

Géodynamique des enveloppes fluides de la Terre

Laurie BOUGEOIS

ST3 - Polytech' Paris UPMC

7 novembre 2014



1. Introduction

2. Caractéristiques des enveloppes fluides

3. Atmosphère et circulation atmosphérique

4. Océan et circulation océanique

5. Climats et paléoclimats

Pourquoi étudier les enveloppes fluides ?

La mer de Glace

1916

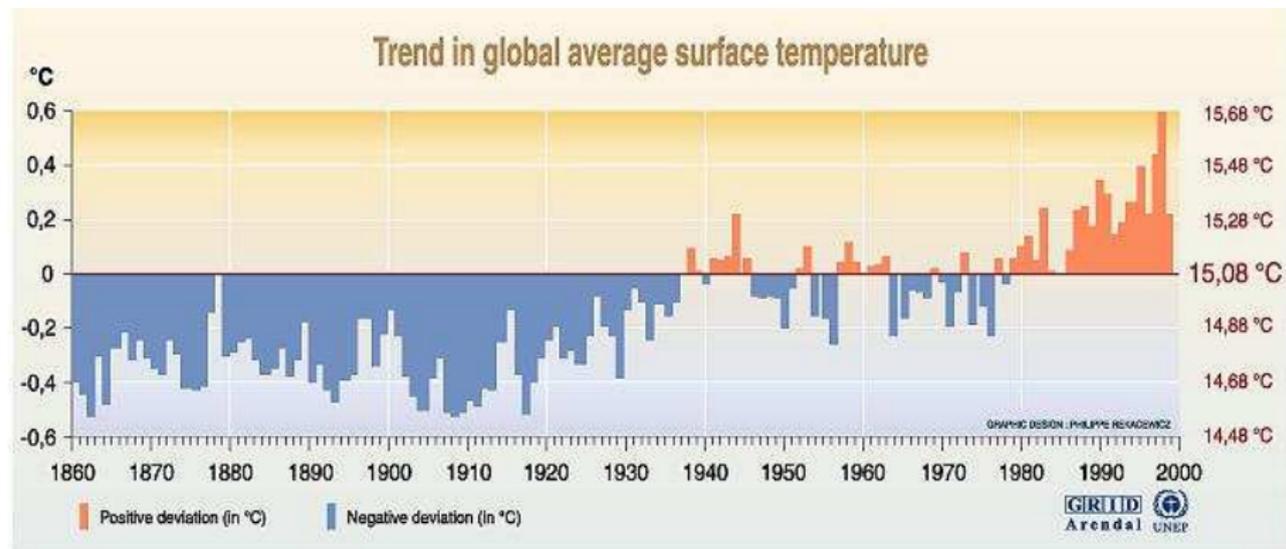


2001



Pourquoi étudier les enveloppes fluides ?

Réchauffement climatique



Source: School of environmental sciences, climatic research unit, university of East Anglia, Norwich, United Kingdom, 1999.

Pourquoi étudier les enveloppes fluides ?

Typhon dévastateur aux Philippines

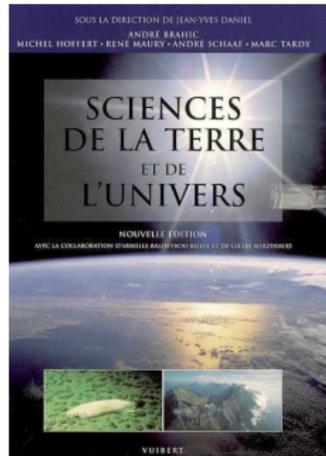
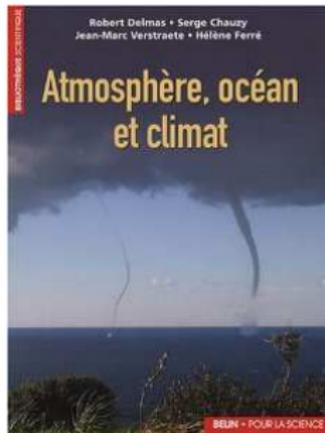
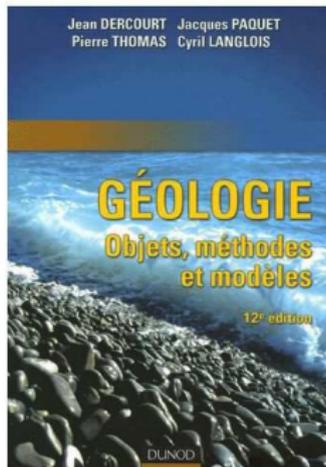
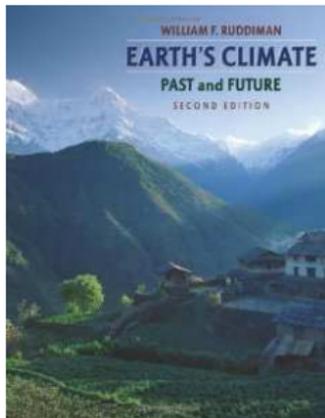


Pourquoi étudier les enveloppes fluides ?

Énergies renouvelables



Quelques ouvrages...



1. Introduction
- 2. Caractéristiques des enveloppes fluides**
3. Atmosphère et circulation atmosphérique
4. Océan et circulation océanique
5. Climats et paléoclimats

Taille des enveloppes fluides

- **Atmosphère** : enveloppe gazeuse autour de la Terre de ~ 150 km
- **Océan** : enveloppe liquide autour de 70.8% de la Terre

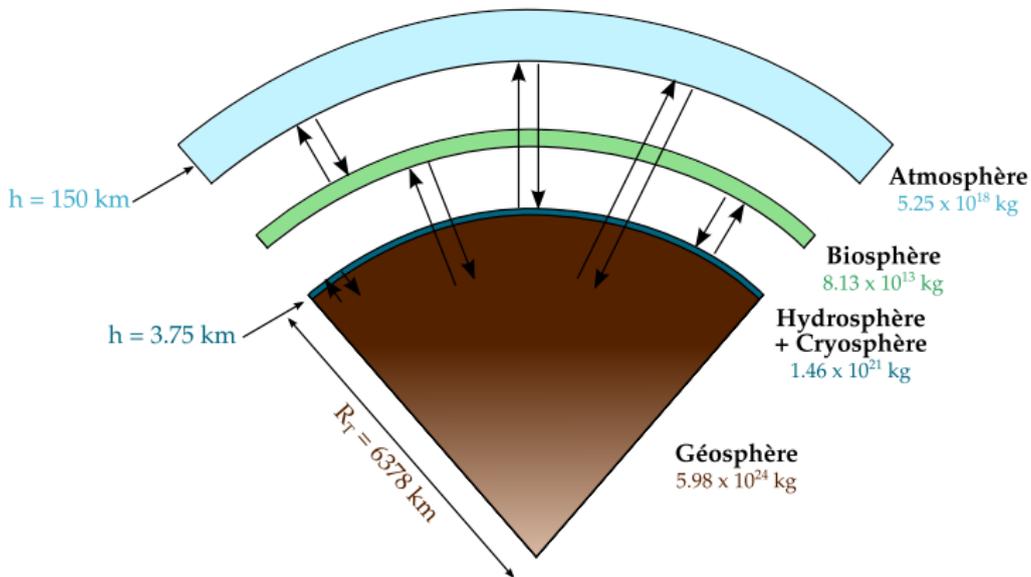
"How inappropriate to call this planet Earth when clearly it is Ocean"

Arthur C. Clarke, 1990

- **Reste de l'hydrosphère**
 - ↪ calottes polaires 3%
 - ↪ banquises $< 1\%$
 - ↪ lacs et rivières $\lll 1\%$
 - ↪ glaciers d'altitude $\lll 1\%$



Masse et épaisseur des enveloppes fluides



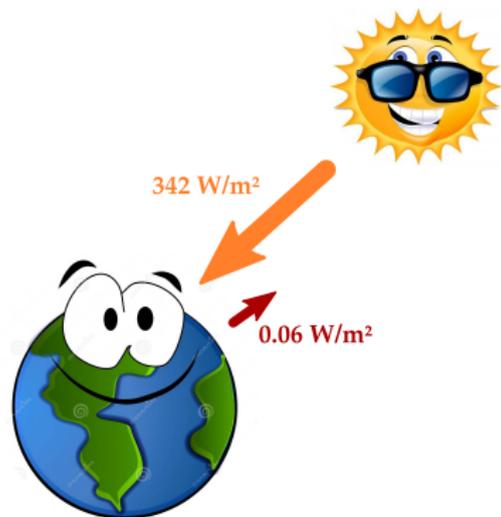
- enveloppes fluides = petits réservoirs

↪ $m_{\text{geosphere}} \sim 4000 \times m_{\text{hydrosphere}}$

↪ $m_{\text{hydrosphere}} \sim 300 \times m_{\text{atmosphere}}$

Sources d'énergie et mouvement des enveloppes fluides

- 2 sources d'énergie potentielles :
 - ↪ énergie interne de la Terre (0.06 W/m^2)
 - ↪ énergie externe reçue du Soleil = insolation (342 W/m^2)
- Énergie solaire reçue par la Terre ~ 5500 fois plus importante que l'énergie liée au chauffage interne

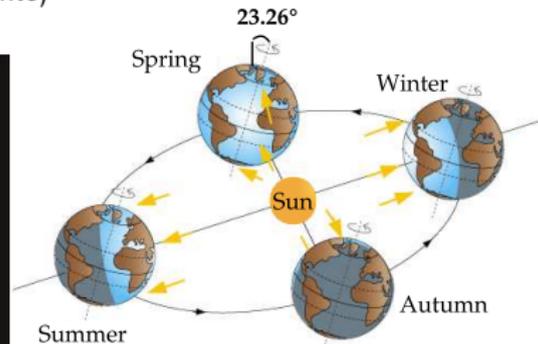
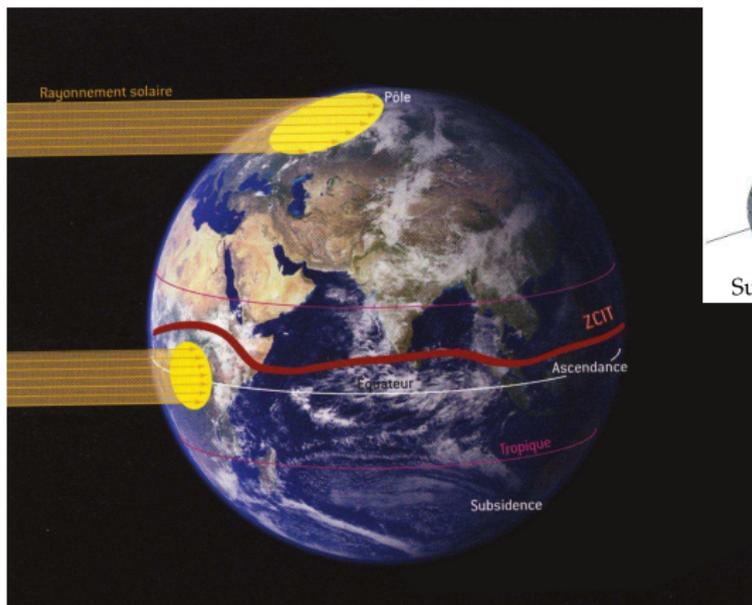


L'énergie solaire est à l'origine des mouvements des enveloppes fluides

Répartition de l'énergie sur Terre

- influence de la latitude

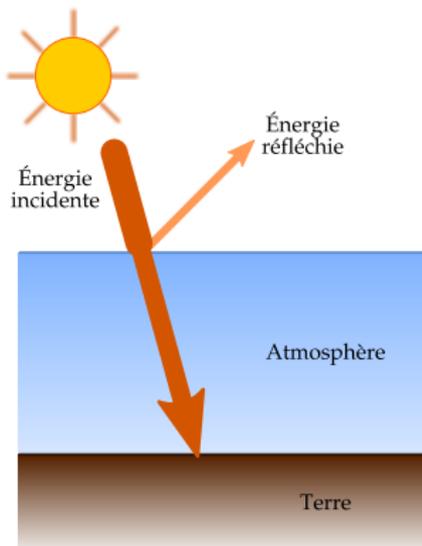
- ↪ maximum dans la région intertropicale (incidence subverticale)
- ↪ minimum aux pôles (incidence rasante)



Répartition de l'énergie sur Terre

- influence de la nature de la surface

$$\text{Albedo} = E_{\text{refléchie}} / E_{\text{recue}}$$

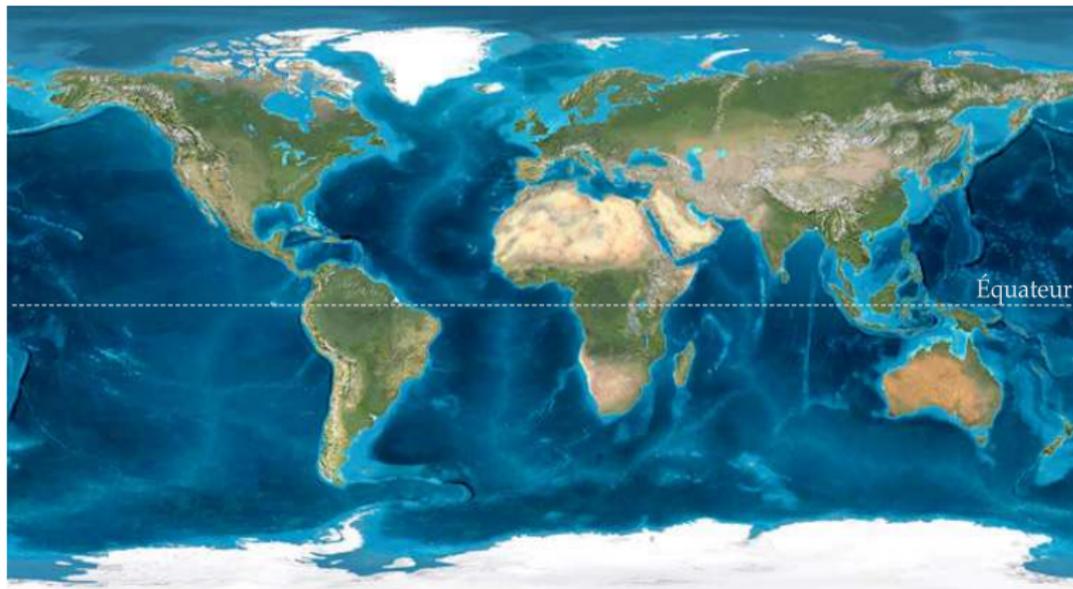


Surface	Albédo
Neige/Glace	60-90%
Nuages	40-90%
Désert de sable	30-50%
Tundra	15-35%
Forêts	5-20%
Océans/mers	5-10%

