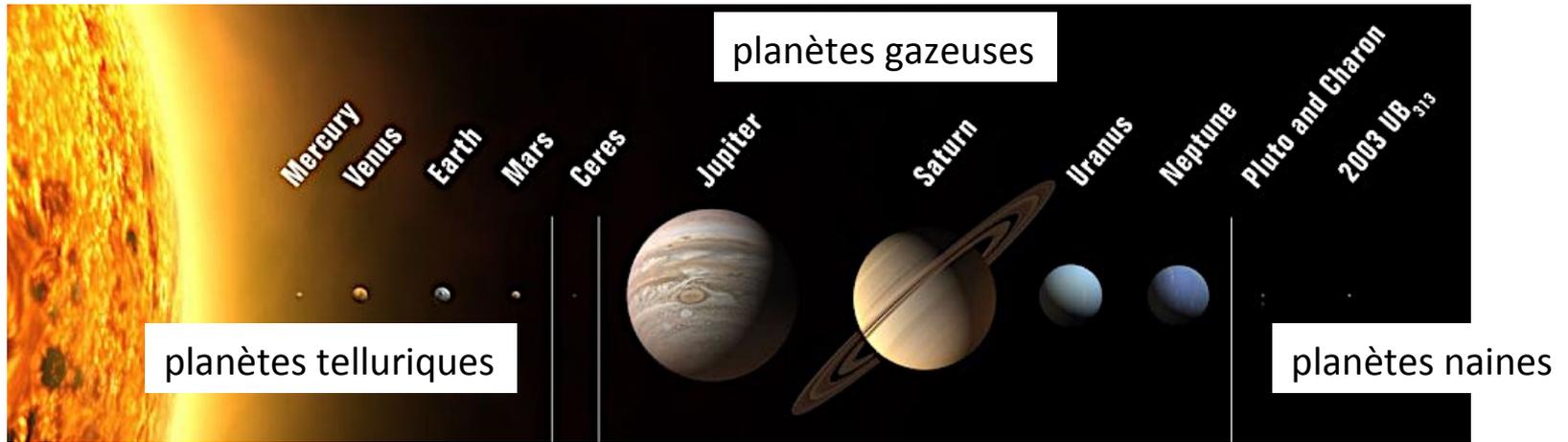


BG-C – Le Climat de la Terre

Chapitre 1 – L'atmosphère et sa dynamique

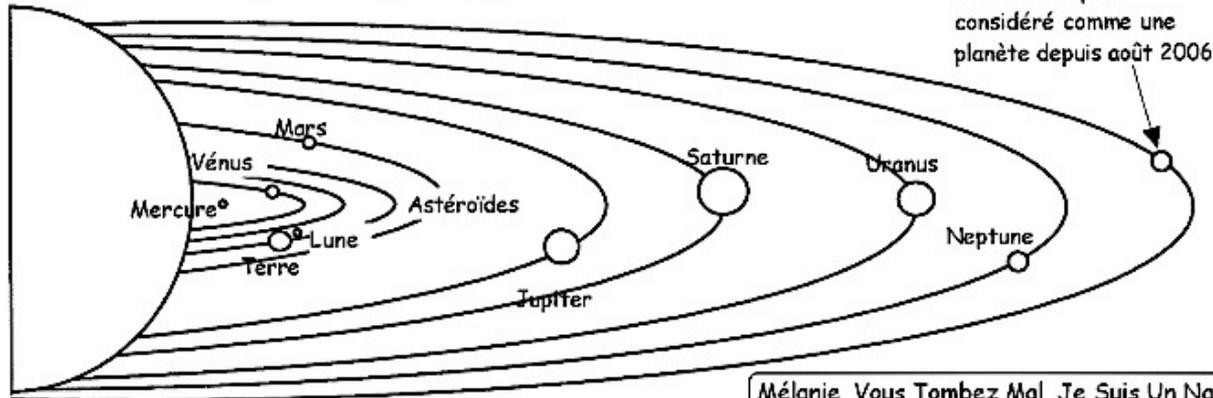


Une planète tellurique



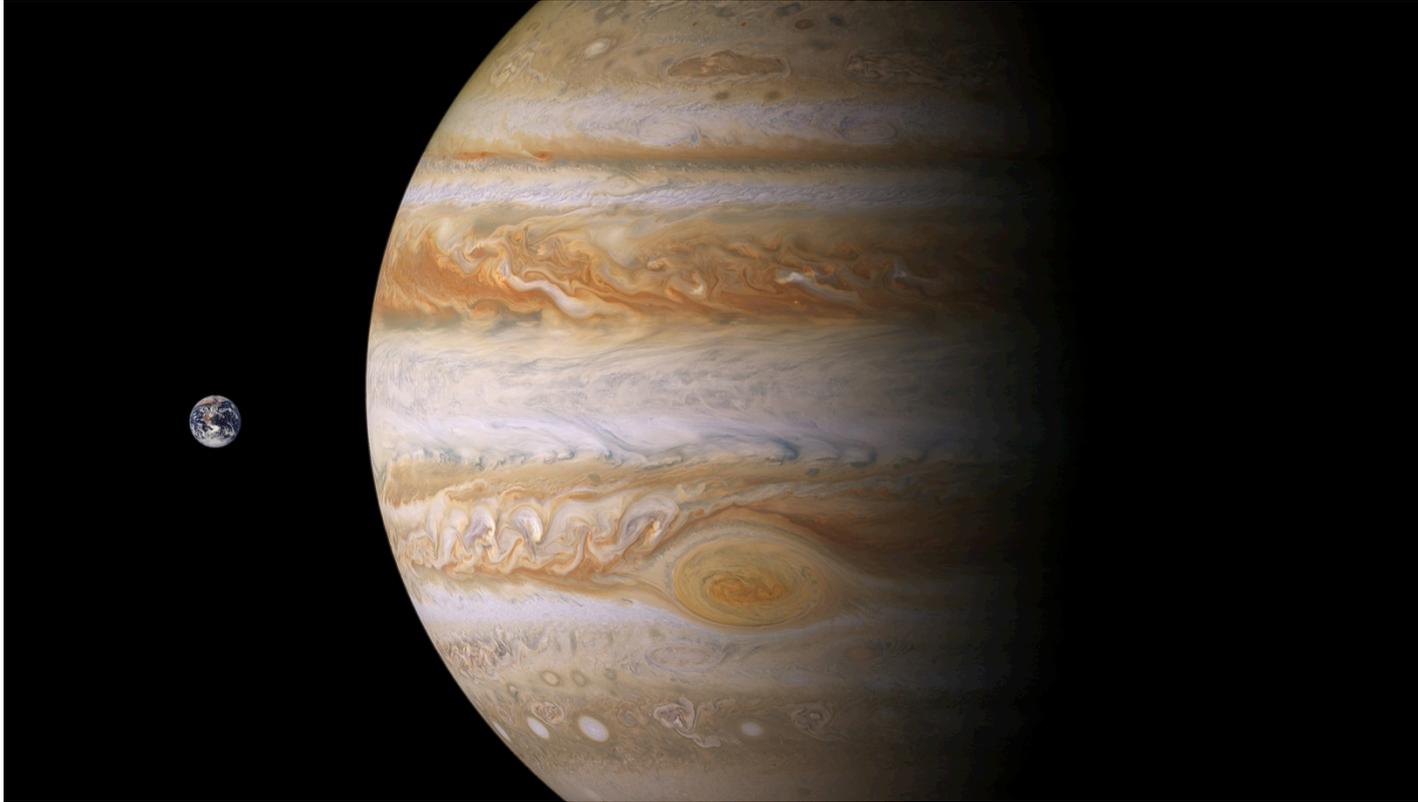
Source: Martin Kornmesser / [International Astronomical Union](http://InternationalAstronomicalUnion.org)

Position des planètes par rapport au soleil



Mélanie, Vous Tombez Mal, Je Suis Un Navet

Une planète tellurique

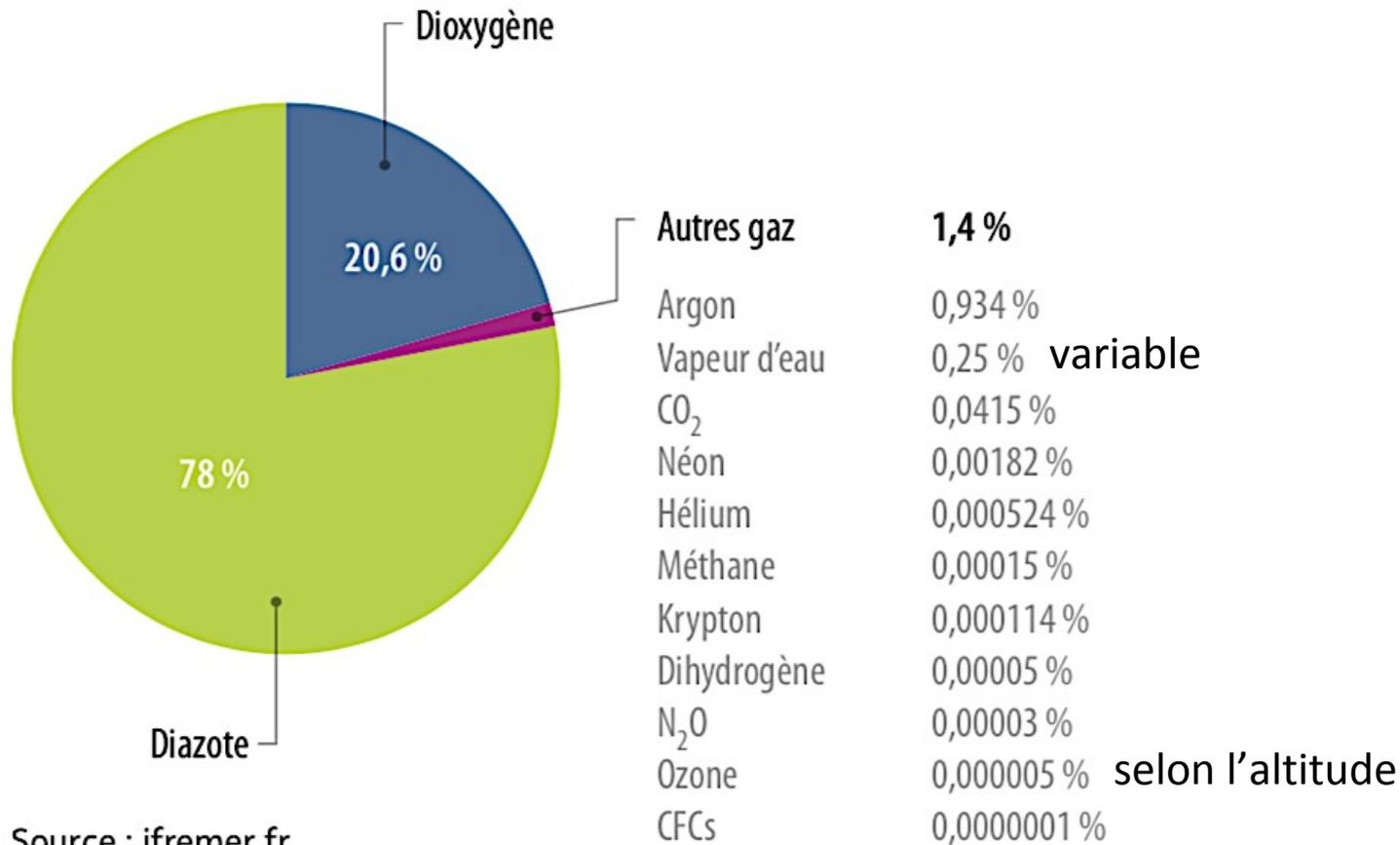


La taille de la Terre, comparée à celle de Jupiter.

Source : [Flickr/CC/Brian Altmeyer \(photo recadrée\)](#)

1. L'atmosphère et sa stratification

1.1. Une enveloppe gazeuse de 800 km

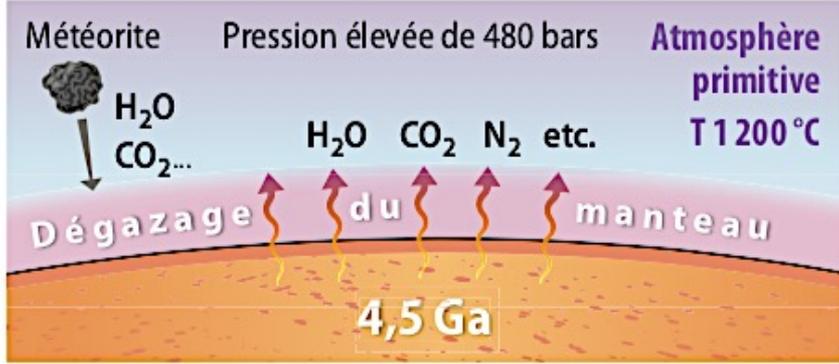


Source : ifremer.fr

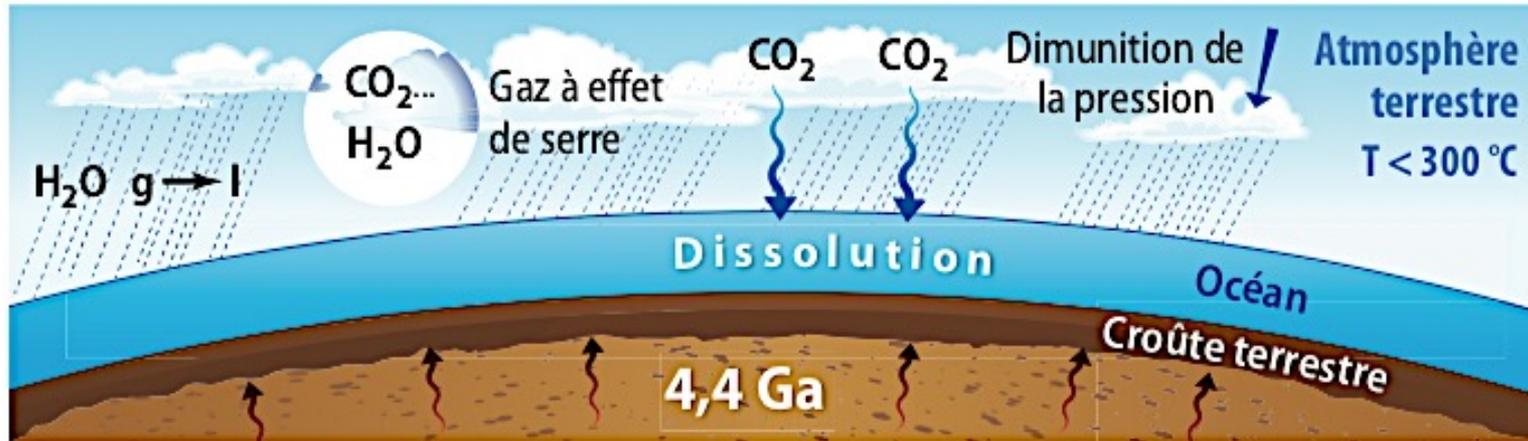
Des gaz d'origines diverses

- Gaz d'origine géologique : CO₂, N₂, Ar, H₂O...

Histoire (hypothétique) de l'atmosphère primitive



La Terre primitive, liquide, permet le dégazage du manteau et la formation d'une atmosphère chaude, à forte pression.



Le refroidissement de la Terre entraîne la liquéfaction de l'eau et donc la dissolution des gaz : la pression diminue alors fortement. *Source : Muriel Gargaud, 2012*

Des gaz d'origines diverses

- Gaz d'origine géologique : CO₂, N₂, Ar, H₂O...
- Gaz d'origine biologique : O₂

L'apparition du dioxygène sur Terre : constats

Des organismes photosynthétiques marins très anciens

Stromatolithes
de Pilbara
(Australie), datés
par radiochronologie à 3,5 Ga

2 cm



Parc National du Karijini (Australie)

1 cm

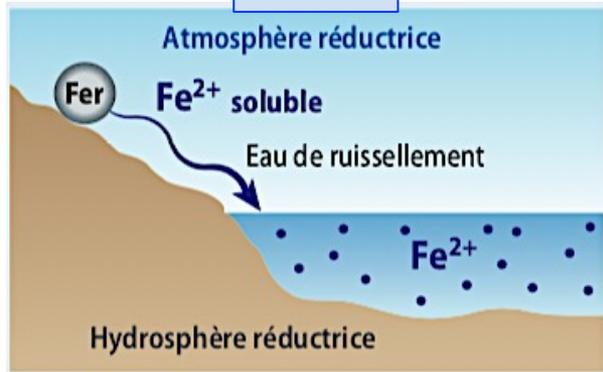
Des roches sédimentaires
témoignant d'une
oxydation du fer

Échantillon de fer rubané
Bancs gris d'hématite (Fe_2O_3)
Bancs rouges de silice,
avec des traces d'hématite



L'apparition du dioxygène sur Terre : modèle

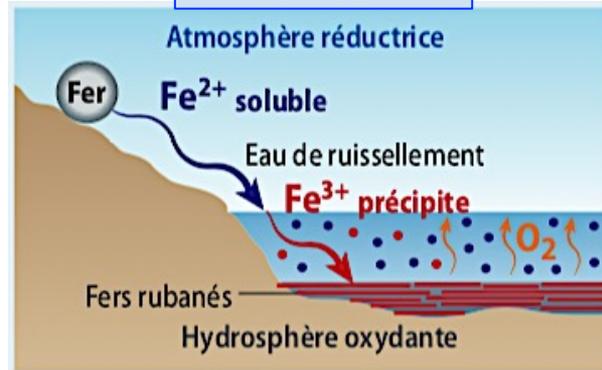
> 4 Ga



Période 1 - Milieu non oxydant

La présence de fer dissous sous forme d'ions Fe^{2+} dans les océans témoigne d'un milieu non oxydant.

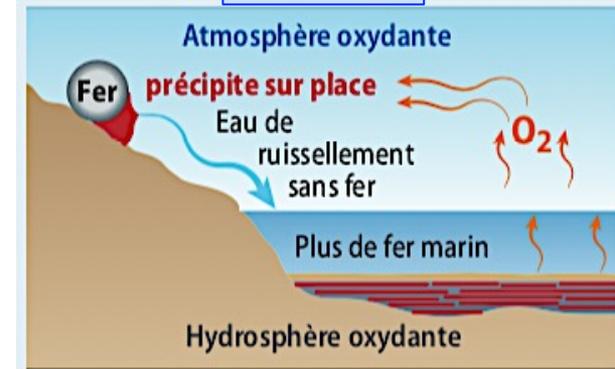
- 4 à - 2,2 Ga



Période 2 - Oxydation dans les océans

La photosynthèse dégage de dioxygène dans les océans entraînant une oxydation des ions Fe^{2+} en ions Fe^{3+} peu solubles, qui précipitent et sont sédimentés => fers rubanés.

< 2,2 Ga



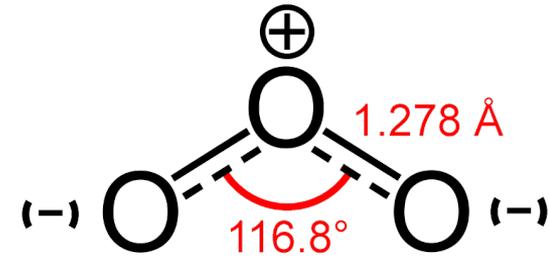
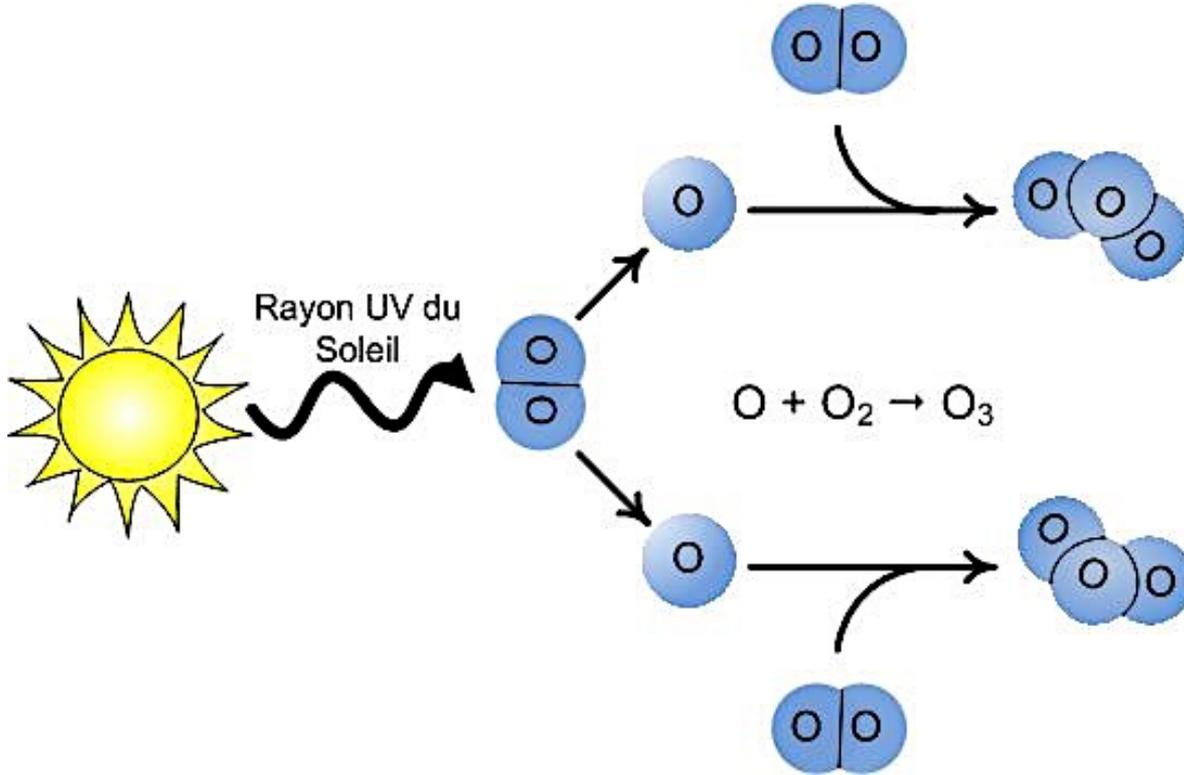
Période 3 - Dioxygène atmosphérique

Après consommation totale du fer marin, le dioxygène se répand vers l'atmosphère. Le fer n'est plus transporté vers les océans car il précipite alors directement sur les continents.

