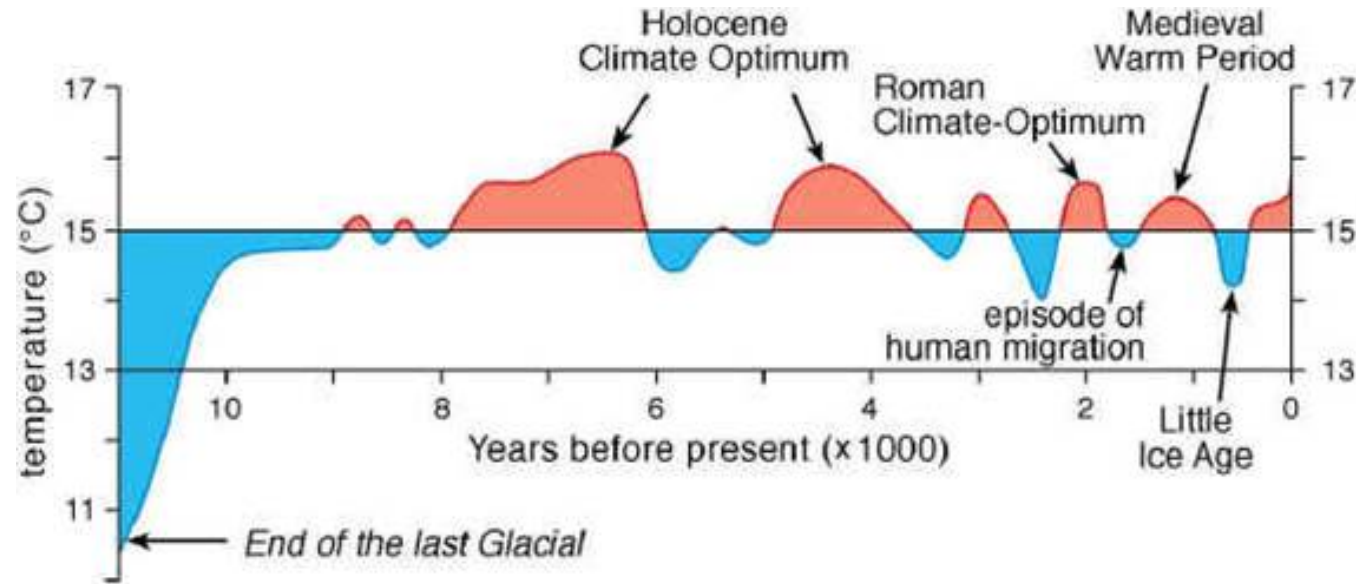
→ Tectonique & Dérive

10 000 – 100 000 années

→ Paramètres orbitaux

~100 ans

→ Effet de l'Humain



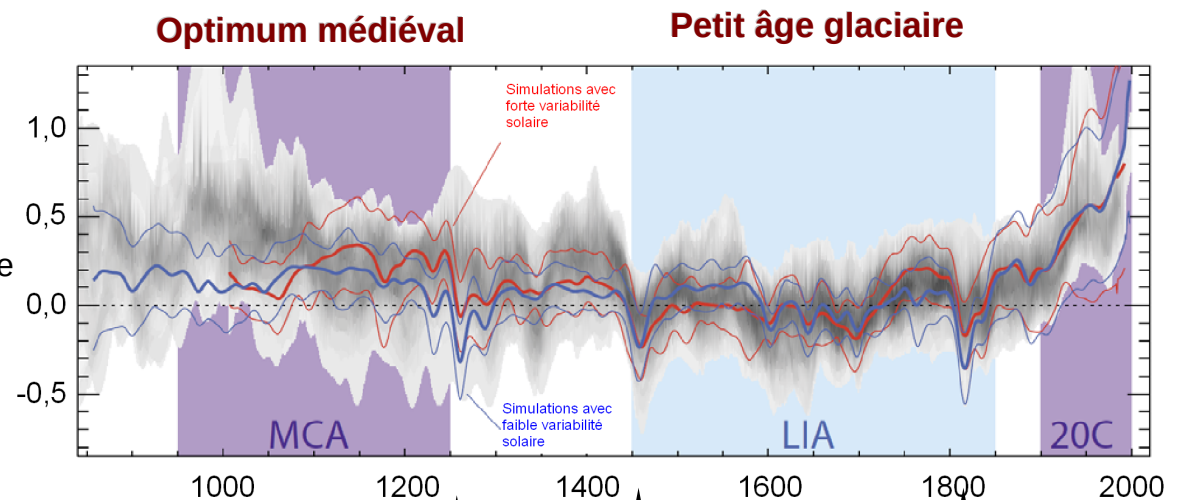
Average near-surface temperatures of the northern hemisphere during the past 11.000 years (after Dansgaard et al., 1969, and Schönwiese, 1995)