Répartition de l'énergie sur Terre

- influence de la nature de la surface

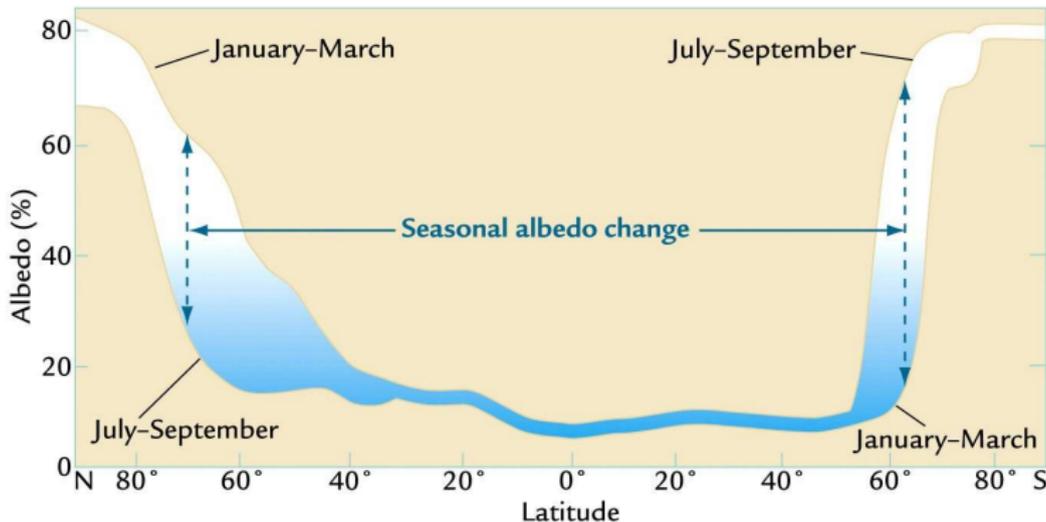
$$\text{Albedo} = E_{\text{reflechie}} / E_{\text{recue}}$$



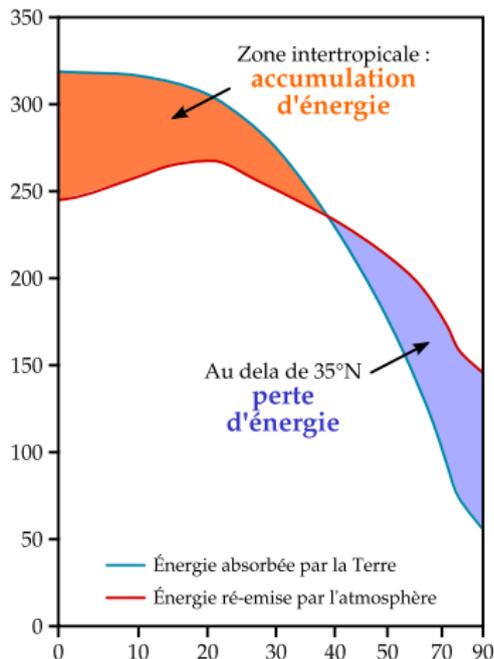
Répartition de l'énergie sur Terre

- influence de la nature de la surface

$$\text{Albedo} = E_{\text{reflechie}} / E_{\text{recue}}$$



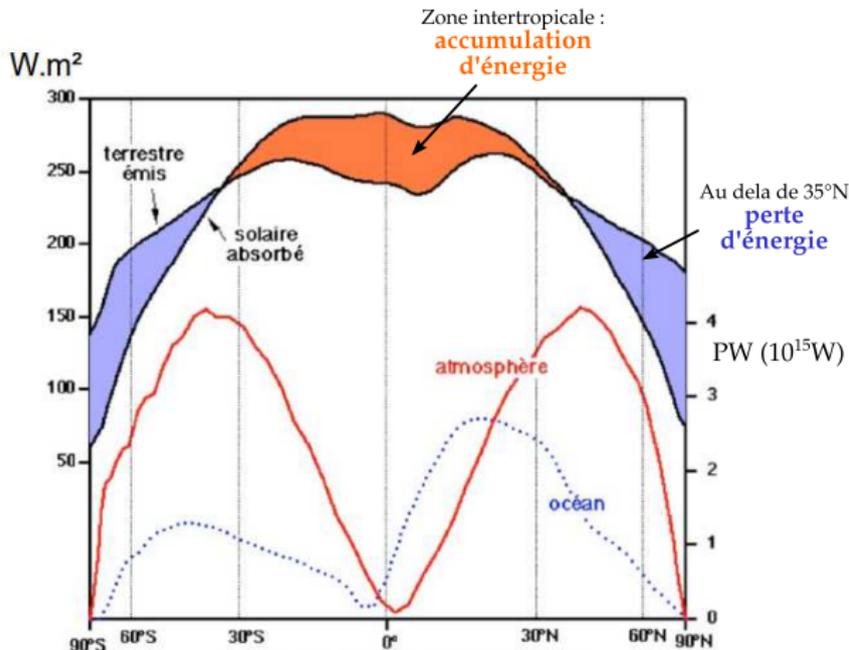
Bilan énergétique en fonction de la latitude



Enveloppes fluides reçoivent et absorbent plus d'énergie à l'équateur qu'aux pôles

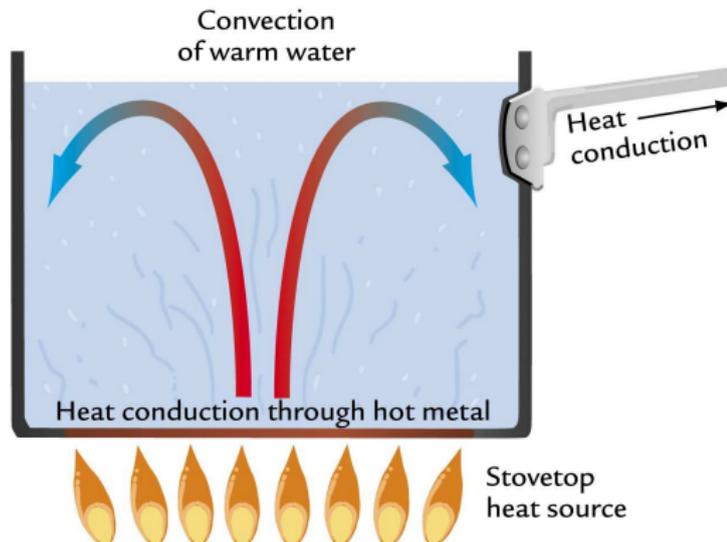
Redistribution méridienne de la chaleur

- Les tropiques ne s'échauffent pas indéfiniment et les pôles ne deviennent pas de plus en plus froids
 - ↪ Transport d'énergie assuré par les enveloppes fluides



Redistribution méridienne de la chaleur

- Les tropiques ne s'échauffent pas indéfiniment et les pôles ne deviennent pas de plus en plus froids
 - ↪ Transport d'énergie assuré par les enveloppes fluides



Transfert de chaleur par CONVECTION

1. Introduction
2. Caractéristiques des enveloppes fluides
- 3. Atmosphère et circulation atmosphérique**
4. Océan et circulation océanique
5. Climats et paléoclimats

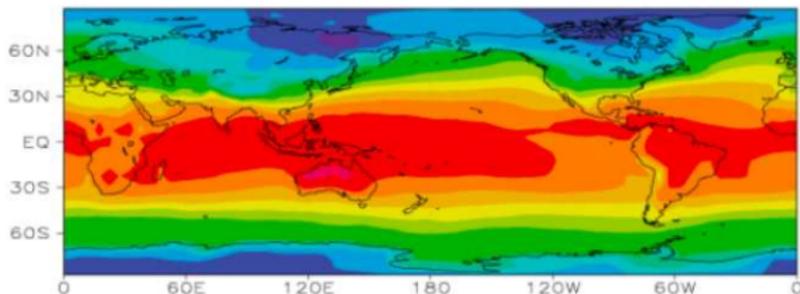
Quelques caractéristiques physico-chimiques

À l'altitude 0

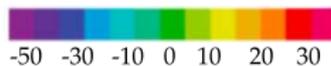
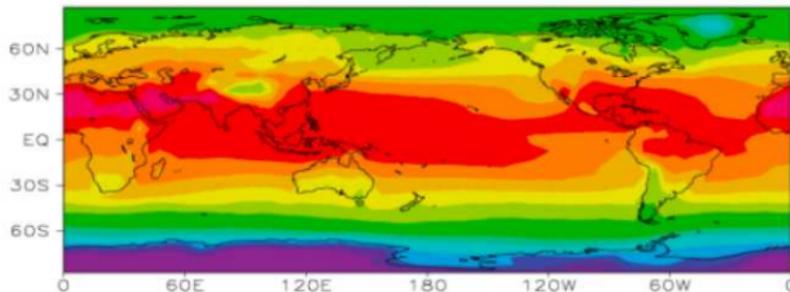
- Température moyenne : 15°C
- Masse vol. de l'air $1.2 \text{ kg/m}^3 \approx 0.001$ fois la masse vol. de l'eau
- Pression : 1013.25 hPa

Répartition zonale des températures

Décembre-Janvier-Février



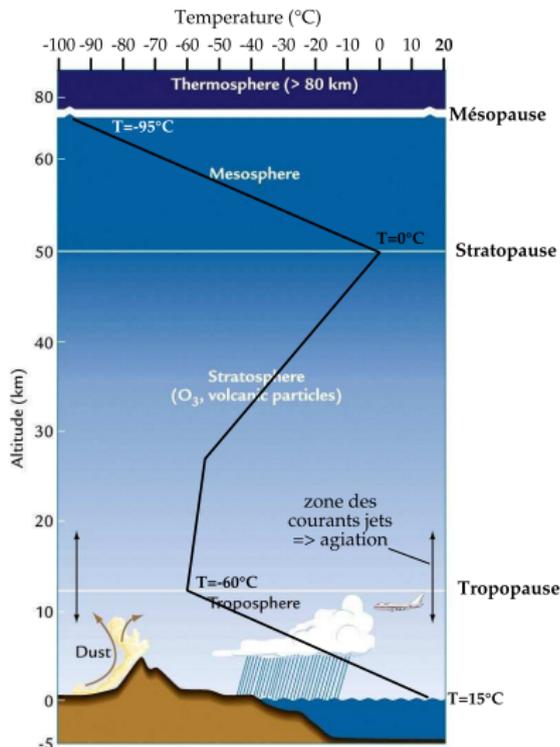
Juin-Juillet-Aout



T(°C) de l'air de surface

Structure verticale de l'atmosphère

⇒ fondée sur la température



THERMOSPHÈRE

- gaz ionisés par UV et rayons X

MÉSOSPHÈRE

- captage d'énergie ~ 0 (~ pas de matière)

STRATOSPHÈRE

- T augmente : absorption des UV par O_3
- 19.9% de la $m_{\text{atmosphérique}}$
- couche très stable verticalement
- O_3 naturelle

- T ~ stable

TROPOSPHÈRE

- diminution de température de 6.5°C/km
- couche instable et turbulente
- 80% de la $m_{\text{atmosphérique}}$
- 98% de la vapeur d'eau, O_3 anthropique

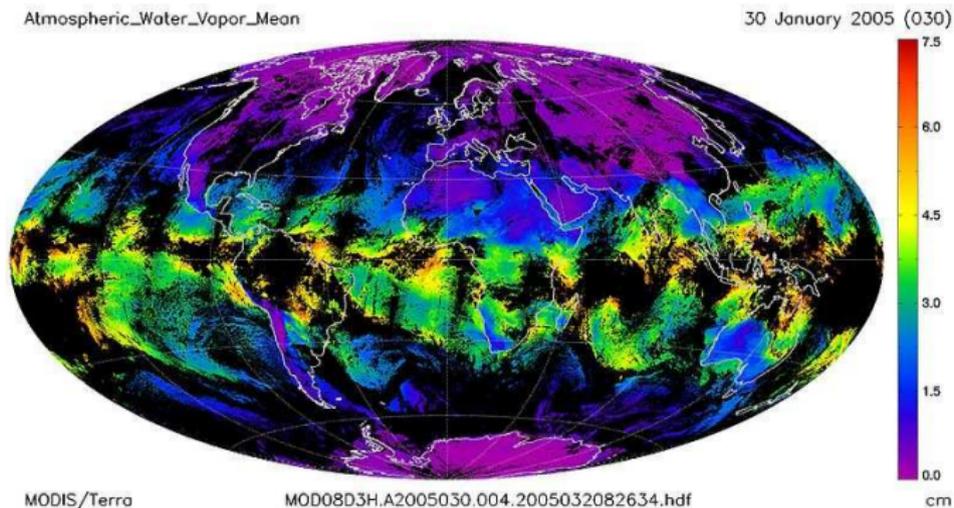
Composition chimique l'atmosphère

⇒ principalement troposphère et base de la stratosphère

Composition de l'atmosphère au voisinage de la surface (0 à 25 km). En bleu italique, les gaz à effet de serre		
GAZ	FORMULE CHIMIQUE	ABONDANCE (en volume)
Azote	N_2	78,08%
Oxygène	O_2	20,95%
<i>Vapeur d'eau</i>	<i>H_2O</i>	<i>0 à 4%</i>
Argon	Ar	0,93%
<i>Dioxyde de carbone</i>	<i>CO_2</i>	<i>0,0370%</i>
Néon	Ne	0,0018%
Hélium	He	0,0005%
<i>Méthane</i>	<i>CH_4</i>	<i>0,00017%</i>
Hydrogène	H_2	0,00005%
<i>Oxyde nitreux</i>	<i>N_2O</i>	<i>0,00003%</i>
Ozone	O_3	0,000004%

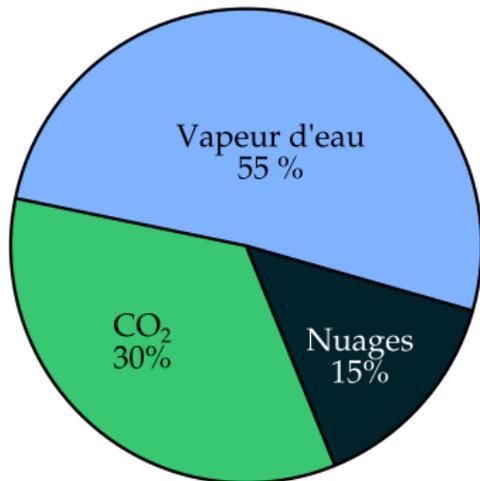
Composition chimique l'atmosphère

⇒ principalement troposphère et base de la stratosphère

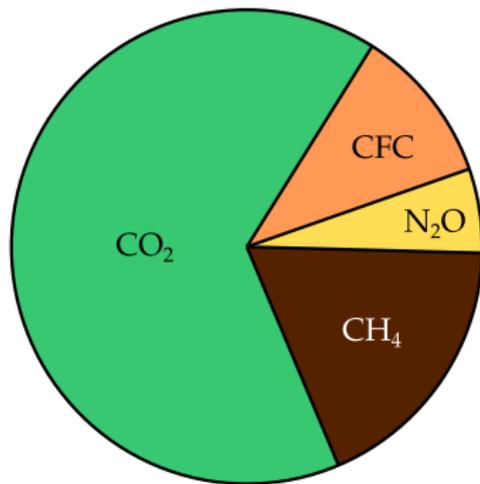


La vapeur d'eau : principal gaz à effet de serre

Principaux constituants atmosphériques contribuant à l'effet de serre

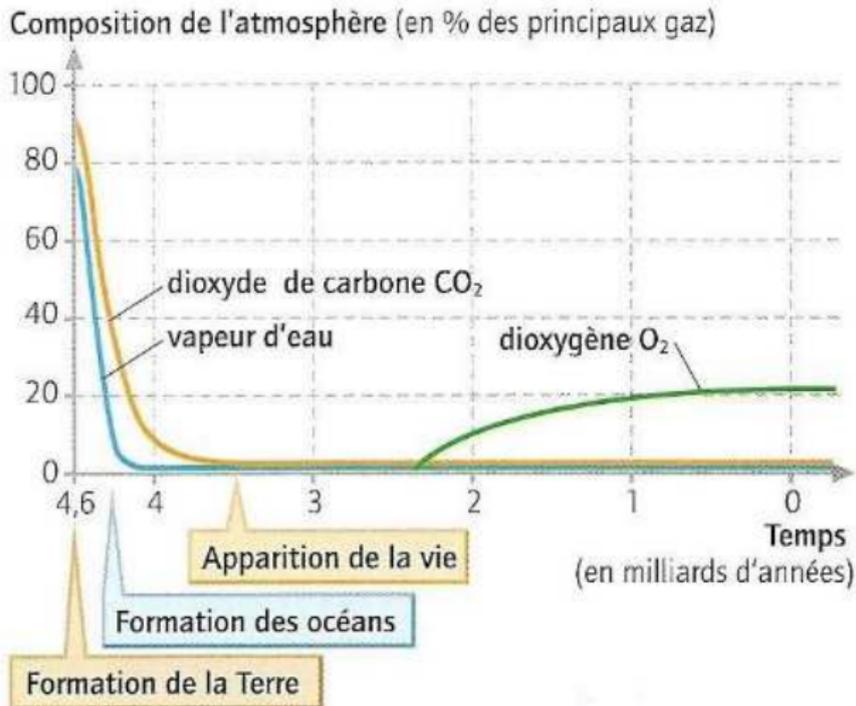


Gaz naturels
~150 W/m²



Gaz anthropiques
~2.5 W/m²

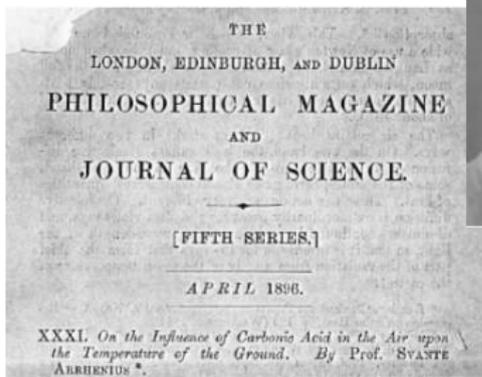
Évolution de la composition de l'atmosphère



