

# Introduction à la dynamique du climat

Didier Swingedouw  
didier.swingedouw@u-bordeaux.fr

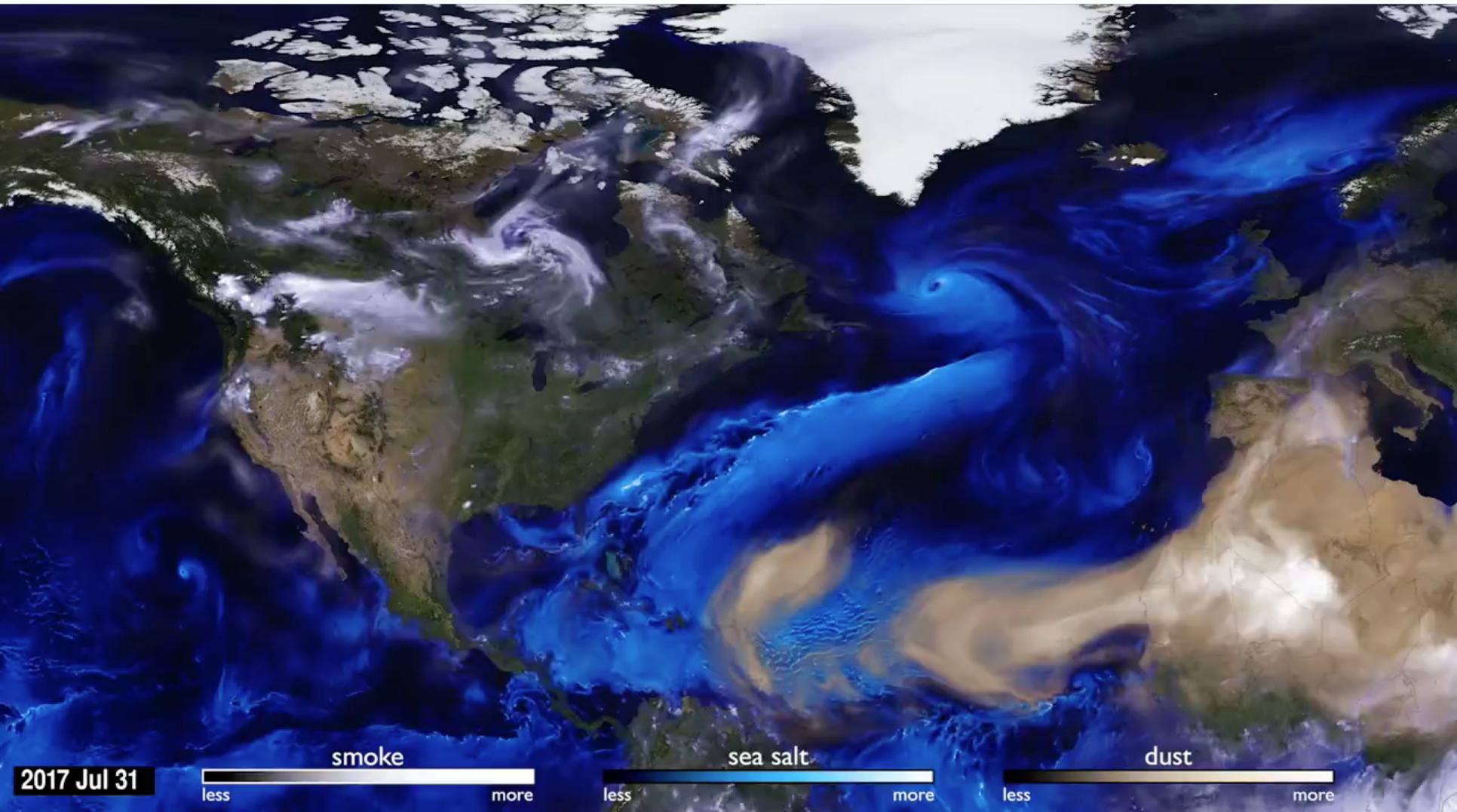
[http://www.epoc.u-bordeaux.fr/indiv/Didier/public\\_html/Cours.html](http://www.epoc.u-bordeaux.fr/indiv/Didier/public_html/Cours.html)

# CLIMAT

Modéliser pour comprendre et anticiper



# Circulation 2017



Qu'est-ce que le climat ?

# Définition du climat

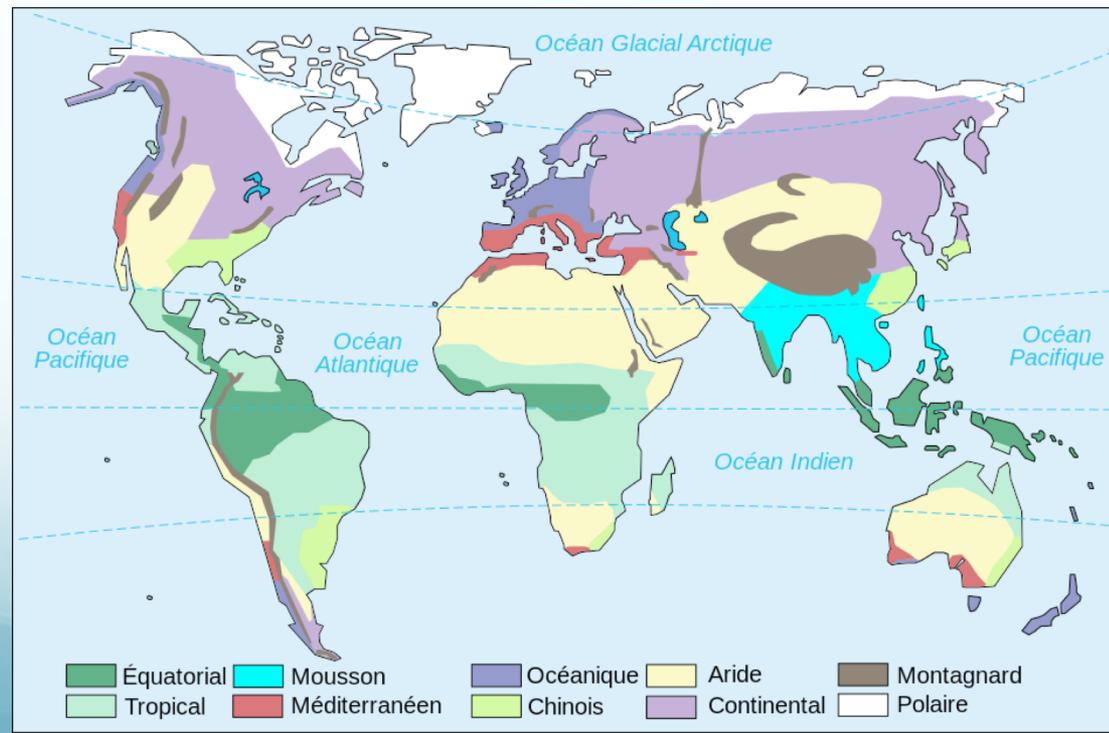
- Larousse : Ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un lieu donné.
- Wikipédia : Le climat est la distribution statistique des conditions de l'atmosphère terrestre dans une région donnée pendant une période donnée. Il se distingue de la météorologie qui désigne l'étude du temps à court terme et dans des zones ponctuelle.
- GIEC : Le climat est habituellement défini comme une moyenne météo, ou plus rigoureusement comme la description statistique en terme de moyenne et variance de variables appropriées (température, précipitation) sur une période allant du mois aux millions d'années. En accord avec l'Organisation Mondiale Météorologique, une période classique est **30 ans**.

# Définition du climat

- Ethymologie : Vient du grec “Klima” qui fait référence à l’inclinaison des rayons du soleil par rapport à l’horizon

⇒ Nature géographique du climat

⇒ Jusque récemment, la climatologie était une branche de la géographie

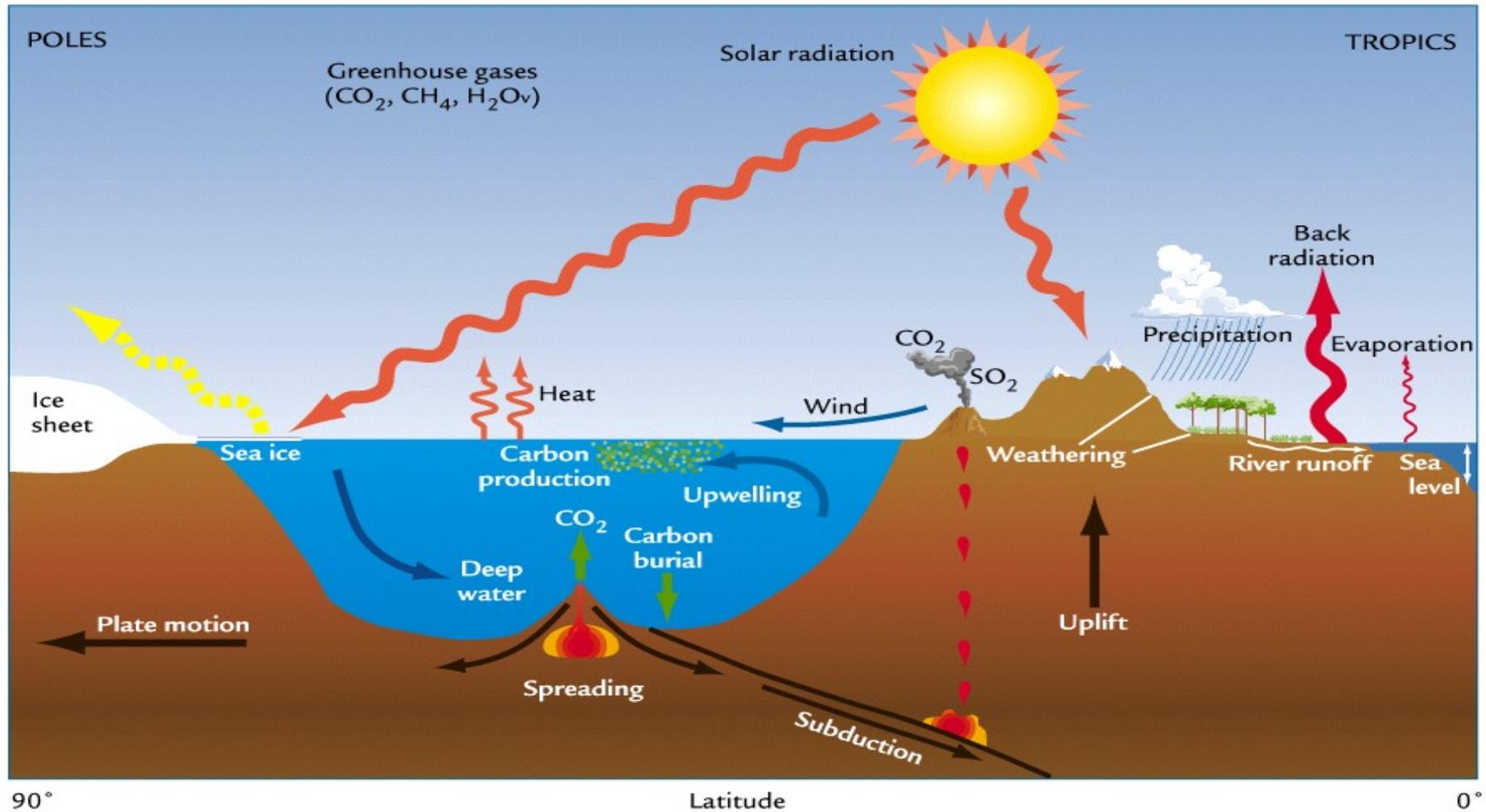


# Définition du climat

- Le climat n'est pas un système physique ?
- Pourquoi 30 ans ?
- Anthropocentrisme de la définition: le climat est défini pour les être humains sur plusieurs décennies (une génération)

# Notion de système climatique

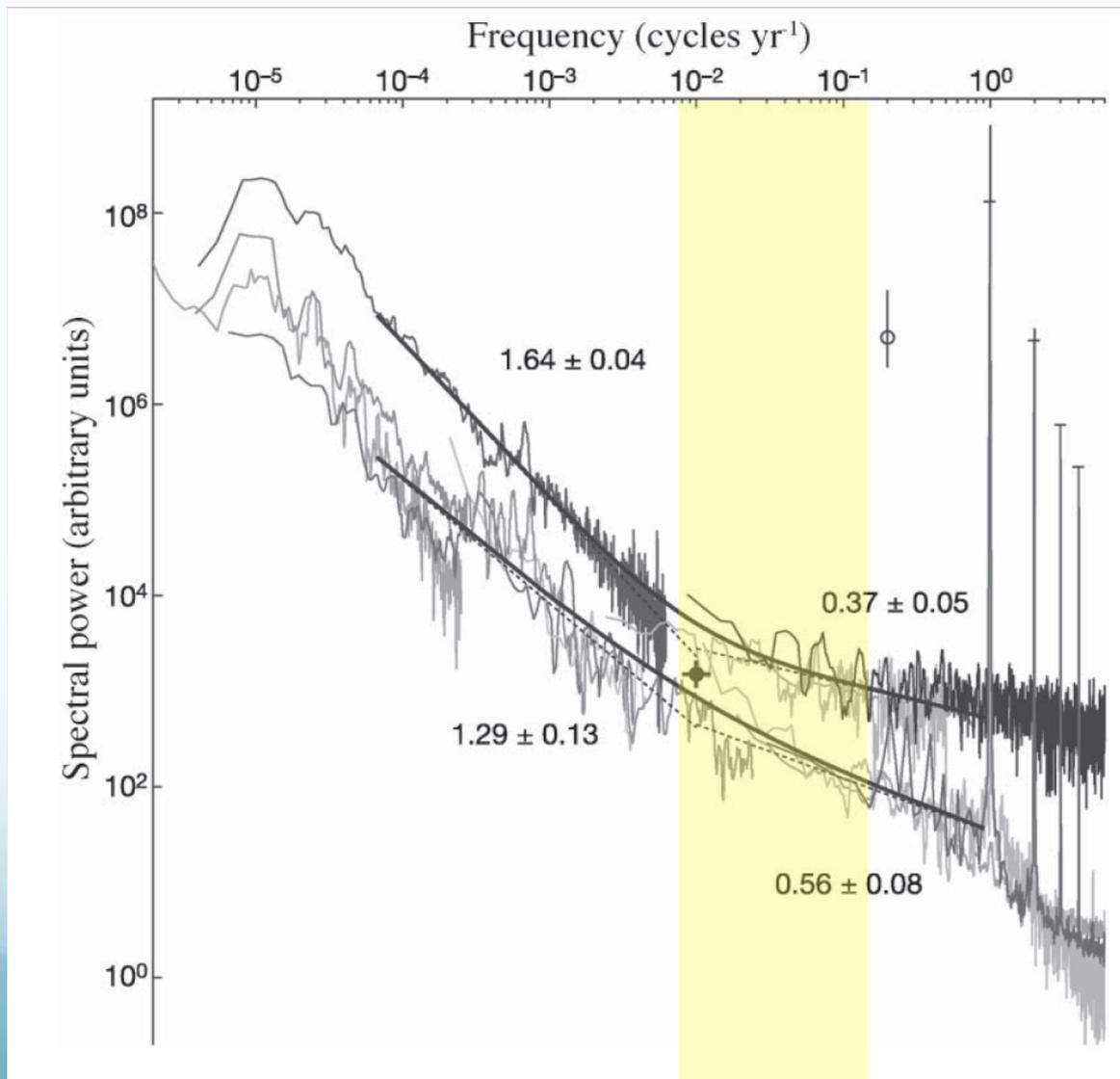
**Besoin de connaissance pluri-disciplinaire !**



# Notion de système climatique

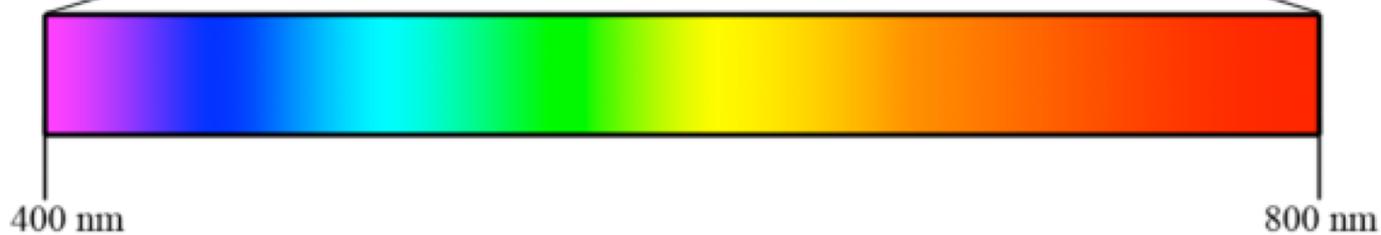
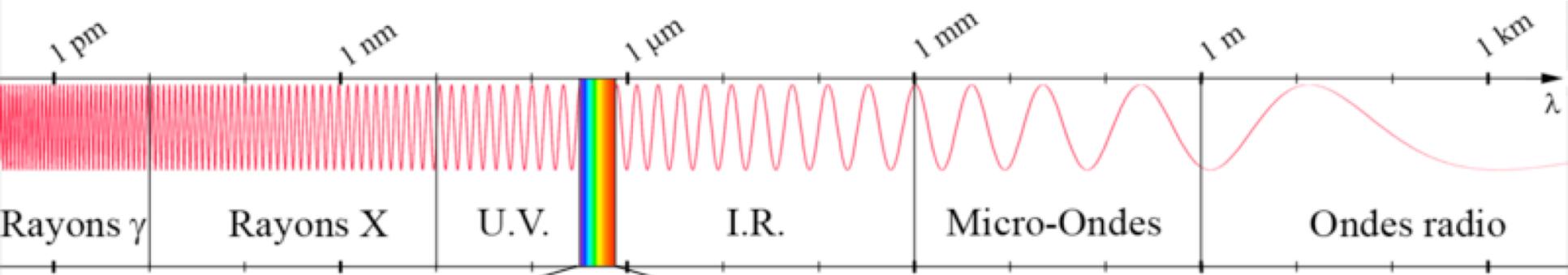
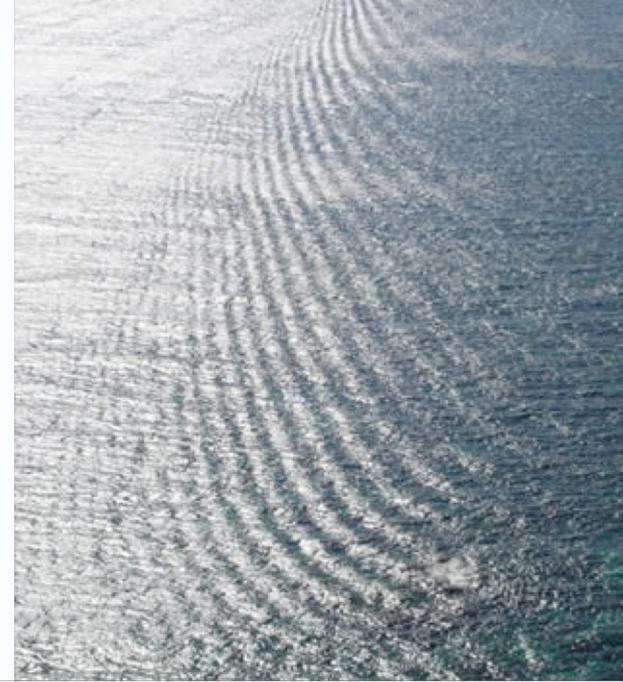
- Par analogie à un **système physique**, on définit le **système climatique** comme constitué de plusieurs composantes (atmosphère, l'océan, banquise, surfaces continentales, végétation, calottes glaciaires...) et leurs interactions.
- Il s'agit d'un **système ouvert**, qui échange en permanence de l'énergie avec l'extérieur, principalement *via* le rayonnement solaire incident, et le rayonnement thermique émis vers l'espace.
- Il s'agit également d'un **système dynamique** car, les lois régissant son comportement étant supposées connues, il est possible de décrire l'évolution dans le temps (la trajectoire) du système, de façon déterministe.
- Pour pouvoir effectuer un tel calcul, il faut en outre disposer d'une condition initiale, décrivant l'état initial du système, et des conditions aux limites, ou **forçages externes**, qui influencent son comportement.