3 – Les climats du passé

Facteurs astronomiques – l'activité solaire



MCA: Anomalie
Climatique Médiévale
LIA: Petit Age Glaciaire



Facteurs terrestres



Calottes polaires



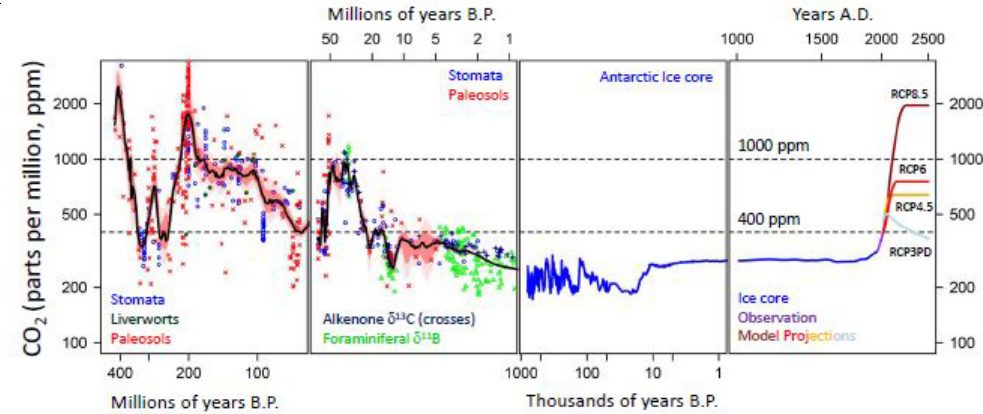
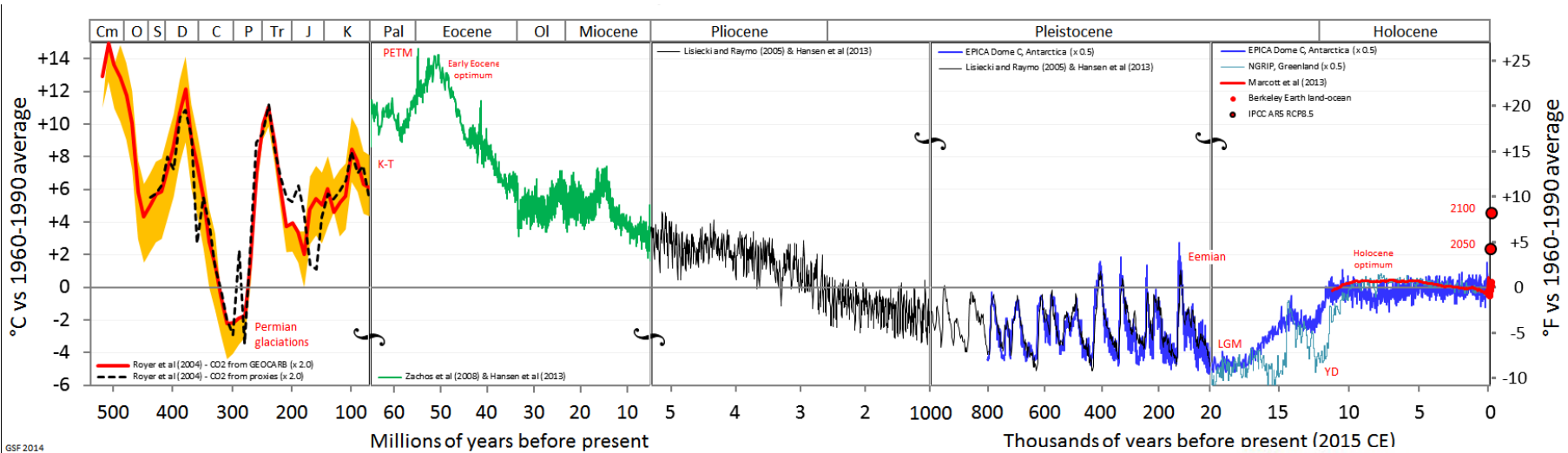
Refroidissements temporaires