Découverte de l'effet de serre

Horace-Bénédict de Saussure en 1780

Le naturaliste suisse avait construit un appareil constitué de cinq caisses de verre emboîtées les unes dans les autres, munies de thermomètres, pour montrer que, plus l'on va vers le centre, plus la température s'élève, jusqu'à obtenir une température d'équilibre ($\sim 109^{\circ}\text{C}$)!

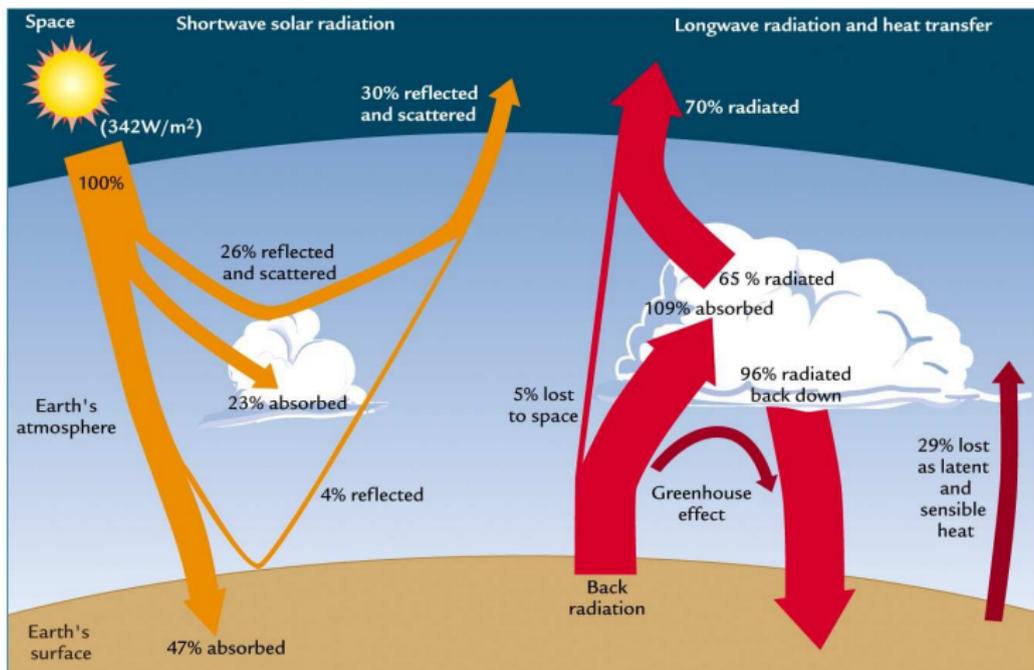


Svante Arrhénius en 1896

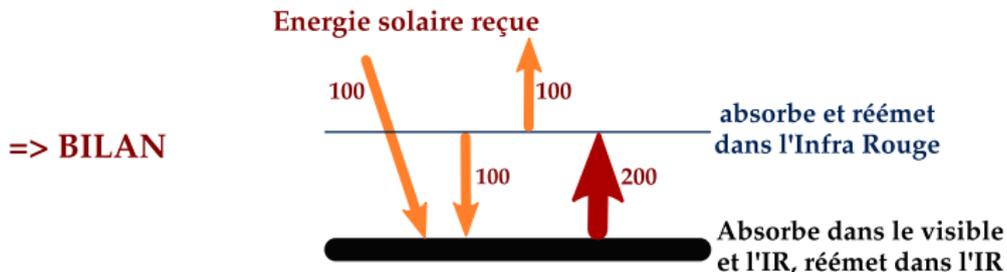
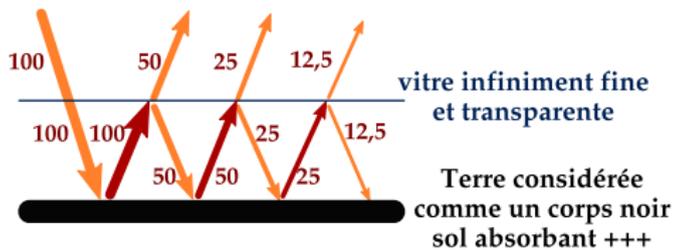
Un doublement du CO_2 s'accompagne d'une élévation de la température moyenne de 6°C .

"Comme ce serait merveilleux si les émissions humaines de gaz carbonique vers l'atmosphère pouvaient augmenter d'autant le climat de la Terre. Nous en serions heureux en Suède".

Effet de serre



Effet de serre

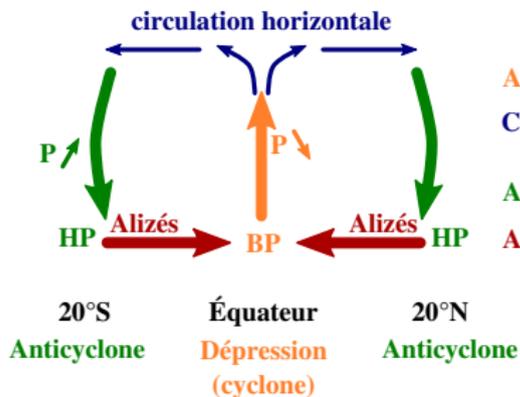


Sans effet de serre $T_{\text{Terre}} = -19^{\circ}\text{C}$
 ... avec effet de serre $T_{\text{Terre}} = 15^{\circ}\text{C}$

Circulation générale atmosphérique

- Mouvements verticaux dans l'atmosphère

↪ exemple de la zone de convergence intertropicale (ZCIT)



Air ascendant : chargé de vapeur d'eau => formation de cumulonimbus

Circulation horizontale : échanges de chaleur avec l'environnement
=> se refroidit jusqu'à tomber

Air descendant : à l'origine des anticyclones (cf Açores, Sibérie)

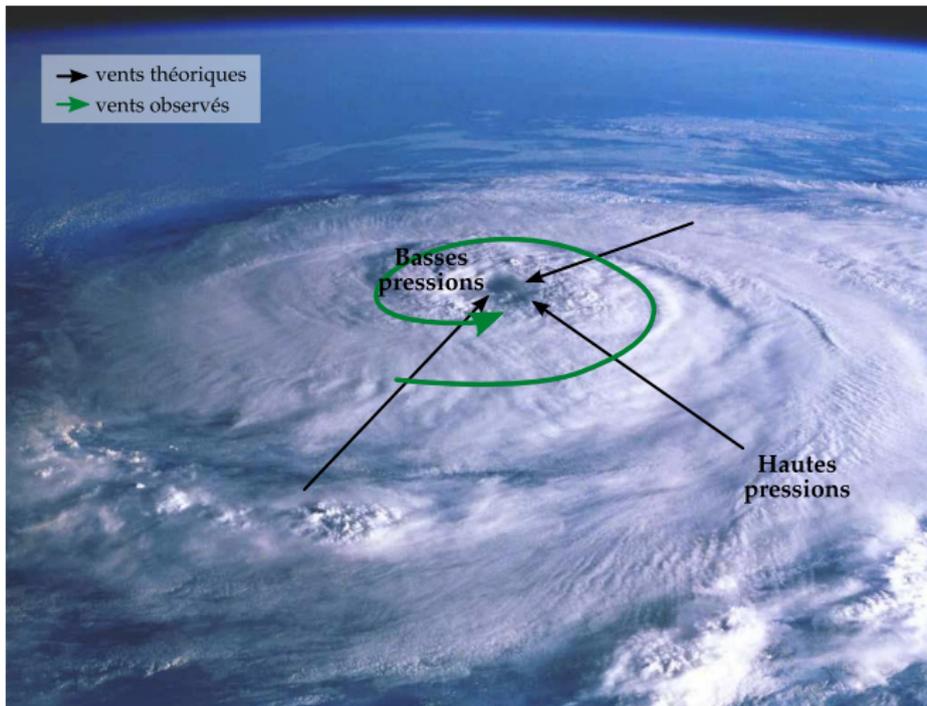
Alizés : mouvement horizontal d'air des HP vers les BP

$$PV = nRT$$

Circulation générale atmosphérique

- Mouvements horizontaux dans l'atmosphère

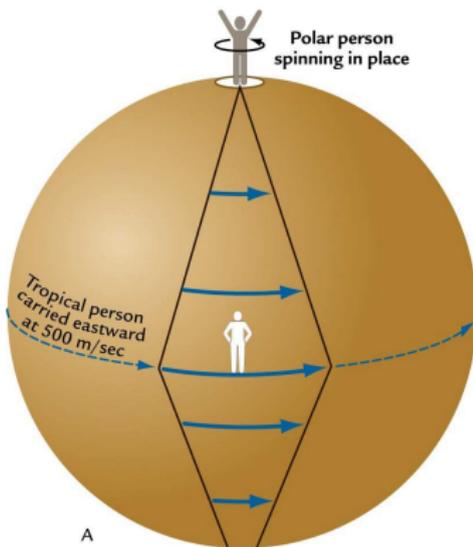
↪ exemple de la zone de convergence intertropicale (ZCIT)



Circulation générale atmosphérique

- Mouvements horizontaux dans l'atmosphère

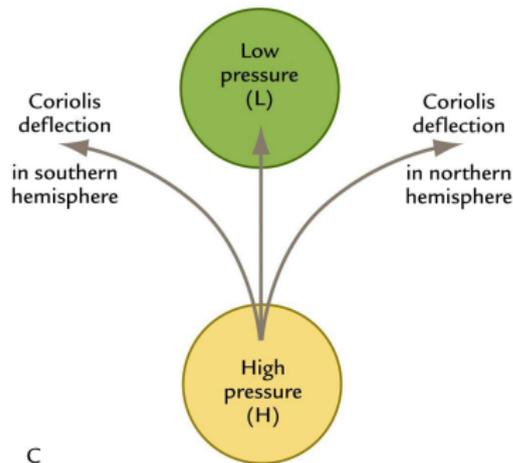
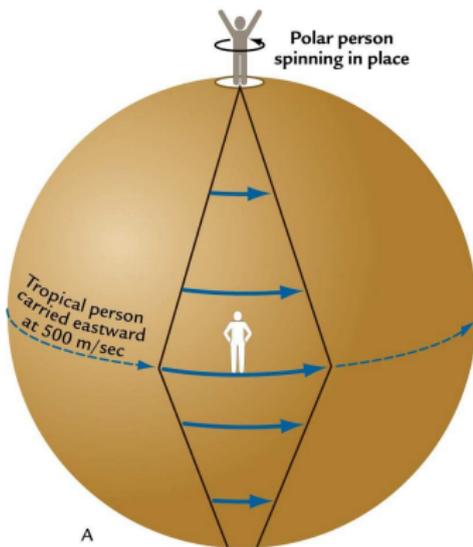
↪ principe de la force de Coriolis



Circulation générale atmosphérique

- Mouvements horizontaux dans l'atmosphère

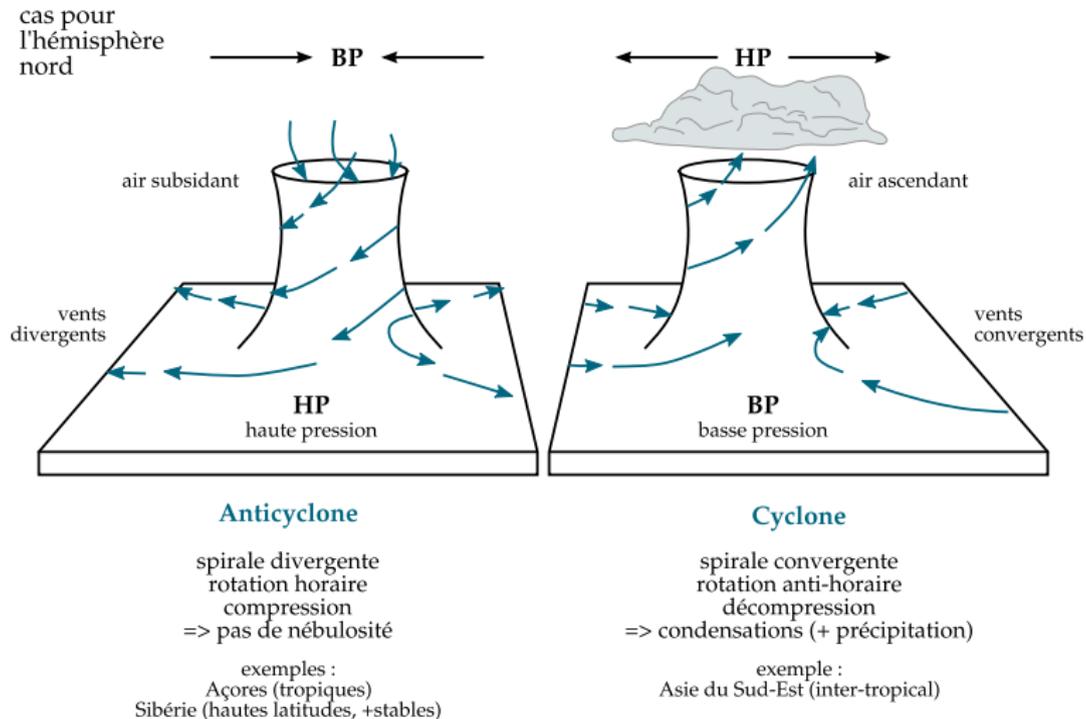
↪ principe de la force de Coriolis



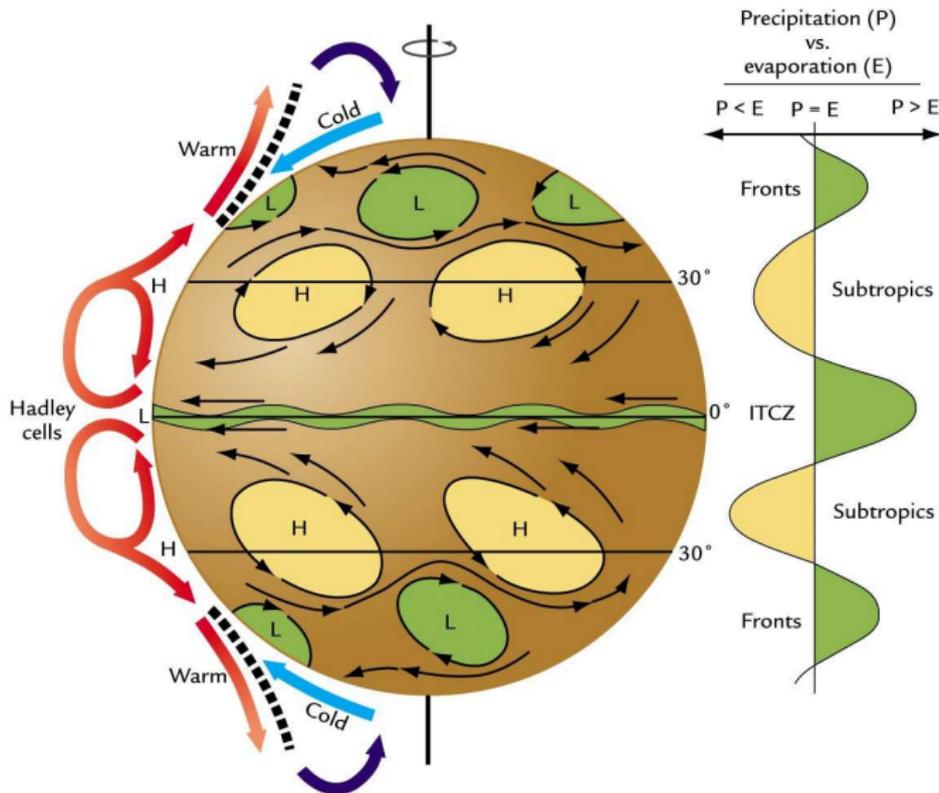
- dévie les courants vers la droite dans l'hémisphère nord
- dévie les courants vers la gauche dans l'hémisphère sud