# Spectre de de la température globale



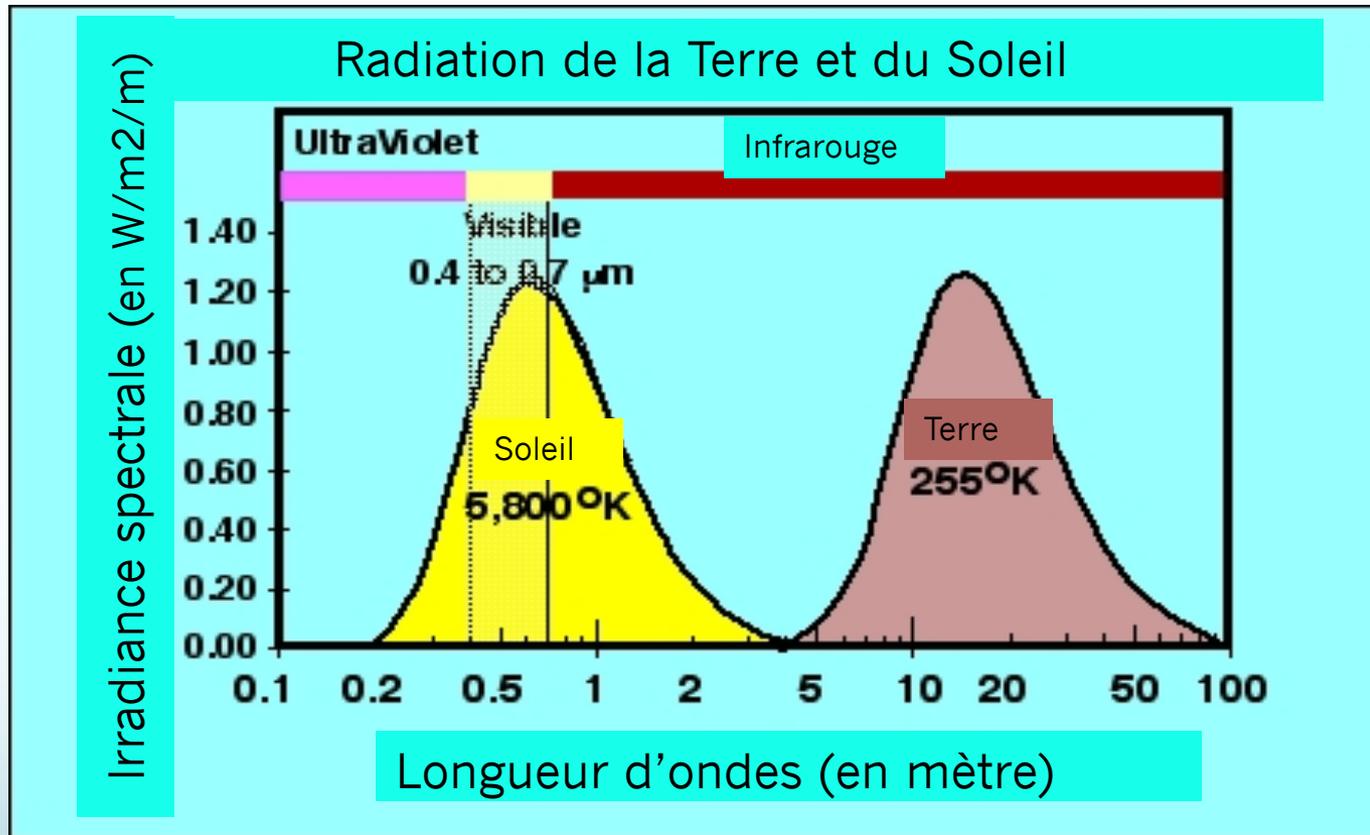
# Ondes et rayonnement électromagnétiques

Le rayonnement électromagnétique désigne une forme de transfert d'énergie linéaire par une particule ionisante via une onde électromagnétique



# Equilibre radiatif de la Terre

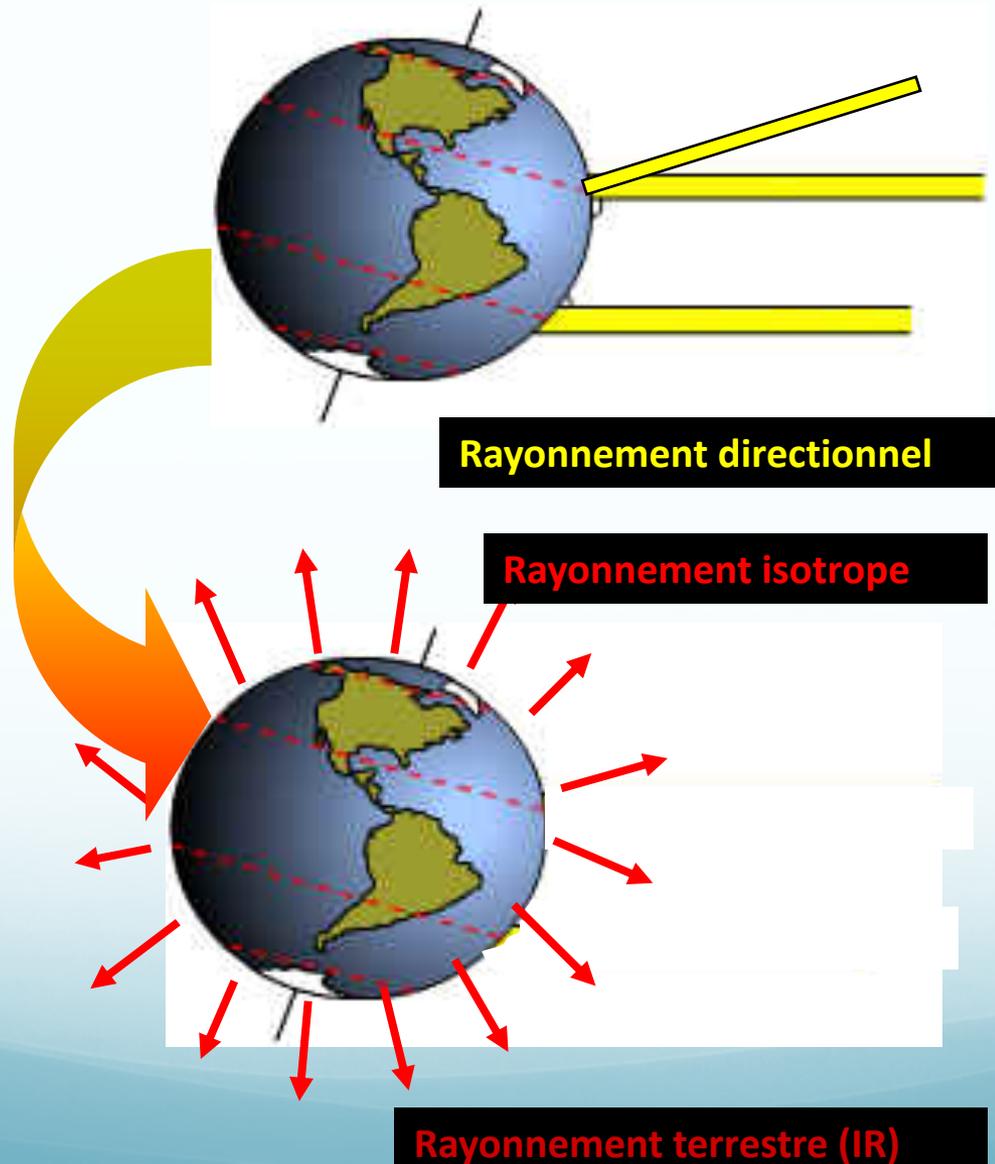
Loi de **Planck** stipule distribution de luminance énergétique spectrale du rayonnement thermique du corps noir est fonction de sa température



Loi de **Stefan-Boltzmann** stipule le flux d'énergie émit par un corps noir est lié à sa température à la puissance 4.

$$F = \sigma T^4$$

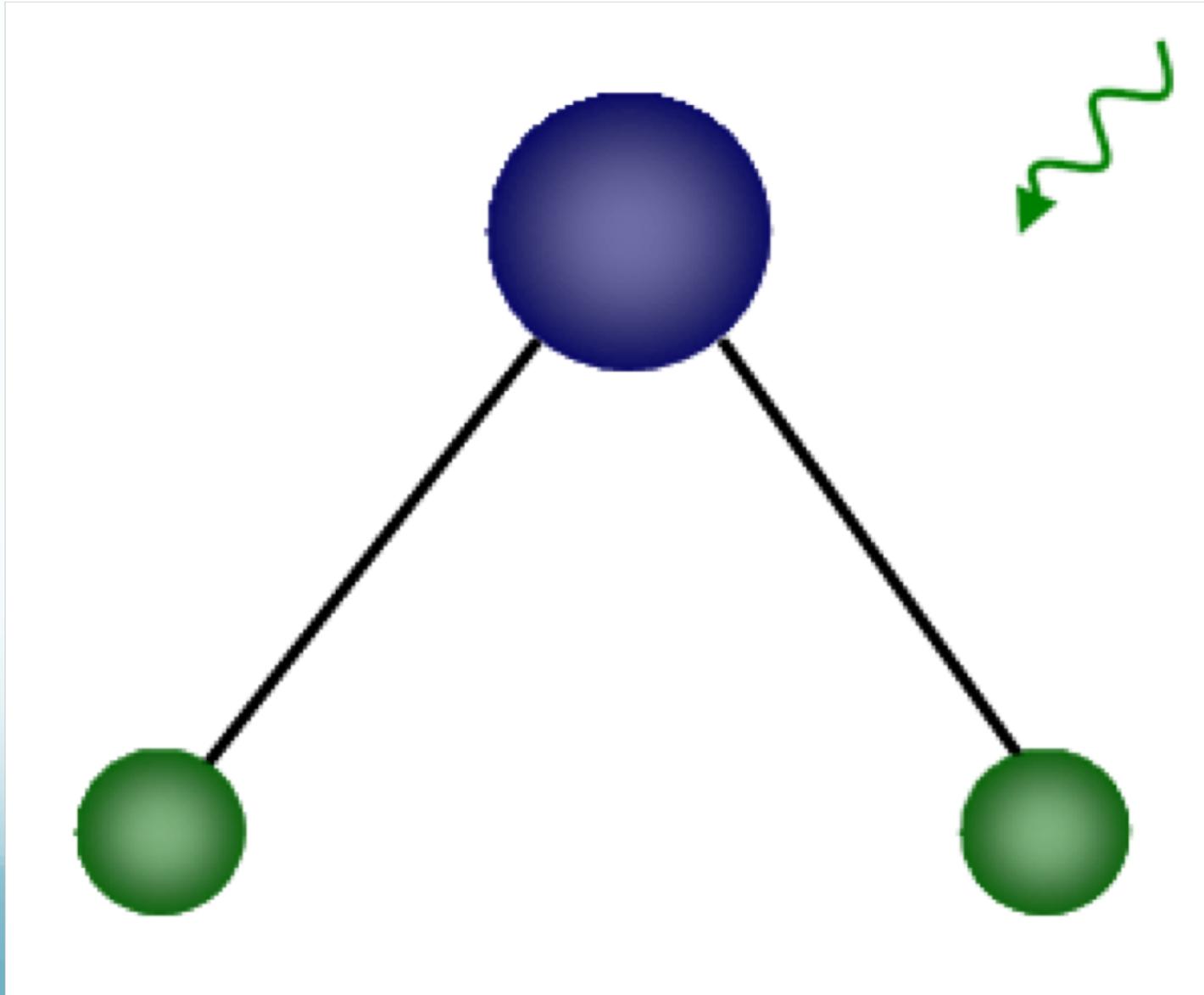
# Equilibre radiatif de la Terre



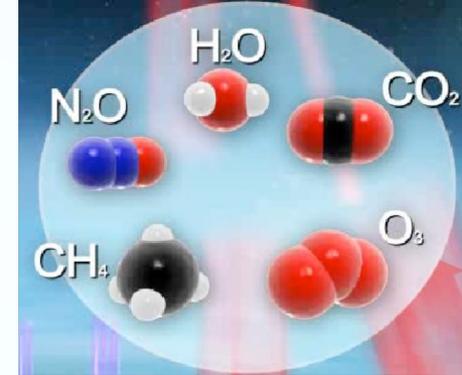
# Histoire de l'effet de serre

- **1780** : **Horace-Bénédict de Saussure** mesure les effets thermiques du rayonnement solaire
- **1824** : **Joseph Fourier** note que « la température du sol est augmentée par l'interposition de l'atmosphère, parce que la chaleur solaire trouve moins d'obstacles pour pénétrer l'air, étant à l'état de lumière, qu'elle n'en trouve pour repasser dans l'air lorsqu'elle est convertie en chaleur obscure »
- **1861** : **John Tyndall** identifie les principaux responsables de ce mécanisme : la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone.
- **1896** : **Svante August Arrhenius** propose la première estimation de l'impact du niveau de dioxyde de carbone sur les températures terrestres. Il estime qu'un doublement de la quantité de dioxyde de carbone devrait augmenter de 4° la température moyenne