Éruption du
Salamas - 1257

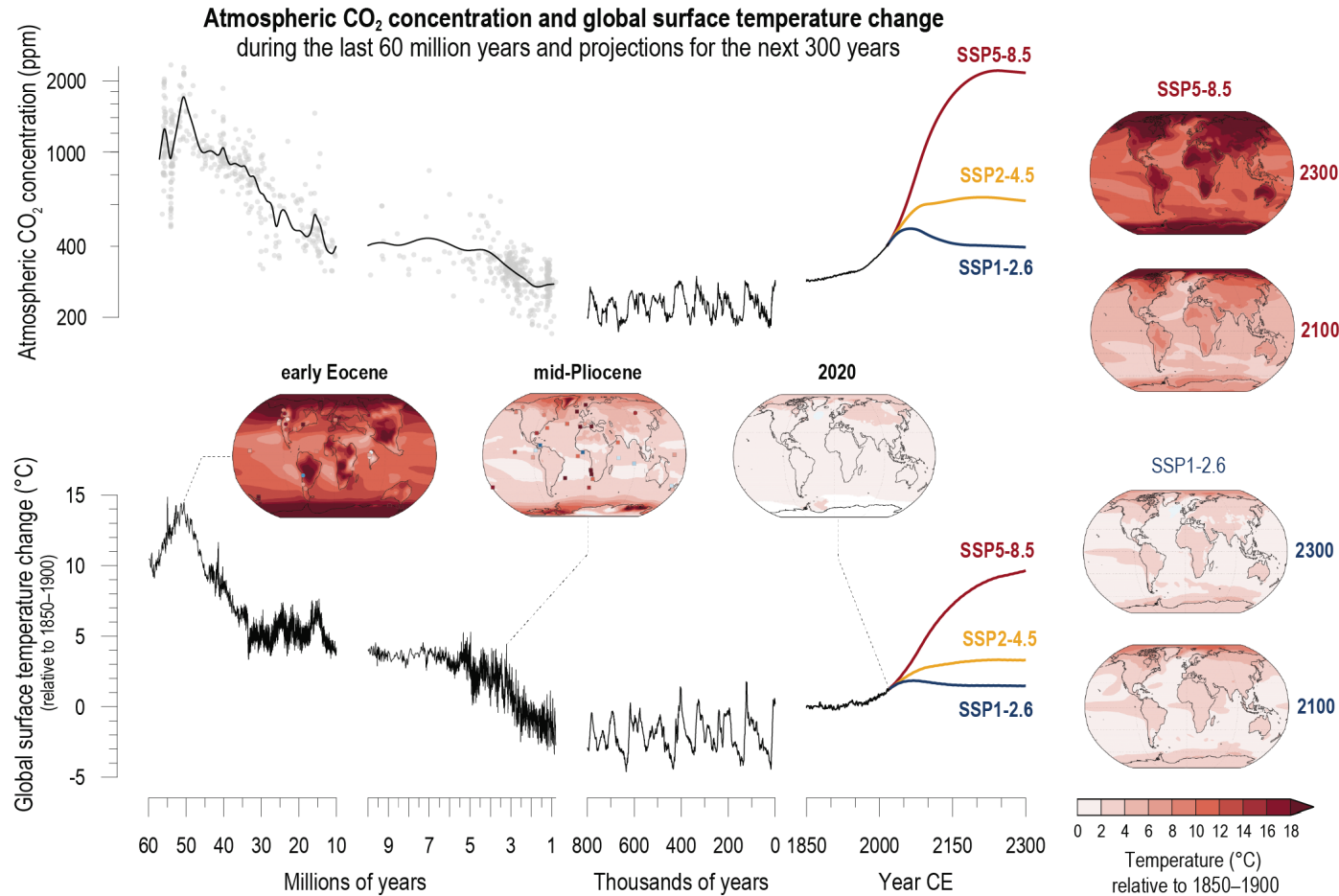
Éruption du
Kuwae - 1458

Éruption du
Tambora - 1815

3 – Les climats du passé



3 – Les climats du passé



3 – Les climats du passé...et après ?