Circulation générale atmosphérique

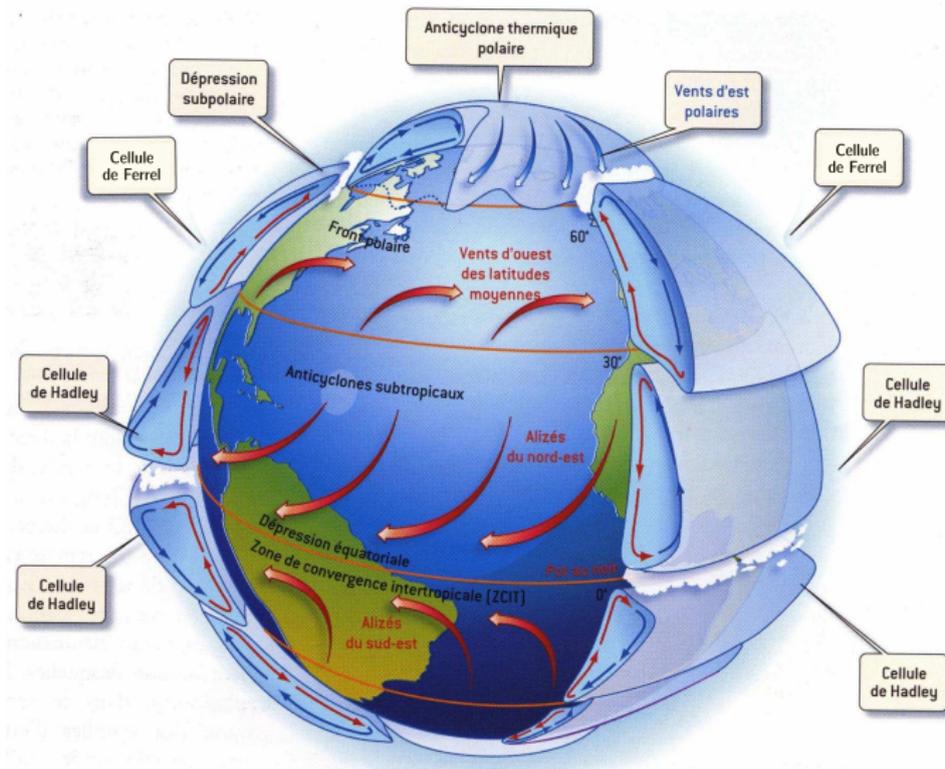
● Mouvements 3D des masses d'air



Circulation générale atmosphérique

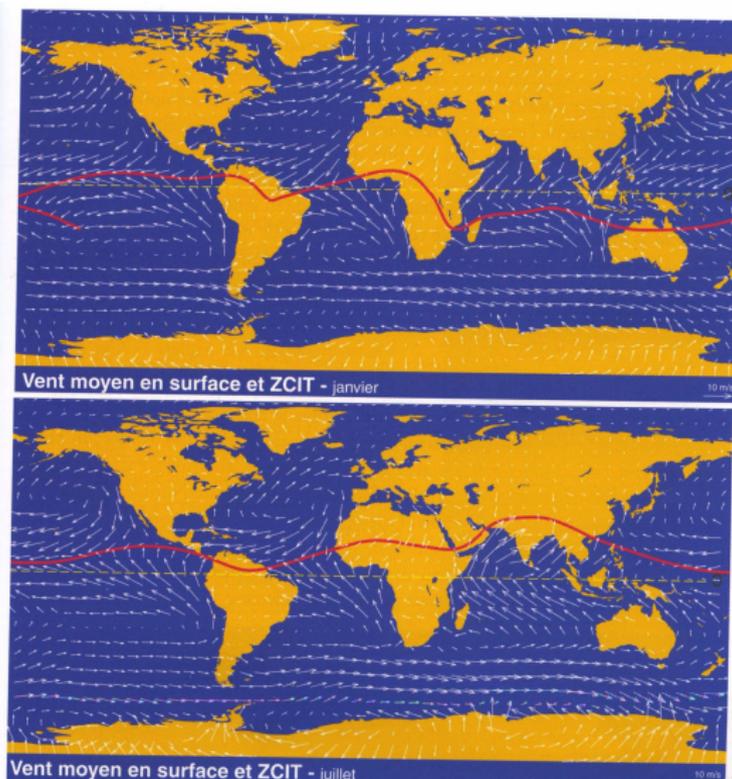


Circulation générale atmosphérique

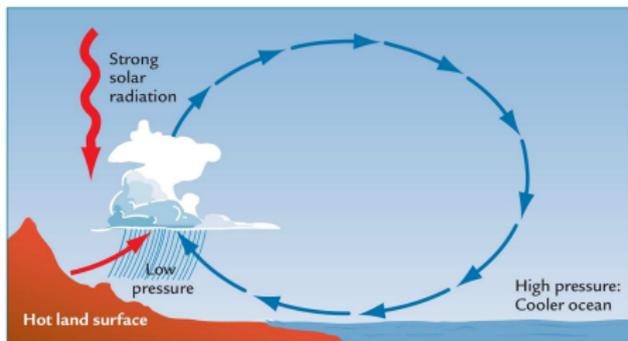


Alternance saisonnière

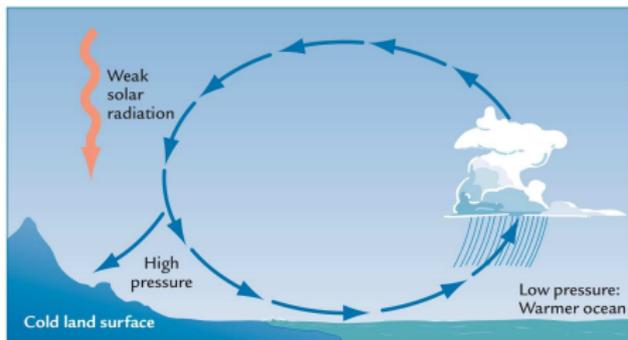
- été boréal vs été austral



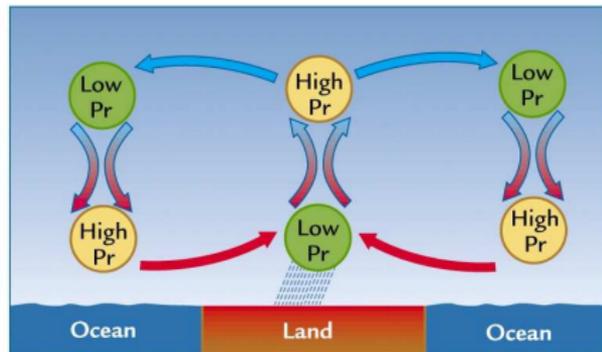
Exemple des moussons



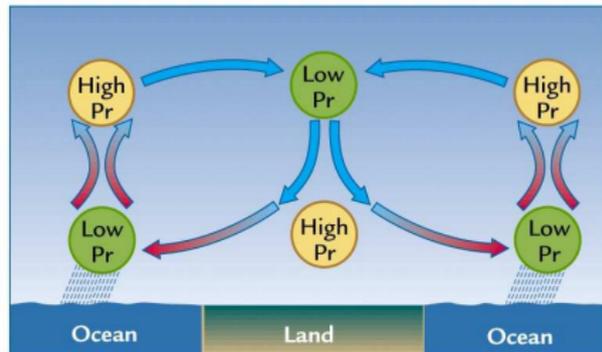
A Summer monsoon



B Winter monsoon



A Summer

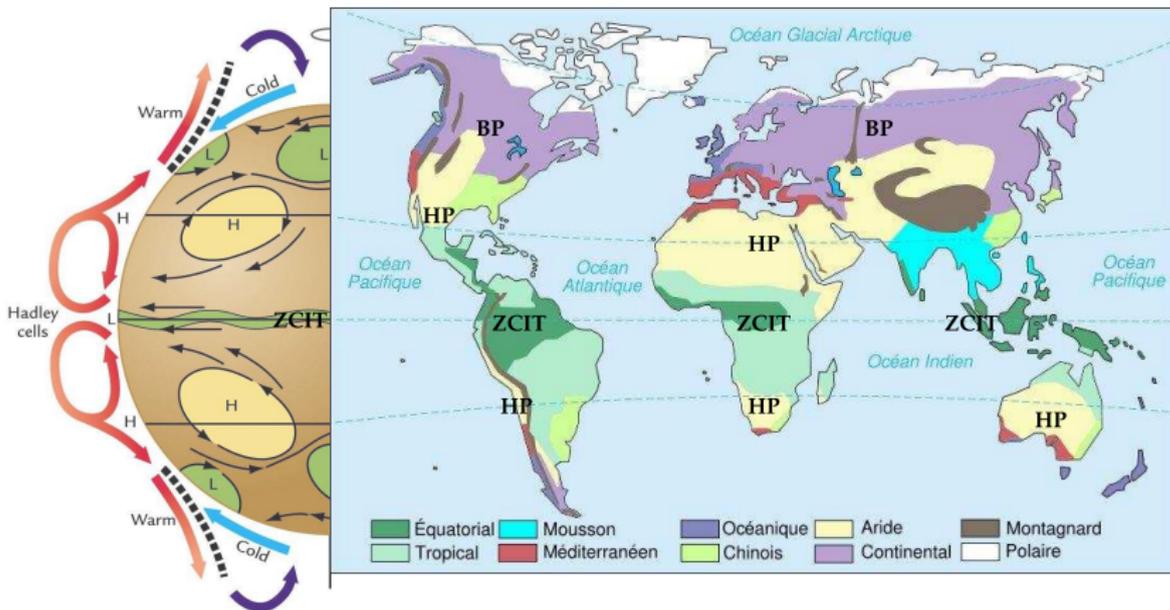


B Winter

Circulation atmosphérique et climats de la Terre

- circulation zonale en bande de 30° de latitude

↪ répartition zonale des climats



Conclusions - Atmosphère

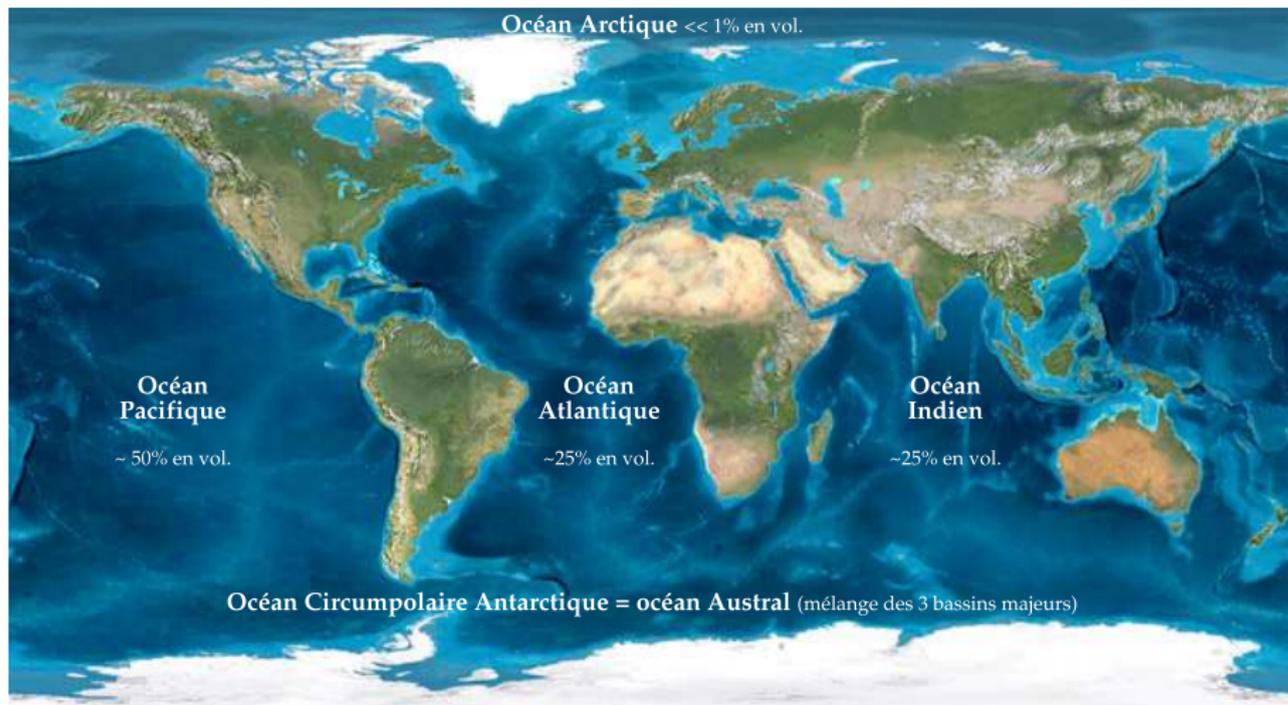
- T et P moyennes au sol : 15°C et 1010 hPa
- T à la surface de la Terre : répartition zonale liée à l'insolation
- stratification verticale marquée en fonction de la température
- 80% de la masse de l'atmosphère est comprise dans les 12 premiers km (troposphère)
- mouvements verticaux liés à la répartition zonale des T de surface
- force de Coriolis : effet majeur sur les mouvements de masse d'air
- mouvements horizontaux dans l'hémisphère nord : enroulement anti-horaire autour des zones de BP (cyclone), expulsion horaire depuis les zones de HP (anticyclones)
- circulation générale : 3 boucles de convections (Hadley, Ferrel, polaire) à cause de F_{Coriolis}
- répartition zonale des climats liée à la circulation atmosphérique au 1^{er} ordre

1. Introduction
2. Caractéristiques des enveloppes fluides
3. Atmosphère et circulation atmosphérique
- 4. Océan et circulation océanique**
5. Climats et paléoclimats

Pourquoi étudier les océans ?