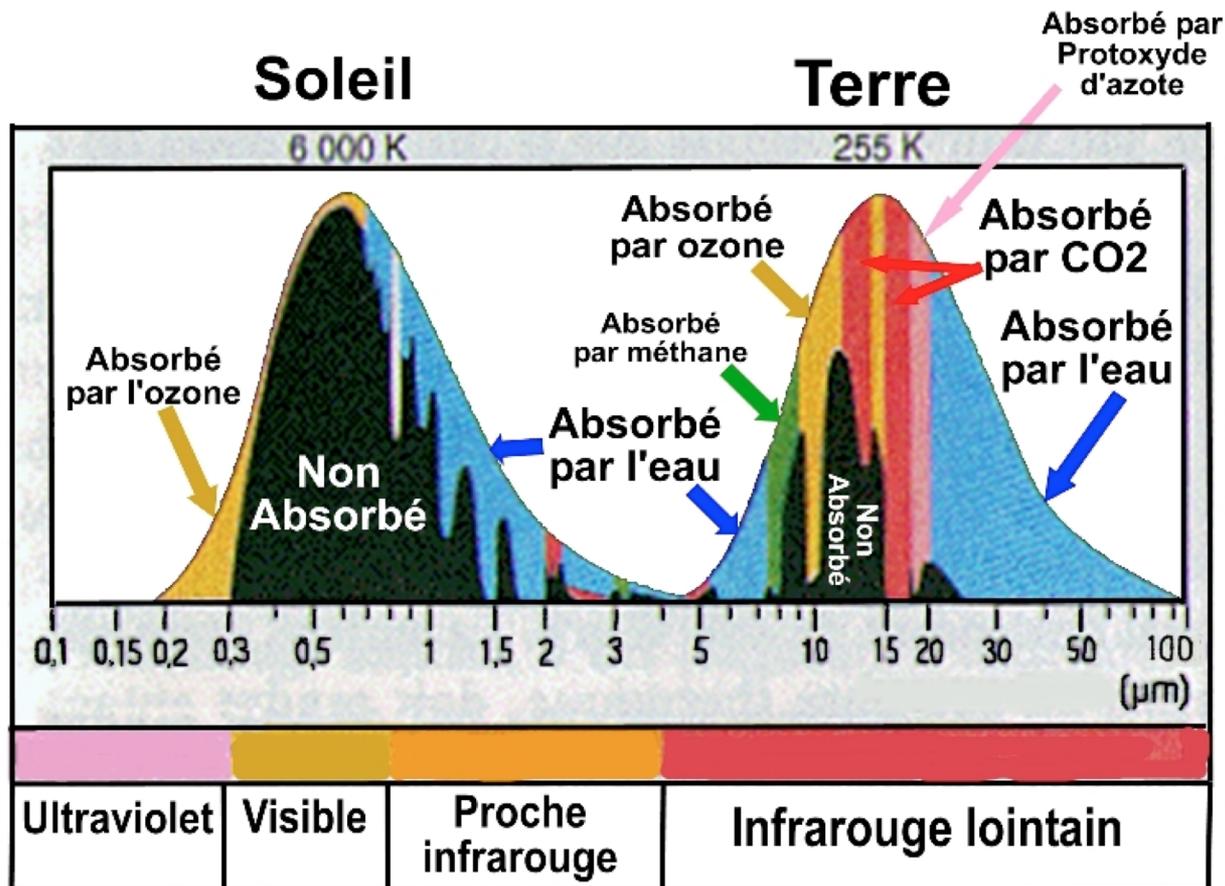
# Principe de l'effet de serre



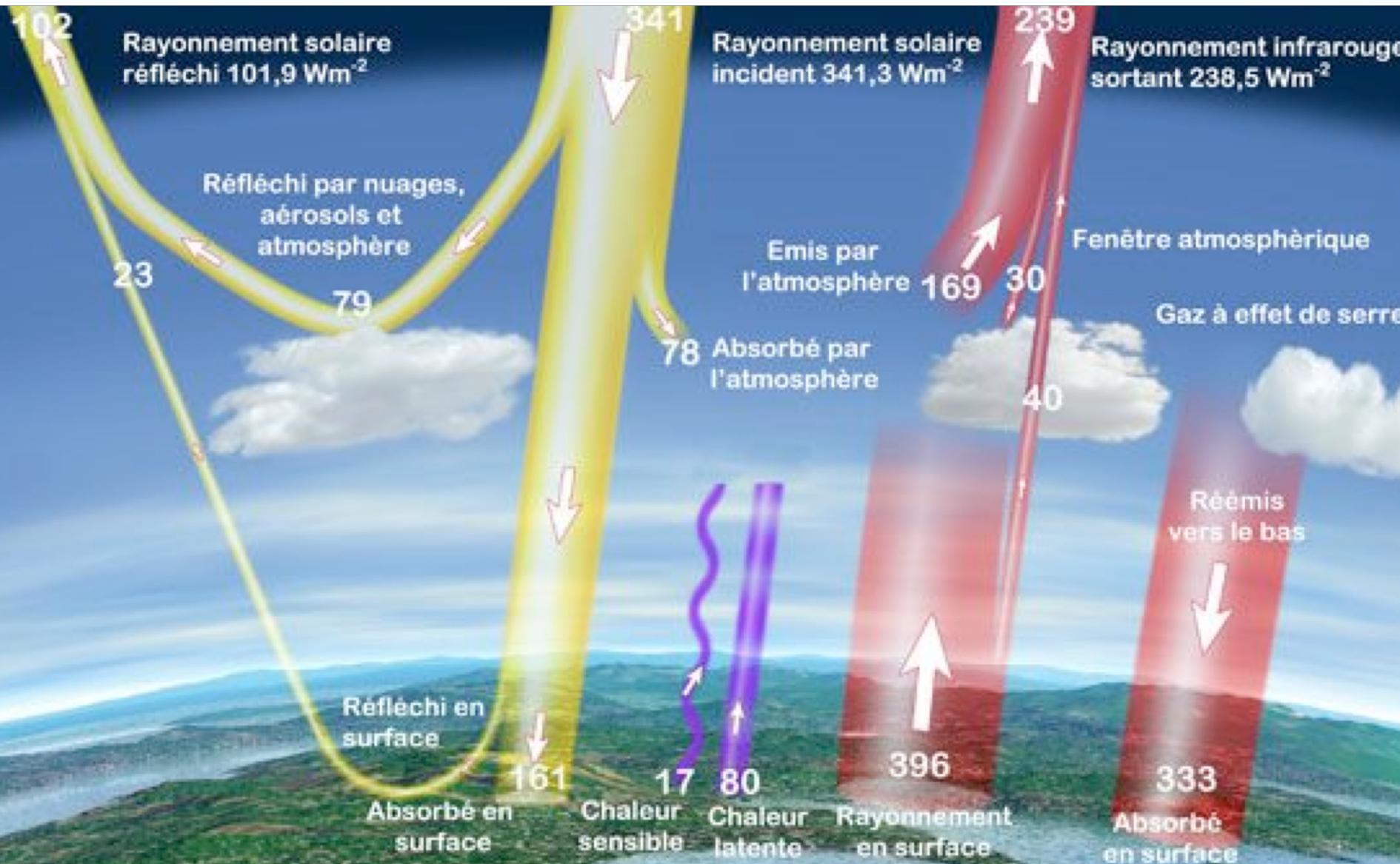
# Gaz à effet de serre



## Spectre d'absorption du rayonnement thermique

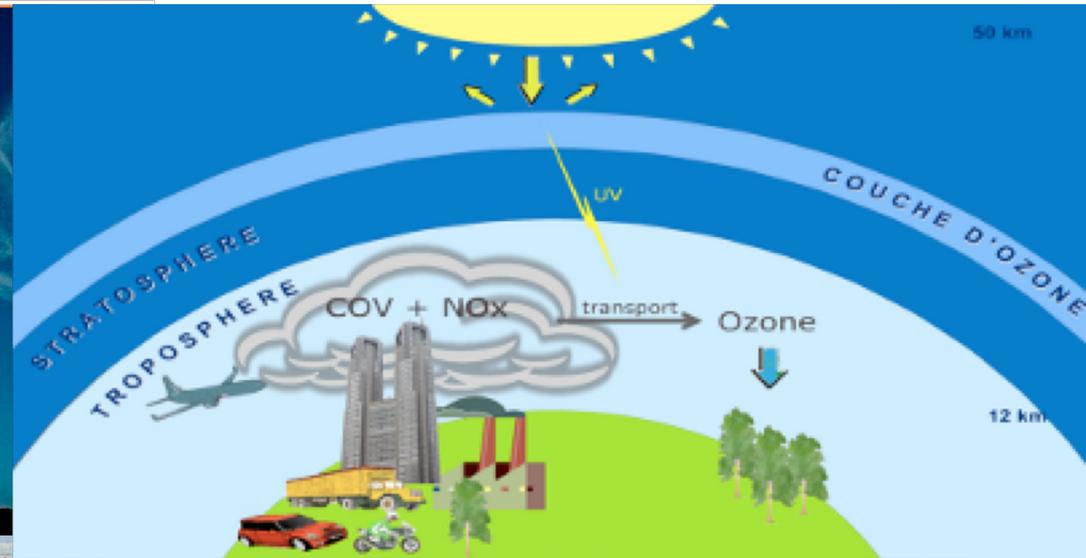


# Bilan radiatif "réel"

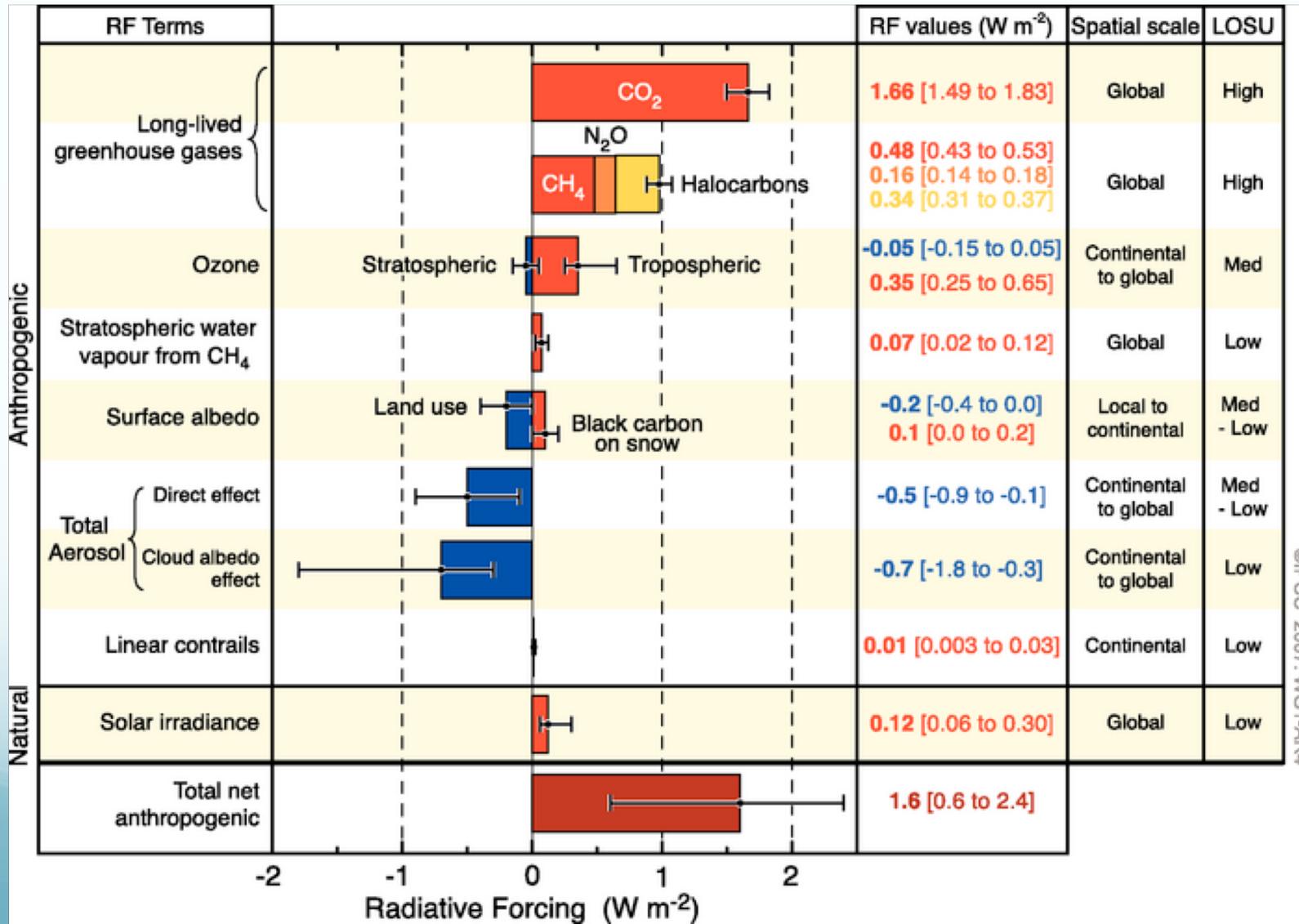


# Différents forçages climatiques

Volcans,  
aerosols,



# Changement de forçage externe (100 dernières années)

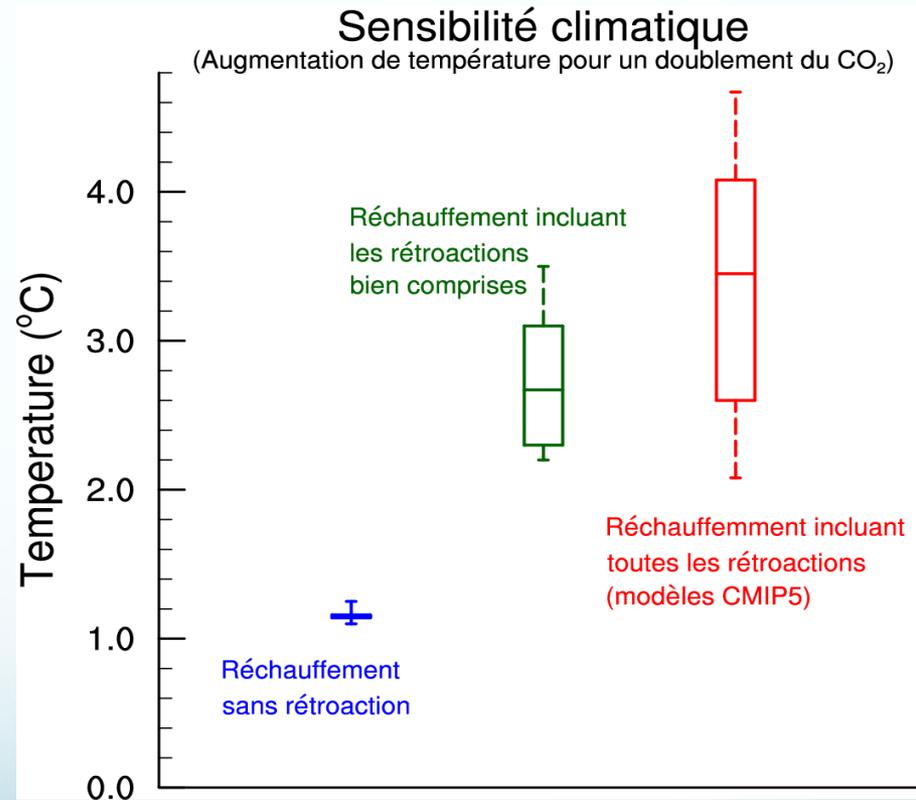


Application TD :

Modèle simple de climat !

# Notion de sensibilité climatique

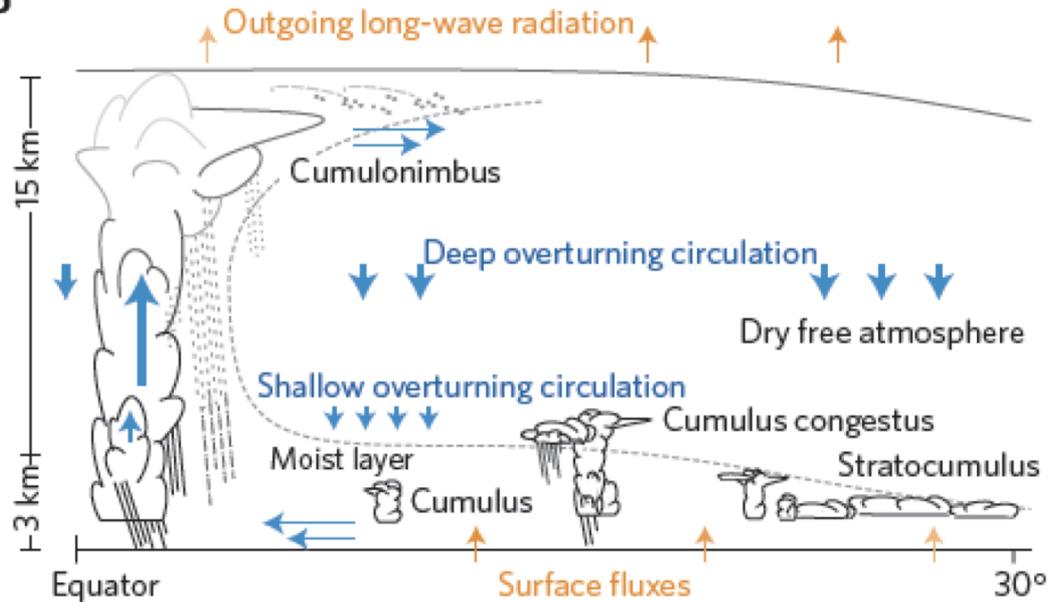
- Augmentation de température pour un doublement de  $\text{CO}_2$  (de 280 à 560 ppm par ex.)
- Evaluation des rétroactions robustes :
  - Albedo
  - Vapeur d'eau
  - Nuages