1000 000 000 années

→ Evolution du Soleil

10 000 000-100 000 000 années

→ Tectonique & Dérive

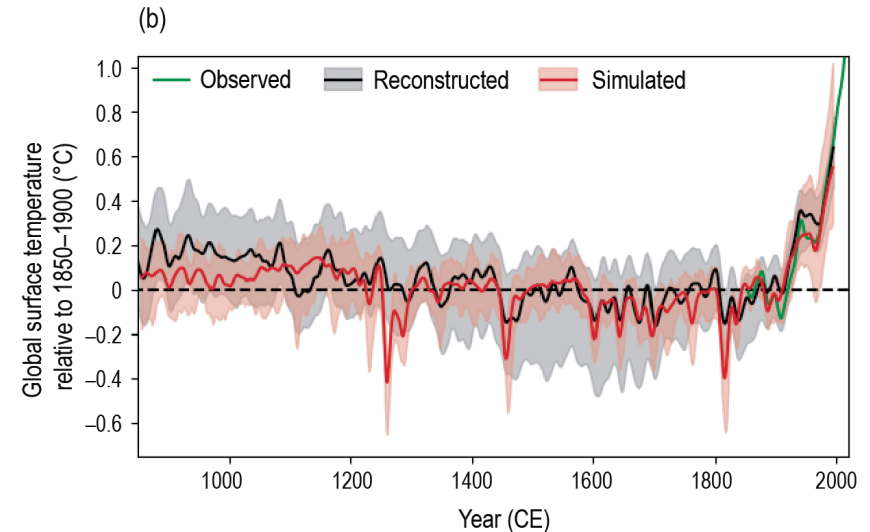
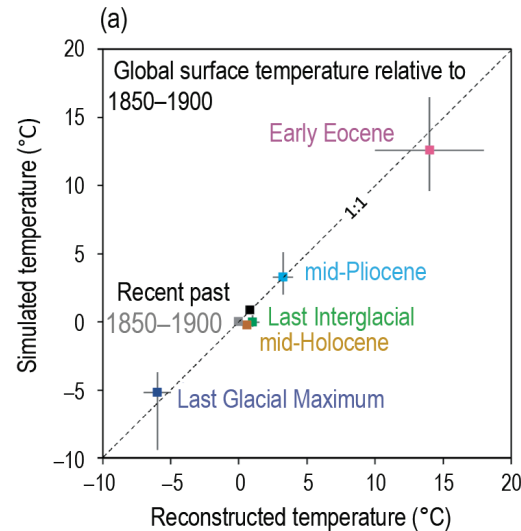
10 000 – 100 000 années

→ Paramètres orbitaux

~100 ans

→ Effet de l'Humain

Proxy-based and model-simulated estimates of global surface temperature agree across multiple reference periods



3 – Les climats du passé...et après ?

1000 000 000 années

→ Evolution du Soleil

10 000 000-100 000 000 années

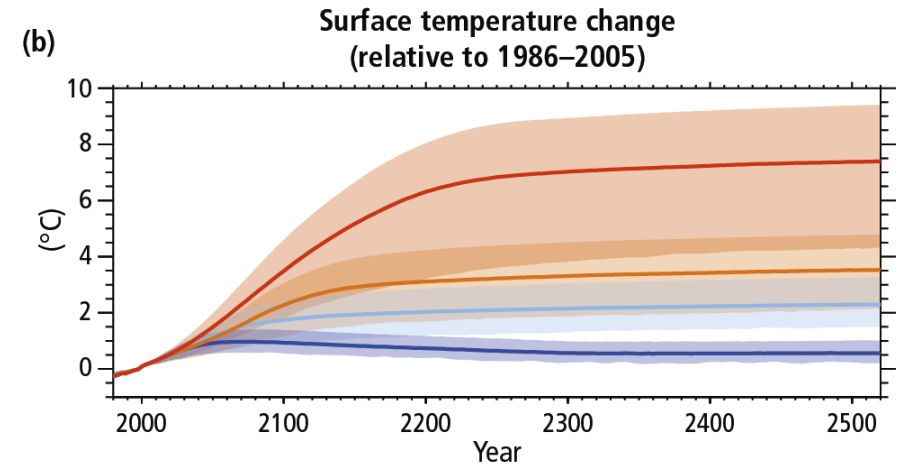
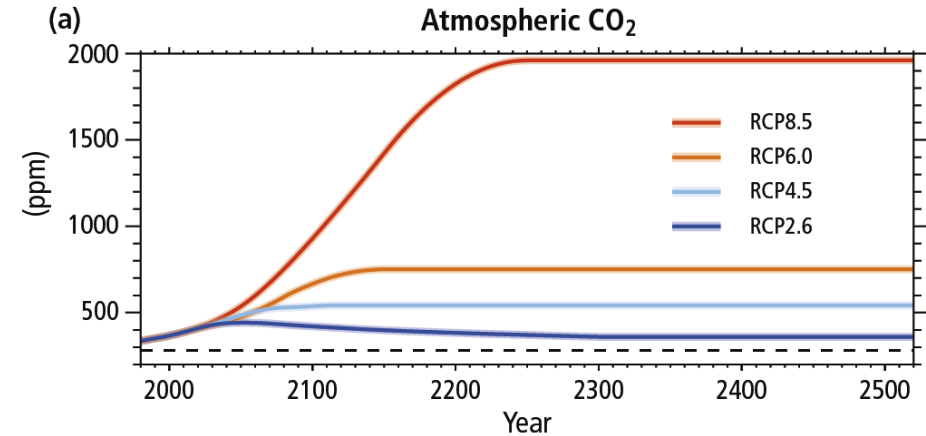
→ Tectonique & Dérive