- la moitié de la population mondiale vit à proximité d'un océan (<80 km)
- les océans = principale source de nourriture de l'humanité
- océan = agent principal (quantité/unité de volume) de transport de chaleur sur Terre
- stockage et précipitation de composés chimiques : impact sur le climat de la terre (CO₂) , impact économique (Fe, Mn, Au...)

Répartition des océans



Profondeur moyenne des 3 bassins majeurs = 3.6-4 km

Profondeur moyenne de l'Arctique = 1.1 km

Répartition des océans

● Hémisphère nord

- ↪ 54% océans
- ↪ 46% continents

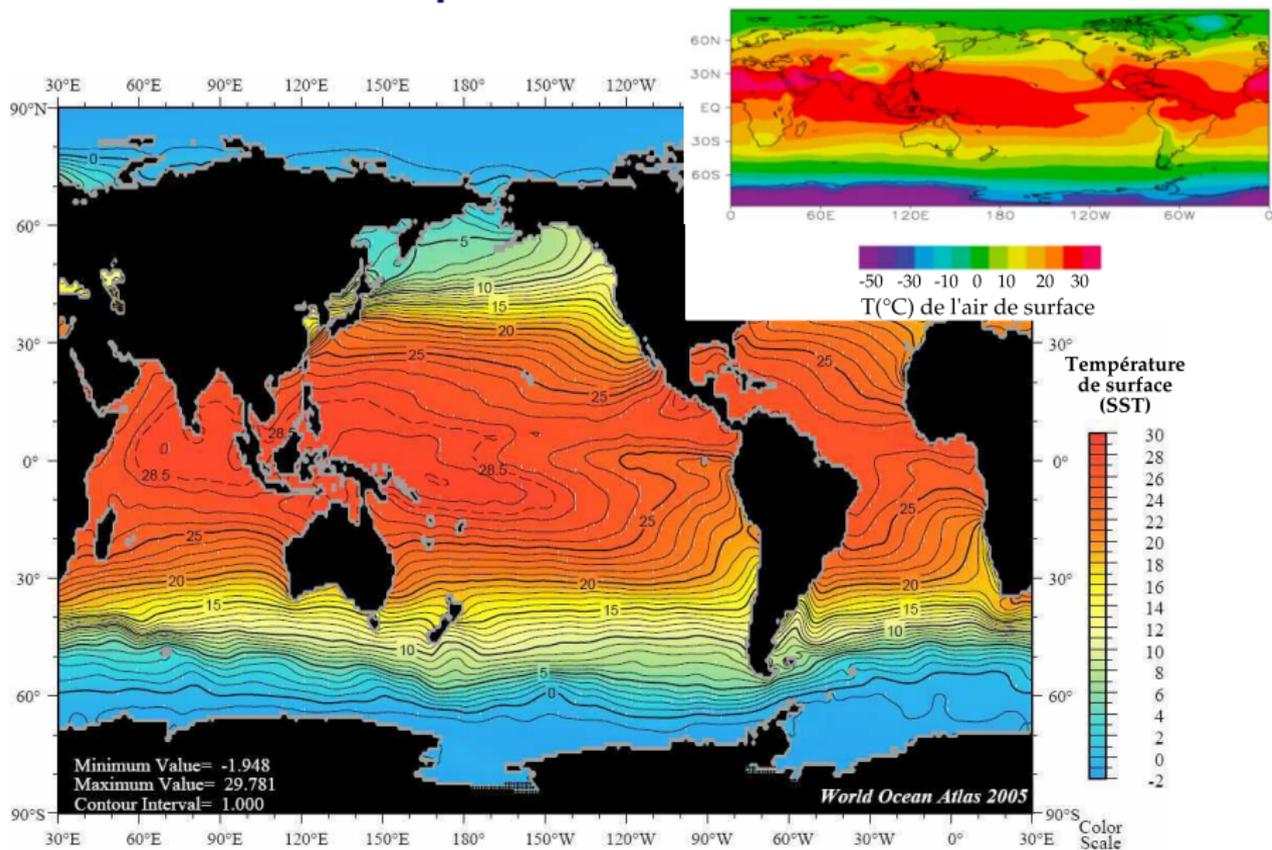


● Hémisphère sud

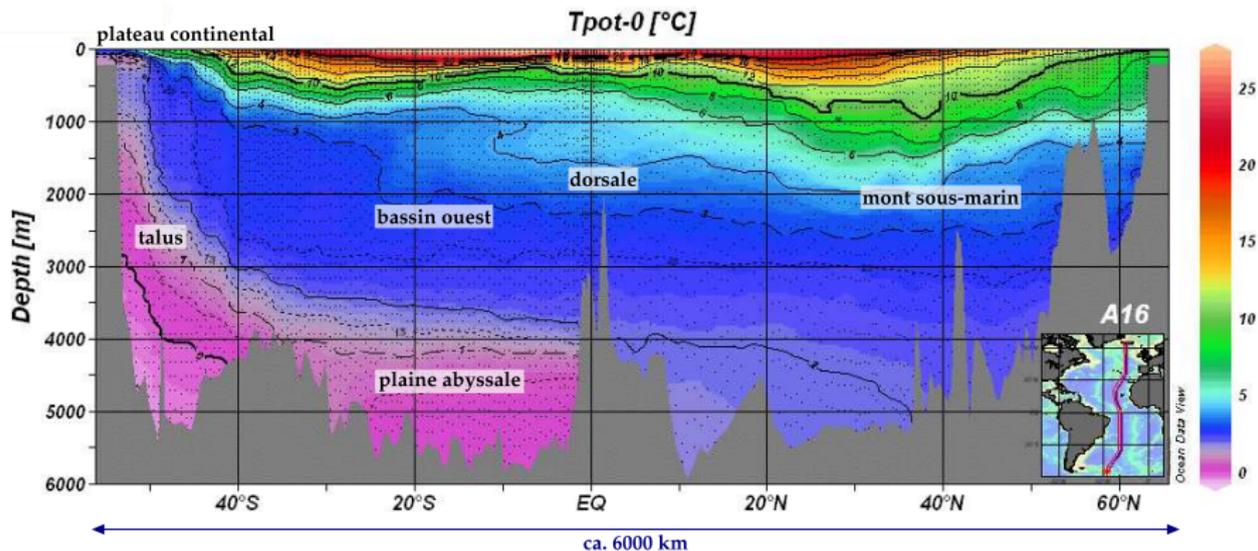
- ↪ 88% océans
- ↪ 12% continents



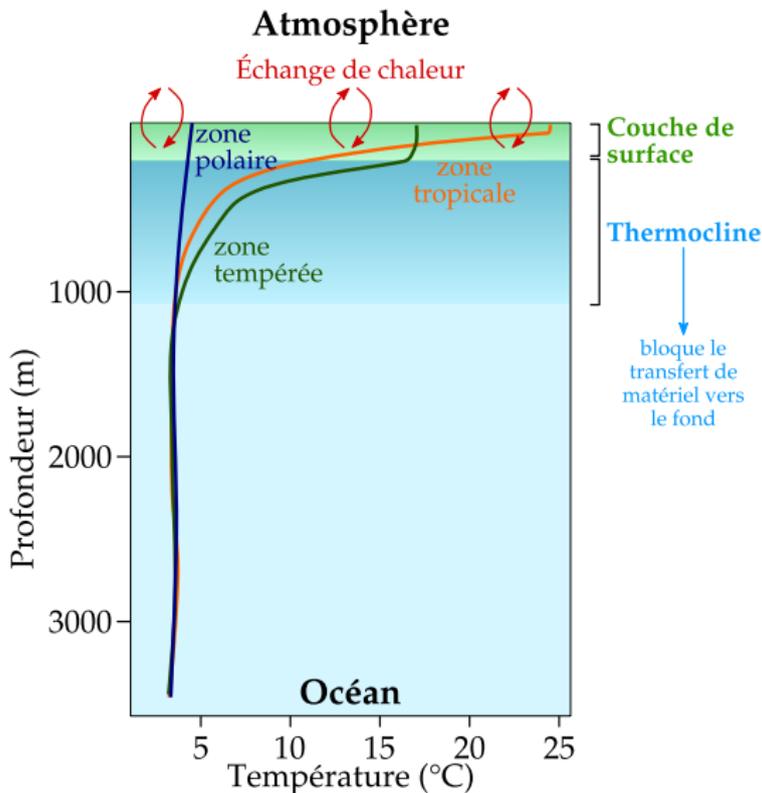
Températures de surface



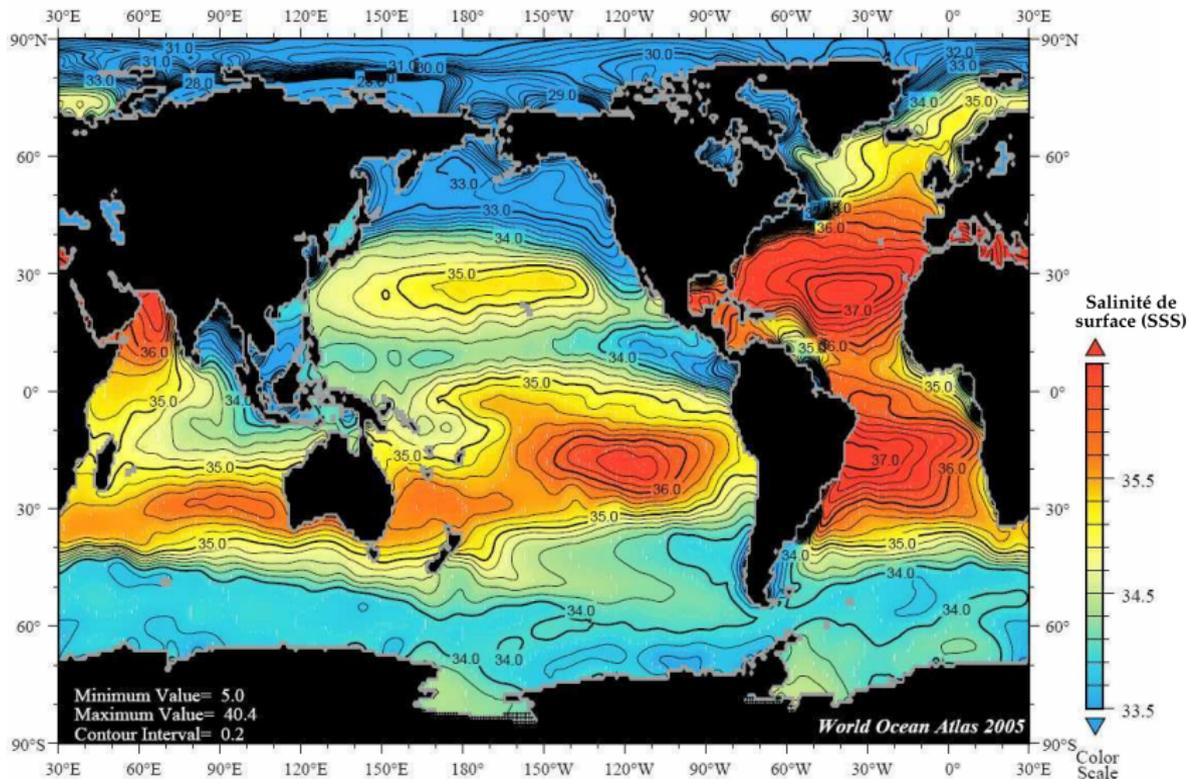
Section longitudinale dans l'Atlantique



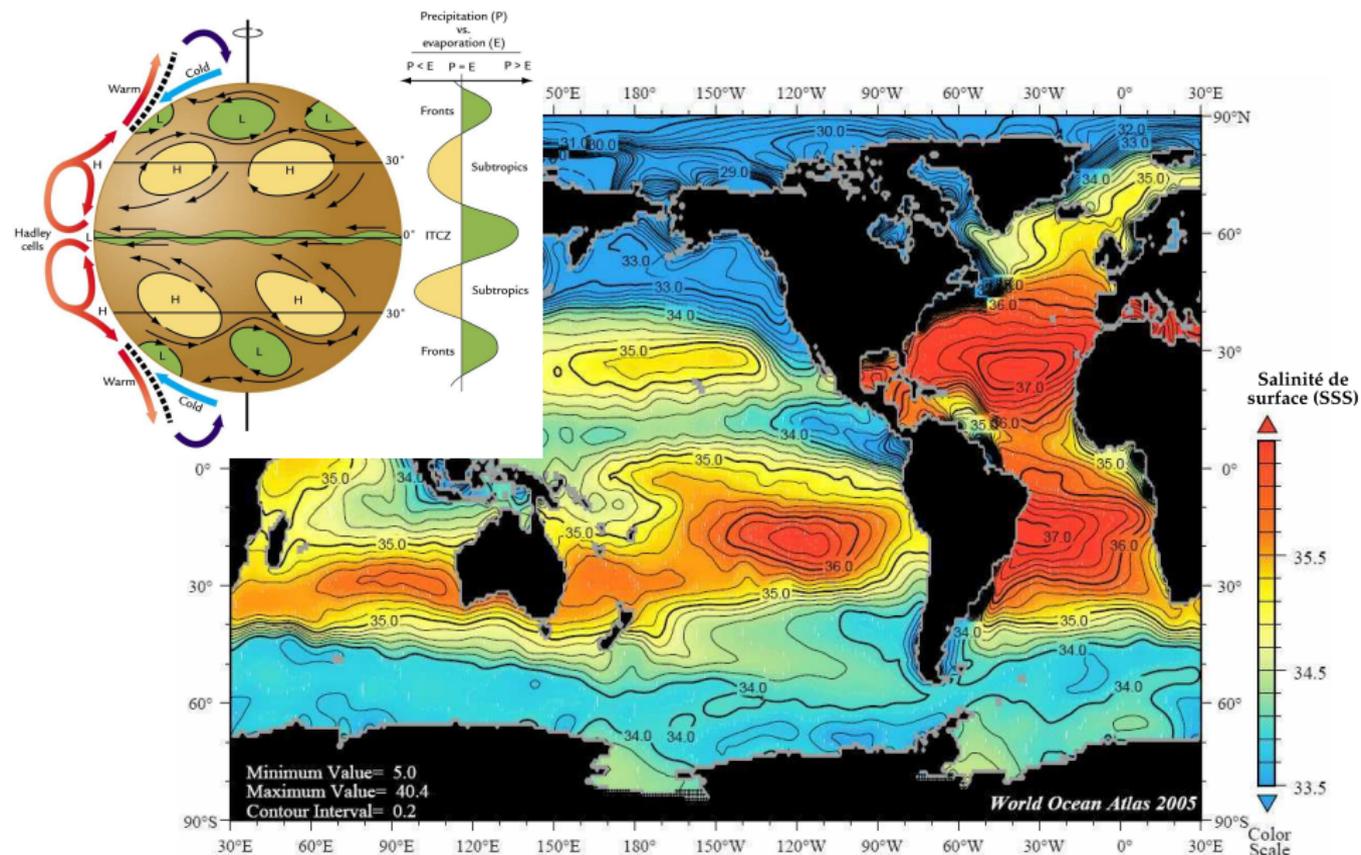
Structure verticale des océans



Salinités de surface

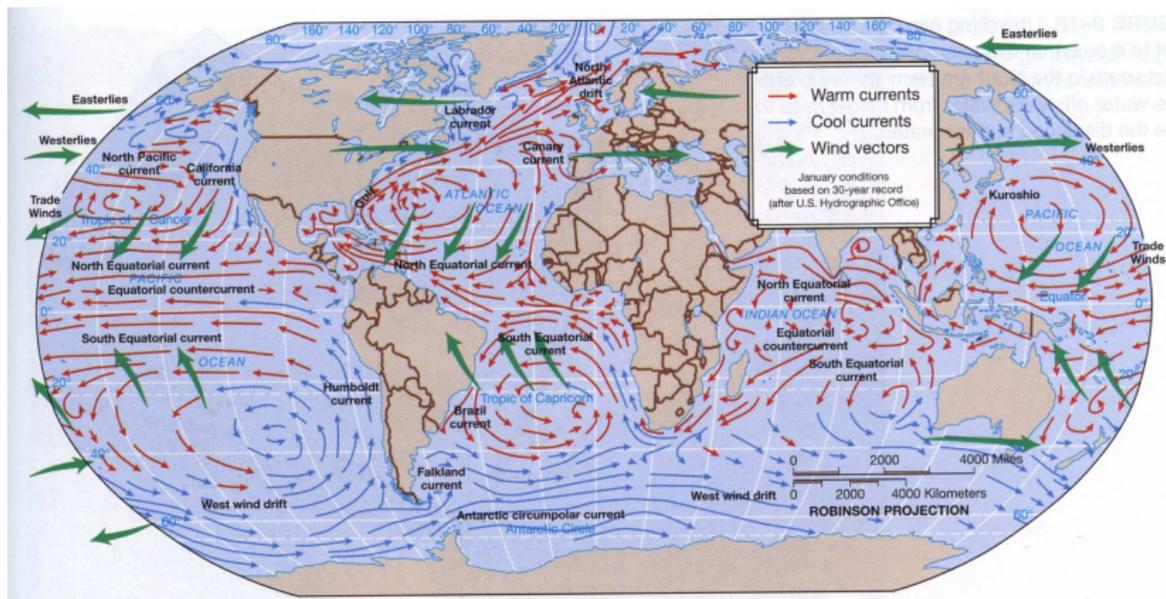


Salinités de surface



Couplage atmosphère/océan

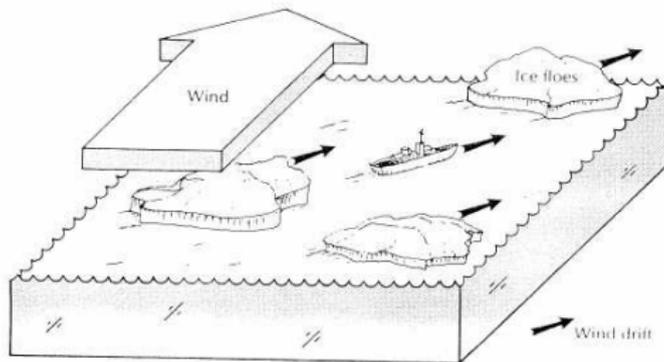
Courants de surface



Un peu d'histoire...