a



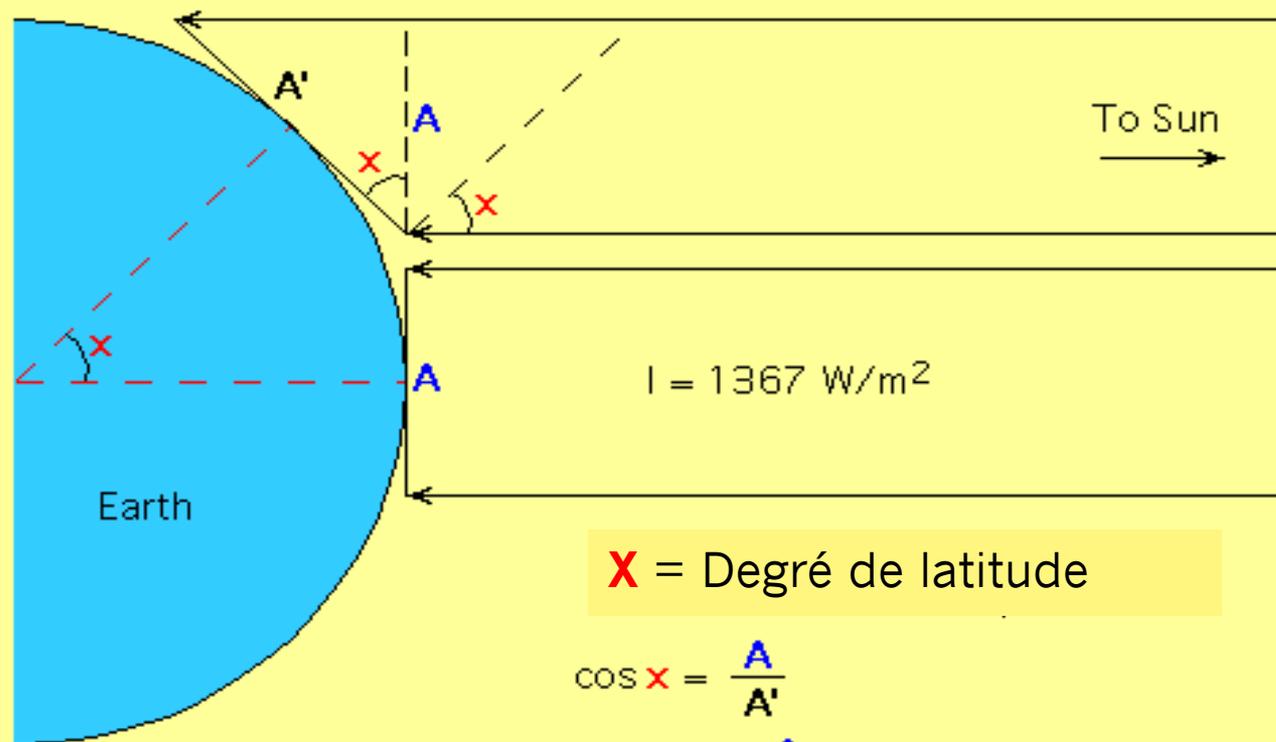
b



Bony 2016

# Pour sortir de l'approche à une dimension !

l'insolation décroît quand l'angle d'incidence augmente

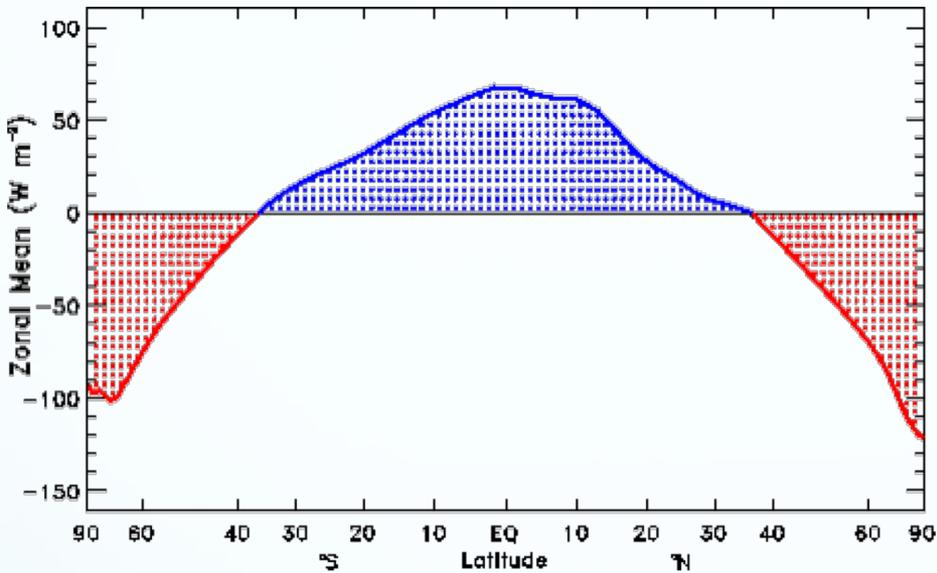


$x$  = Degré de latitude

$$\cos x = \frac{A}{A'}$$

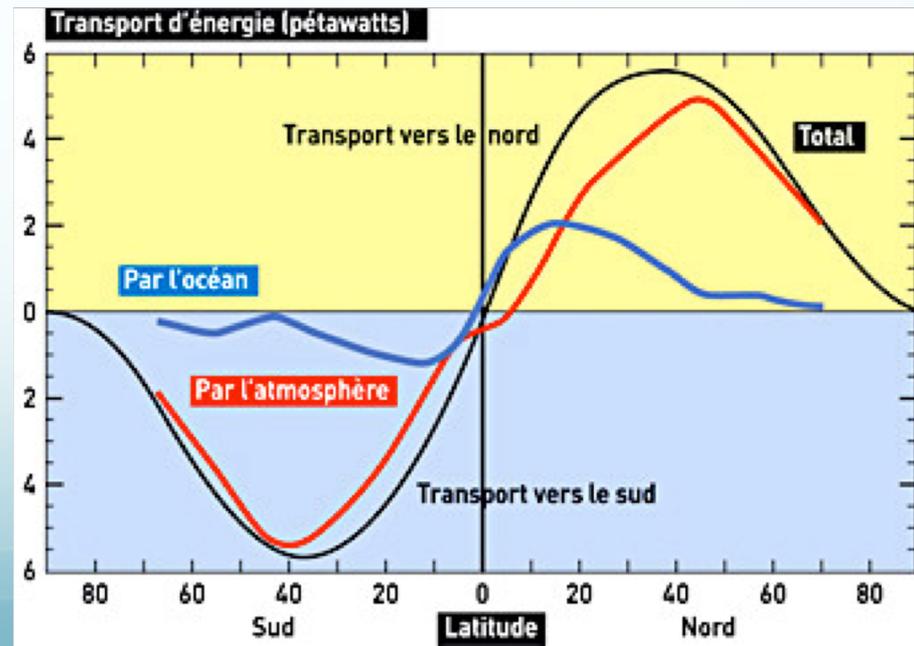
$$A' = \frac{A}{\cos x}$$

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



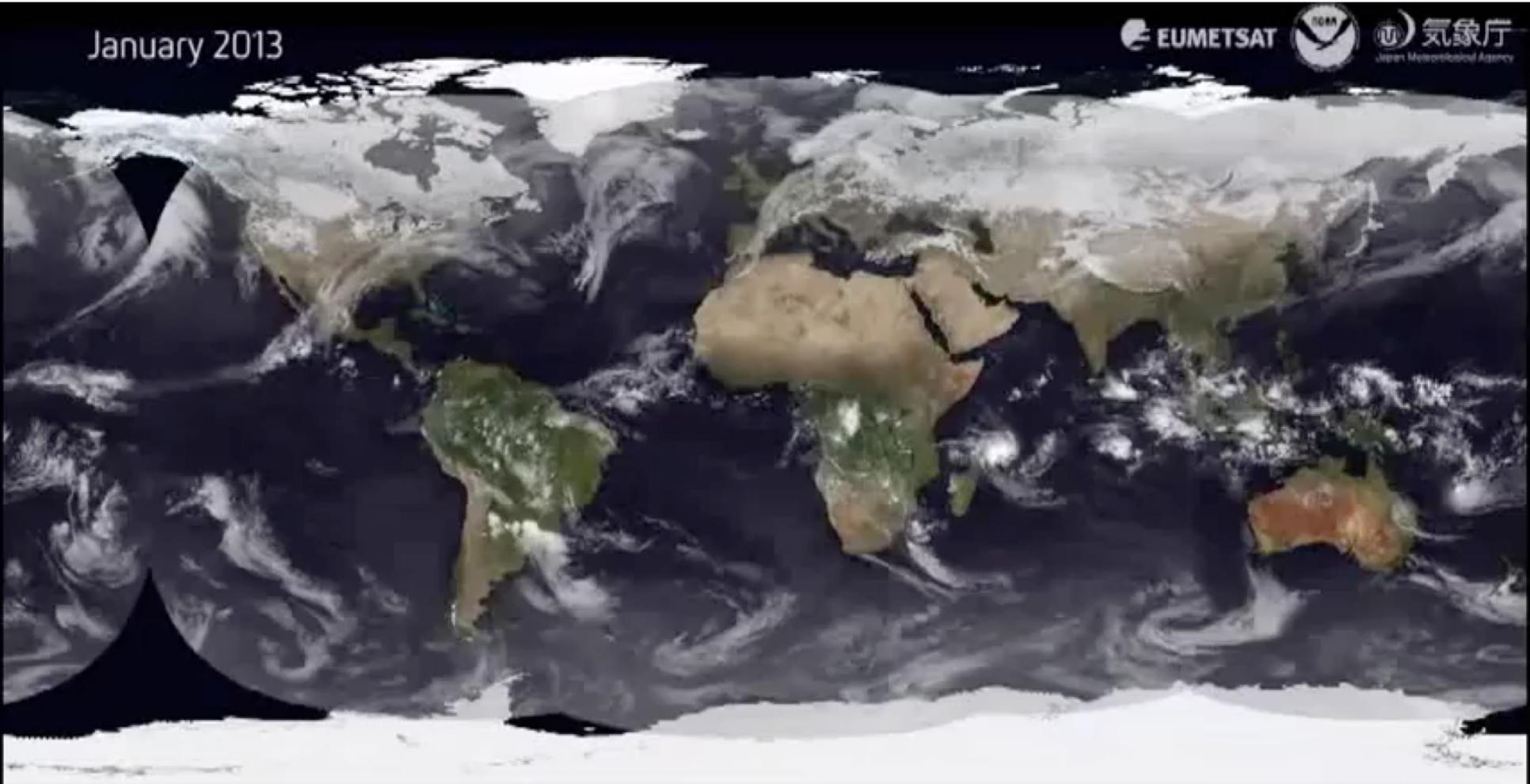
Transport vers le Nord par l'atmosphère et par l'océan (PW)

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

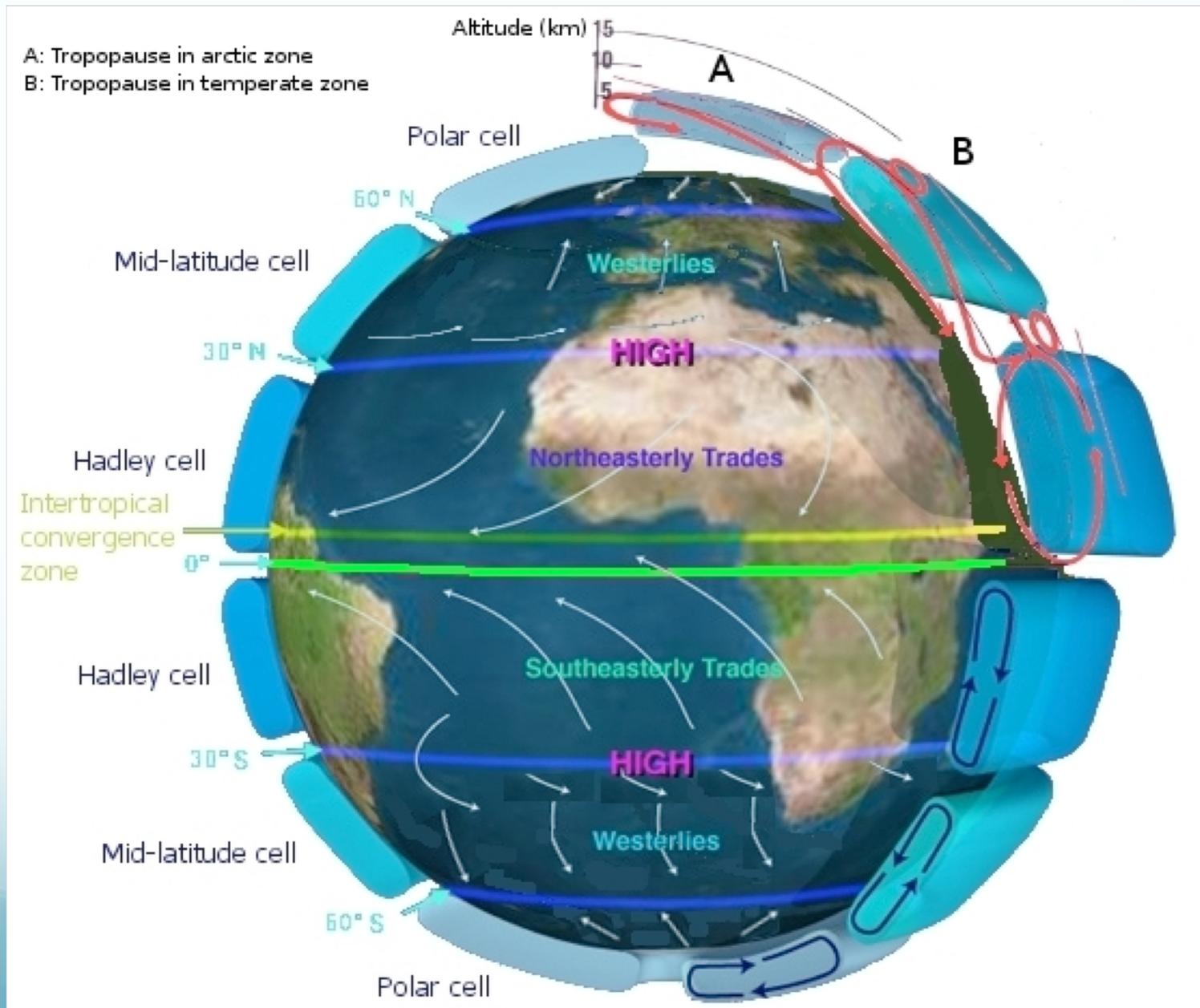


# Circulation atmosphérique

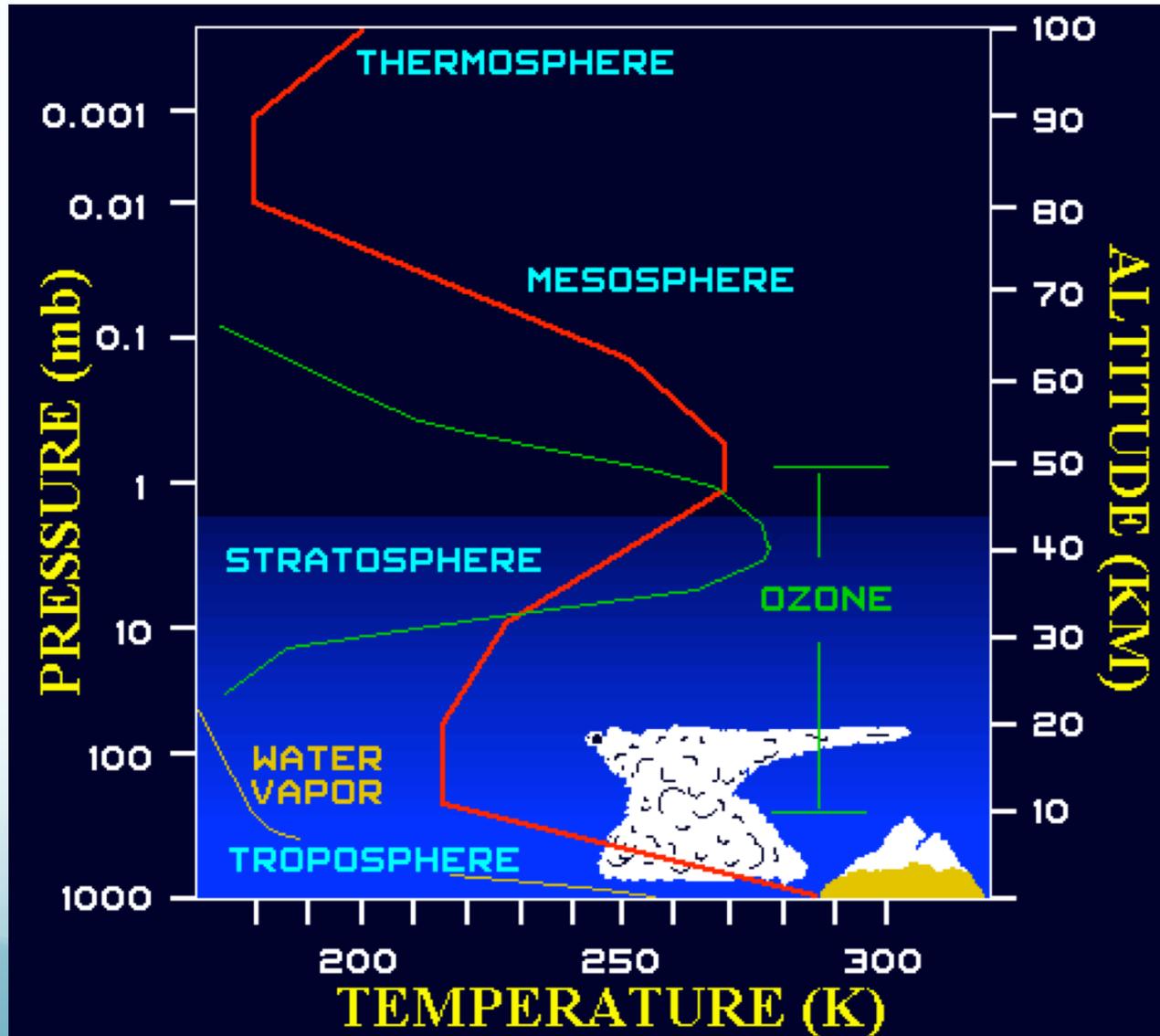
January 2013



# Circulation atmosphérique



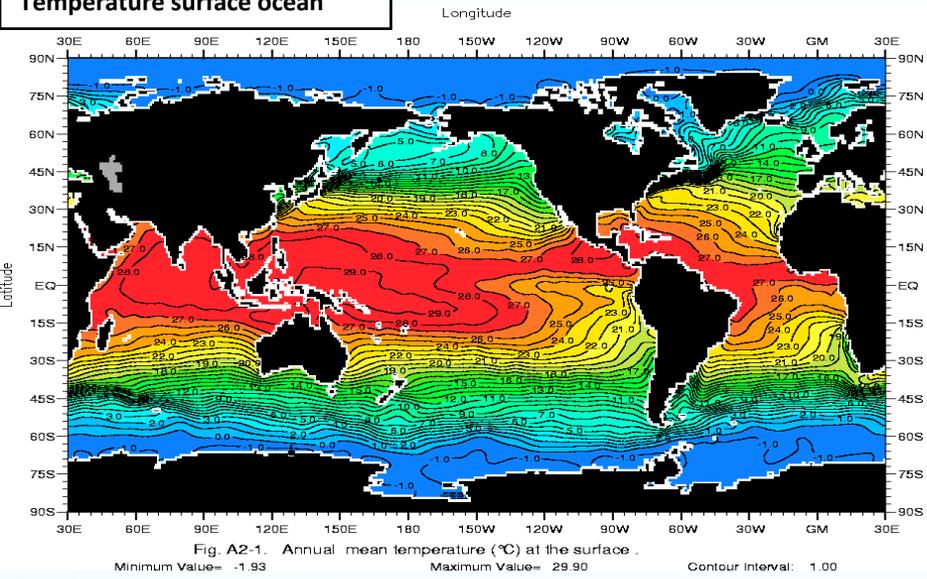
# Organisation verticale de l'atmosphère