10 000 – 100 000 années

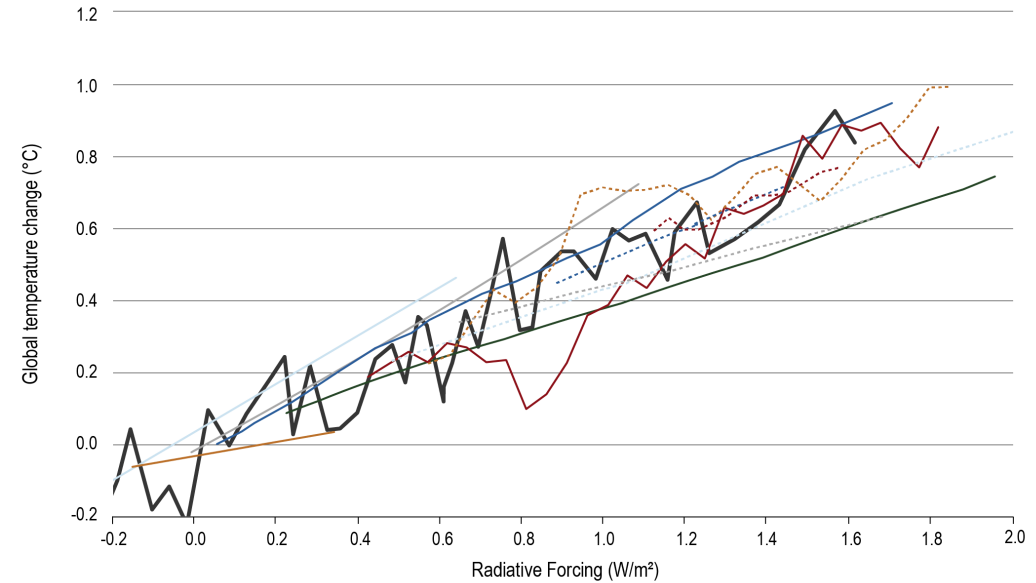
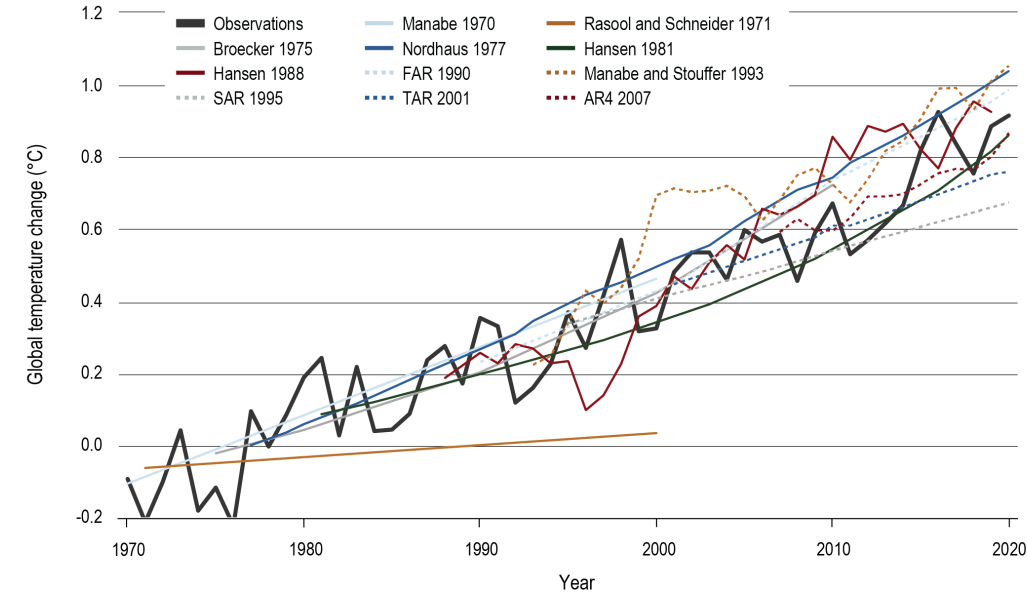
→ Paramètres orbitaux

~100 ans

→ Effet de l'Humain



3 – Les climats du passé...et après ?