- Observation de Nansen (1898) sur la dérive de la banquise

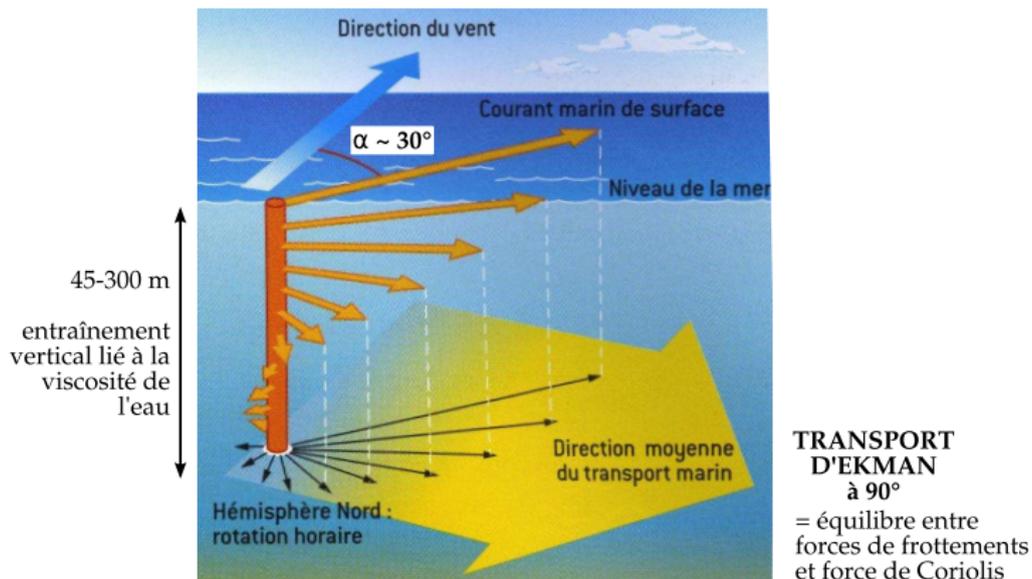
- ↪ Dans l'océan Arctique (hémisphère nord), la banquise se déplace à 20-40° vers la droite par rapport à la direction des vents.



Implique 3 forces (modélisation par Ekman) :

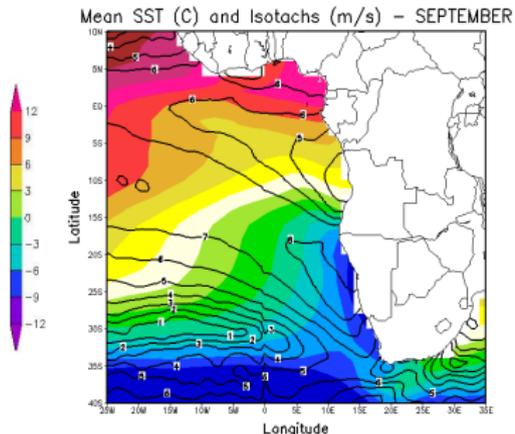
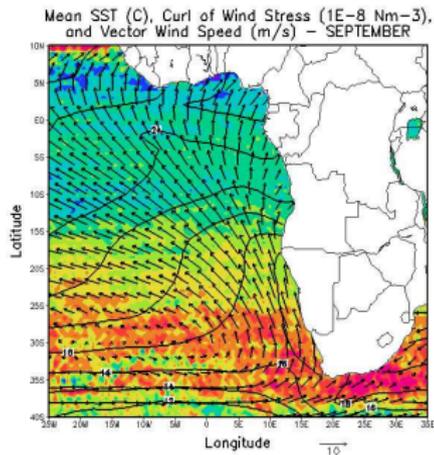
- ↪ tension superficielle liée au vent (frottements au sommet)
- ↪ force de Coriolis
- ↪ frottements dans l'eau (sinon la banquise irait aussi vite que le vent)

Transport d'Ekman

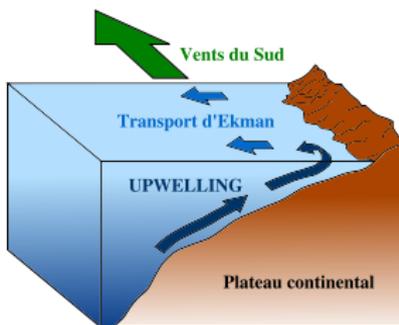
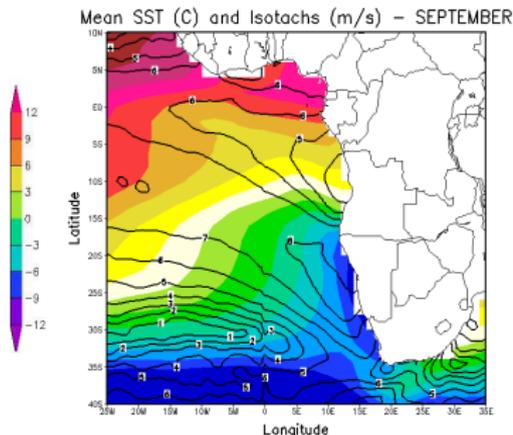
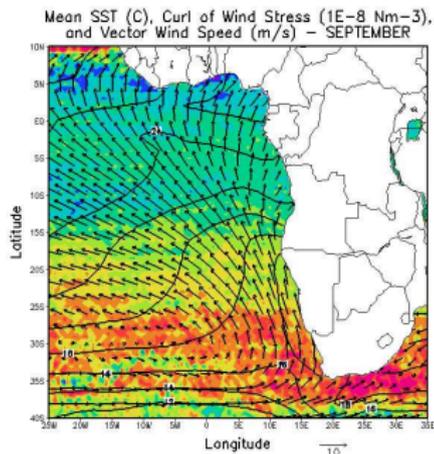


Le frottement des vents sur la surface océanique génère la circulation océanique de surface

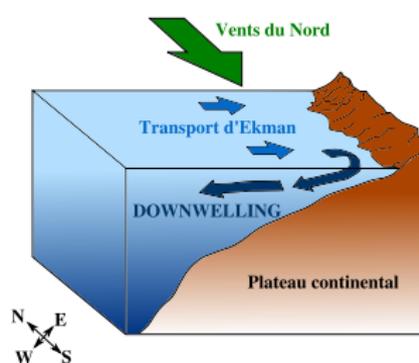
Transport d'Ekman et upwelling côtier



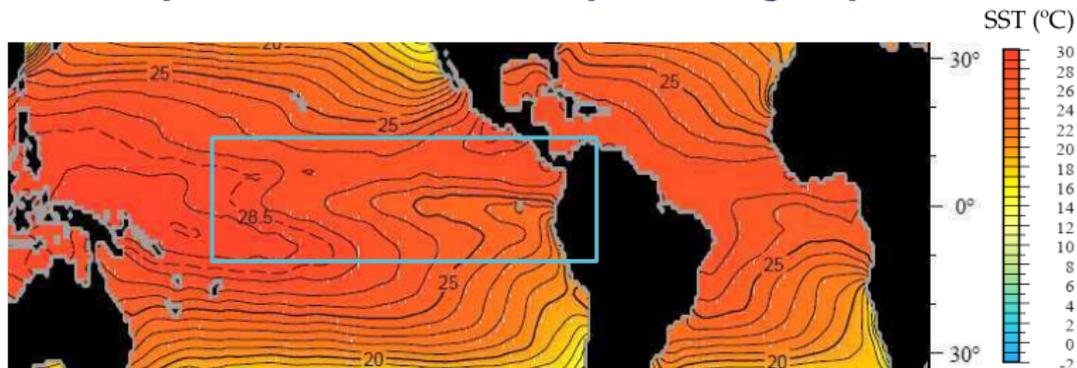
Transport d'Ekman et upwelling côtier



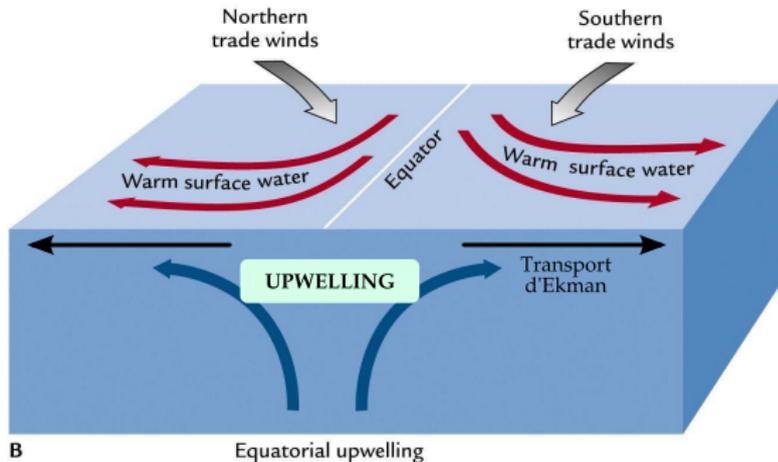
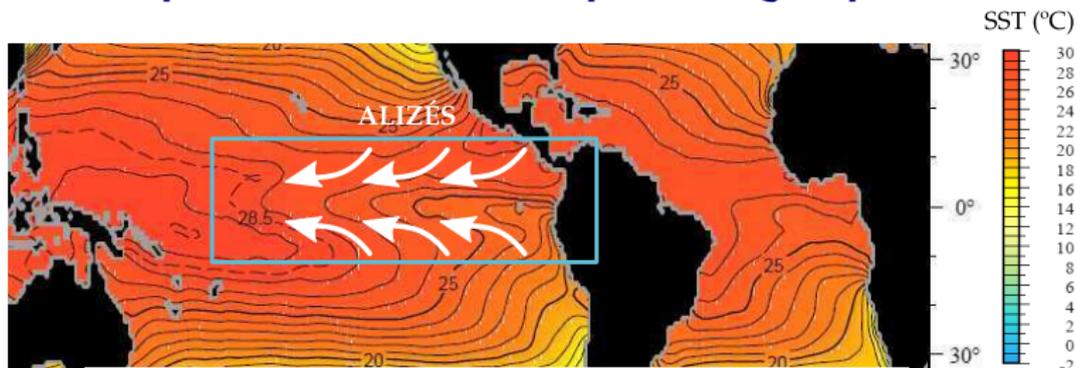
⚠ Cas pour l'hémisphère sud



Transport d'Ekman et upwelling équatorial

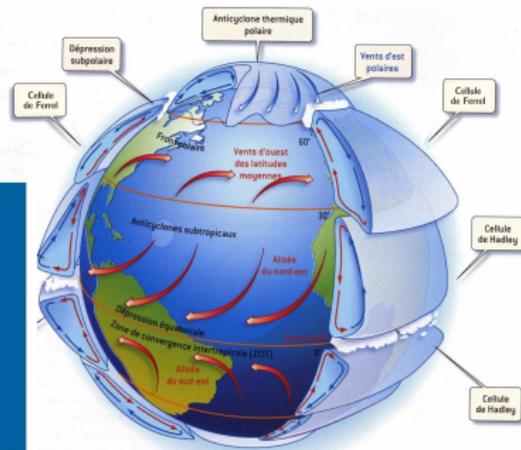
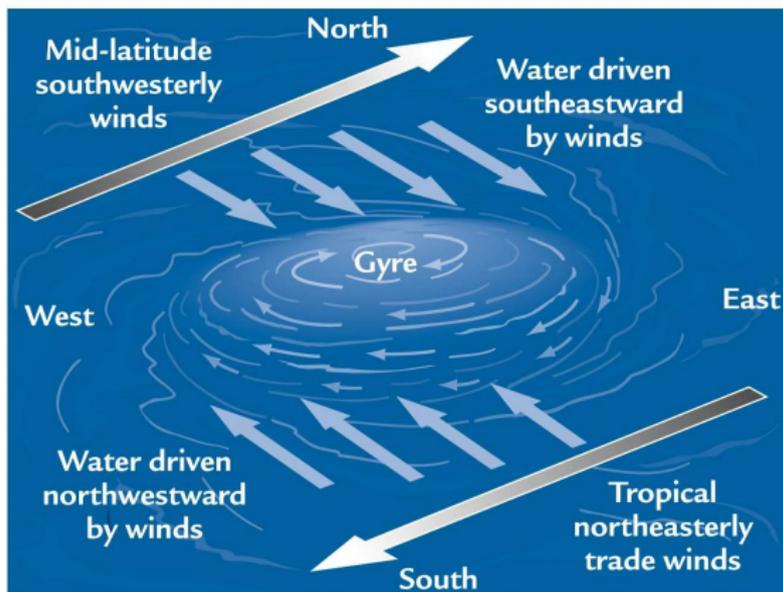