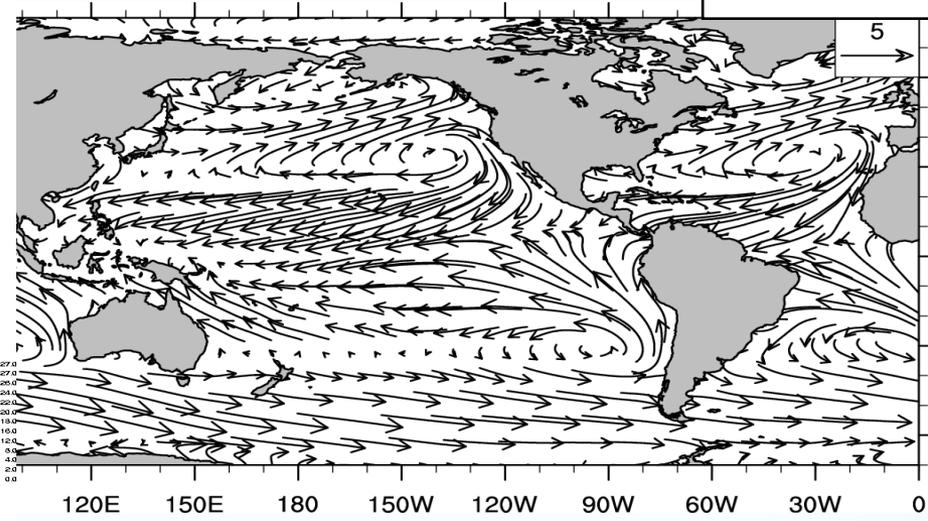
# Circulation océanique

# Circulation océanique

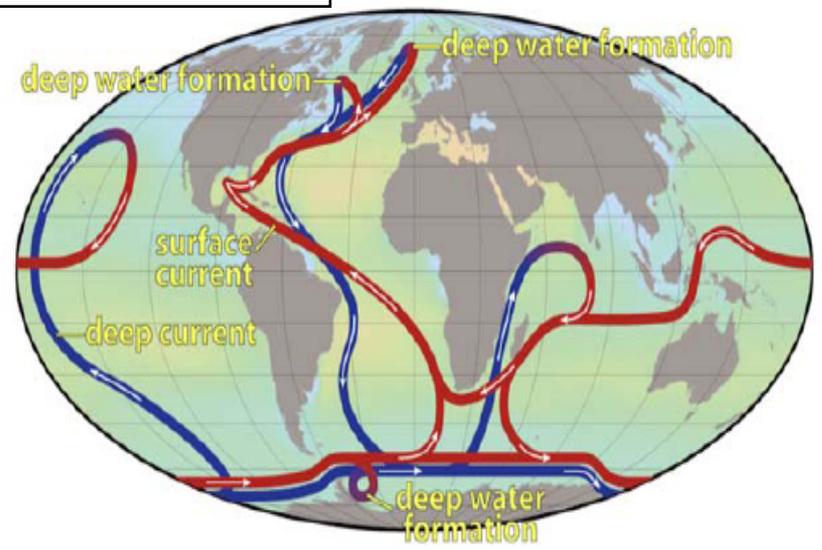
Température surface océan



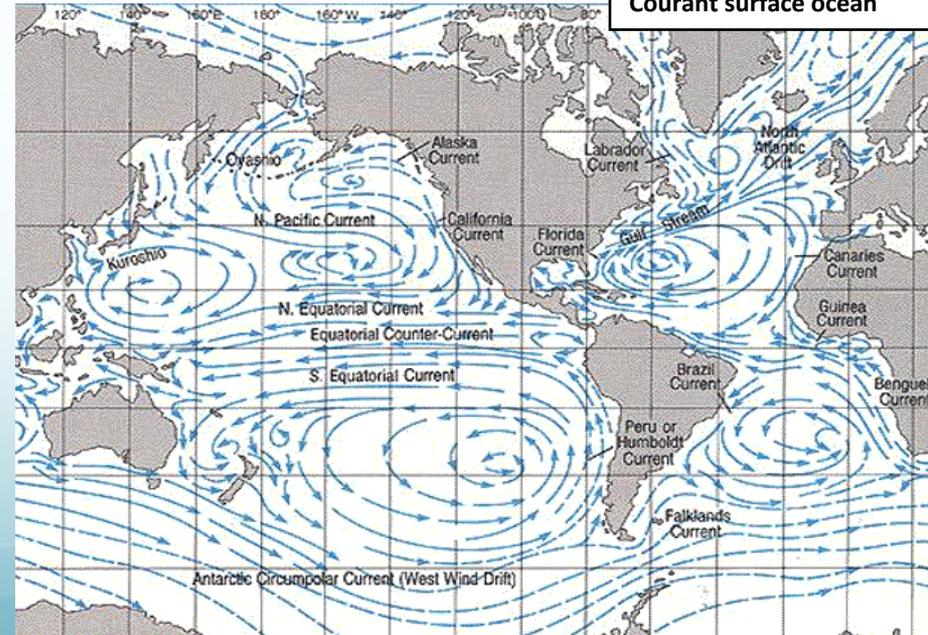
Vent de surface



Circulation thermohaline

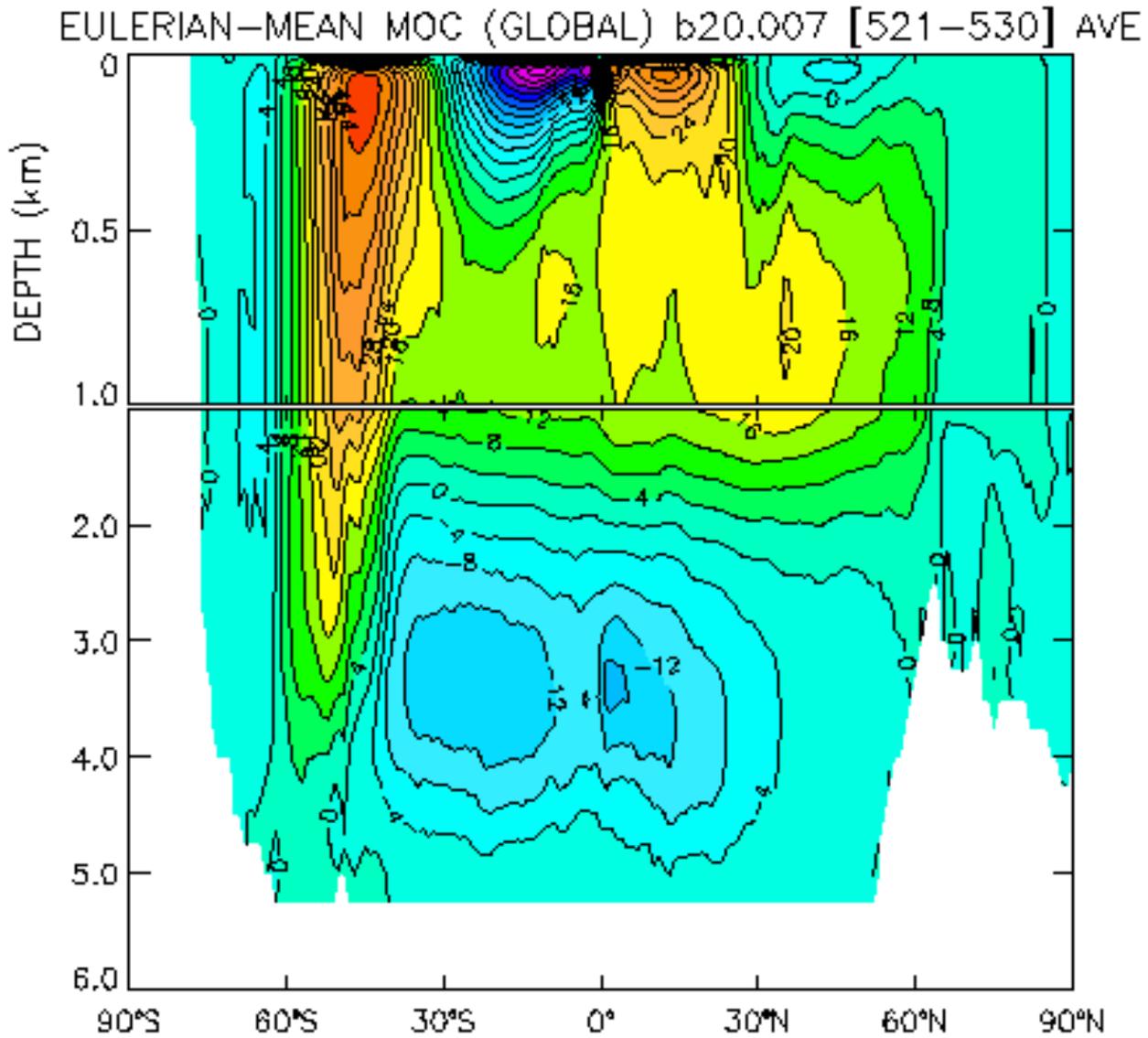


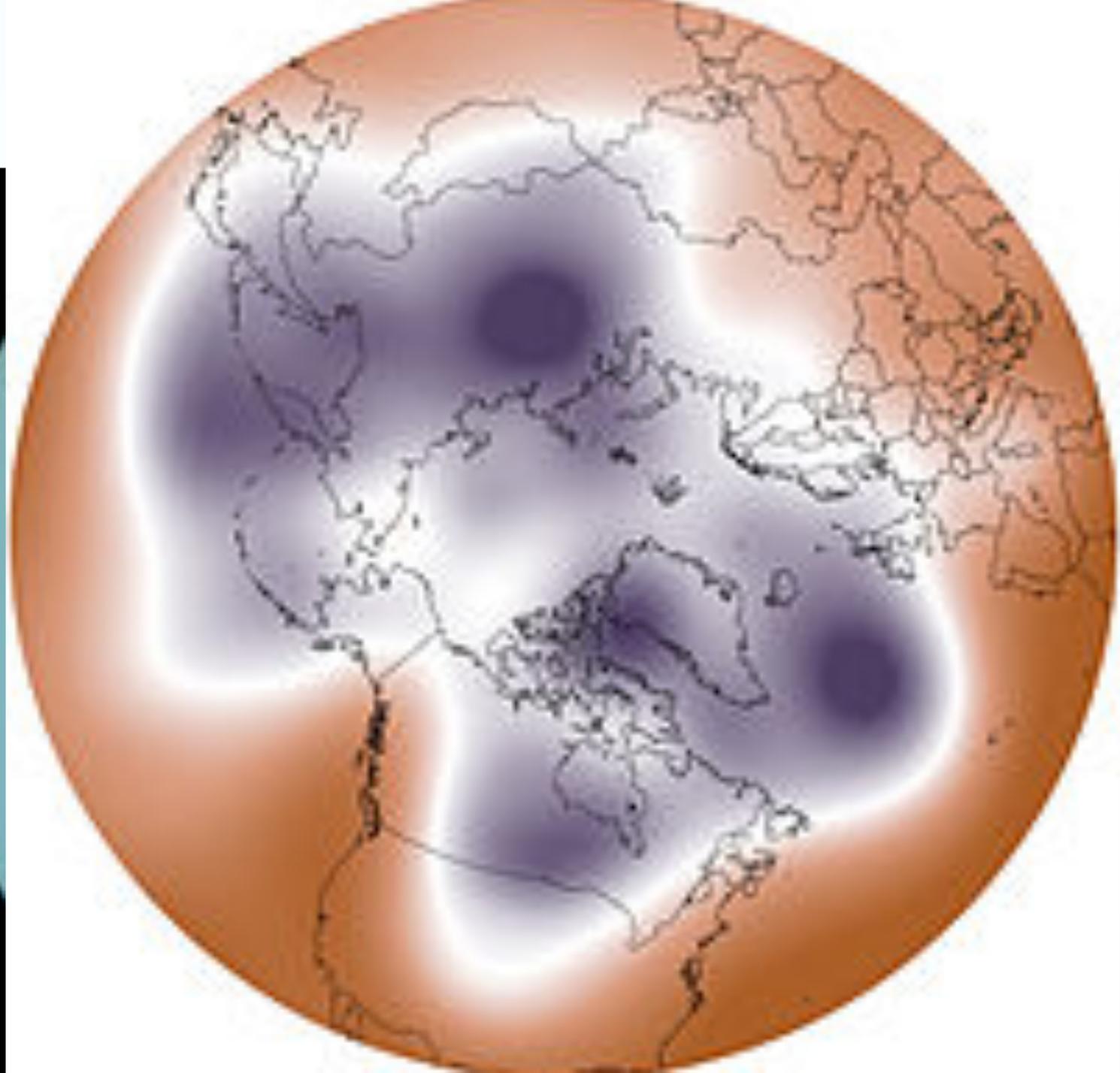
Courant surface océan



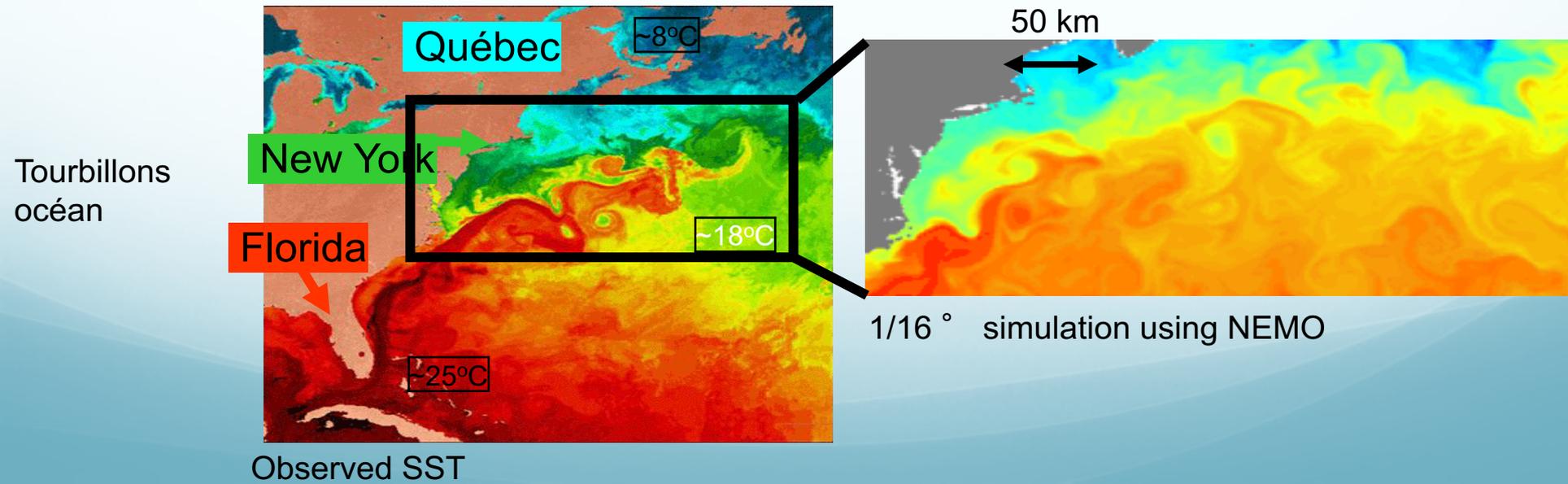
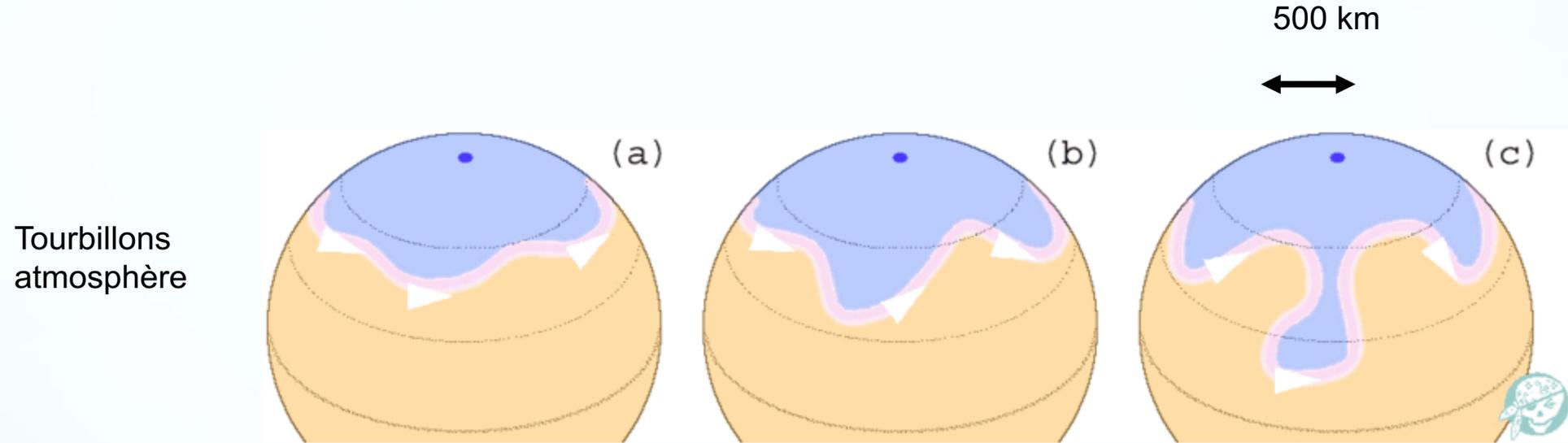
# Circulation océanique méridienne