Des gaz d'origines diverses

- Gaz d'origine géologique : CO_2 , N_2 , Ar, H_2O ...
- Gaz d'origine biologique : O_2 et CH_4
- Cas de l'ozone, issu du dioxygène

L'apparition de l'ozone



Des gaz d'origines diverses

- Gaz d'origine géologique : CO_2 , N_2 , Ar, H_2O ...
- Gaz d'origine biologique : O_2 et CH_4
- Cas de l'ozone, issu du dioxygène
- Gaz issus de l'activité anthropique : CH_4 , SO_2 , CFC...

L'apparition du méthane

Sources de méthane

- 30 % naturelles
 - terres marécageuses, marais, tourbières, pergélisols
 - 70% anthropiques
 - exploitation des combustibles fossiles
 - élevage (processus digestifs des ruminants),
 - cultures inondées de riz,
 - sites d'enfouissement des déchets.
- 30 %
- 40 %
-

L'origine biologique du méthane

Bovins, termites, éléphants, kangourous...

Bactéries méthanogènes du tube digestif

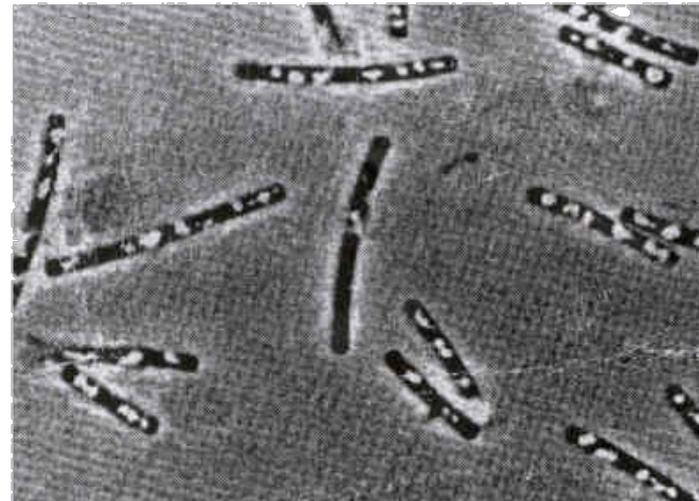


$$\Delta G_0' = - 135 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

Le mécanisme est le même dans les marécages, sédiments fins, rizières, stations d'épuration...

Stephen Zinder

Methanotherix thermophila, bactérie **chimolithotrophe anaérobie** stricte de 1 μm de diamètre. À l'intérieur des cellules, on observe des vésicules de gaz.



Bilan : histoire de l'atmosphère

Composition de l'atmosphère

Ga : milliards d'années

Atmosphère primitive

La composition exacte de l'atmosphère primitive n'est pas connue. Des modèles proposent une composition majoritaire de vapeur d'eau (H_2O) et de dioxyde de carbone (CO_2), ainsi qu'un peu d'azote (N_2), de gaz rares (néon, argon, krypton, etc.) et d'hélium (He). D'après Muriel Gargaud, 2012.

Perte de l'atmosphère initiale H et He

-4,56 Ga

-4,5 Ga

-3,8 Ga

-3,5 Ga

-2 Ga

-0,7 Ga

0 Ga

Calendrier géologique

Formation de la Terre

Formation de l'hydrosphère

Premières traces de vie

Apparition de la photosynthèse



Début de dissolution du CO_2 dans l'océan

Condensation H_2O

Apparition de l' O_2 dans l'atmosphère

Apparition de l' O_3

Atmosphère actuelle $N_2 - O_2 - CO_2$

1750

2020

Ère industrielle (activité humaine)

Quantité de CO_2

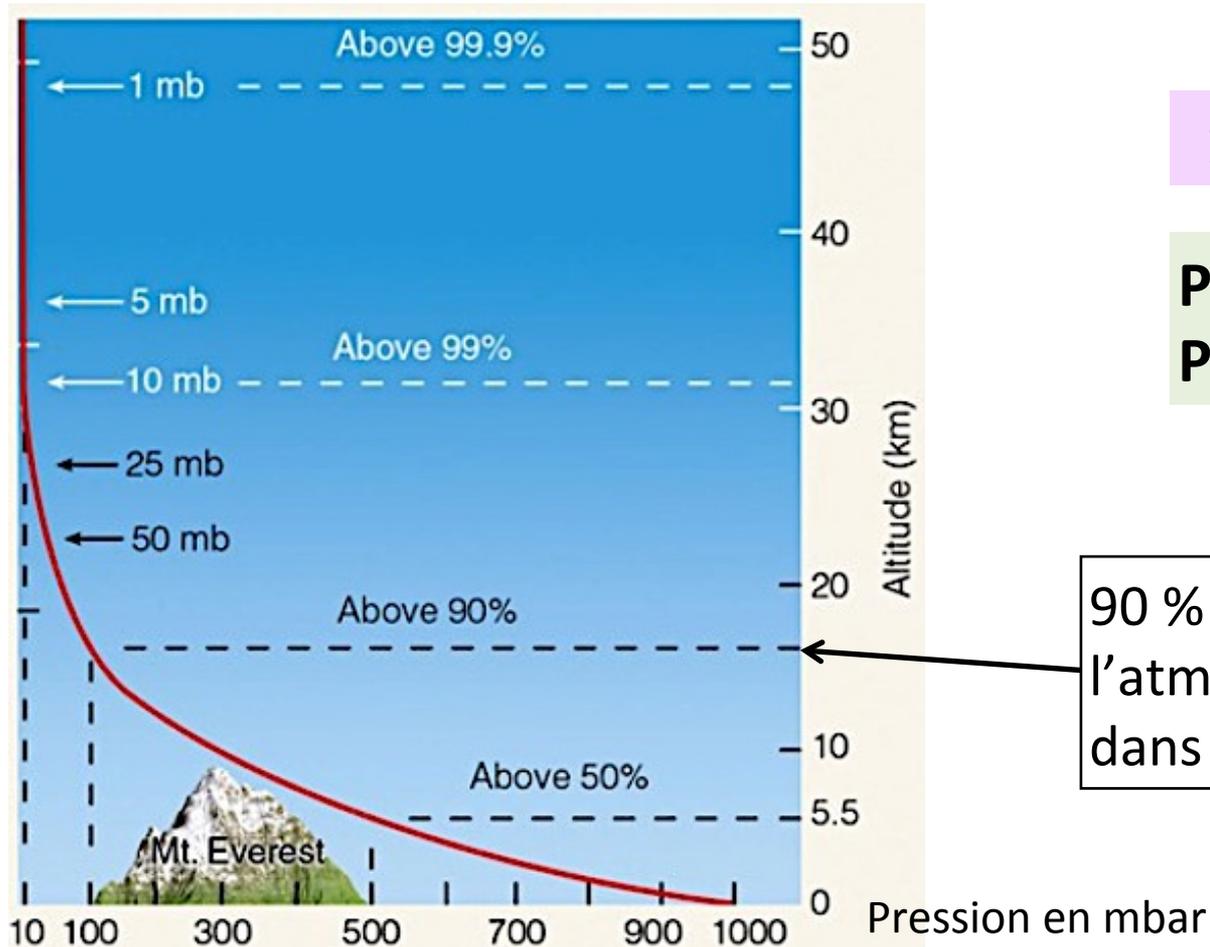


1.2. Une structuration verticale

L'atmosphère en strates : photographie prise par la navette spatiale américaine le 11/01/92 au matin, le Soleil n'ayant pas encore surgi à l'horizon.



Une structuration verticale liée à la pression

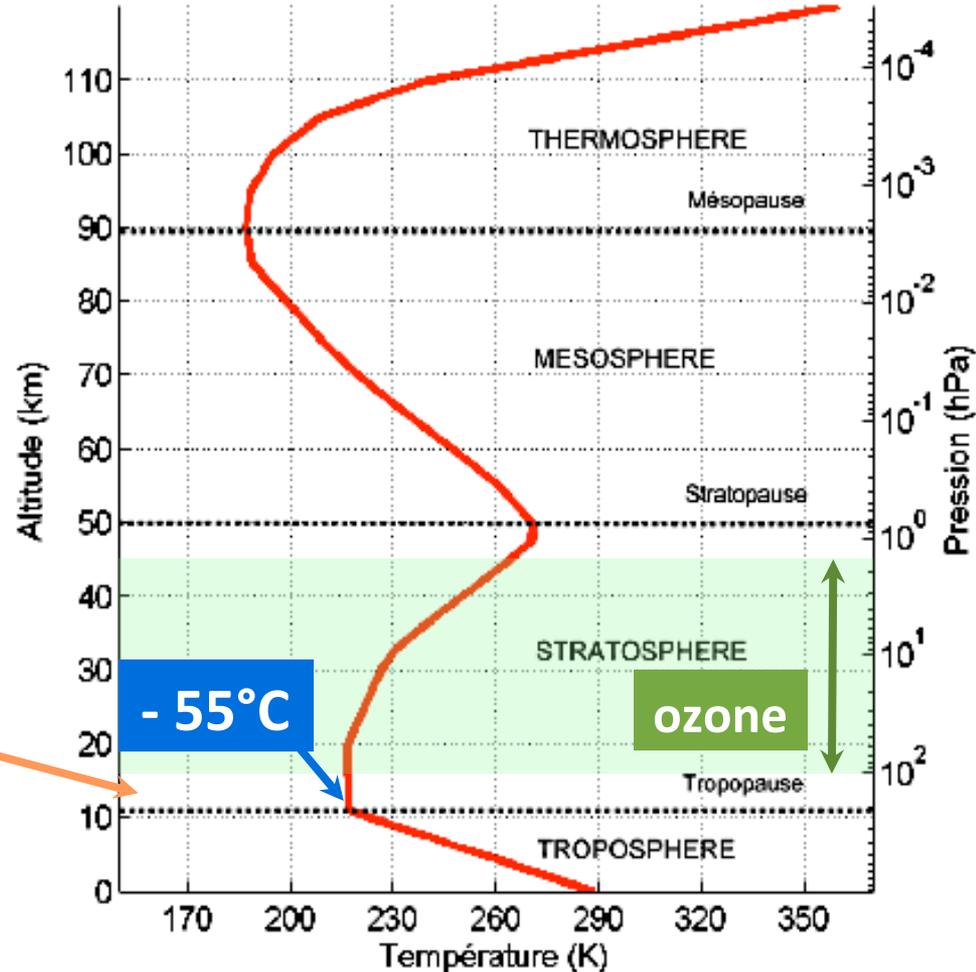


$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

Presson au sol
P = 1013 hPa

90 % de la masse de l'atmosphère est contenue dans les 16 premiers km

Une structuration verticale liée à la température



altitude des jets d'altitude (jet-streams)

-55°C

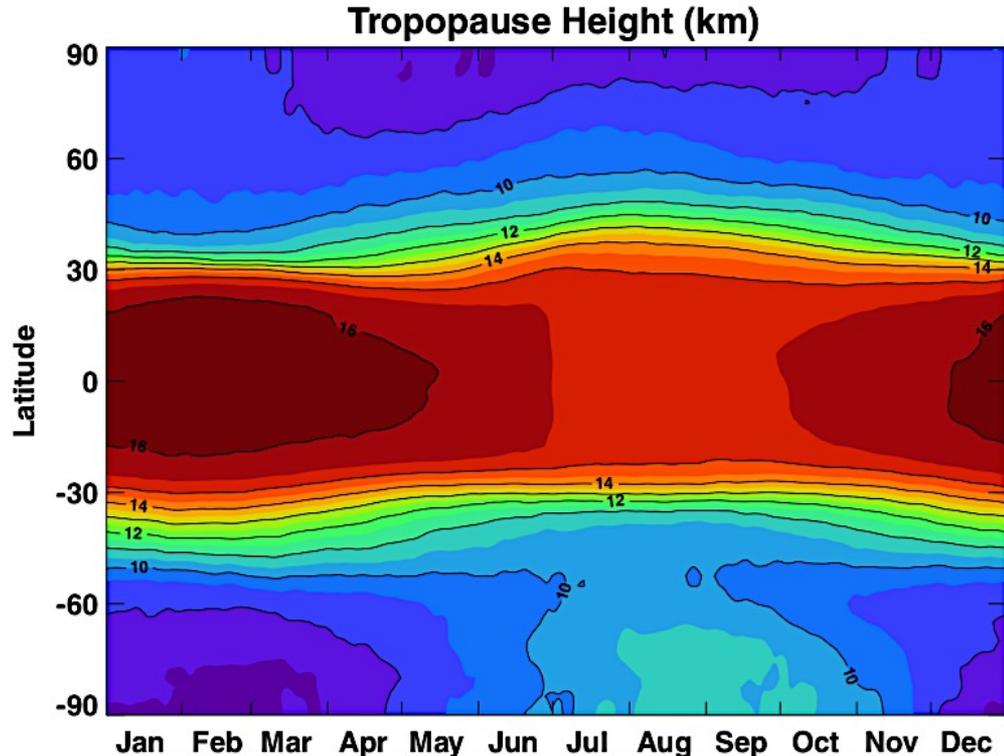
ozone

La troposphère

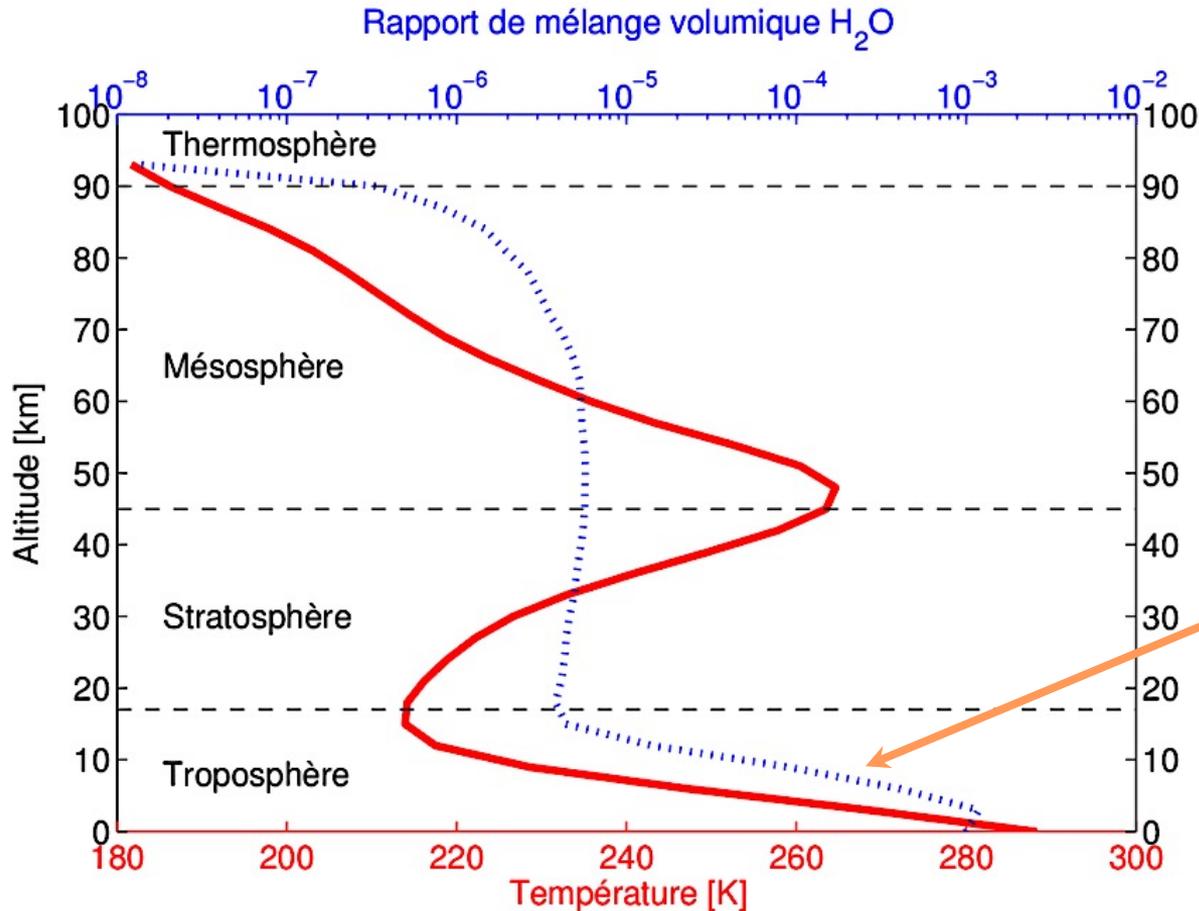
La troposphère

- **Gradient thermique** de $-6,5^{\circ}\text{C}$ par km
- **Couche limite** = couche d'interface avec le sol ou l'eau d'environ 1 km d'épaisseur
- Épaisseur variable entre l'équateur (17 km) et les pôles (8 km) et selon les saisons.

Épaisseur de la troposphère



La formation d'un nuage dans la troposphère



Un nuage se forme lorsque la vapeur d'eau se condense en eau liquide, sous forme de gouttelettes (ou glace).

La quantité d'eau varie selon l'altitude.