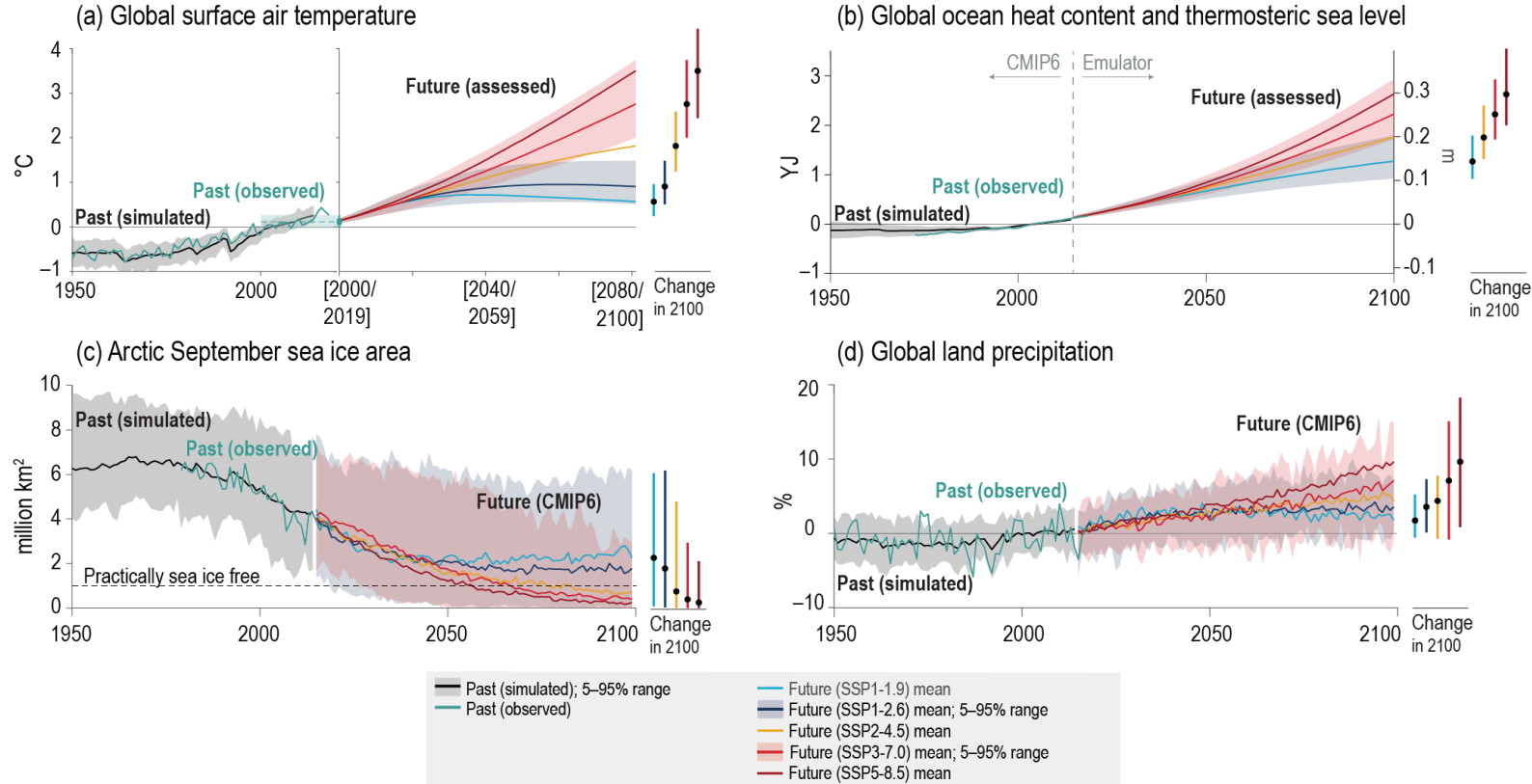


→ c'était prévu !

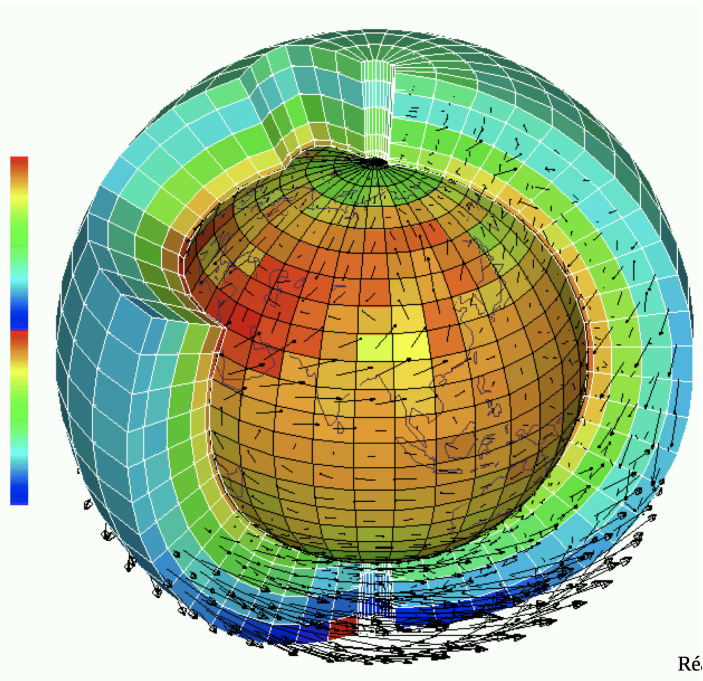
3 – Les climats du passé...et après ?