Température surface océan

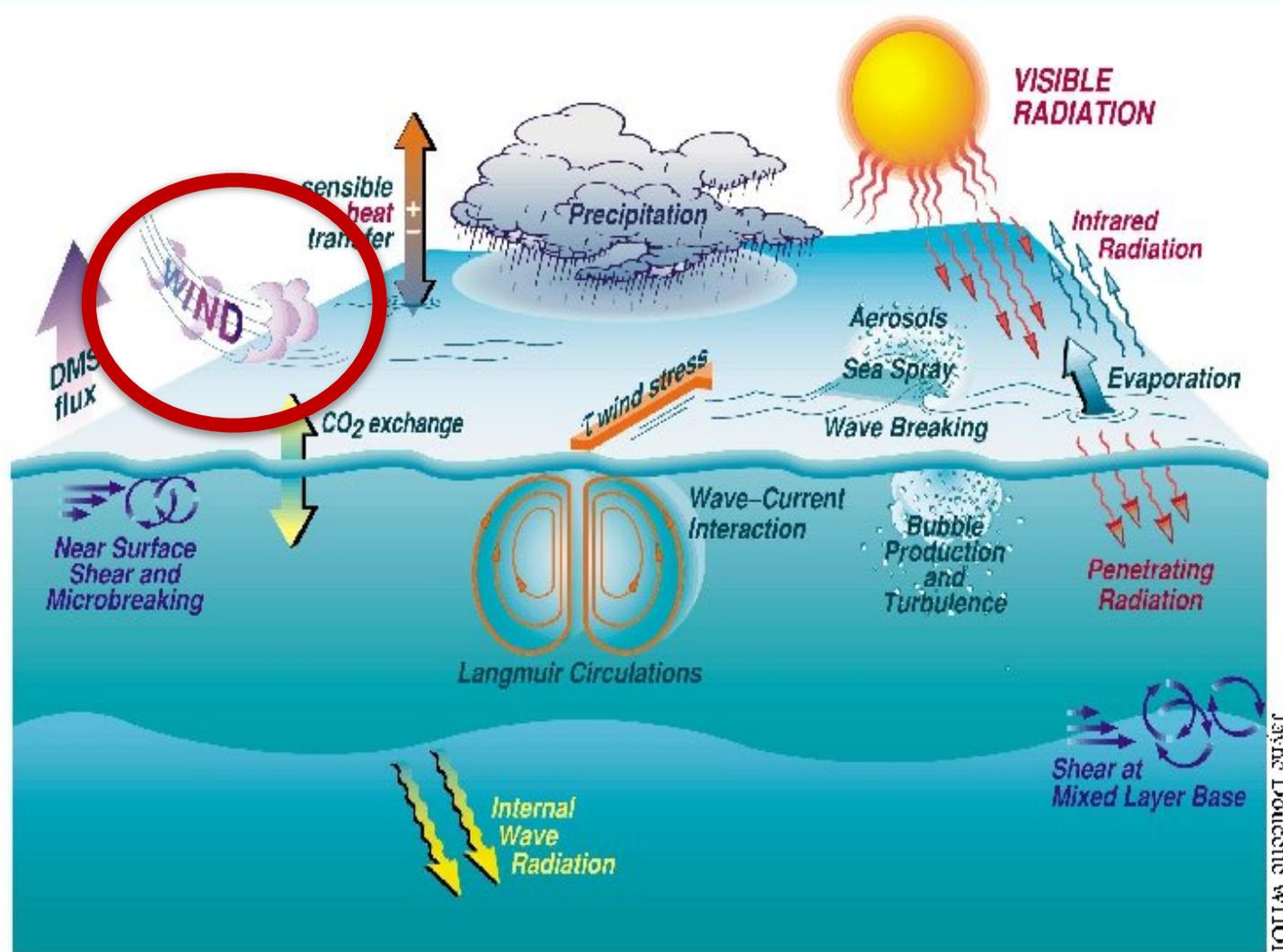




# Différentes tailles d'instabilités baroclines

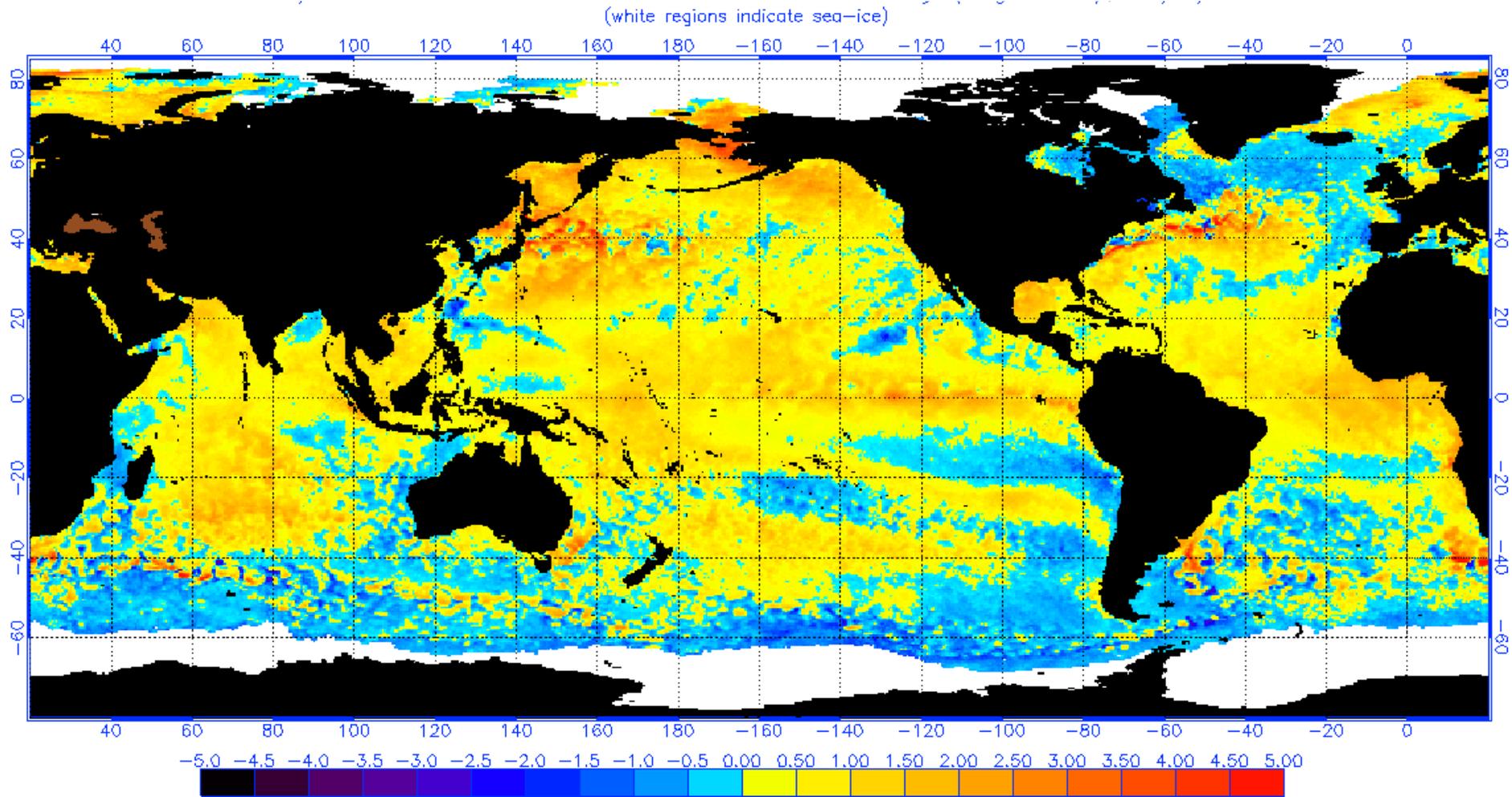


# Interactions océan-atmosphère



# La température de surface du mois d'Octobre dernier

Anomalies de température pour Octobre 2018 par rapport à la moyenne de tous les mois d'Octobre 1981 - 2010



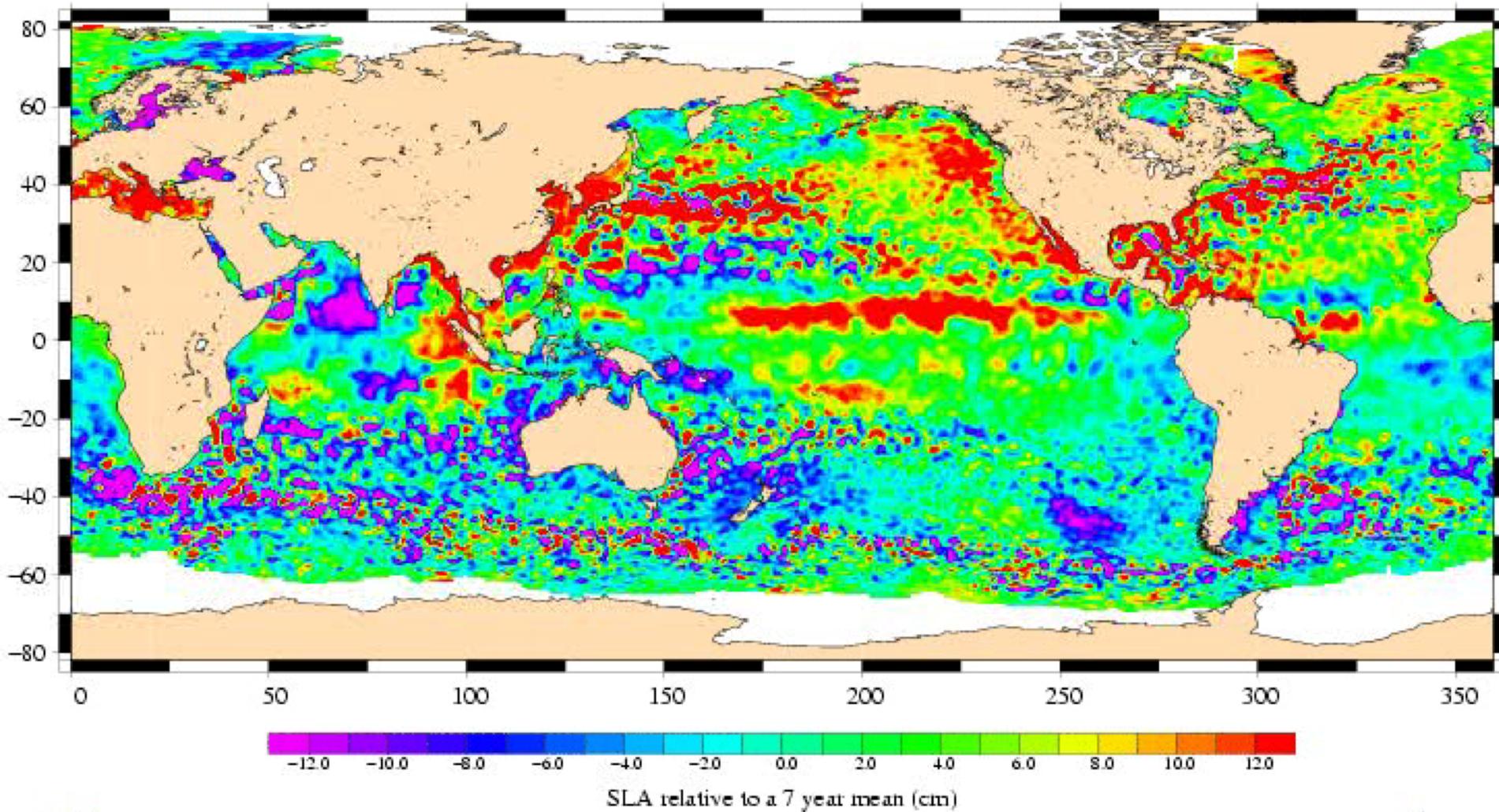
# Quelques grands modes de variabilité climatique

- Oscillation El Nino : ENSO
- Oscillation Nord Atlantique : NAO
- Variabilité multi-décennale atlantique : AMV
- Oscillation décennale Pacifique : PDO

# Quelques grands modes de variabilité climatique

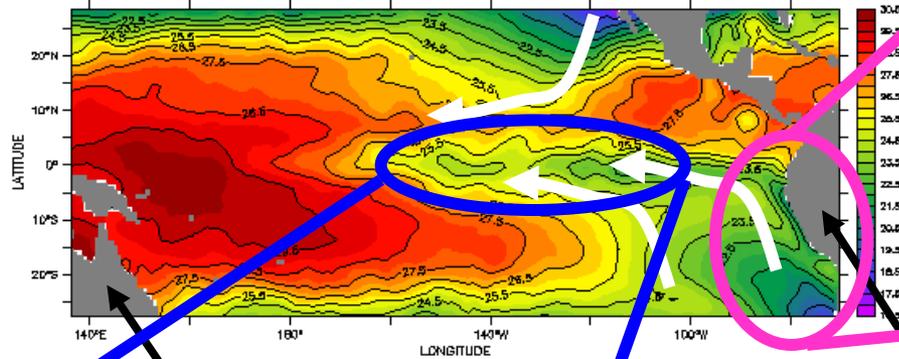
- Oscillation El Nino : ENSO
- Oscillation Nord Atlantique : NAO
- Variabilité multi-décennale atlantique : AMV
- Oscillation décennale Pacifique : PDO

1992/10/14



# Conditions normales dans le Pacifique

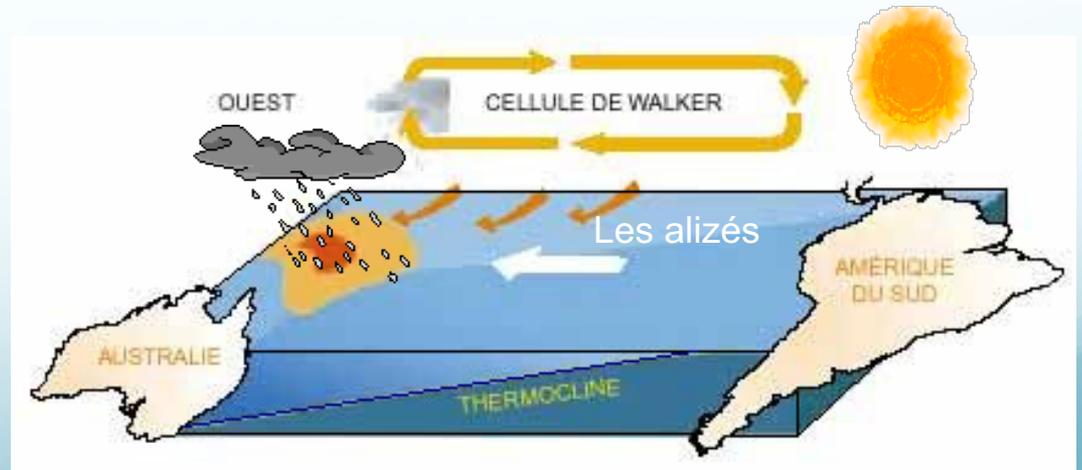
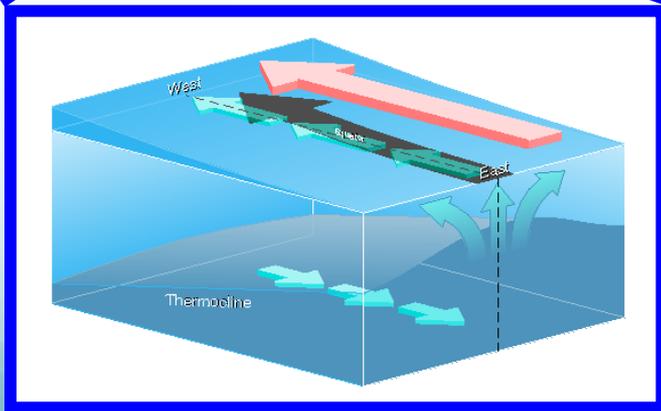
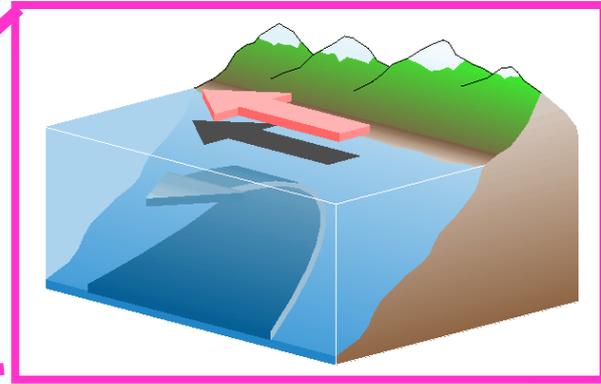
## Température de surface



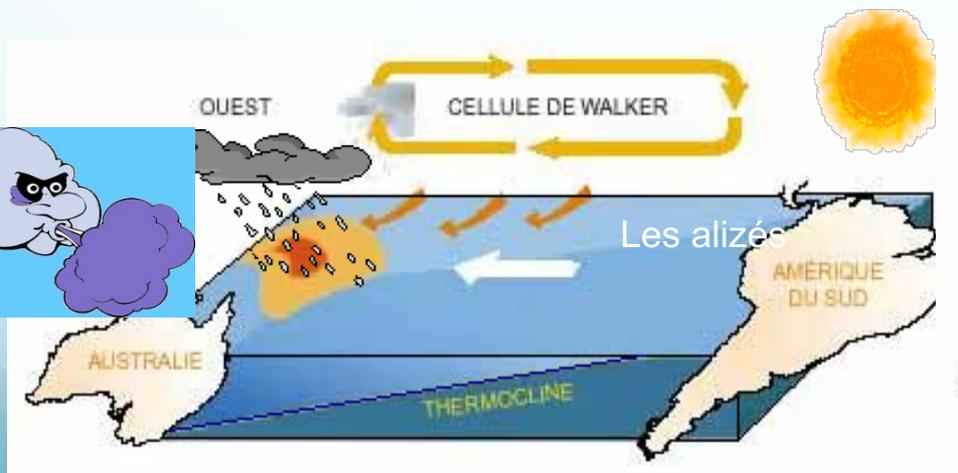
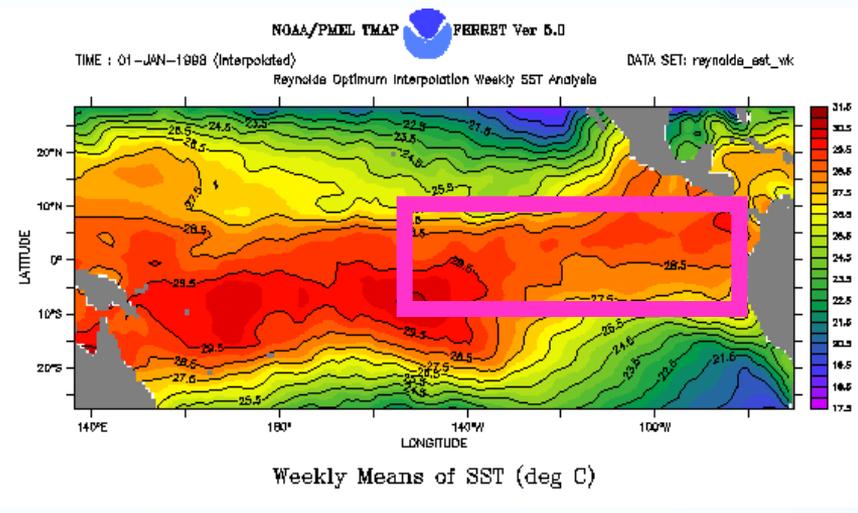
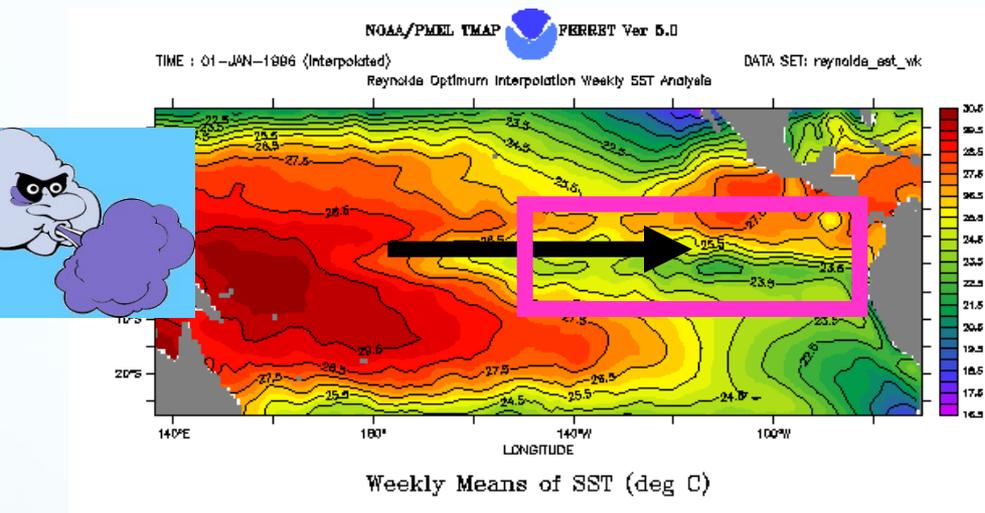
Weekly Means of SST (deg C)