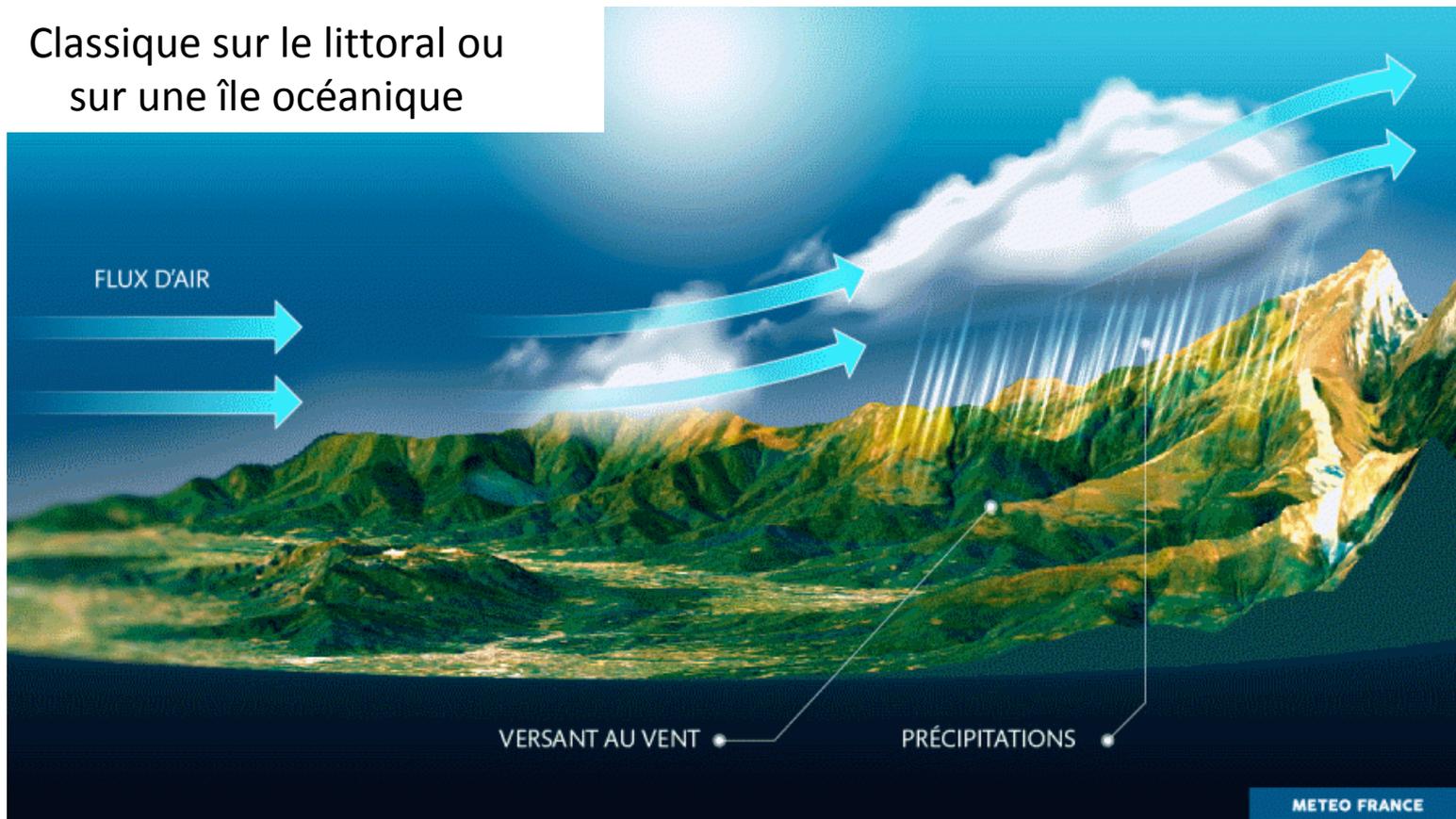
Les conditions de formation d'un nuage

Un nuage se forme lorsque la température d'un air contenant de la vapeur d'eau diminue, c'est-à-dire quand...

- ... l'air chaud et humide monte et se refroidit
- ... un air chaud et humide issu de la mer se déplace au-dessus d'un sol froid du continent

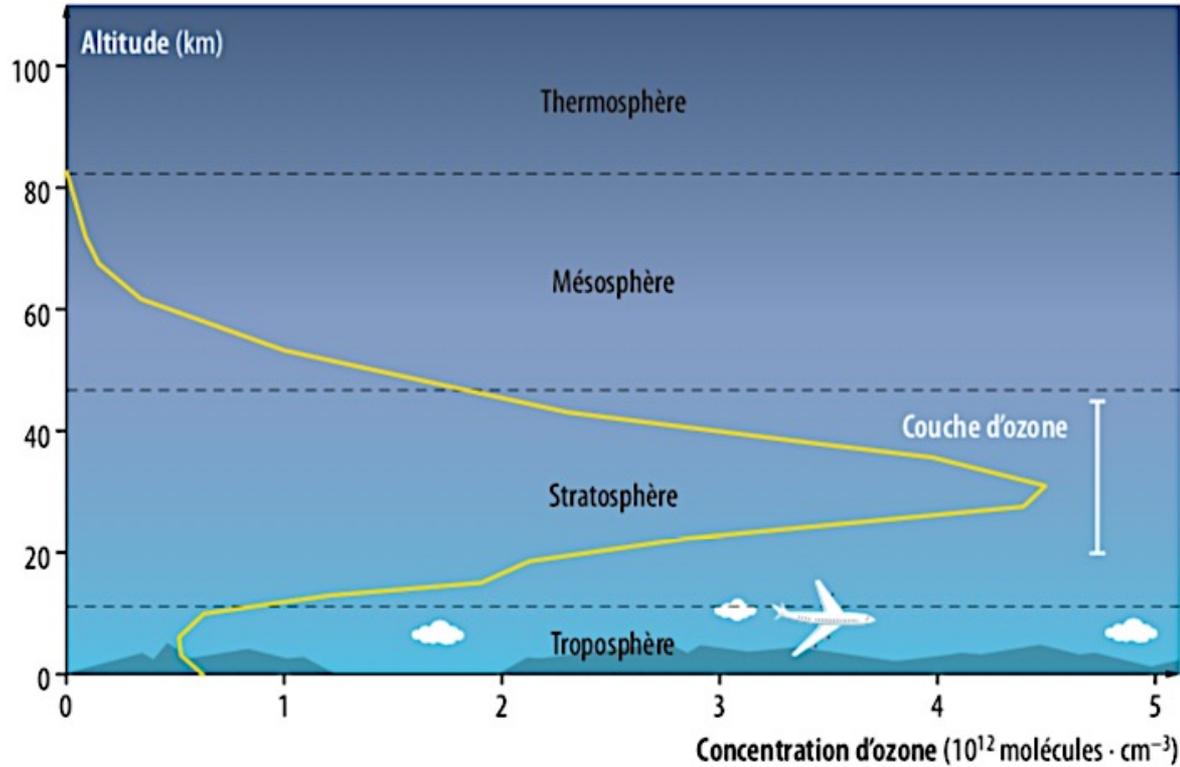
Exemple du soulèvement orographique

Classique sur le littoral ou sur une île océanique



La stratosphère

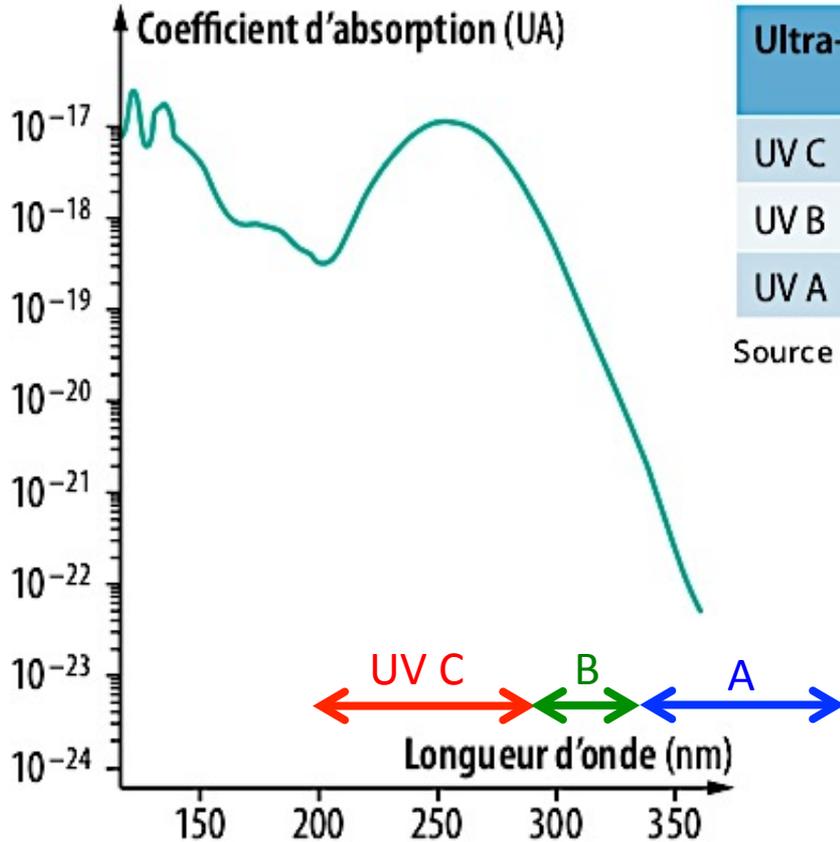
La distribution verticale de l'ozone



Source : Crutzen, P., et al., *Can. J. Chem.*, 1974

Corrélation avec la hausse de la température de l'air

Ozone et absorption des rayons solaires



Ultra-violets	Longueur d'onde (en nm)	% absorption par l'atmosphère terrestre
UV C	200-280	100 %
UV B	280-320	95%
UV A	320-400	65 %

Source : education.meteofrance.fr

Conséquences :

- hausse localisée de la température dans la strate qui abrite l'ozone ;
- protection contre les effets mutagènes des UV.

Bilan sur la stratosphère

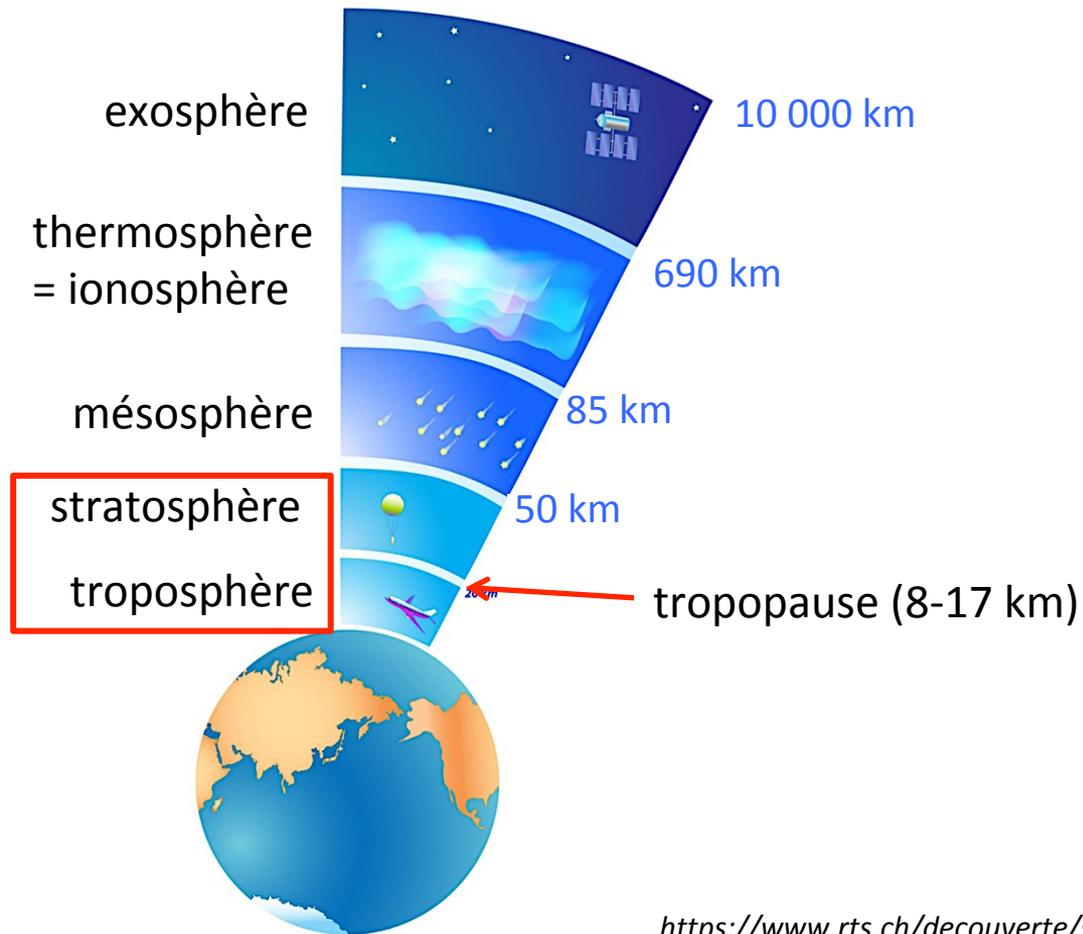
- Absorption du rayonnement solaire donc échauffement
- Jets d'altitude (ou jet-streams)
 - orientés de l'ouest vers l'est
 - de fortes vitesses (100 à 400 km.h⁻¹)

Des nuages du jet-stream sur la mer Rouge et l'Égypte. Ces courants peuvent dépasser 360 km/h.

© Nasa



BILAN : les strates

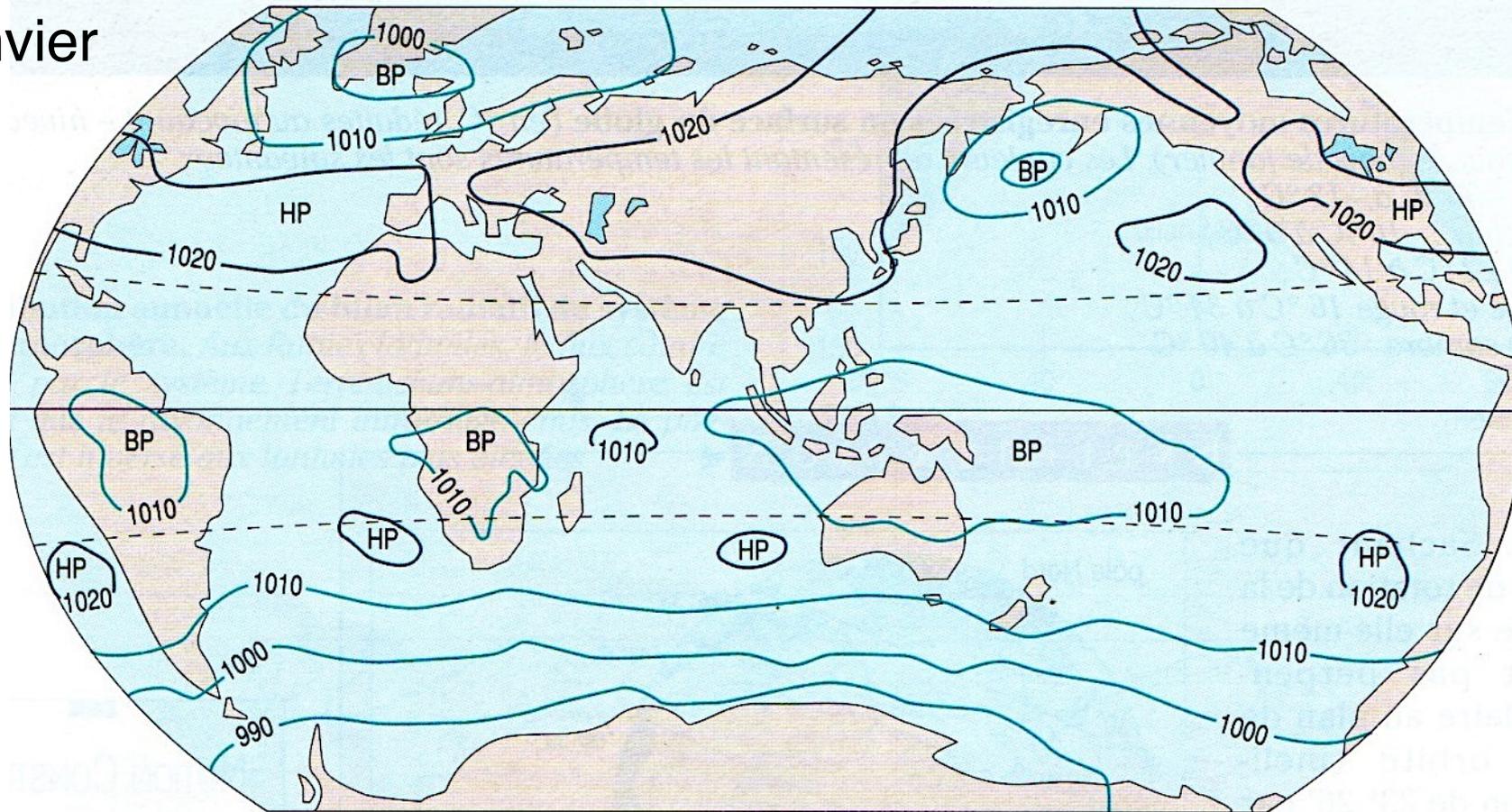


2. Les mouvements atmosphériques

2.1 Le vent, un mouvement orienté de l'air

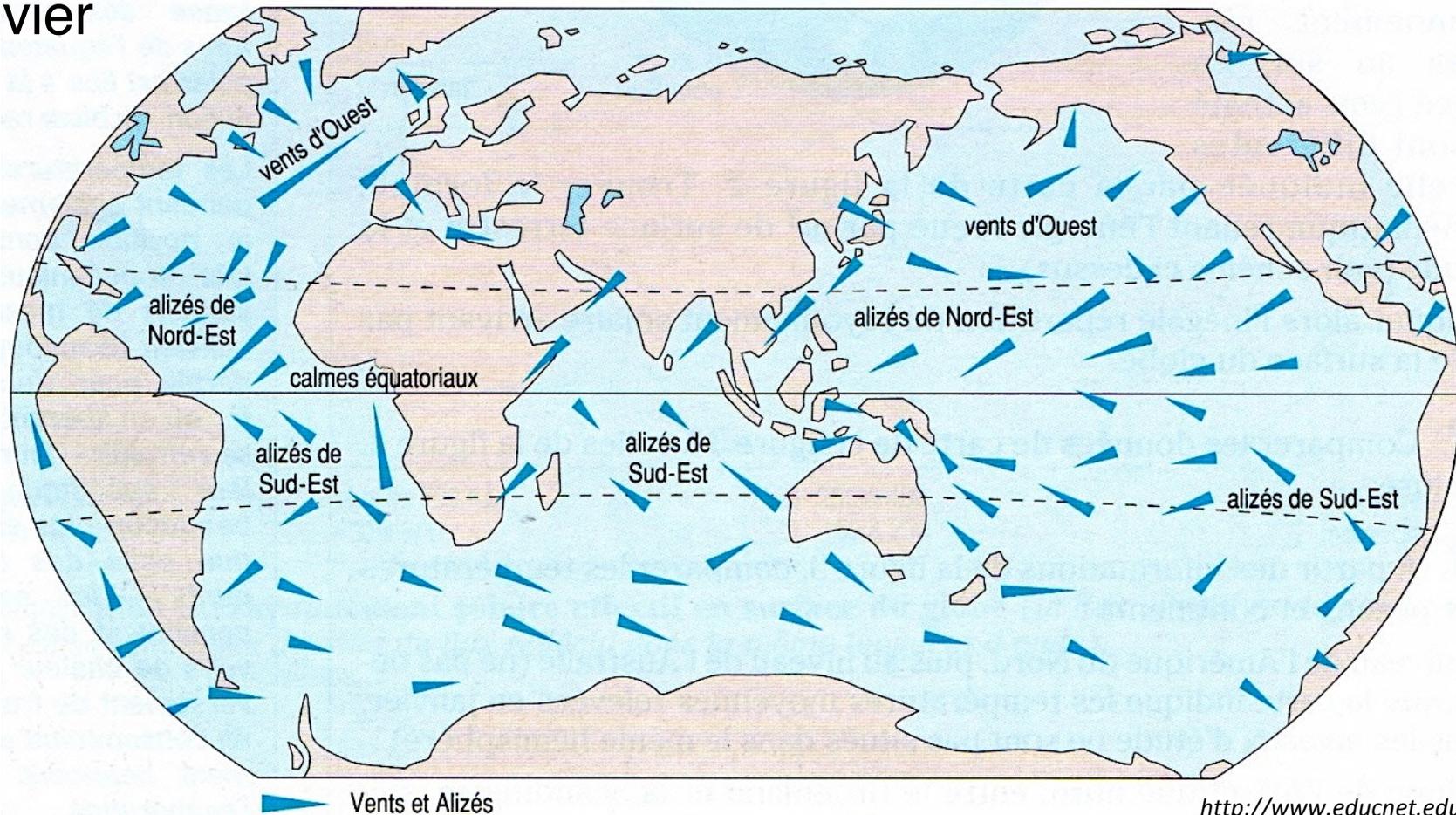
Carte des pressions à la surface du globe