Recent and future change of four key indicators of the climate system

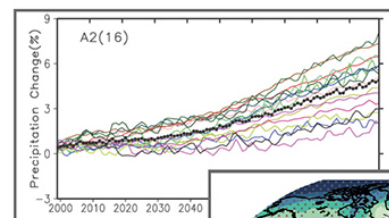
Atmospheric temperature, ocean heat content, Arctic summer sea ice, and land precipitation



3 – Les climats du passé...et après ?

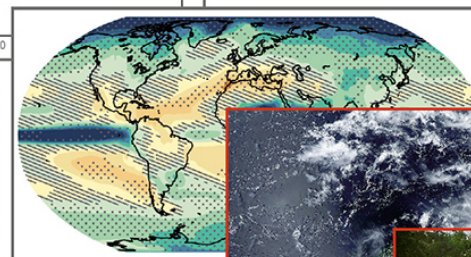


3 – Les climats du passé...et après ?



Ce que produisent les modèles globaux

Plus de 300 km
L'échelle globale
avec une moyenne
des précipitations
sur le globe et
des cartes de pluies
produites par
les modèles de climat.



Centaine de km

L'échelle de la centaine de kilomètres
qui caractérise la partie la plus active
des cyclones tropicaux.



Dizaine de km

L'échelle de la dizaine de kilomètres
qui est celle des événements de pluies
intenses parfois responsables
d'inondations.



km

Le kilomètre qui est l'échelle
qui intéresse les agriculteurs
au Sahel.



Ce qui est nécessaire
pour étudier les impacts

Point

L'échelle de la plante qui reçoit l'eau de pluie et
la réinjecte dans l'atmosphère avec la transpiration.



Conclusions

Un système complexe !

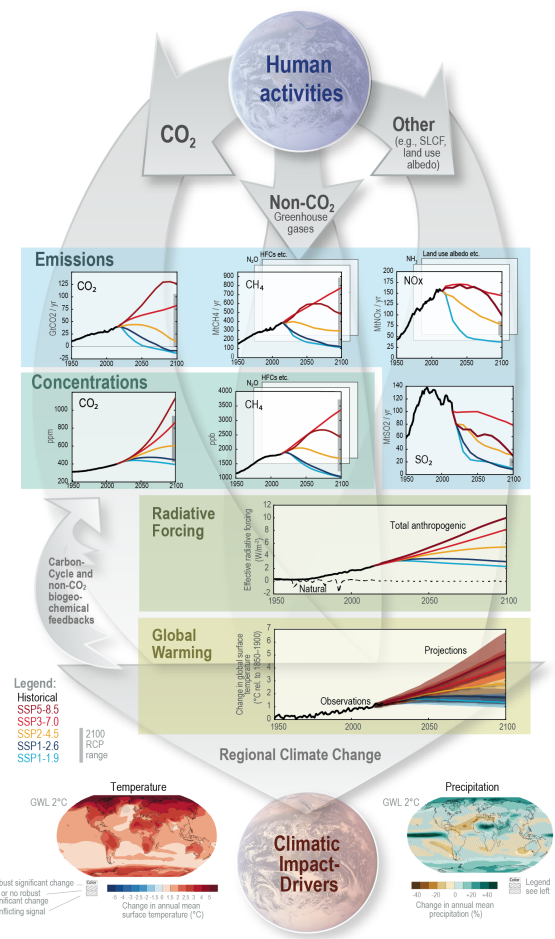
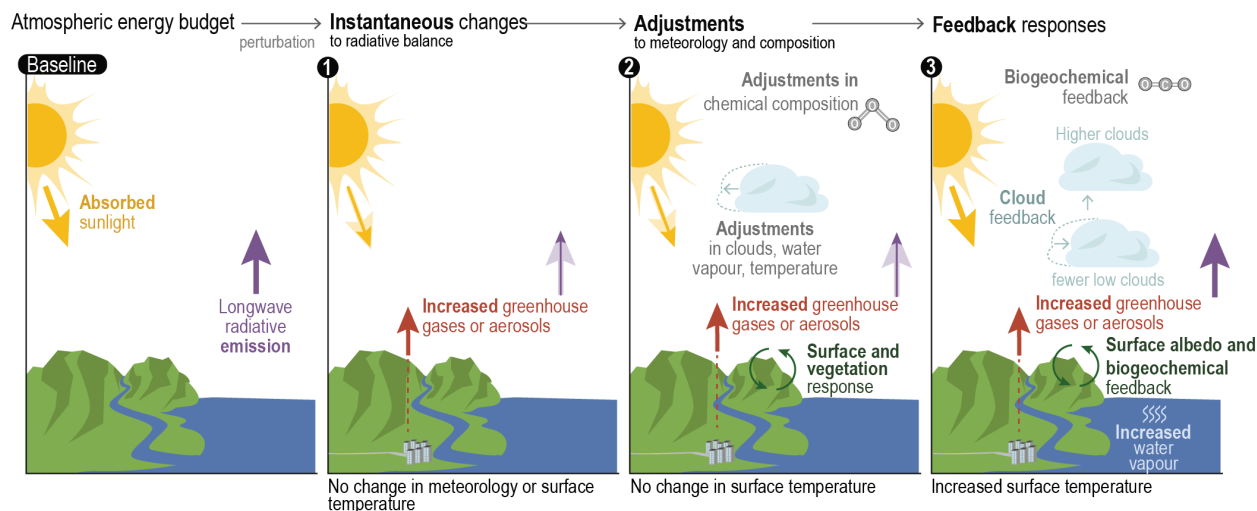
→ Interaction océan/atmosphère, multiples facteurs