Transport d'Ekman et upwelling équatorial



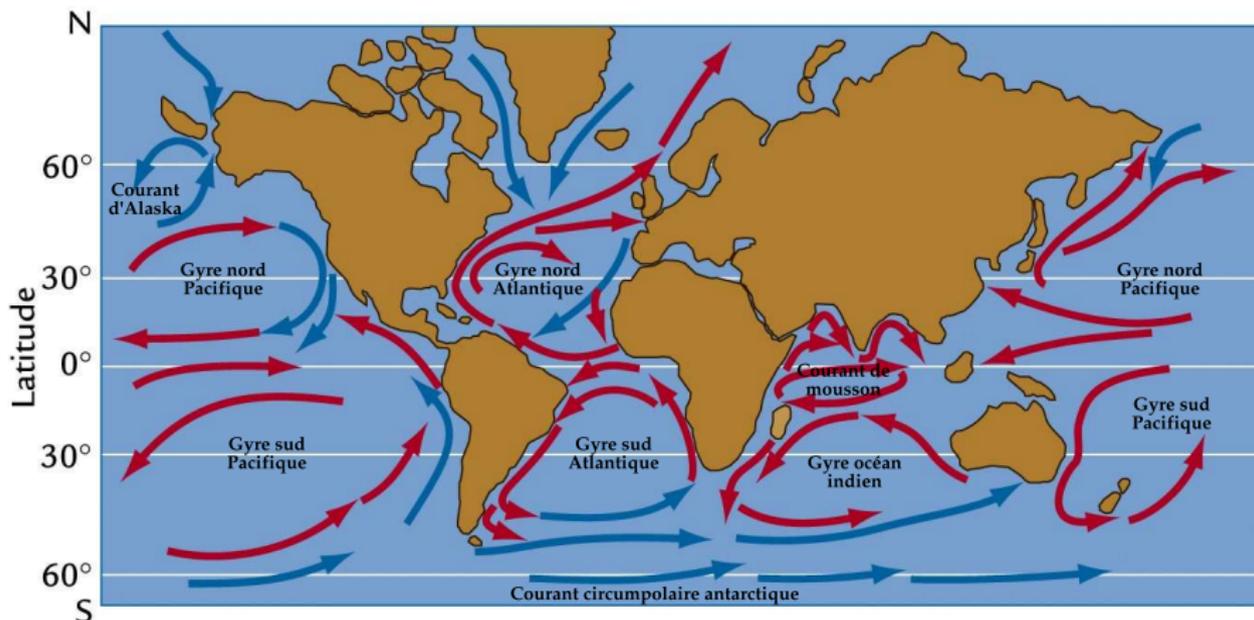
Transport d'Ekman et gyres océaniques

Courants géostrophiques = circulations giratoires océaniques



Transport d'Ekman et gyres océaniques

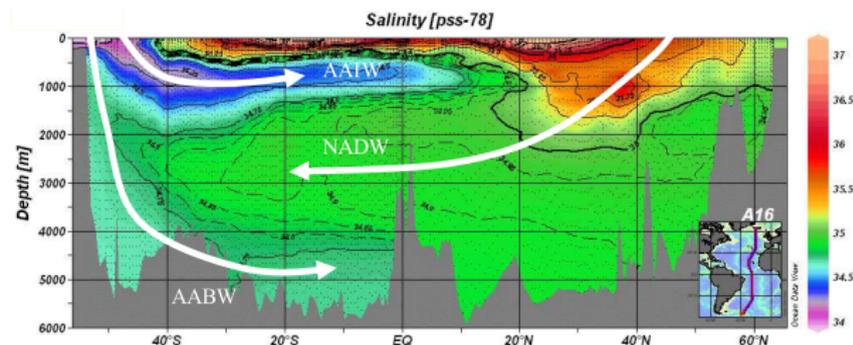
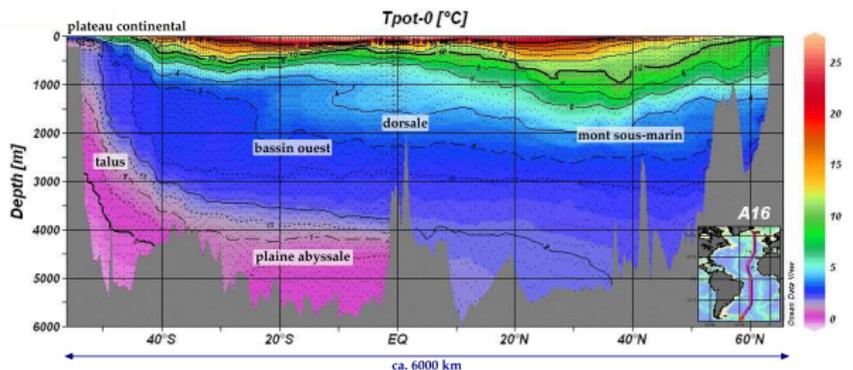
Courants géostrophiques = circulations giratoires océaniques



Circulation océanique profonde

Mise en évidence

- ↪ profils T et S
- ↪ pénétration de certains éléments anthropiques (dirac) : ^3H , CFC
- ↪ datation ^{14}C
- ↪ déplacement des bouées flotteurs-plongeurs



AAIW = Antarctic Intermediate Water

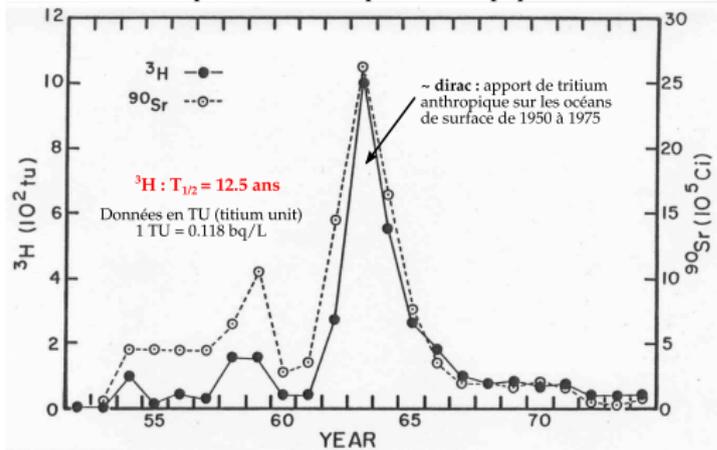
AABW = Antarctic Bottom Water

NADW = North Atlantic Deep Water

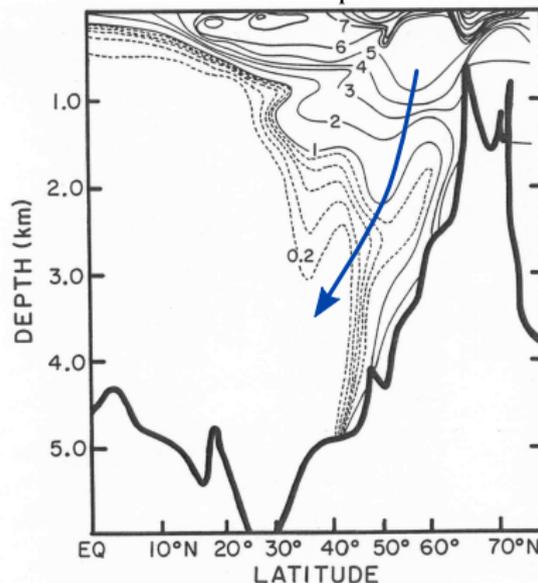
Circulation océanique profonde

Dirac = signal ponctuel

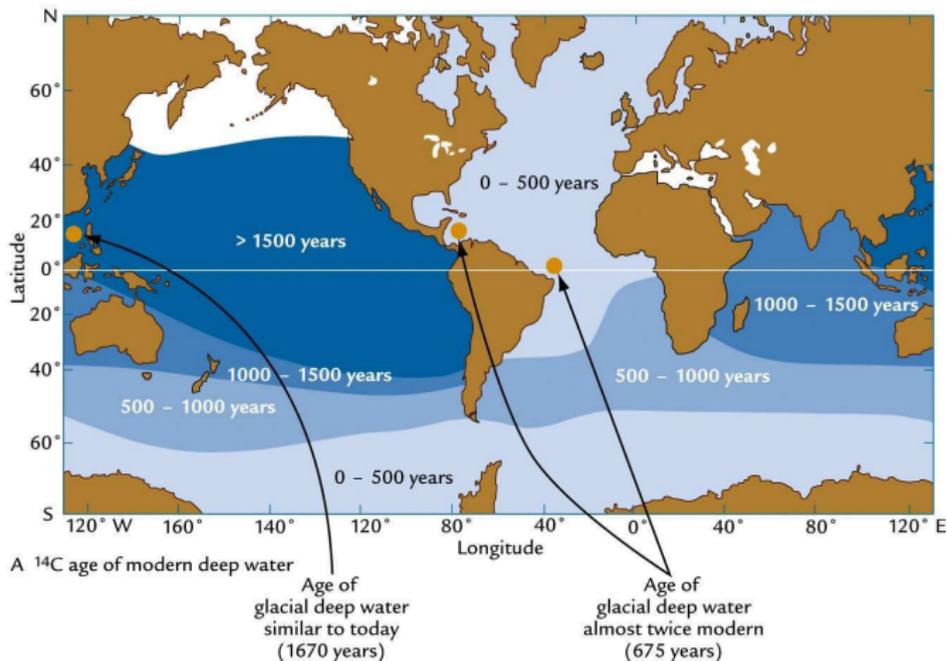
Evolution de la répartition des composés anthropiques dans les océans



Tritium dans l'Atlantique ouest en 1972



Age ^{14}C des eaux profondes



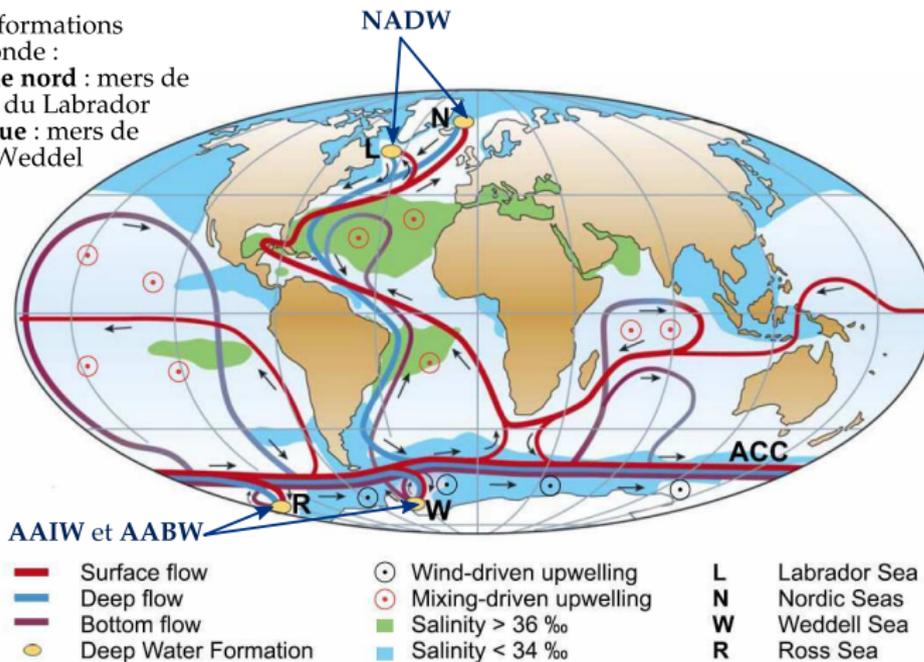
Temps de mélange des océans \simeq 1600 ans

Circulation océanique profonde

Circulation méridienne océanique ou circulation thermohaline

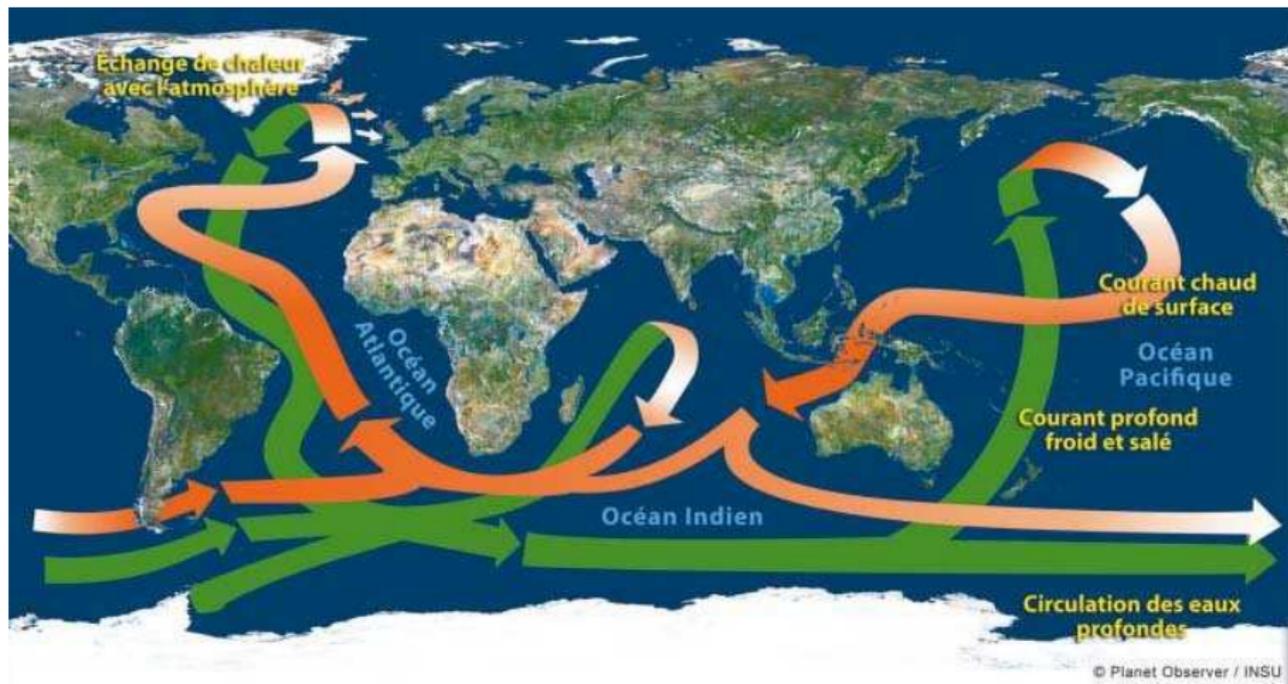
2 zones de formations d'eau profonde :

- **Atlantique nord** : mers de Norvège et du Labrador
- **Antarctique** : mers de Ross et de Weddel