janvier



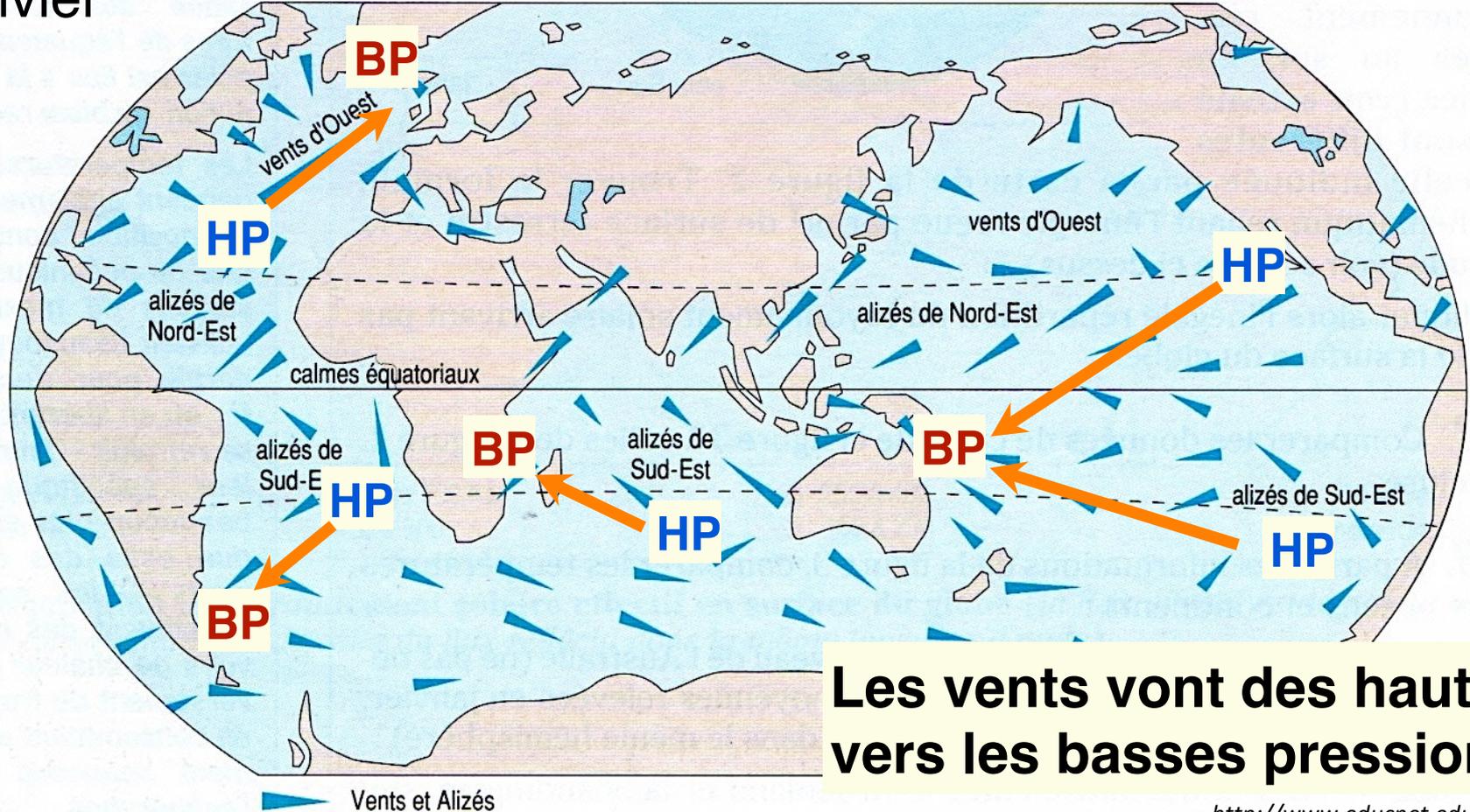
Carte des vents à la surface du globe

janvier



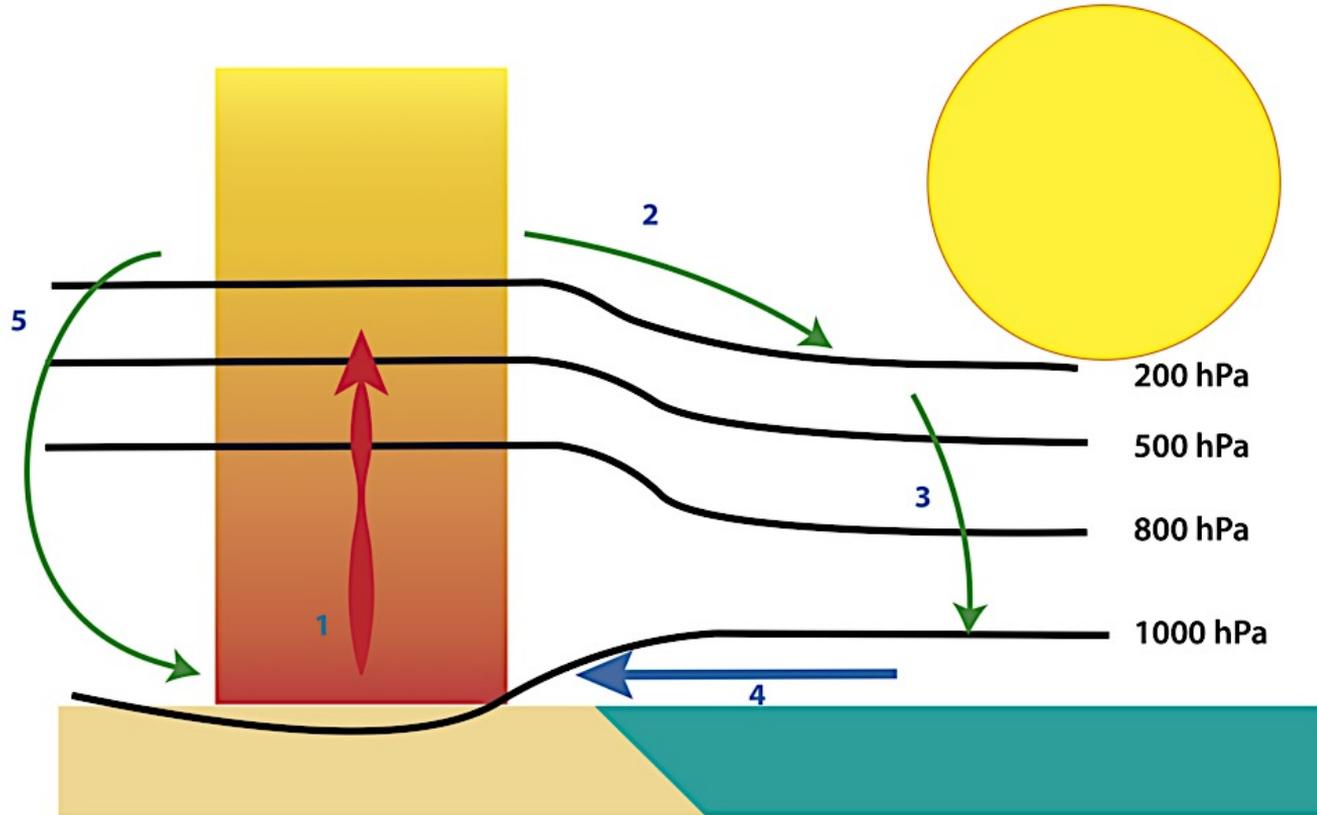
Superposition

janvier



Les vents vont des hautes vers les basses pressions

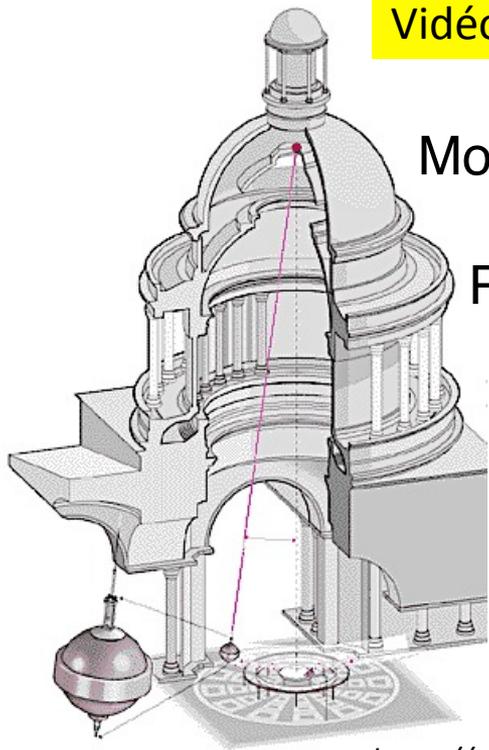
Brise de mer et brise de terre



L'influence de la rotation de la Terre sur les vents

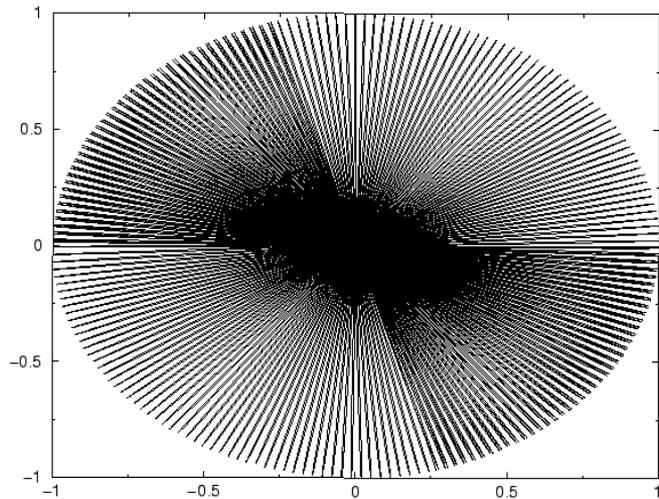
Mise en évidence de la force de déviation due à la rotation de la Terre = force de Coriolis

Vidéo pour comprendre <https://www.youtube.com/watch?v=3rz-Q8JLNJI>



Montage du pendule
de Foucault au
Panthéon en 1851

<https://www.astrocaw.eu>



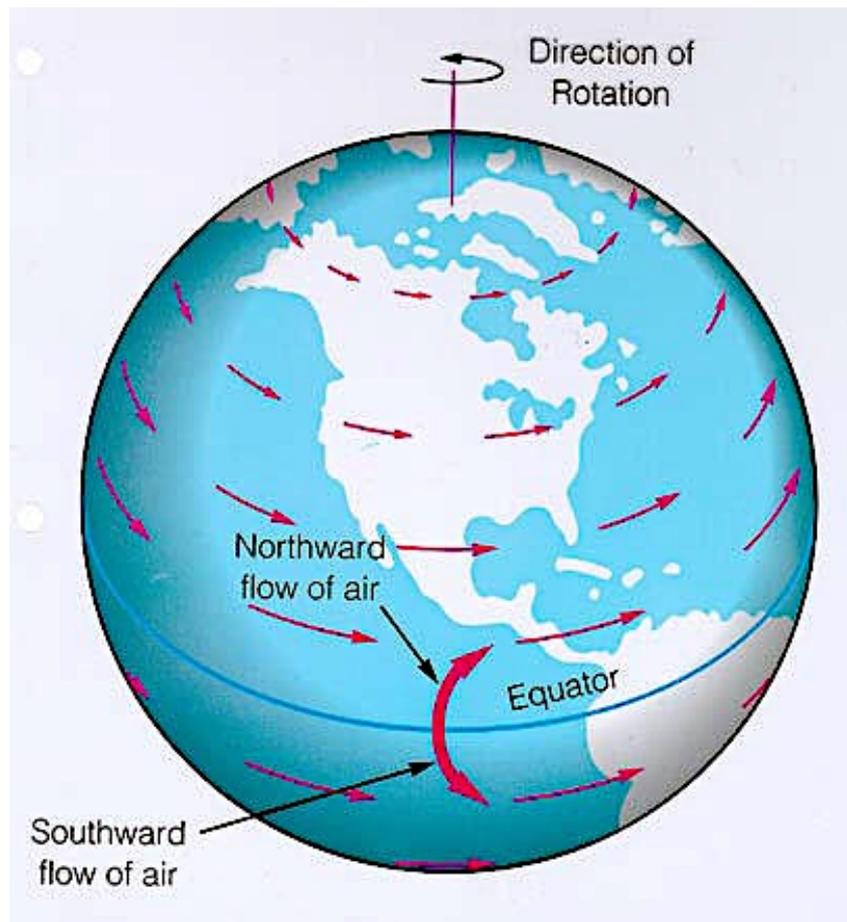
Dessin obtenu par la pointe du
poids, dans le sable en une journée

Une déviation selon l'hémisphère

À cause du référentiel tournant :

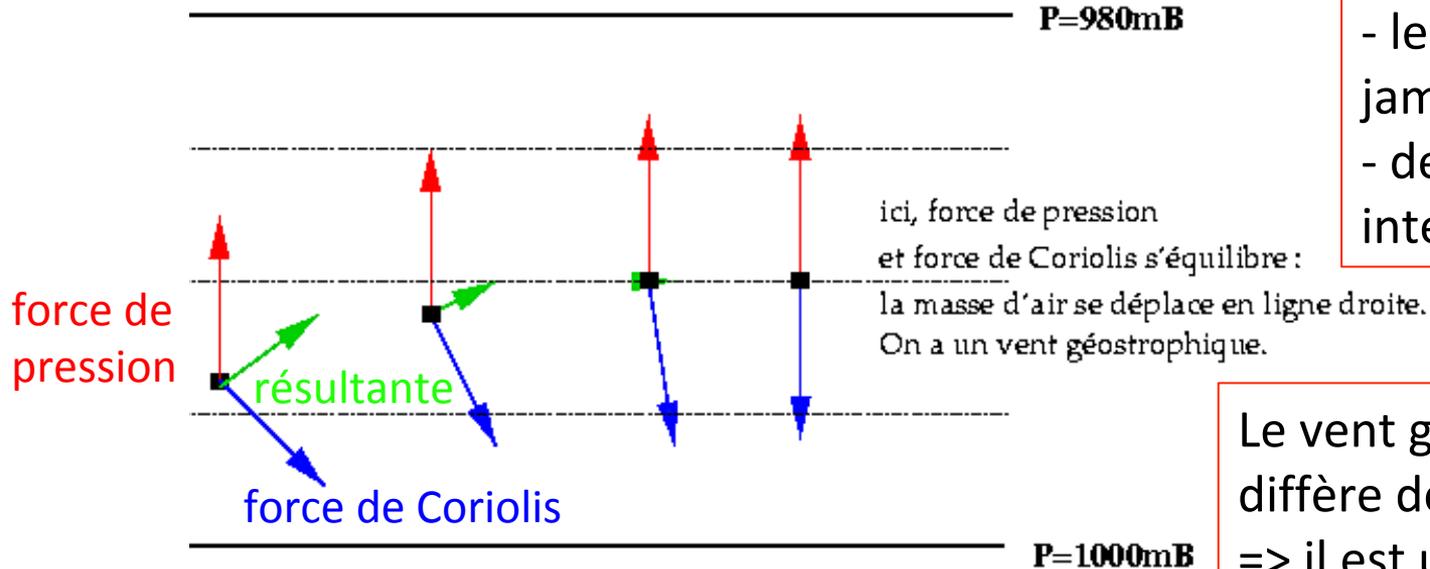
- rotation vers la droite dans l'hémisphère Nord ;
- rotation vers la gauche dans l'hémisphère Sud

Animations : https://meteocentre.com/intermet/vent/p_vent2_corio.htm



Le vent géostrophique

Le vent est dit **géostrophique** lorsque les forces de pression et de Coriolis s'équilibrent : l'air suit alors les lignes isobares.



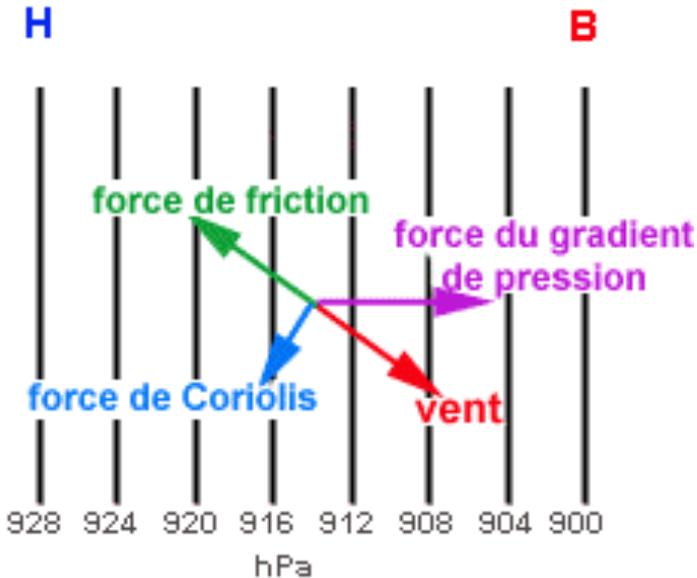
Dans la réalité :

- les isobares ne sont jamais rectilignes ;
- des forces de friction interviennent

Le vent géostrophique diffère de 10 % du vent réel => il est utilisé en météo comme approximation

Des forces de frictions pour les vents au sol

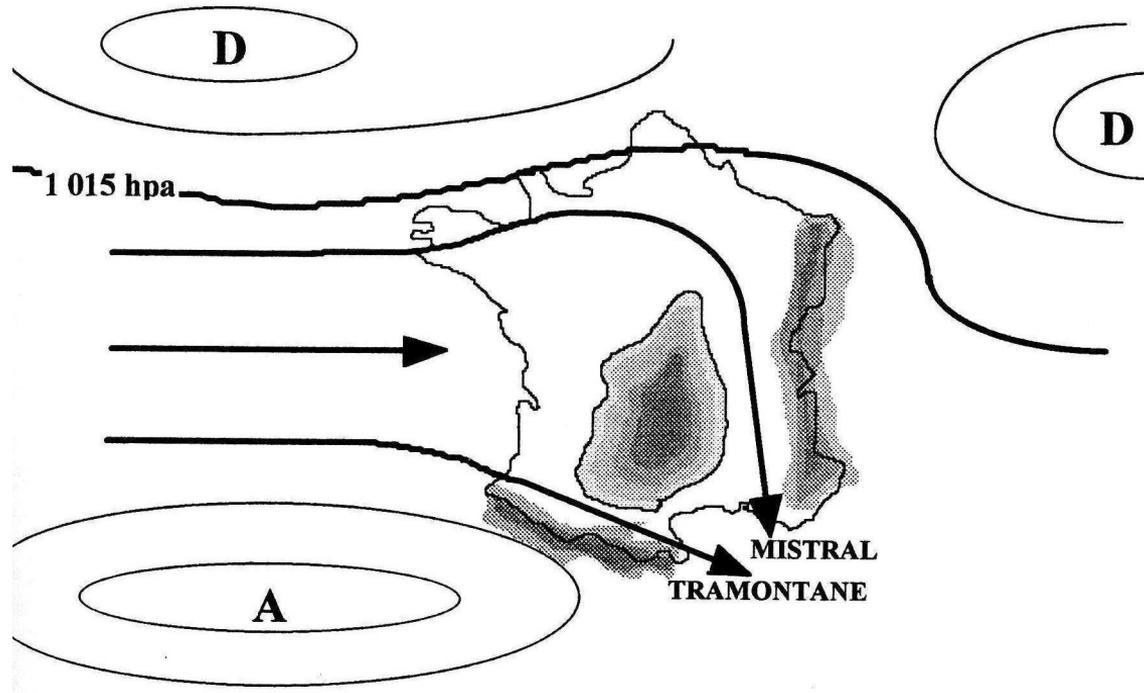
L'effet de la force de friction



Vents d'altitude : force du gradient de pression perpendiculaire aux lignes isobares + effet de la force de Coriolis.