Plein de physique différente

→ thermodynamique, mécanique des fluides, chimie

Des simulations qui ont fait des progrès...

Des résultats prévus & confirmés de rapport en rapport





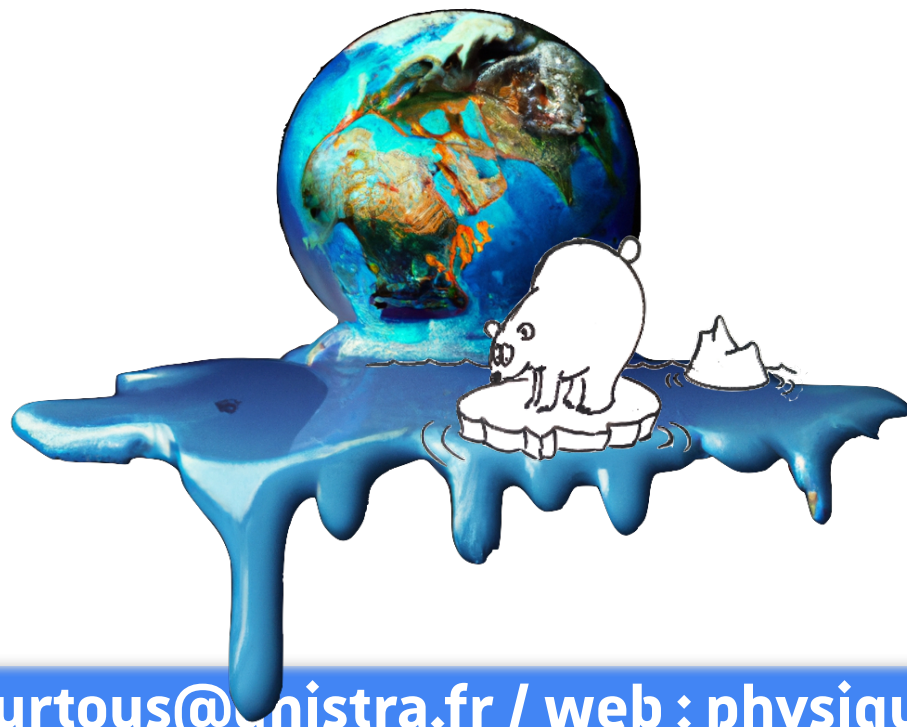
Physique pour Tous ! Saison 6 – Cycle de Rentrée

Les calottes sont cuites 3/4

Physique
pour Tous !

Mardi 03/10 – ça va chauffer !

...Ou les conséquences du changement climatique



18h15 → 19h45

Amphithéâtre Fresnel

Institut de Physique

3-5 rue de l'université

Aussi en visio !



ANNÉE 2023-2024
DE LA PHYSIQUE

contact : physiquepourtous@unistra.fr / web : physiquepourtous.unistra.fr