Circulation océanique profonde

Circulation méridienne océanique ou circulation thermohaline



Circulation océanique profonde

Mécanismes à l'origine de la plongée des eaux en Atlantique nord

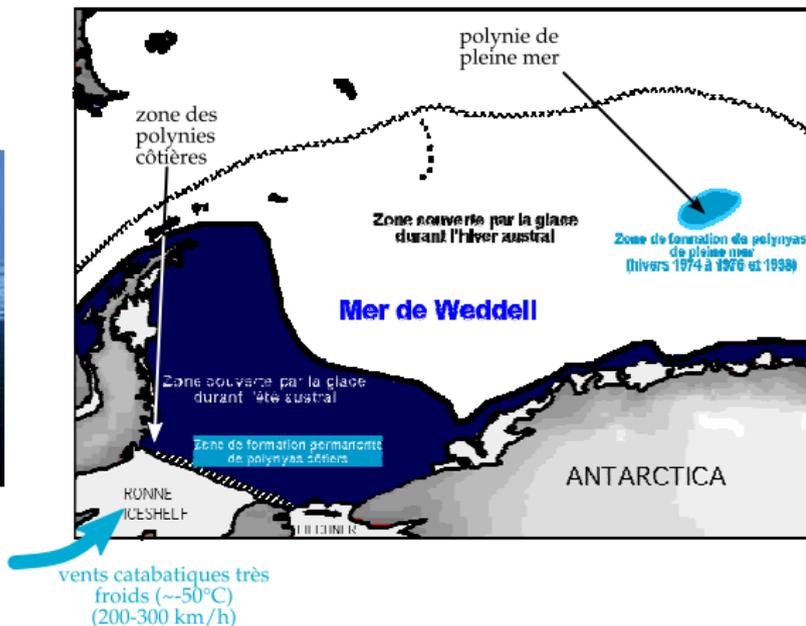
● Importance du Gulf Stream

- ↪ $E > P$: augmentation de la salinité du S au N
- ↪ refroidissement par échange thermique avec l'atmosphère : SST diminuent du S au N



Circulation océanique profonde

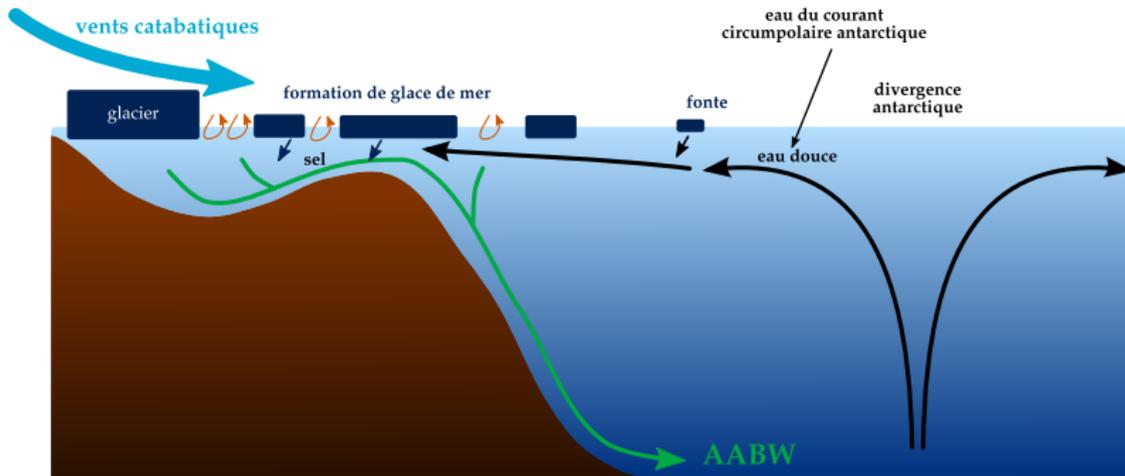
Mécanismes à l'origine de la plongée des eaux en Antarctique



Importance des zones libres de glace

Circulation océanique profonde

Mécanismes à l'origine de la plongée des eaux en Antarctique



● Importance des zones libres de glace

- ↪ refroidissement de l'eau de surface et maintien des polynies côtières par les vents catabatiques
- ↪ création de glace de mer : augmentation la salinité de l'eau
- ↪ échange de chaleur atmosphère-océan : diminution des SST
- ↪ convection d'eau : perte de chaleur et maintien des polynies de pleine mer

Conclusions - Océans

- océans :
 - ↪ 71% de la surface de la Terre
 - ↪ 70% du volume d'eau de la Terre
- SST = f(insolation) \Rightarrow répartition zonale
- salinité de surface = f(E-P) \Rightarrow couplage avec la circulation atmosphérique
- stratification verticale marquée en surface \Rightarrow thermocline
- circulation de surface :
 - ↪ courants de surface induits par les vents (Ekman)
 - ↪ transport d'eau à 90° par rapport à la direction des vents
(vers la droite ou la gauche en fonction de l'hémisphère)
 - ↪ circulations giratoires océaniques
- circulation profonde :
 - ↪ T et S = influents majeurs de la circulation océanique profonde
 - ↪ temps de mélange des océans : 1600 ans (datation ^{14}C)
 - ↪ 2 zones de formation d'eau profonde : Atlantique nord et Antarctique

1. Introduction
2. Caractéristiques des enveloppes fluides
3. Atmosphère et circulation atmosphérique
4. Océan et circulation océanique
- 5. Climats et paléoclimats**

Dynamique climatique actuelle

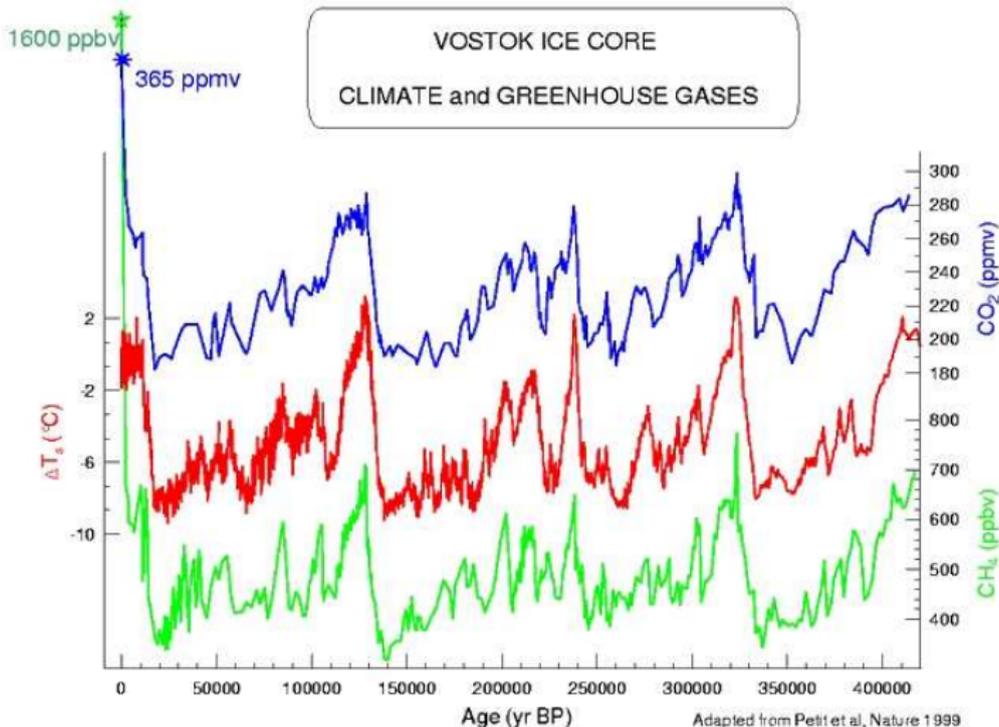
ACTIVITÉS EL NIÑO

À rendre avant le 19 décembre 2014

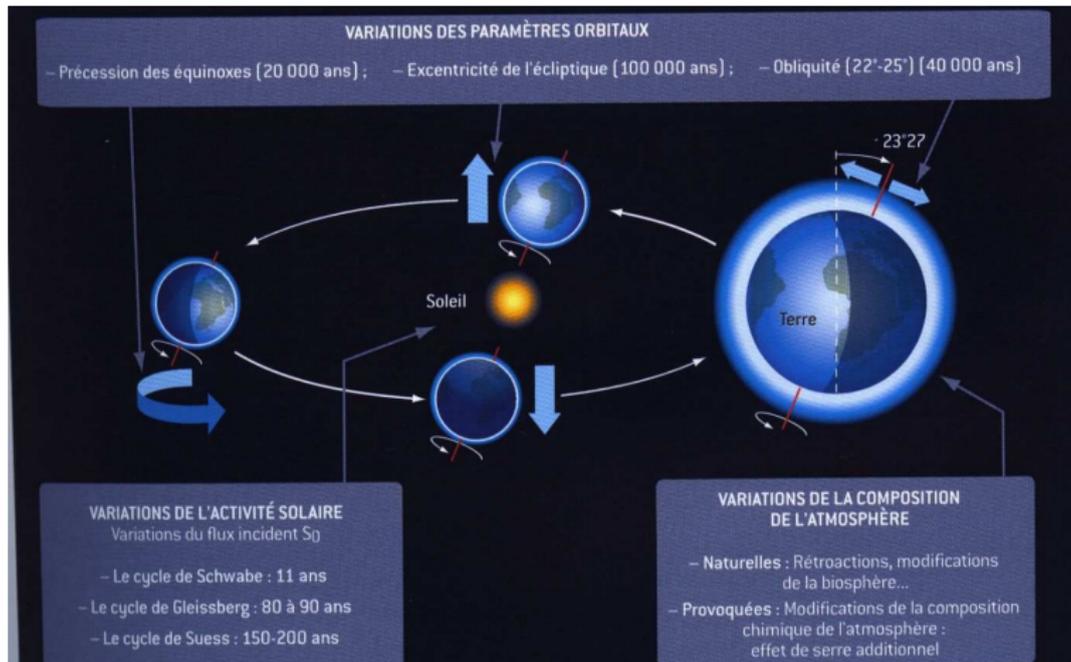
- répondre aux questions pour chaque activité
- faire une courte synthèse sur ce que vous avez compris du phénomène El Niño
- 2-3 pages recto-verso MAX

Variations climatiques quaternaires

Forage de Vostok (Antarctique)



Paramètres astronomiques

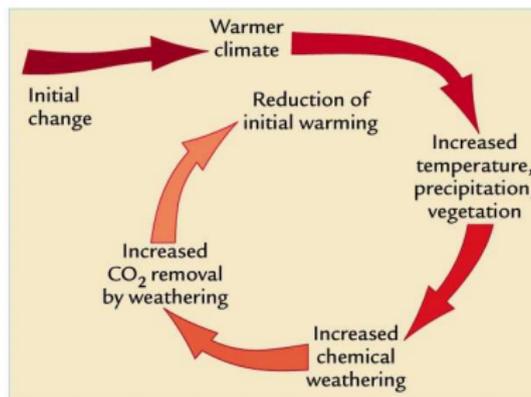


Boucles de rétroactions

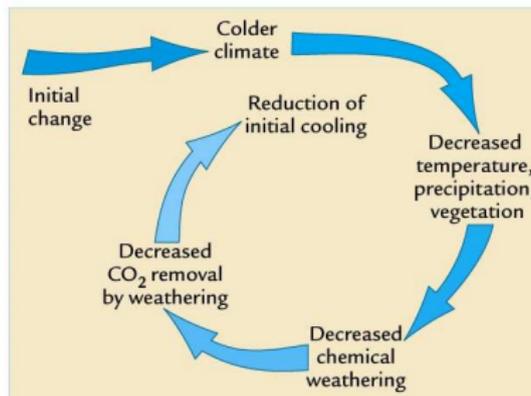


Les rétroactions positives (effet boule de neige) amplifient considérablement des effets astronomiques relativement minimes. Heureusement, les variations astronomiques sont rapides et changent de sens rapidement. Sans quoi, on irait *très vite* vers des températures extrêmes (hautes ou basses).

Boucles de rétroactions

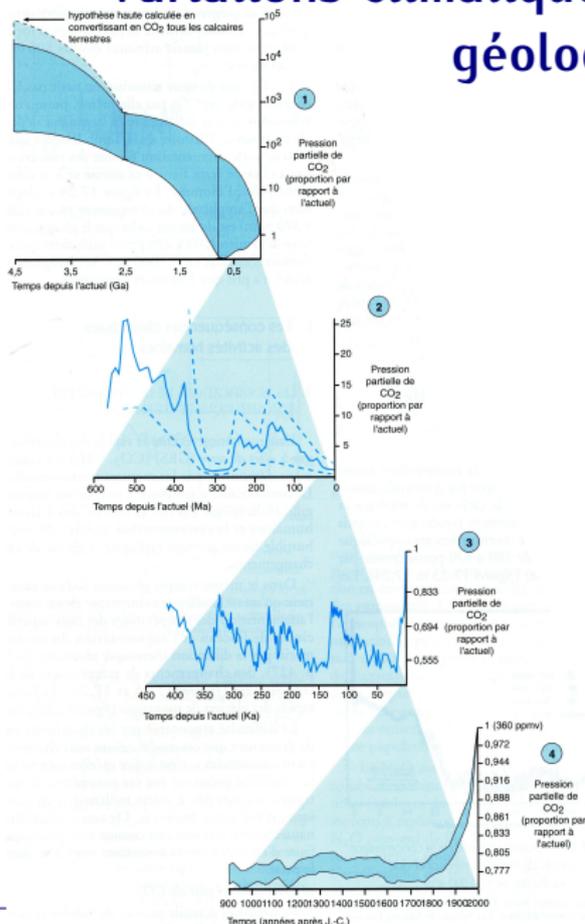


A



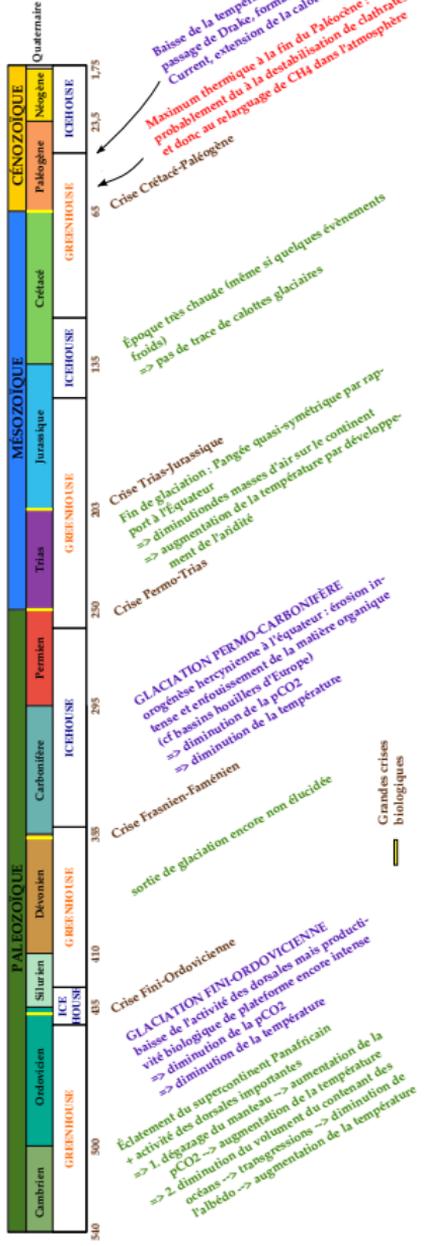
B

Variations climatiques au cours des temps géologiques



- enfouissement de CO₂ sous forme de carbonates
- enfouissement de carbone organique
- volcanisme et gaz à effet de serre
- position des continents et dynamique externe
- etc ...

Variations climatiques au cours des temps géologiques



Variations climatiques au cours des temps géologiques