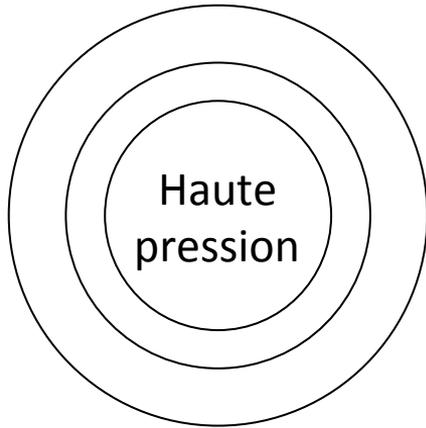
Vents au sol : force du gradient de pression perpendiculaire aux lignes isobares + effet de la force de Coriolis + forces de friction

Influence du relief

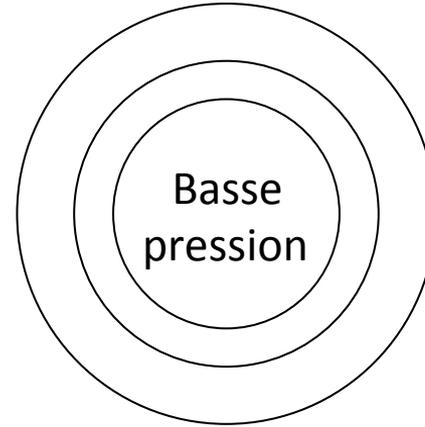


Application aux anticyclones et dépressions

- Indiquer le trajet du vent dans l'hémisphère Nord



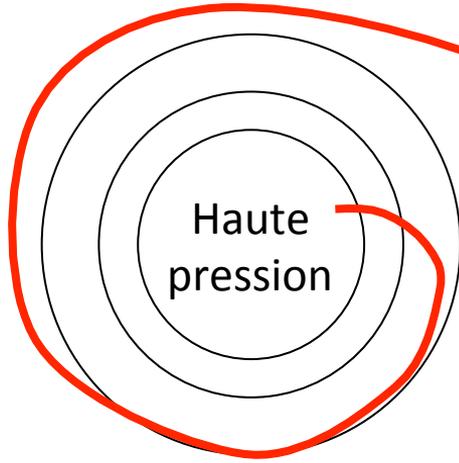
ANTICYCLONE



DÉPRESSION

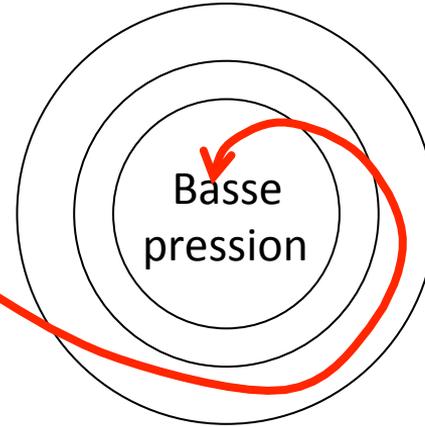
Application aux anticyclones et dépressions

➤ Indiquer le trajet du vent dans l'hémisphère Nord



Sens horaire

ANTICYCLONE

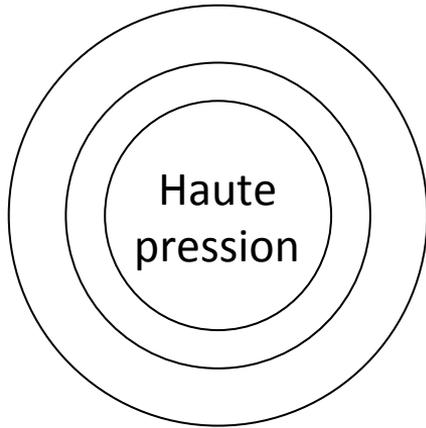


Sens anti-horaire

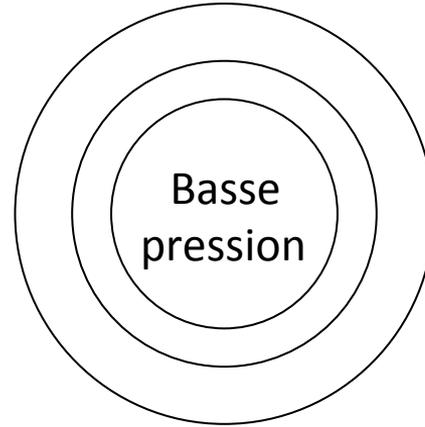
DÉPRESSION

Application aux anticyclones et dépressions

➤ Indiquer le trajet du vent dans l'hémisphère Sud



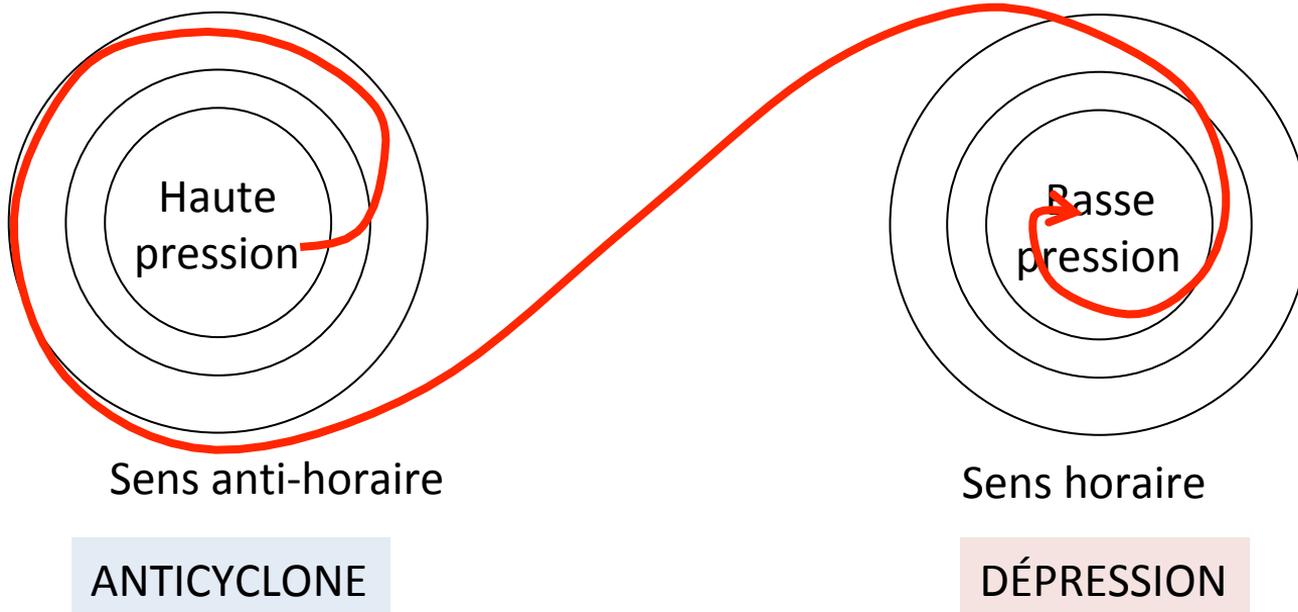
ANTICYCLONE



DÉPRESSION

Application aux anticyclones et dépressions

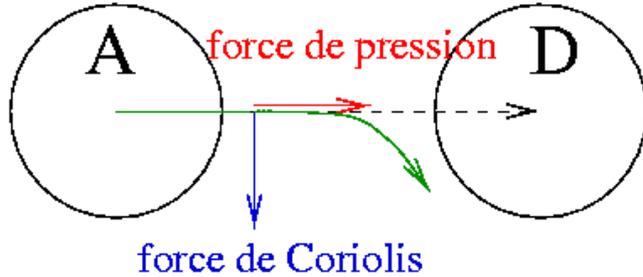
- Indiquer le trajet du vent dans l'hémisphère Sud



BILAN

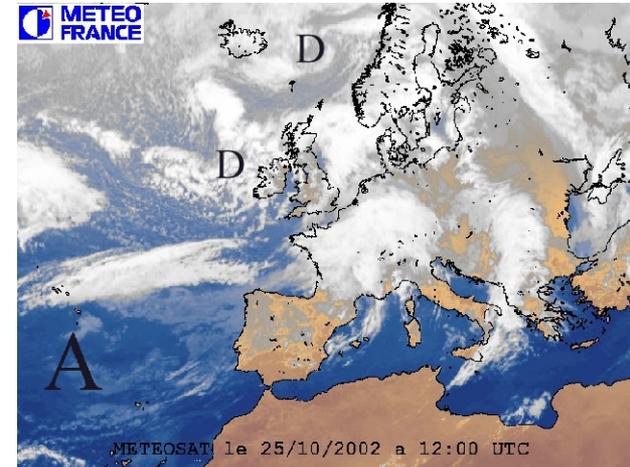
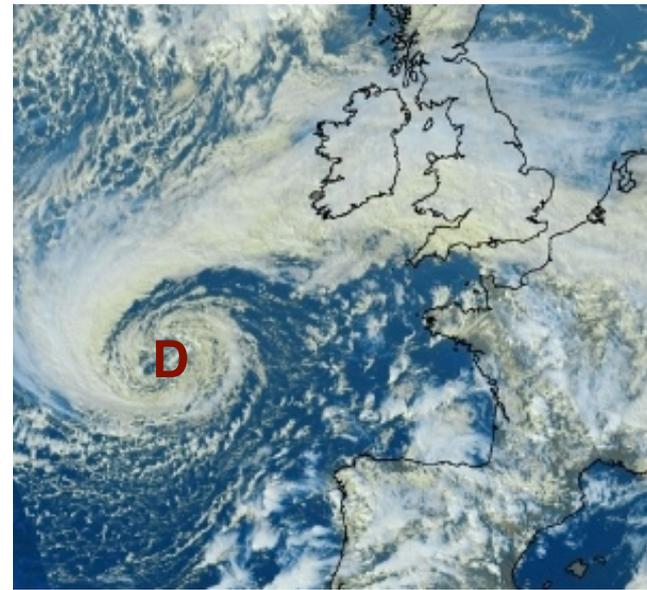
Anticyclone

Dépression



En pointillés, la trajectoire sans force de Coriolis.
La vraie trajectoire est en vert.

Dans l'hémisphère Nord, déviation vers la droite
=> l'air contourne la dépression par la droite
=> l'air tourne dans le sens contraire des aiguilles
d'une montre autour d'une dépression (inverse
pour un anticyclone).



BILAN

Le vent est un déplacement des masses d'air allant des hautes pressions vers les basses pressions.

La direction des vents est influencée par

- la force de Coriolis
- les forces de friction au sol et le relief

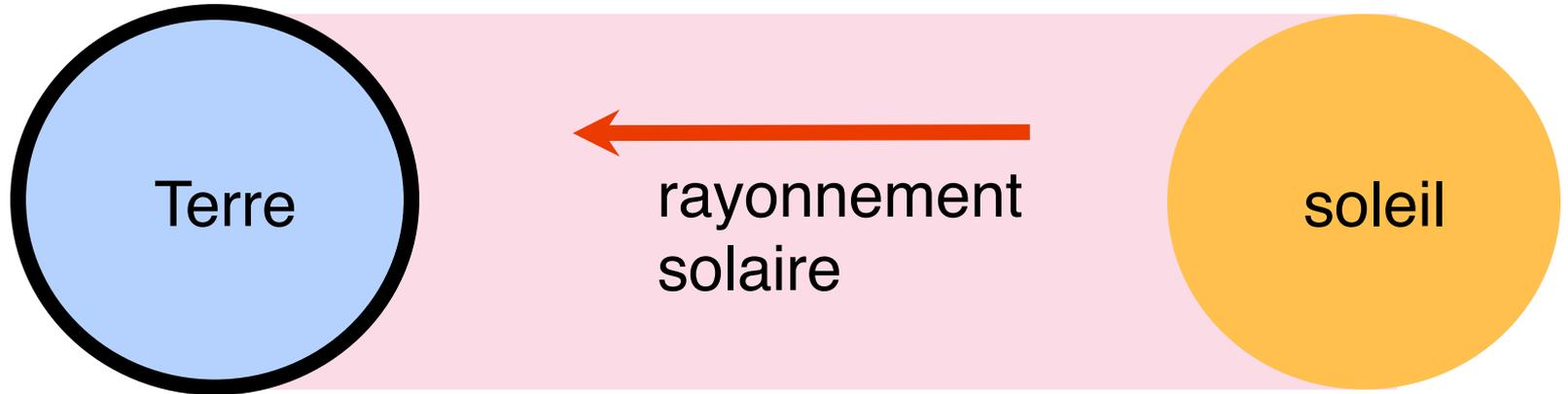
Quelle est l'origine des différences de pressions animant les vents ?

2. Les mouvements atmosphériques

2.2. Le bilan énergétique des enveloppes fluides

L'énergie reçue sur Terre

Constante solaire
= quantité d'énergie
reçue par unité de
surface = 1370 W.m^{-2}



énergie du rayonnement solaire
= quantité d'énergie reçue **en moyenne** sur la Terre = 342 W.m^{-2}

L'atmosphère atténue l'énergie qui atteint le sol

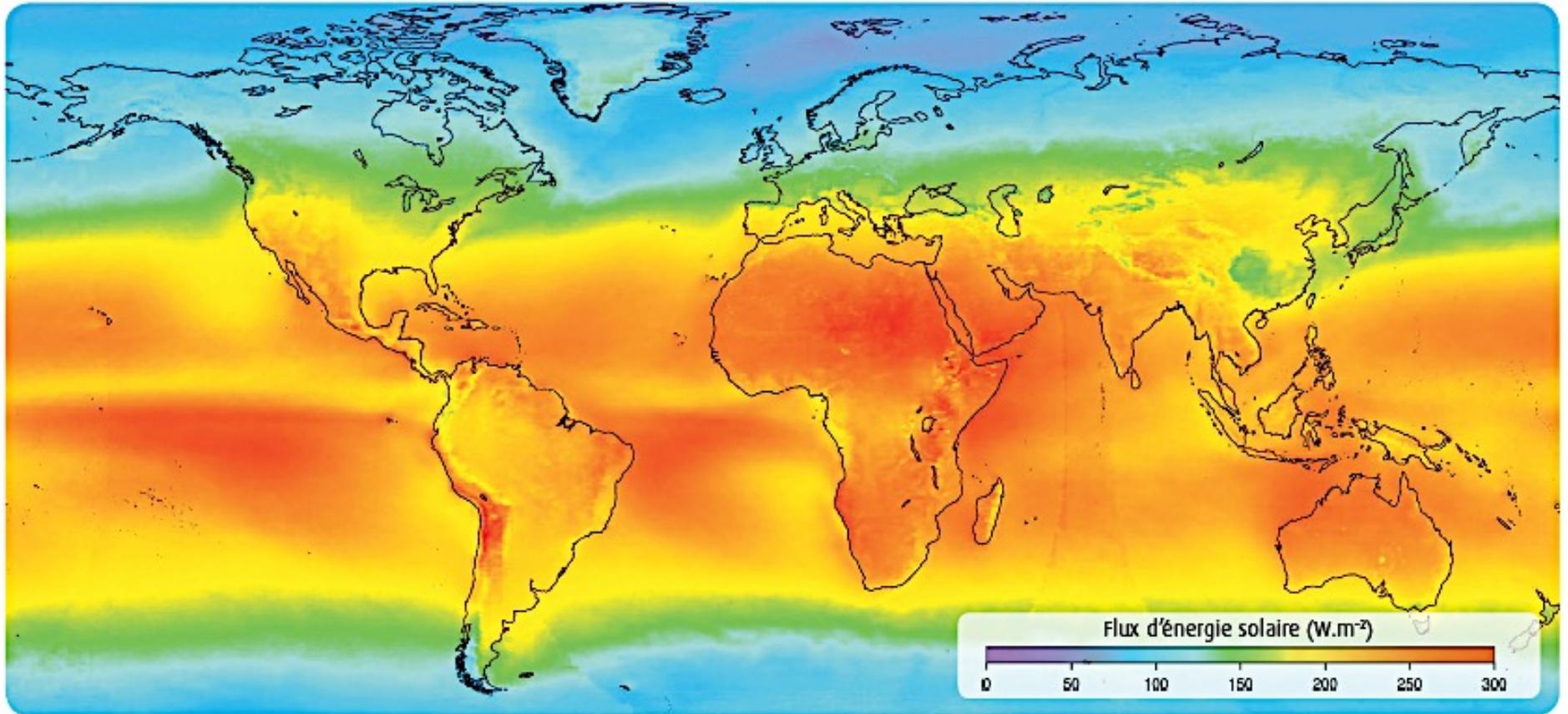
Rayonnement solaire incident = 340 W.m^{-2}

100 W.m^{-2} sont directement réfléchis à leur contact avec l'atmosphère

79 W.m^{-2} sont absorbés par les gaz de l'atmosphère

→ Flux incident au sol = 161 W.m^{-2} **en moyenne**

Carte du flux solaire incident sur Terre

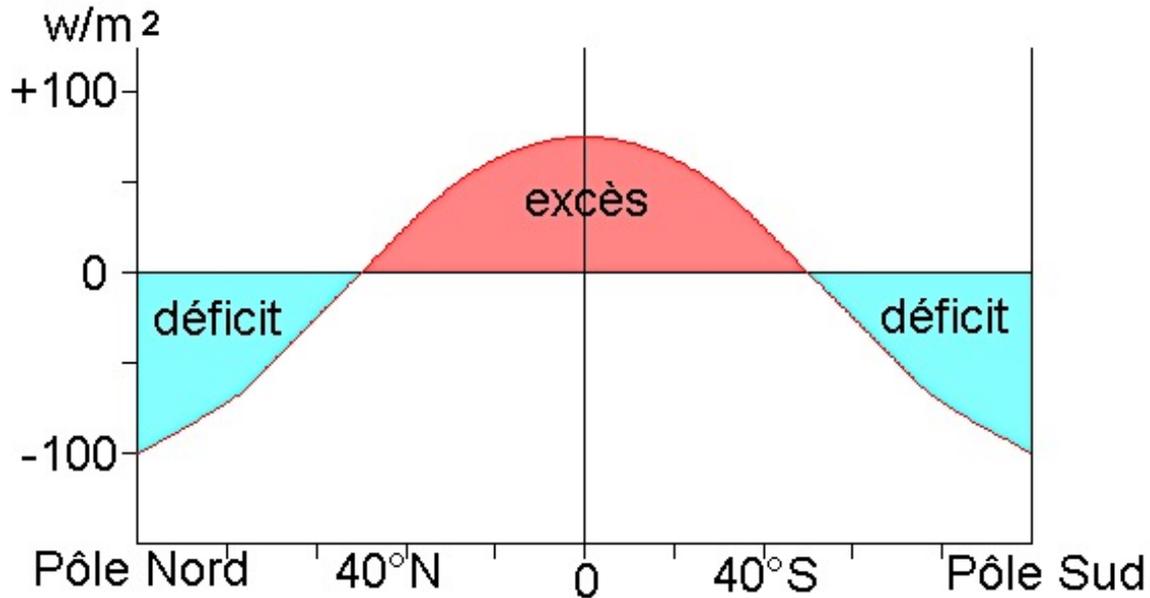


Moyennes sur une année

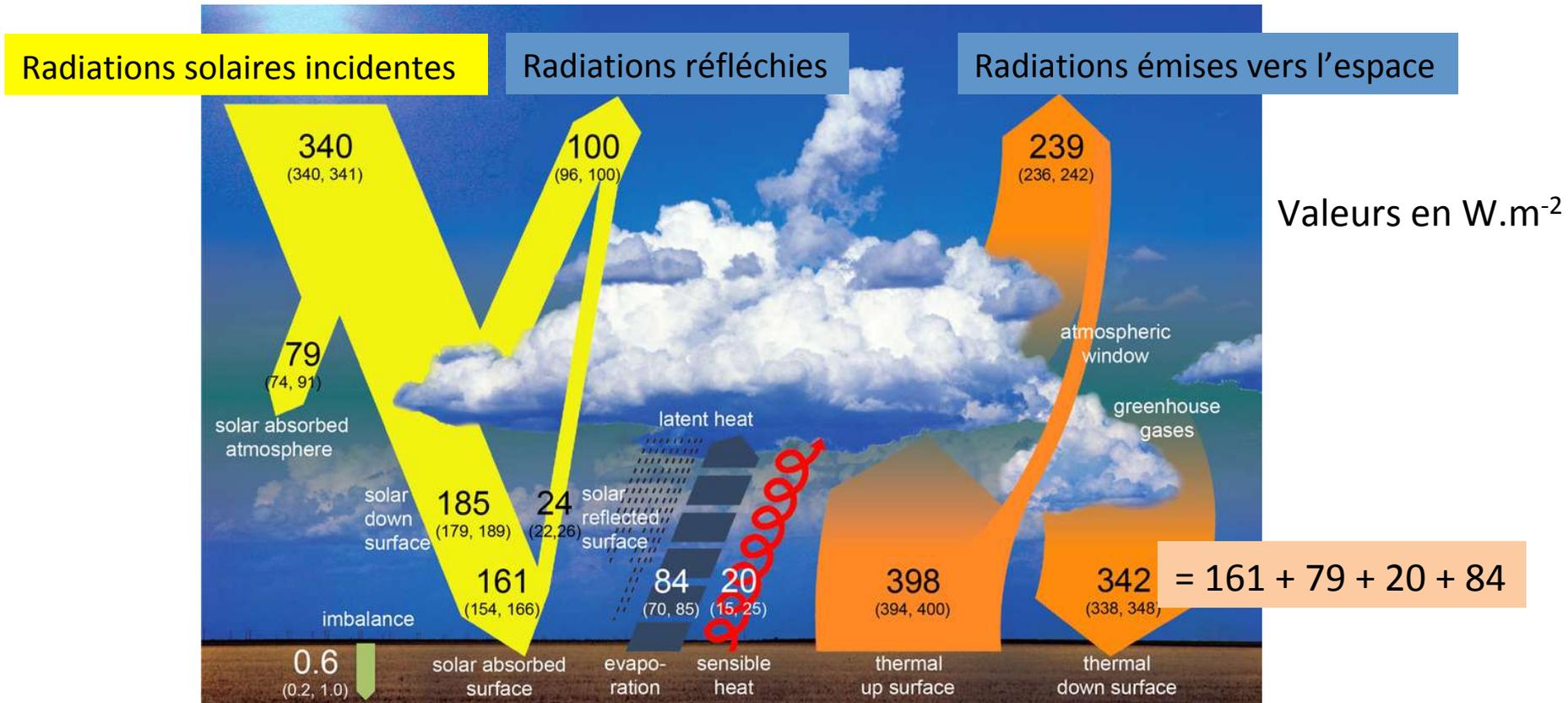
Un bilan énergétique déséquilibré

Valeur moyenne de 161 W.m^{-2} mais des variations liées :