**Australie**

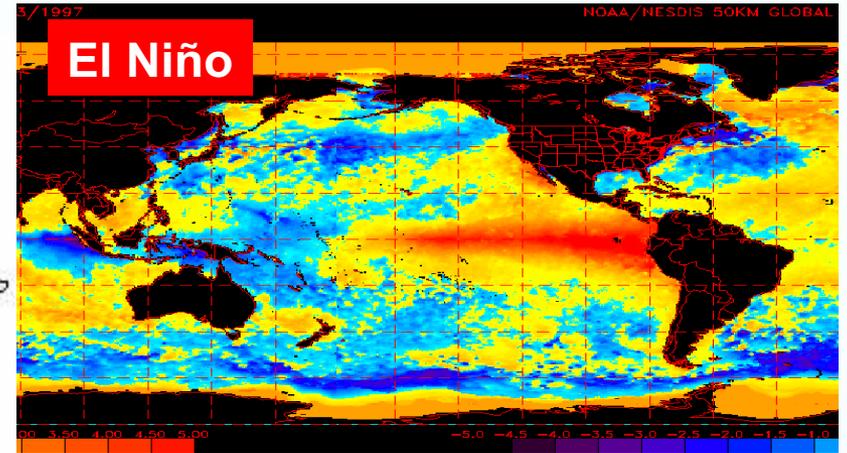
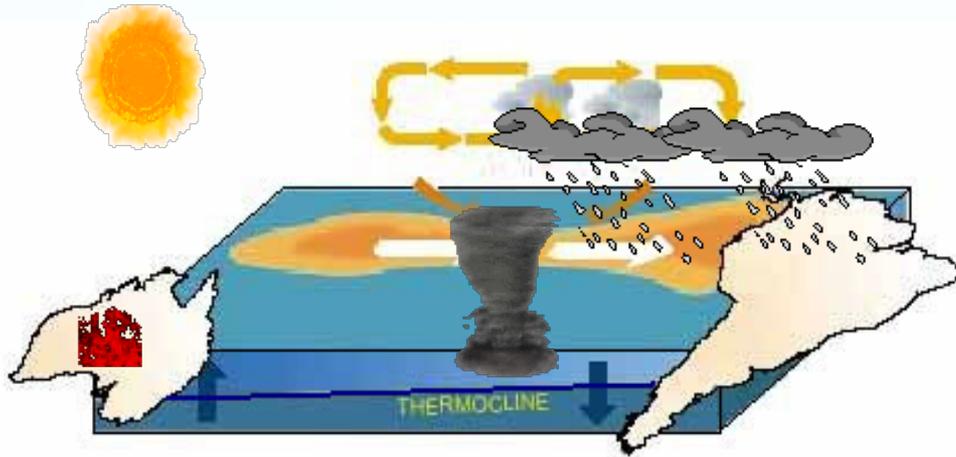
**Amérique du Sud**



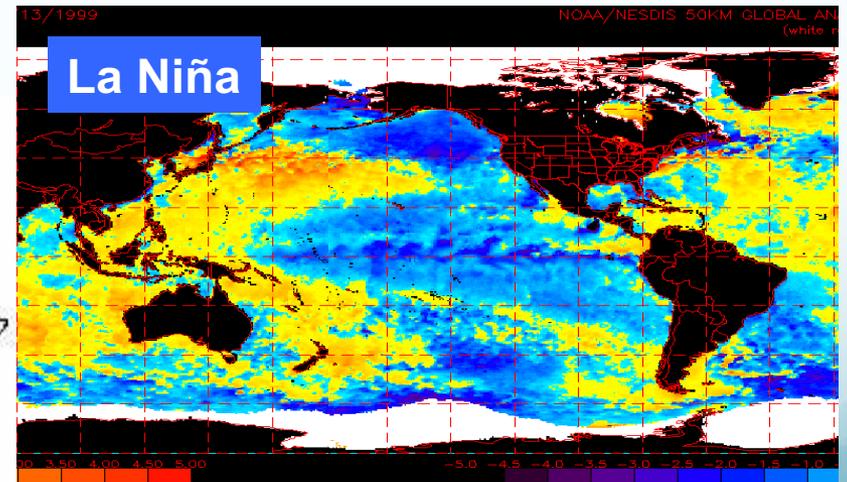
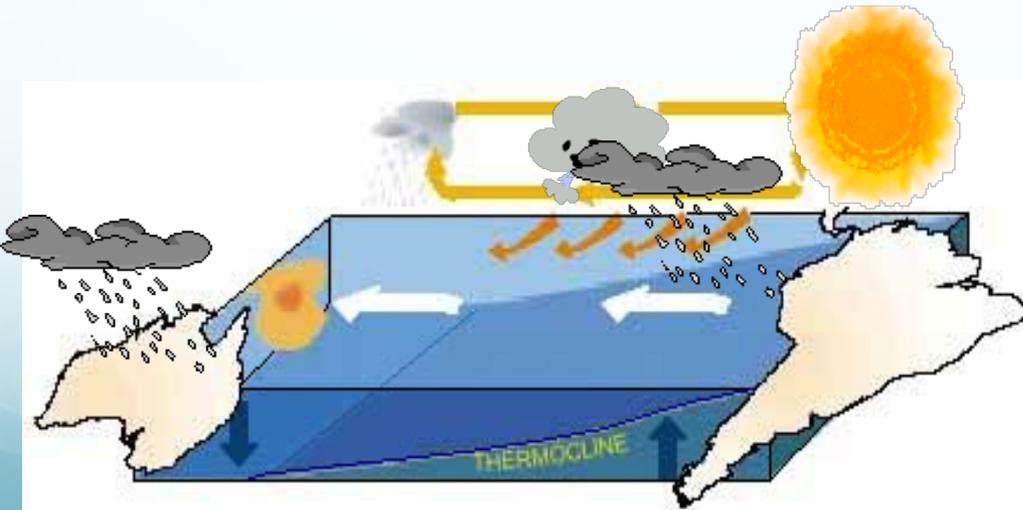
# El Niño : Une oscillation couplée océan-atmosphère dans le Pacifique



# La petite sœur : La Niña

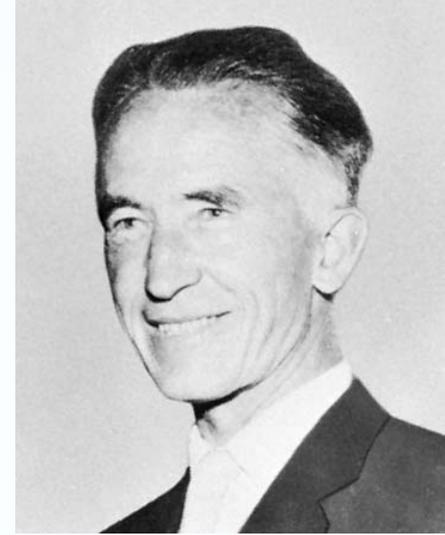


Anomalies de température du 13 Nov. 1997

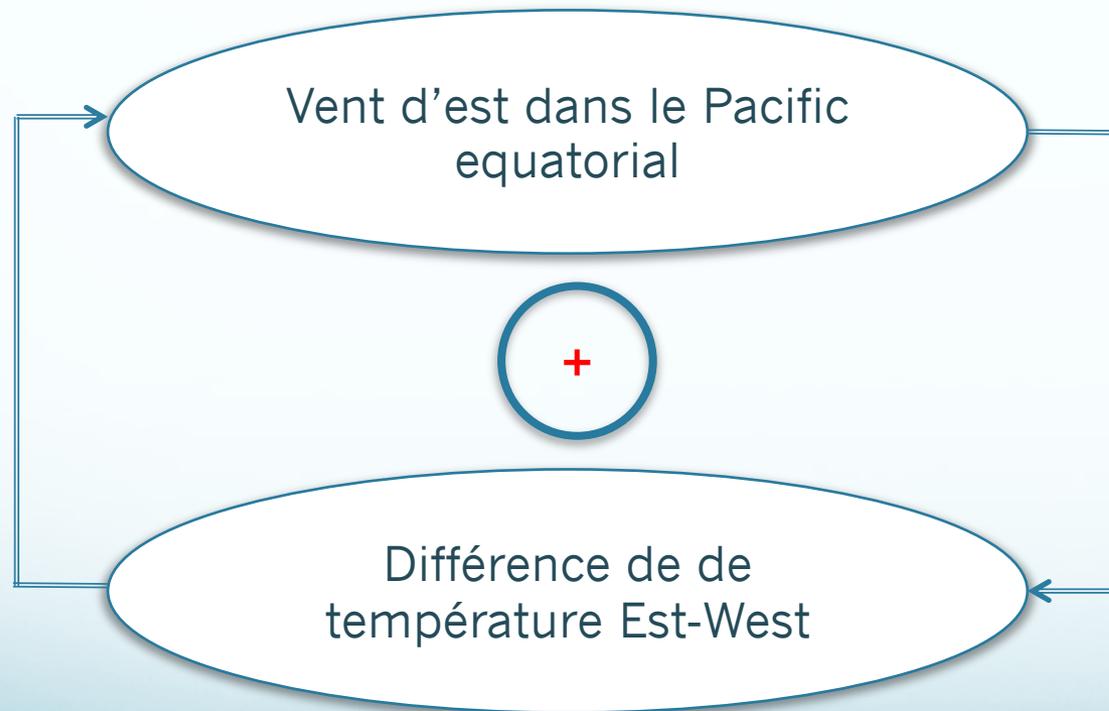


Anomalies de température du 11 Nov. 1998

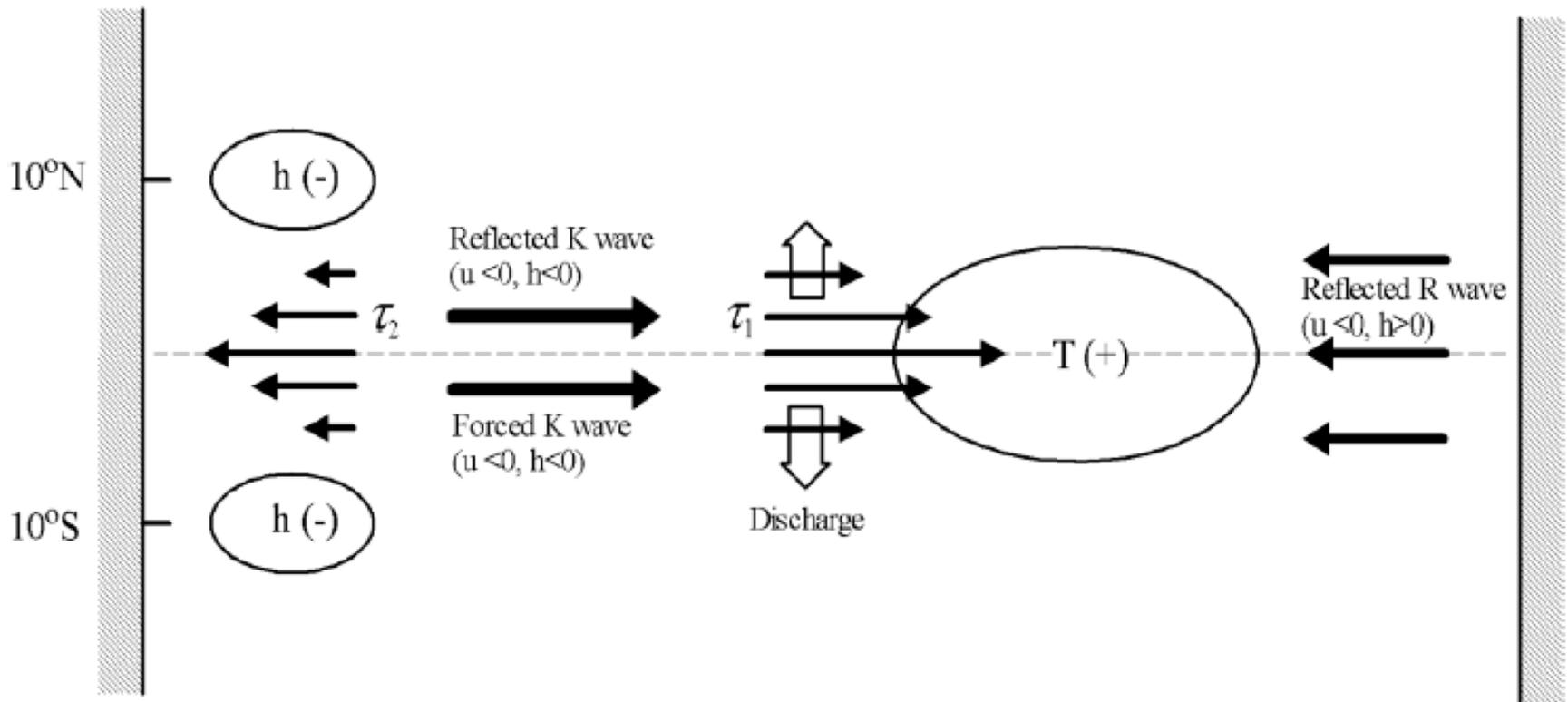
# Rétroaction positive de Bjercknes



Jacob Bjerknes (1897-1975)



## The Unified Oscillator for ENSO



**Figure 1.** Schematic diagram of the unified oscillator for ENSO. Bjerknes positive ocean-atmosphere feedback leads the equatorial central/eastern Pacific to a warm state (El Niño). Four negative feedbacks, required to turn the warm state around, are (1) reflected Kelvin wave at the ocean western boundary, (2) discharge process due to Sverdrup transport, (3) western Pacific wind-forced Kelvin wave, and (4) reflected Rossby wave at the ocean eastern boundary. These negative feedbacks correspond to the delayed oscillator, the recharge oscillator, the western Pacific oscillator, and the advective-reflective oscillator. The unified oscillator suggests that all of the four negative feedbacks may work together in terminating El Niño warming. The four ENSO oscillators are special cases of the unified oscillator.