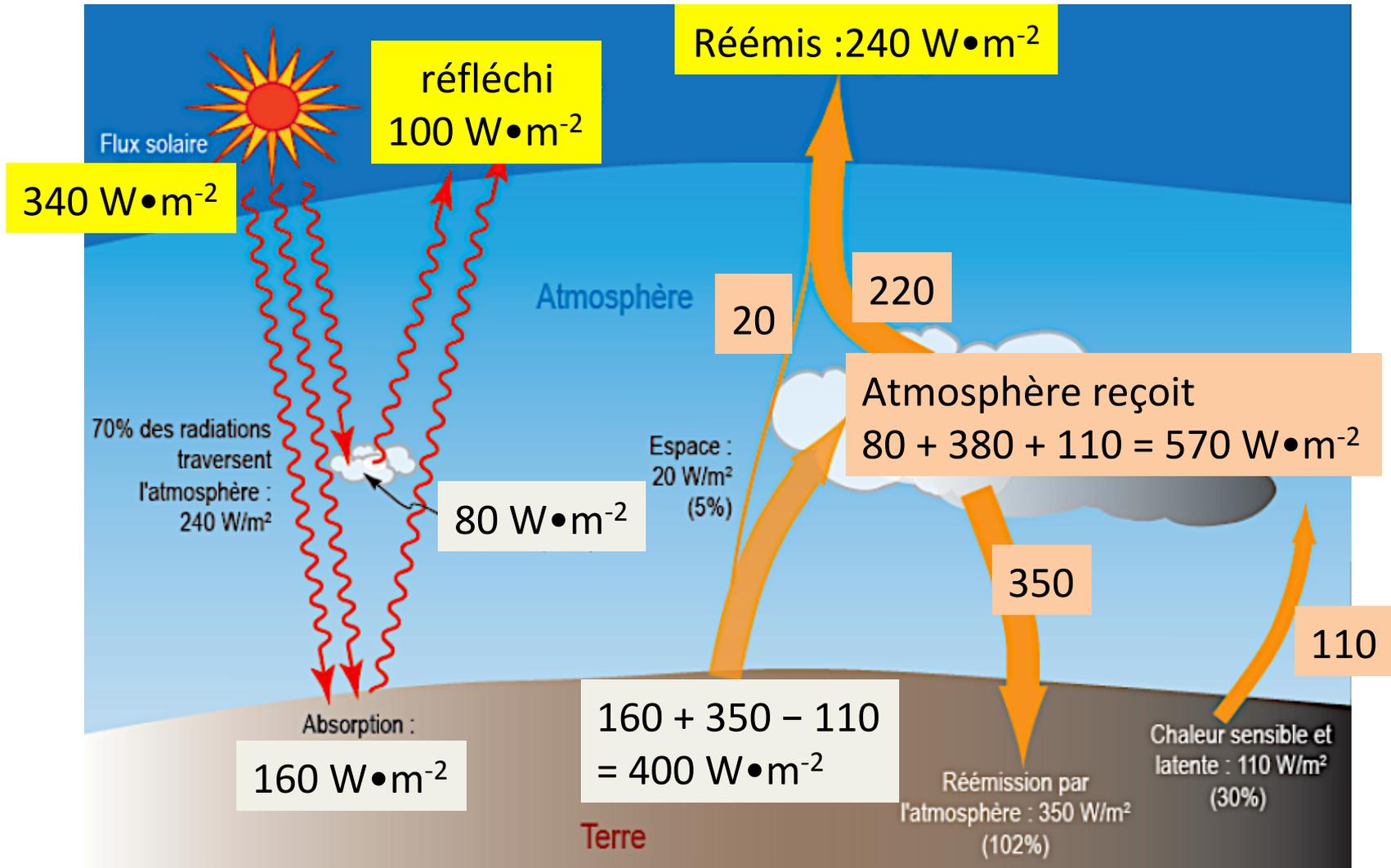
- à l'angle d'incidence
- à l'atmosphère +/- épaisse



L'effet de serre modifie l'équilibre



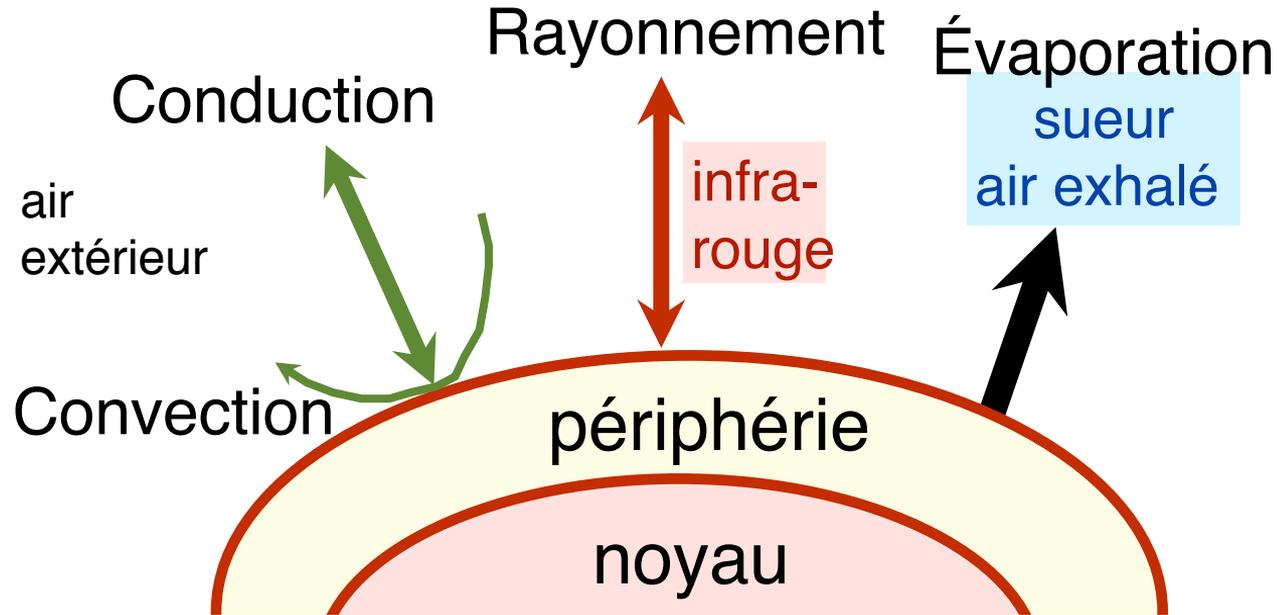
Les marges d'incertitude déduites des observations sont précisées entre parenthèses.



2. Les mouvements atmosphériques

2.3. Les modes de redistribution de l'énergie via les masses d'air

Rappel des transferts thermiques en physiologie



**Mêmes mécanismes physiques en géologie
mais dans des proportions différentes !**

La convection

$$Ra = \frac{\text{poussée d'Archimède}}{\text{dissipation}} = \frac{\rho g \alpha \Delta T d^3}{\kappa \eta}$$

ρ = masse volumique en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,

g = force de gravité en $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,

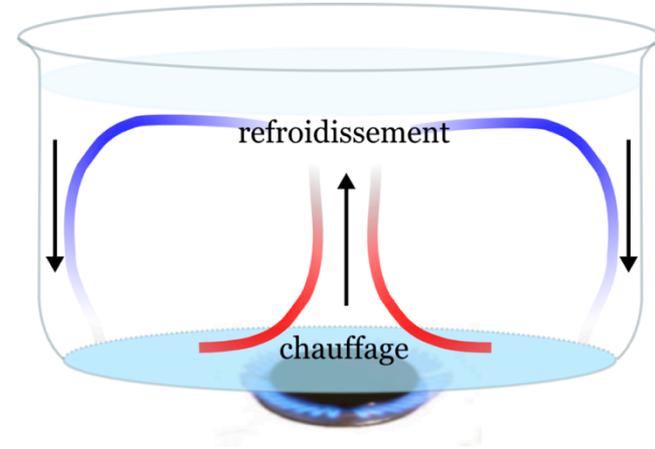
α = coefficient d'expansion thermique, sans dimension,

ΔT = différence de température entre le haut et le bas de la couche, en kelvin (K),

κ = diffusivité thermique en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

η = viscosité en $\text{Pa} \cdot \text{s}$.

d = distance entre le haut et le bas de la couche.



Application à la troposphère

$$Ra = \frac{\text{poussée d'Archimède}}{\text{dissipation}} = \frac{\rho g \alpha \Delta T d^3}{\kappa \eta}$$

$$\rho = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3},$$

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2},$$

α = coefficient d'expansion thermique, sans dimension = $3,661 \cdot 10^{-3}$

$$\Delta T = +13 - (-56) = 69 \text{ }^\circ\text{C},$$

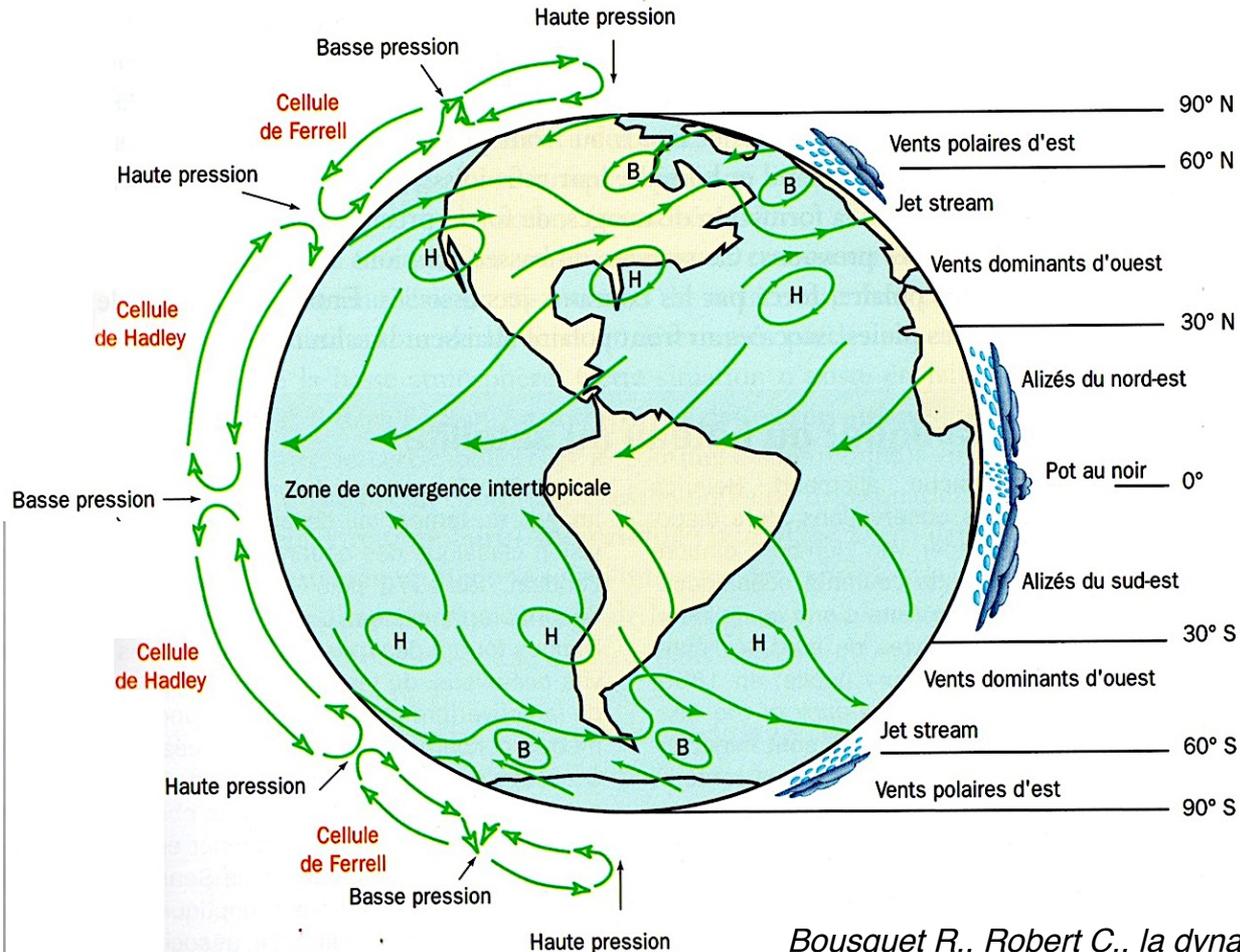
$$\kappa = 0,026 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\eta < 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}.$$

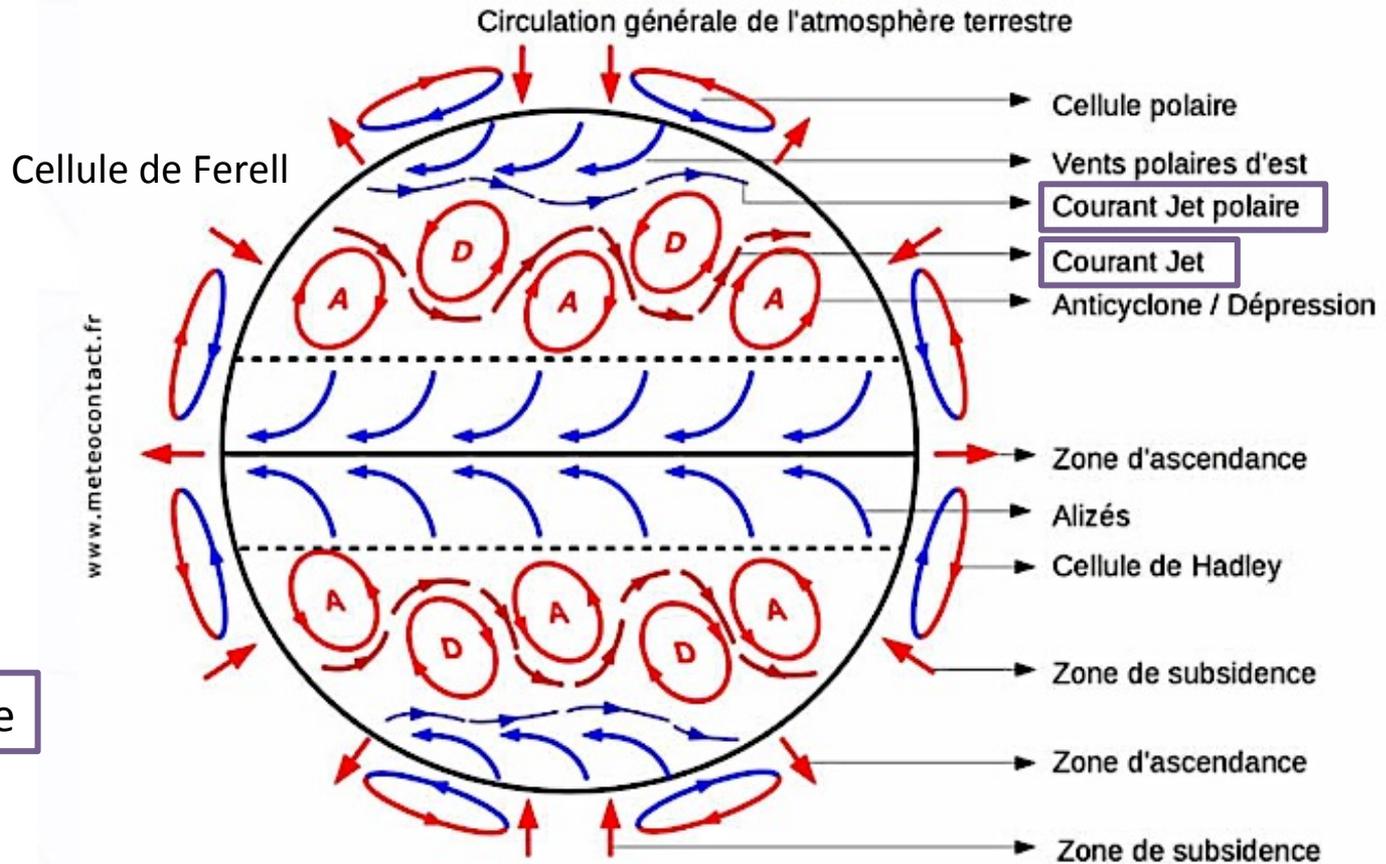
$$d = 12 \text{ km}$$

Ra = ?

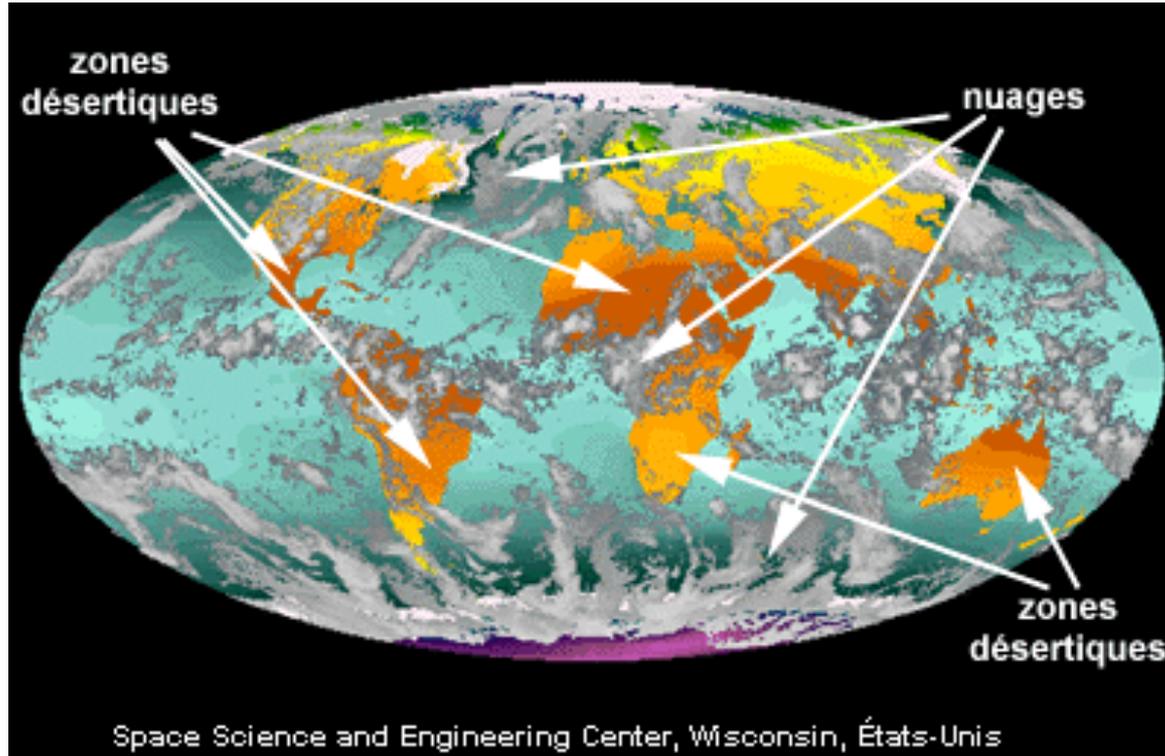
Les cellules de convection



Les grands vents sur Terre

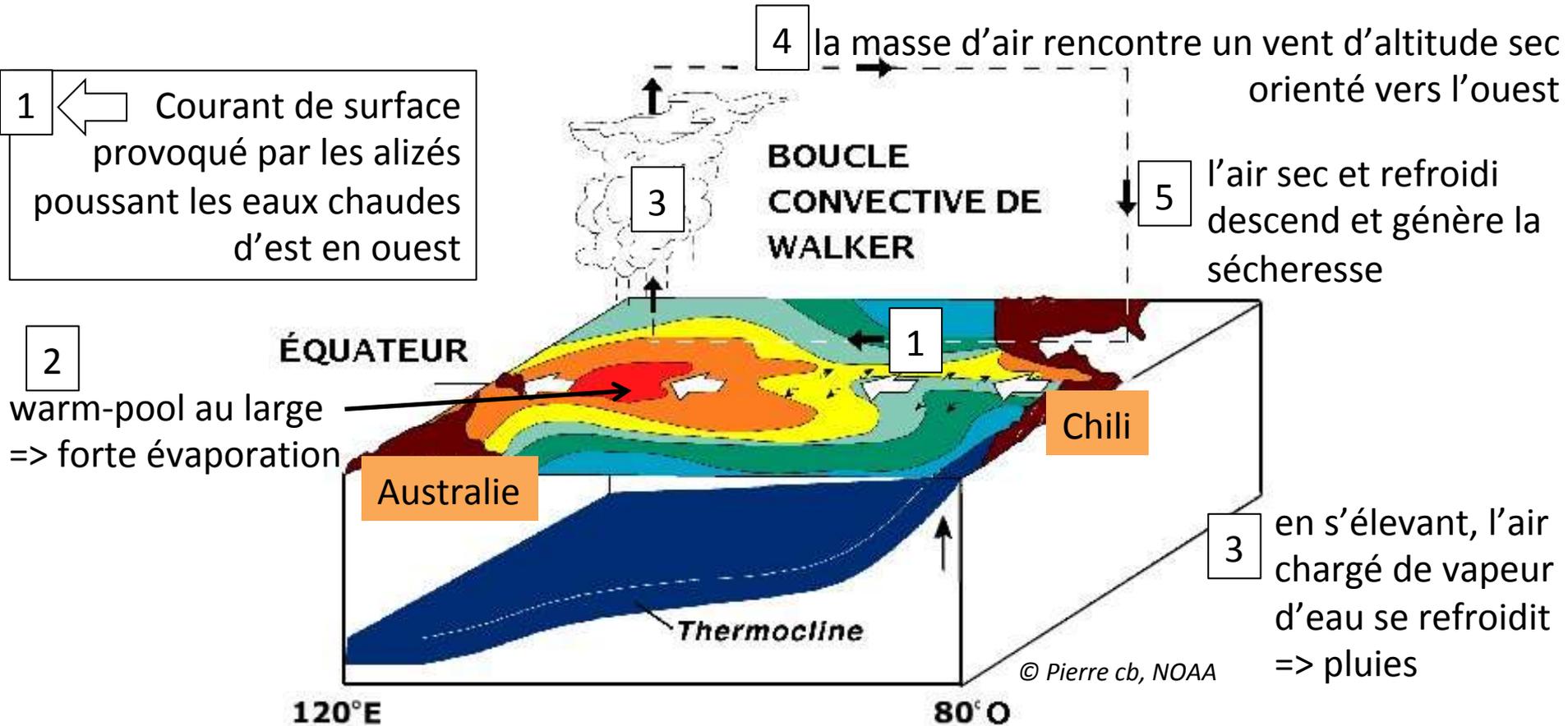


Des conséquences sur le climat



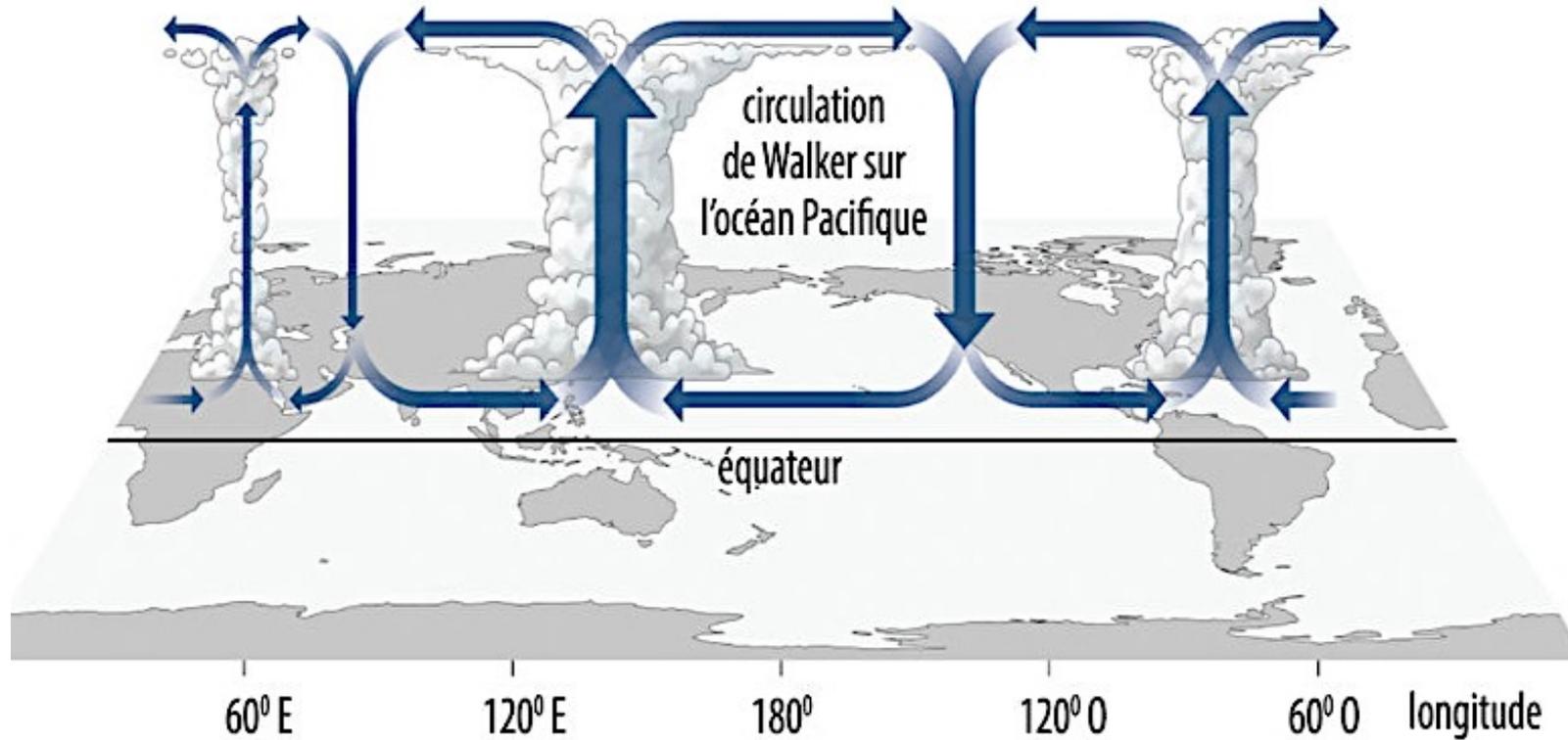
Sur cette image satellite, on remarque que les zones de hautes pressions correspondent aux endroits où il y a moins de nuages. Les zones de basses pressions correspondent aux endroits où il y a plus de nuages.

La cellule de Walker le long de l'équateur



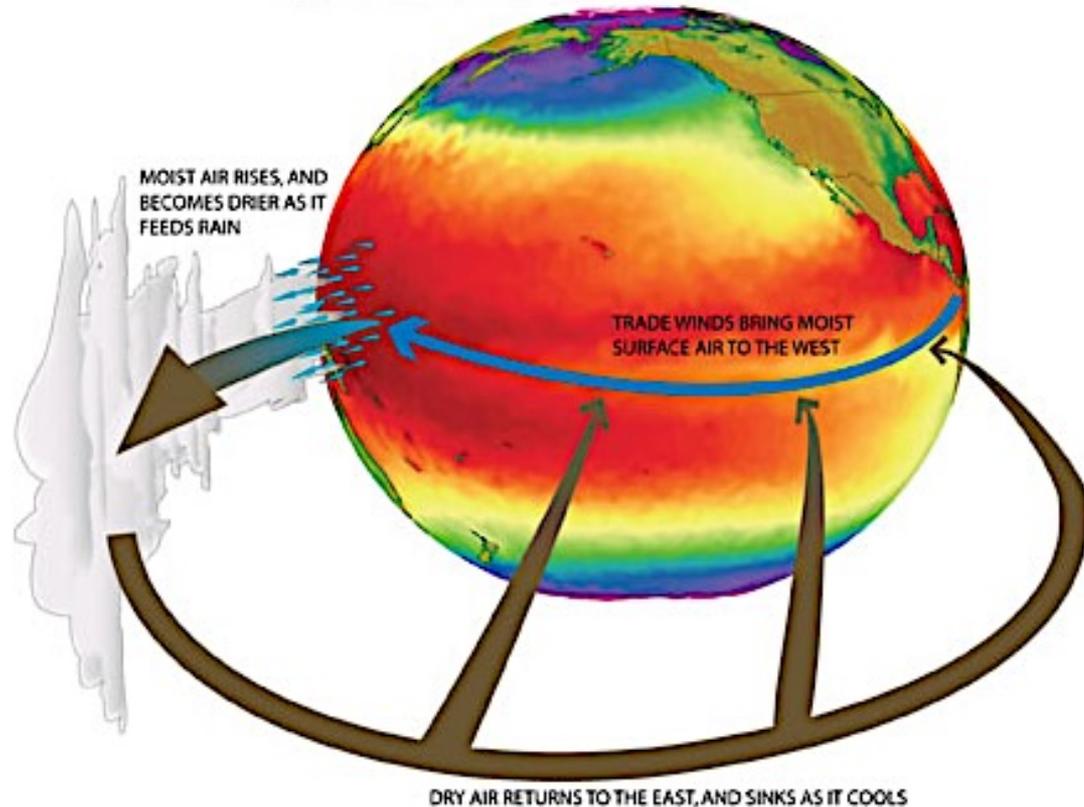
Boucle convective le long de l'équateur, prenant naissance dans l'océan, vers le continent.

La cellule de Walker à l'échelle du globe



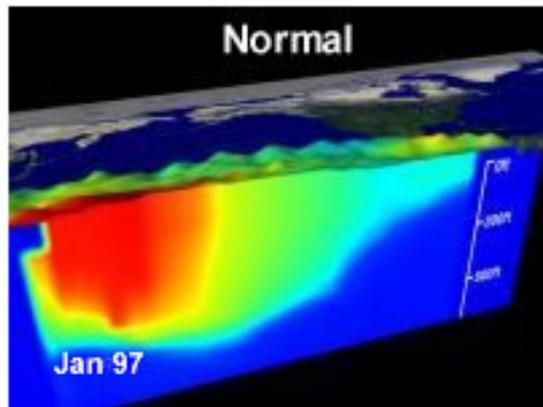
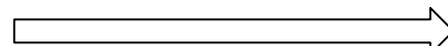
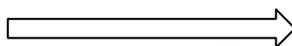
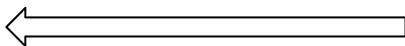
La cellule de Walker du Pacifique est immense

Pacific Walker Circulation

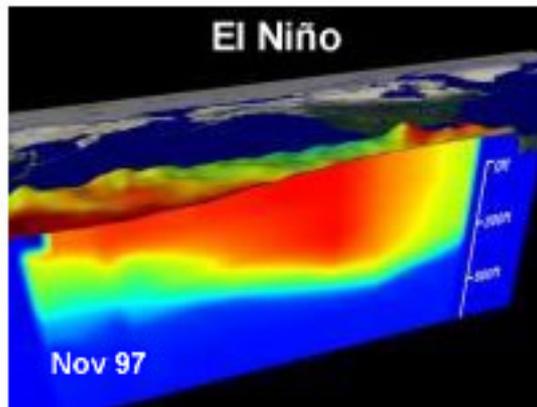


La cellule de Walker change régulièrement

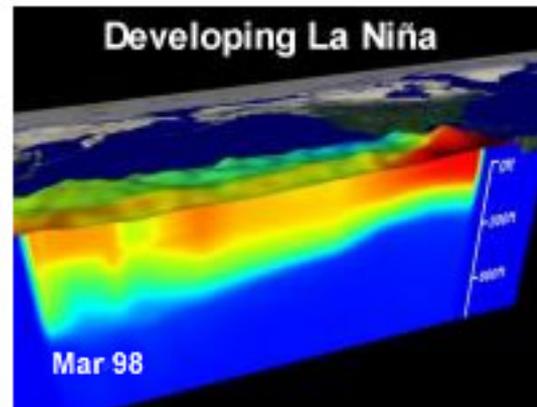
Observations



warm-pool vers les côtes
australiennes



courant inversé

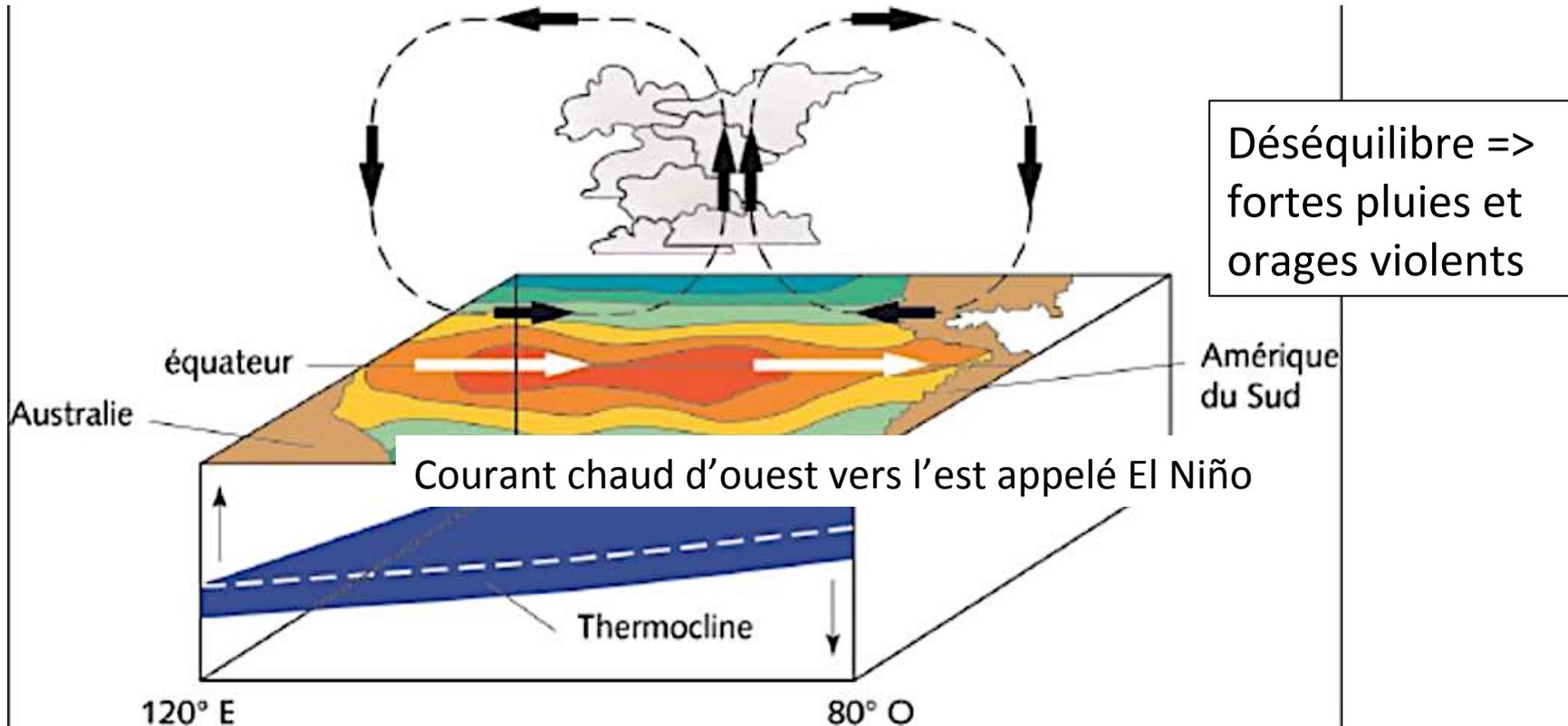


Processus accentué
dans l'autre sens
avec 2 warm-pools

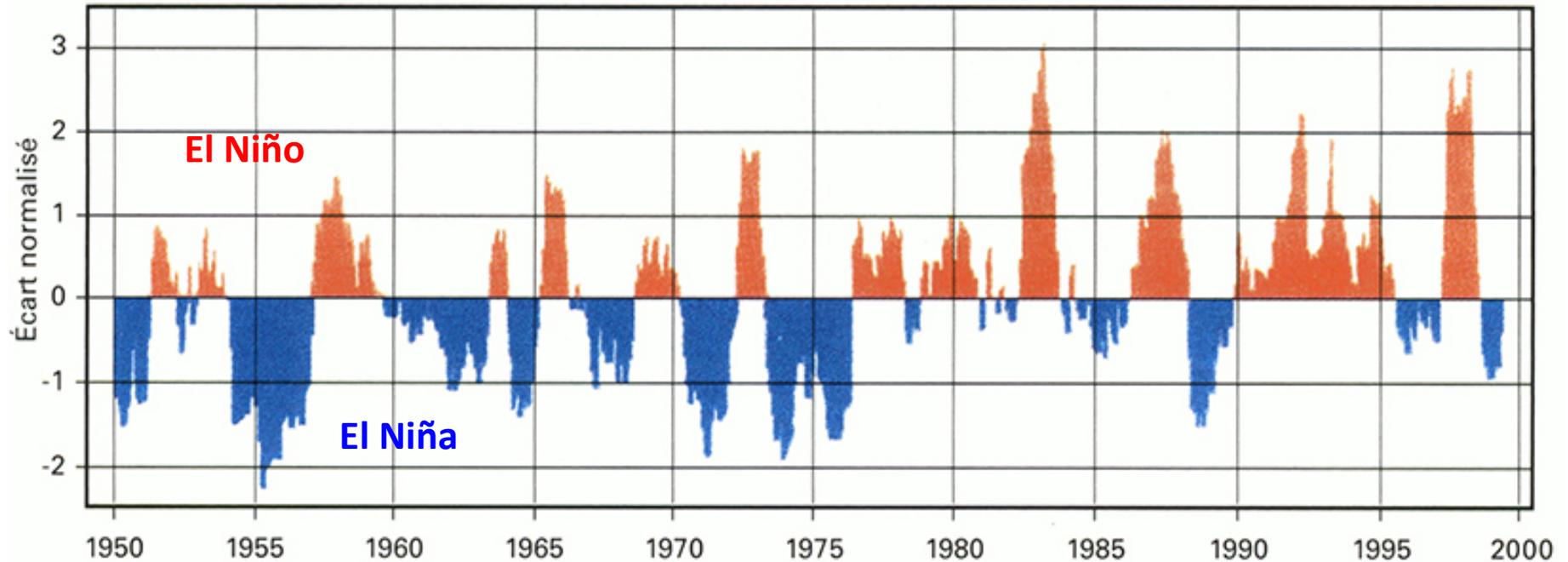
NOAA/PMEL

Le phénomène El Niño

Tous les 18 mois environ, la cellule de Walker s'effondre et se divise, les eaux chaudes accumulées à l'ouest de l'océan Pacifique refluent vers l'Amérique centrale à l'est.



Les phénomènes El Niño et La Niña alternent



2. Les mouvements atmosphériques

2.4. Les conséquences sur les précipitations et les grands biomes

Les principaux biomes

Il existe 17 biomes dont 8 majeurs.

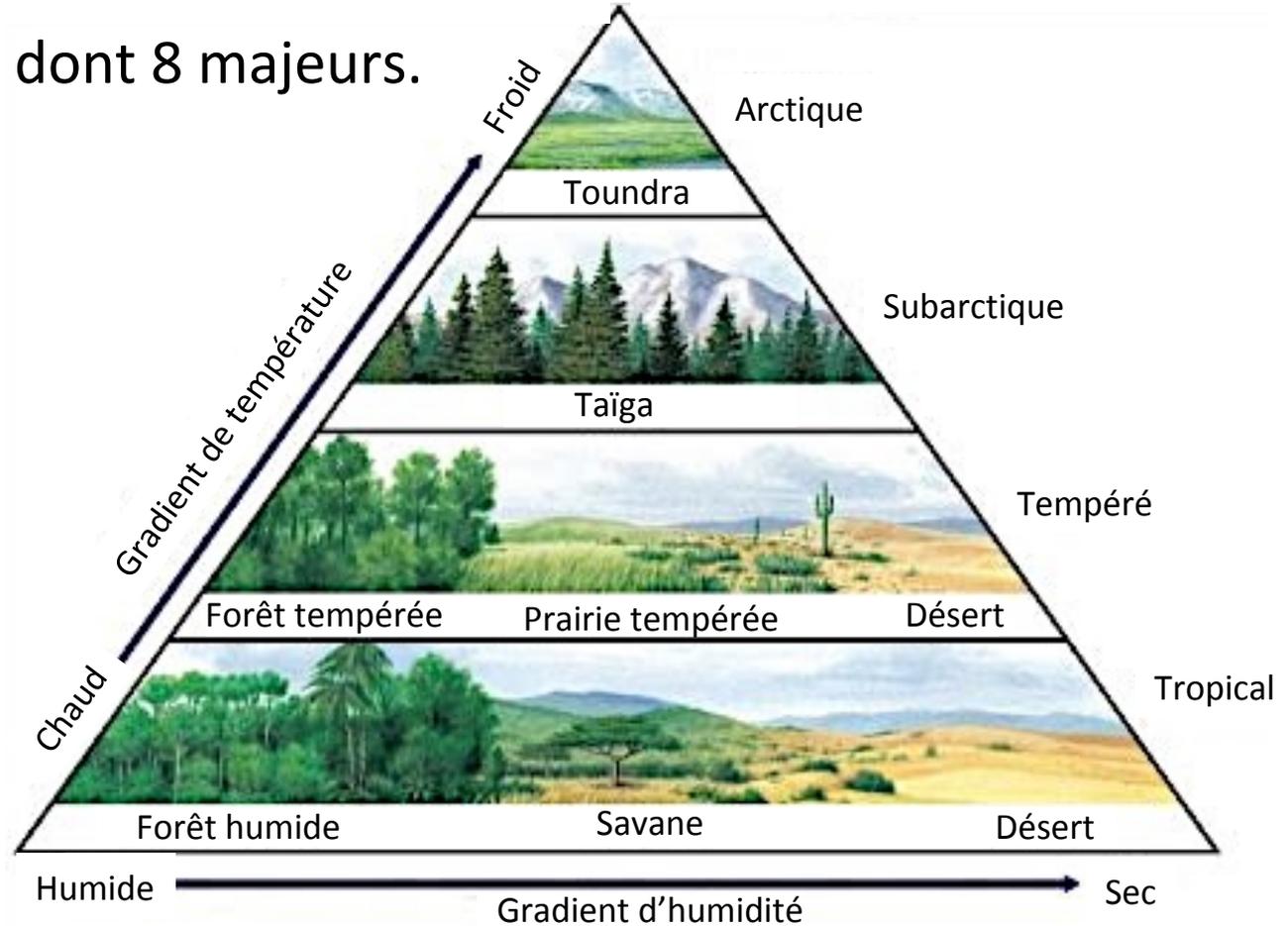
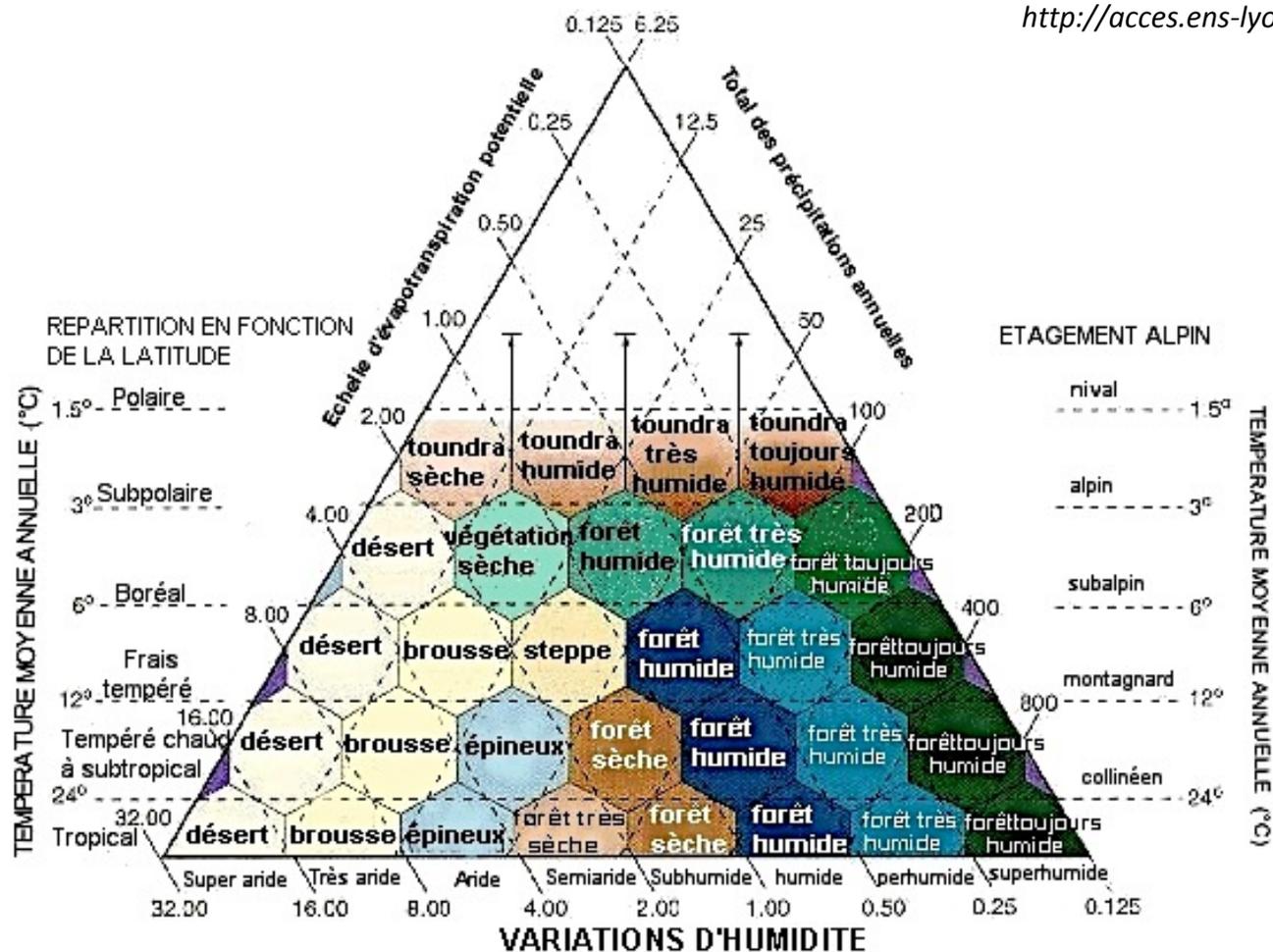
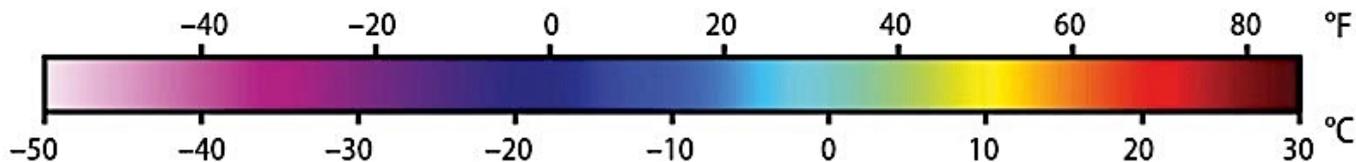
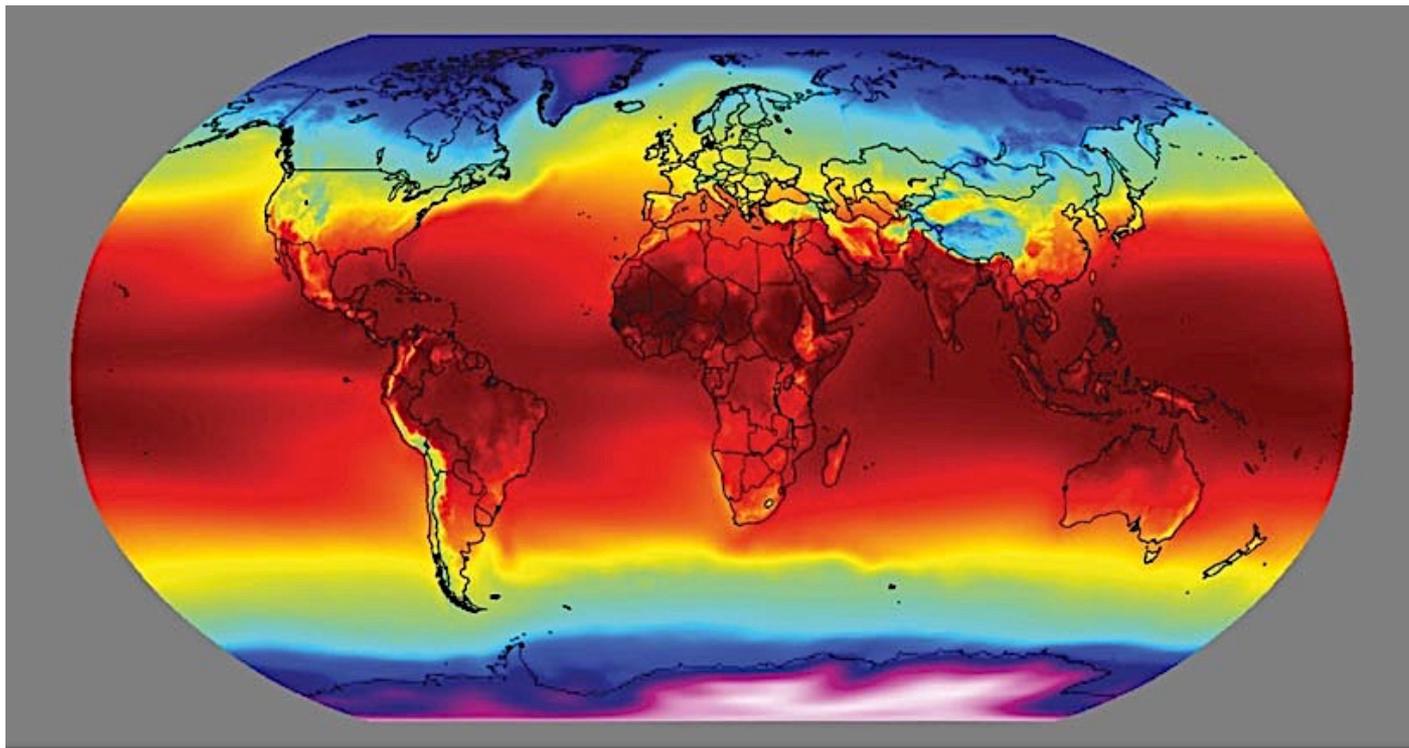


Diagramme de Holdridge

<http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques>

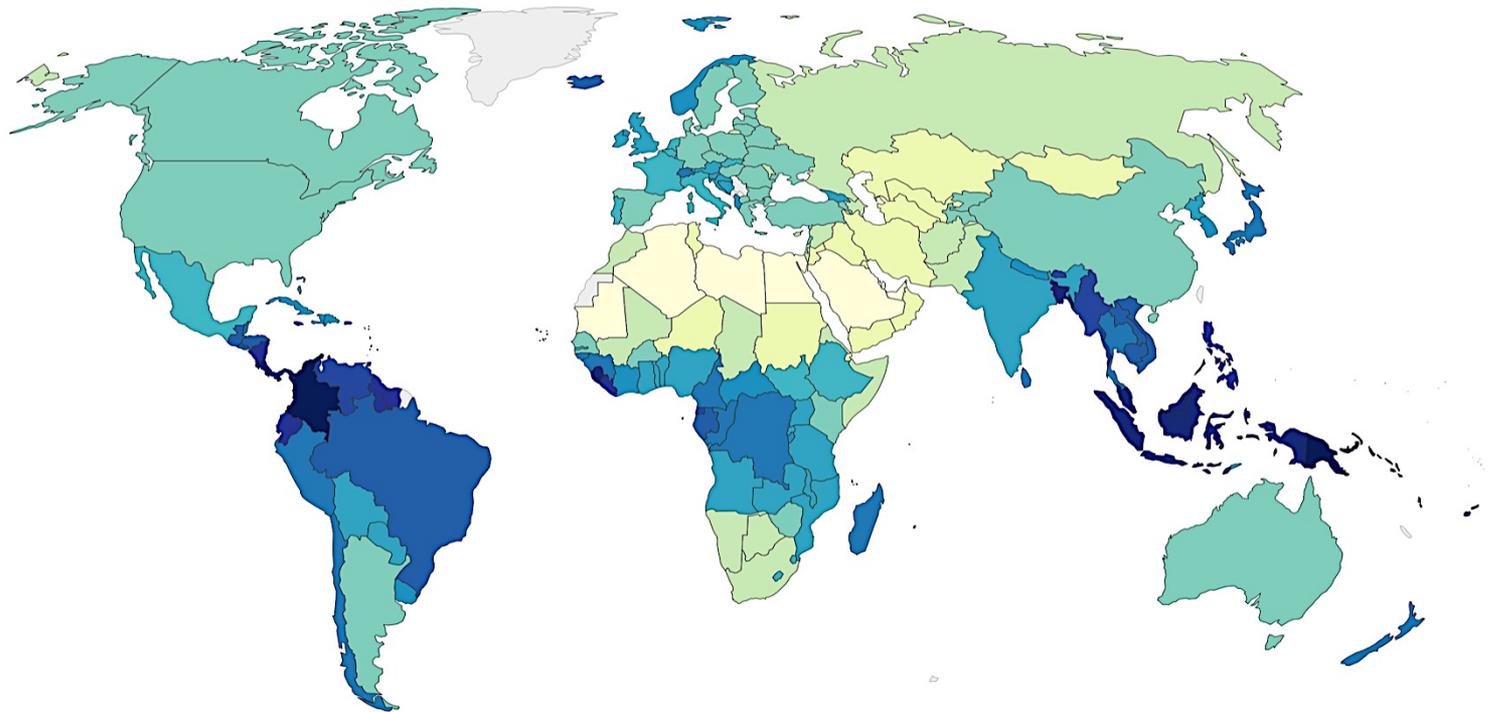


Carte mondiale des températures



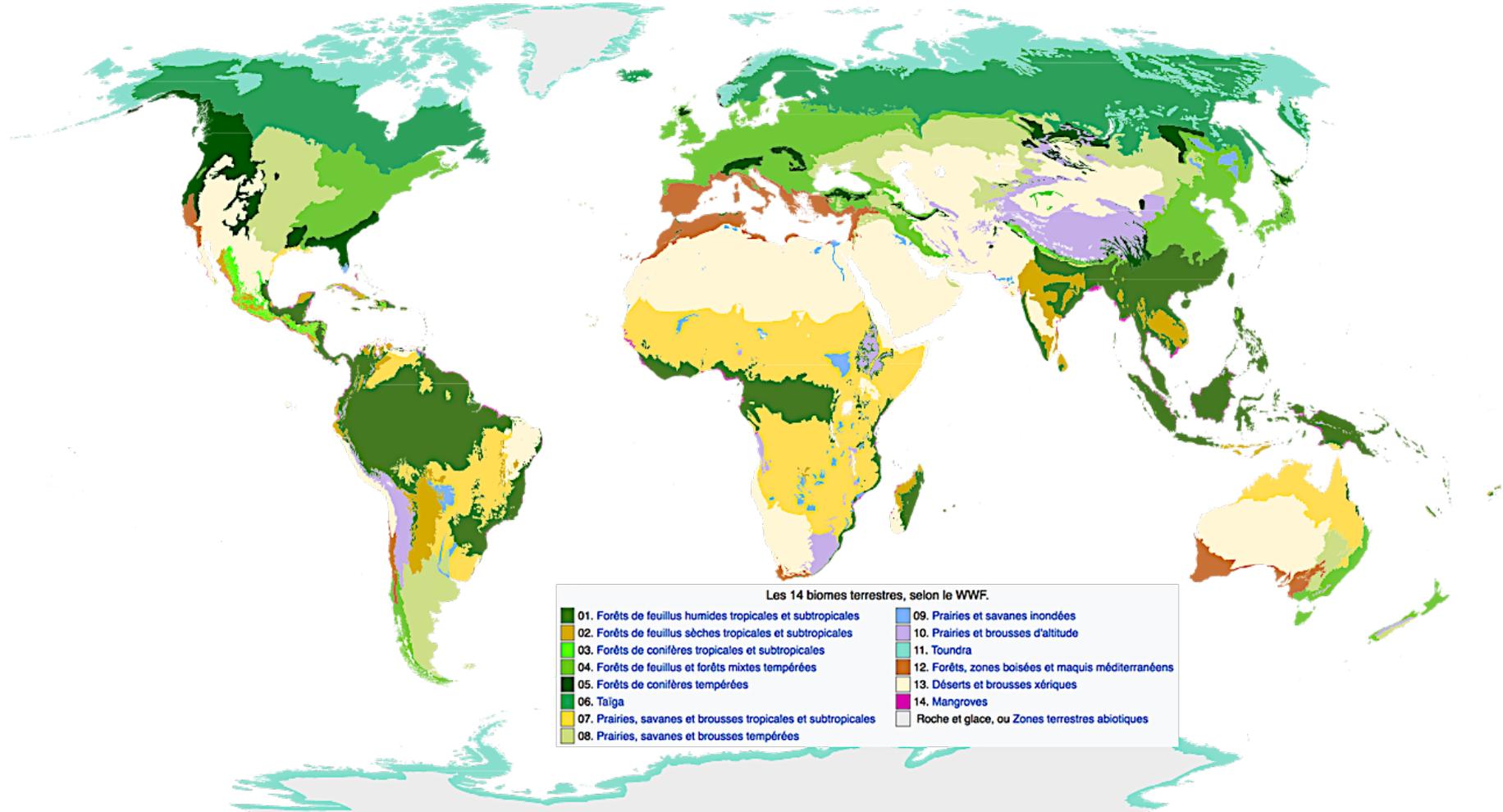
Source : <https://www.encyclopedie-energie.org>

Carte mondiale des précipitations

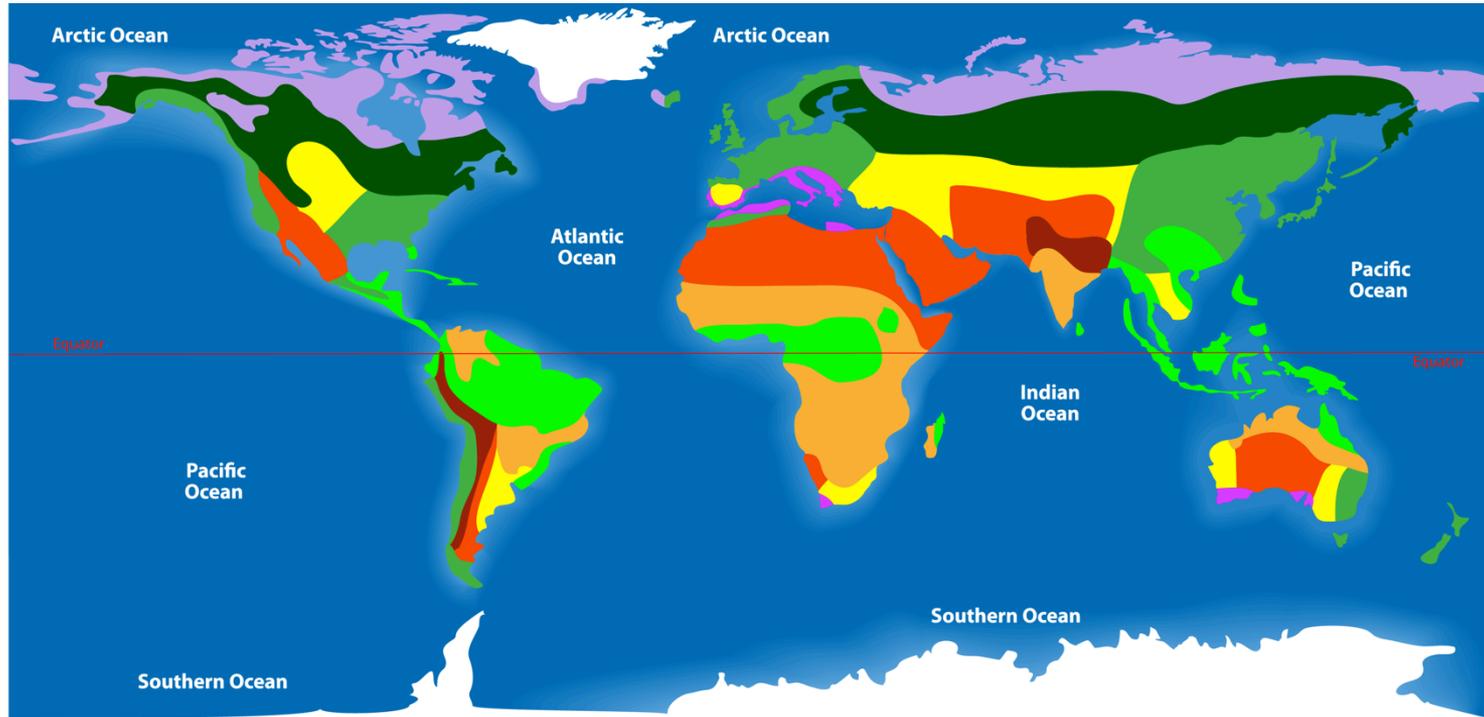


Source : Food and Agriculture Organization of the United Nations

Carte mondiale des biomes



Carte mondiale des biomes



CONCLUSION

À l'échelle de la Terre

inégale répartition du flux solaire => redistribution de la chaleur grâce à l'existence de trois cellules de convection de la troposphère, en fonction de la latitude

À l'échelle d'un pays ou continent

vents = mouvements globalement horizontaux mais accompagnés de mouvements verticaux.

Moteur = différences de pression souvent dues à des différences de température.

À l'échelle d'une région : vents locaux (ex : brise de mer et de terre)