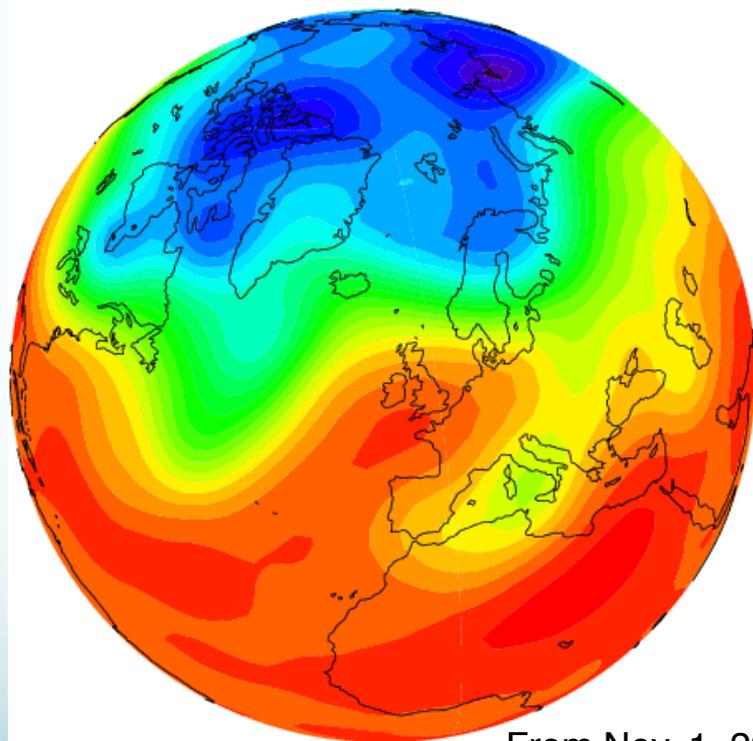
# Quelques grands modes de variabilité climatique

- Oscillation El Nino : ENSO
- Oscillation Nord Atlantique : NAO
- Variabilité multi-décennale atlantique : AMV
- Oscillation décennale Pacifique : PDO

# Variations de pression en Atlantique

Geopotentiel à 500 millibars

20071101



From Nov. 1, 2007 to Mar. 31, 2008

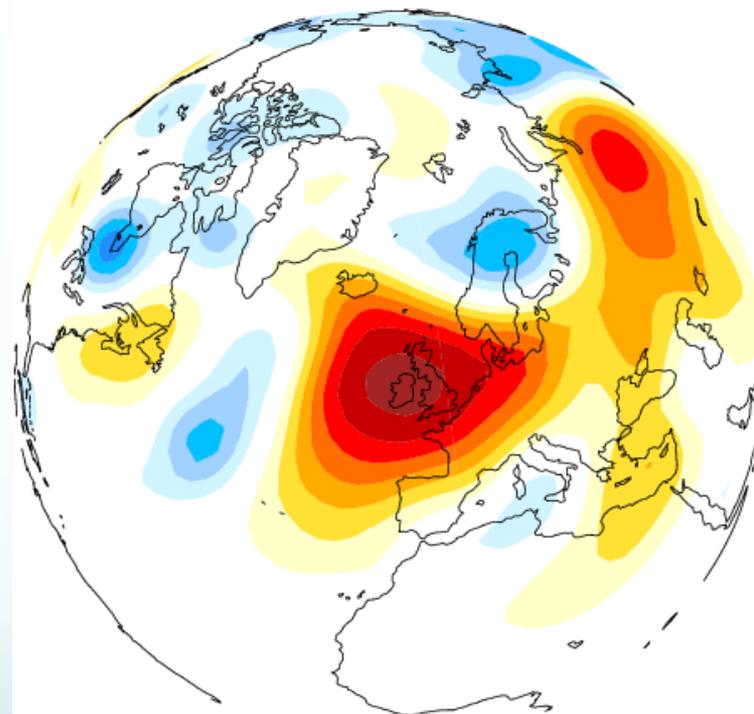
Meter



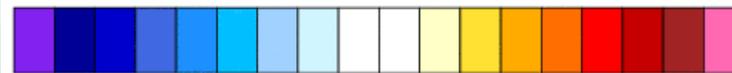
4850 4970 5090 5210 5330 5450 5570 5690 5810 5930

Anomalies de Geopotentiel

20071101

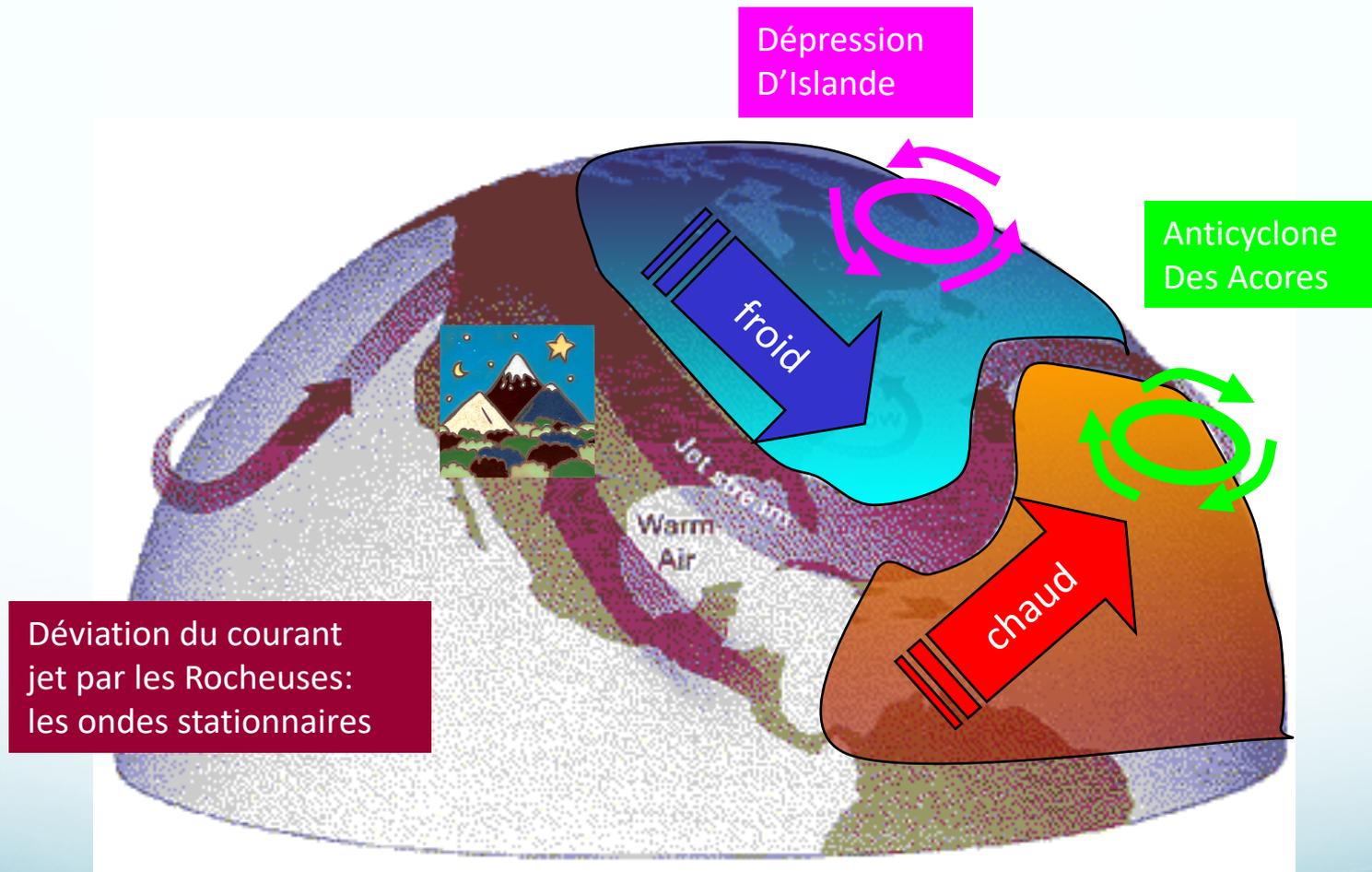


Meter



-320 -240 -160 -80 0 80 160 240 320

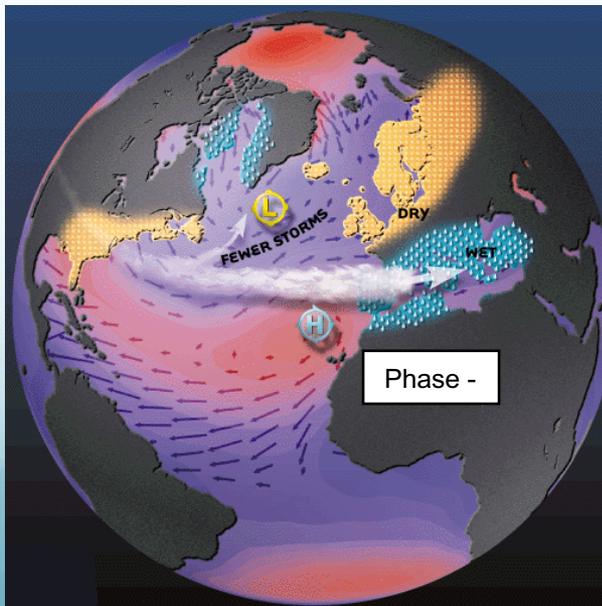
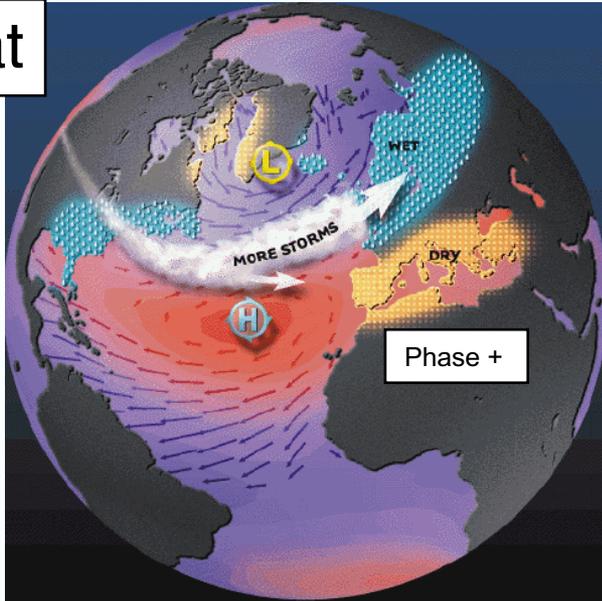
# Les ondes stationnaires



Les ondes stationnaires associées à la présence de massifs montagneux expliquent en grande partie l'asymétrie zonale entre les bords Ouest et Est du bassin Atlantique.

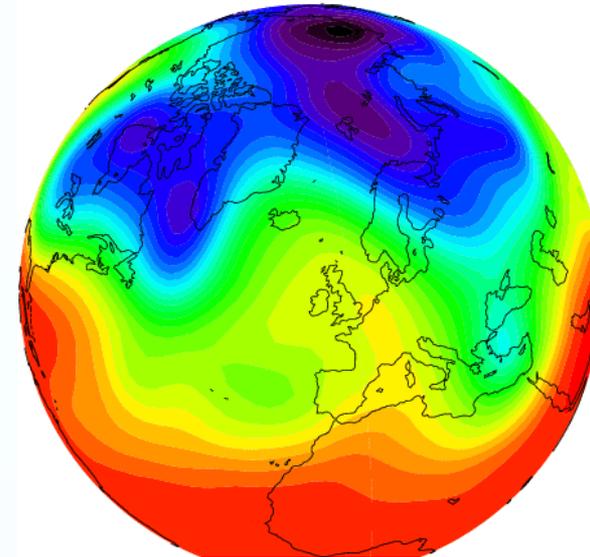
# L'oscillation Nord Atlantique (NAO)

Climat



Blocking

20080218

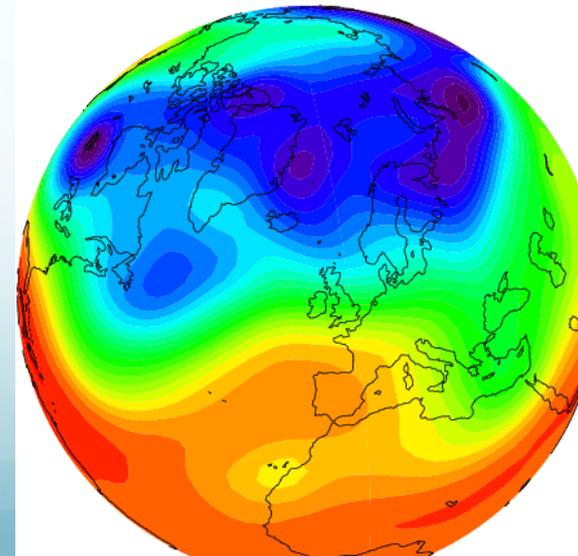


Météo

Déferlement anticyclonique

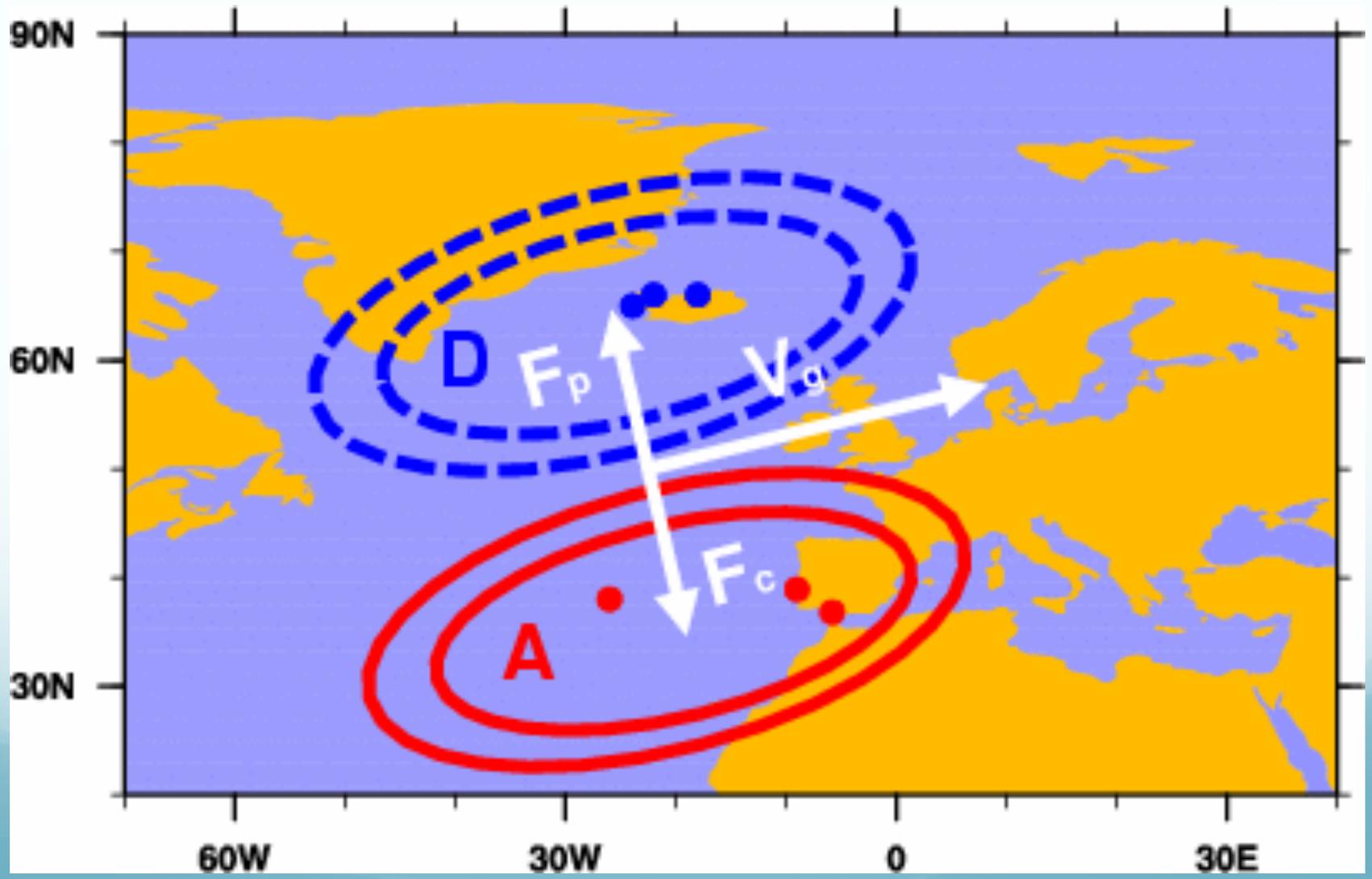
NAO-

19850131

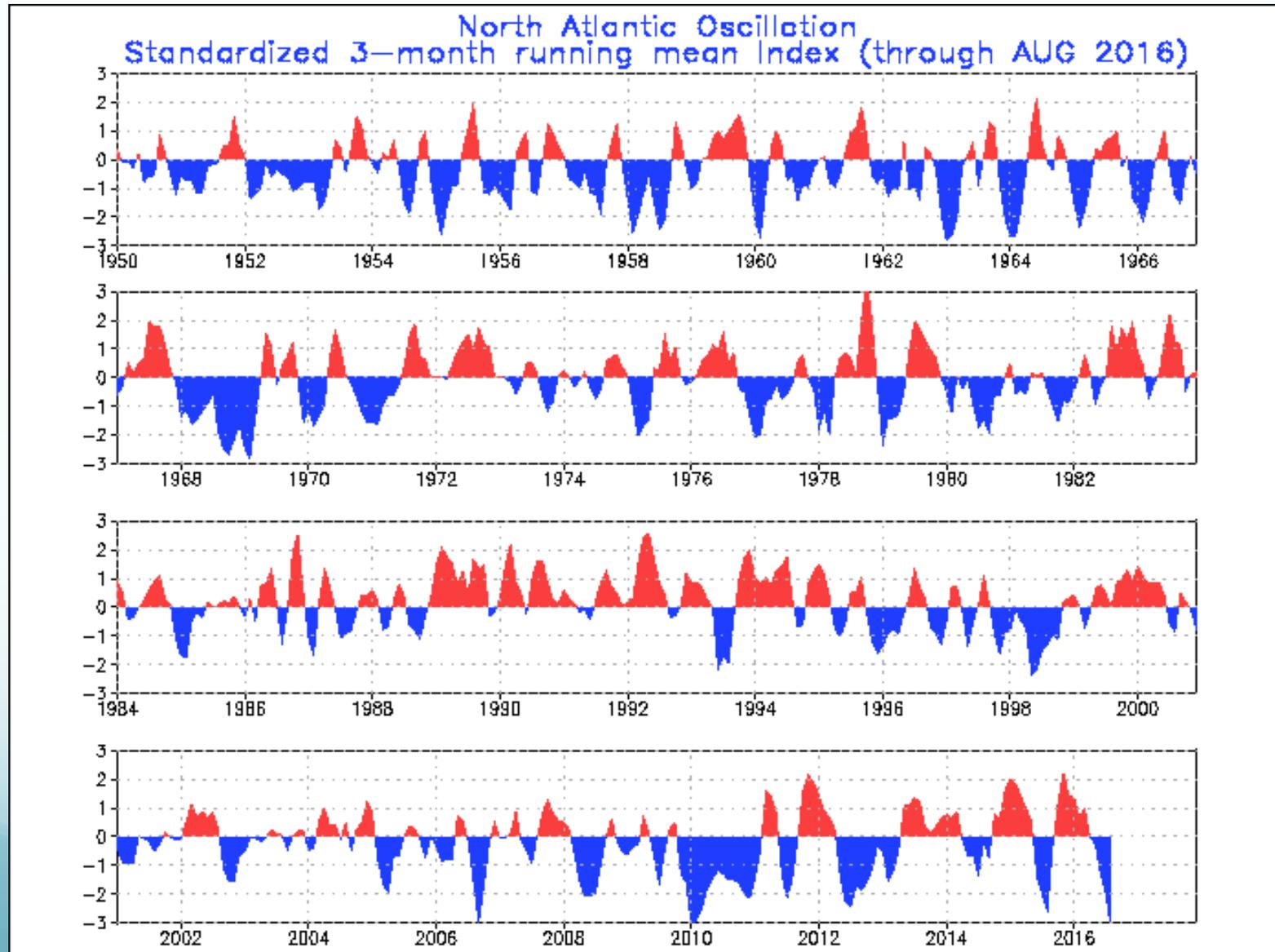


Déferlement cyclonique

# Explication physique de la NAO

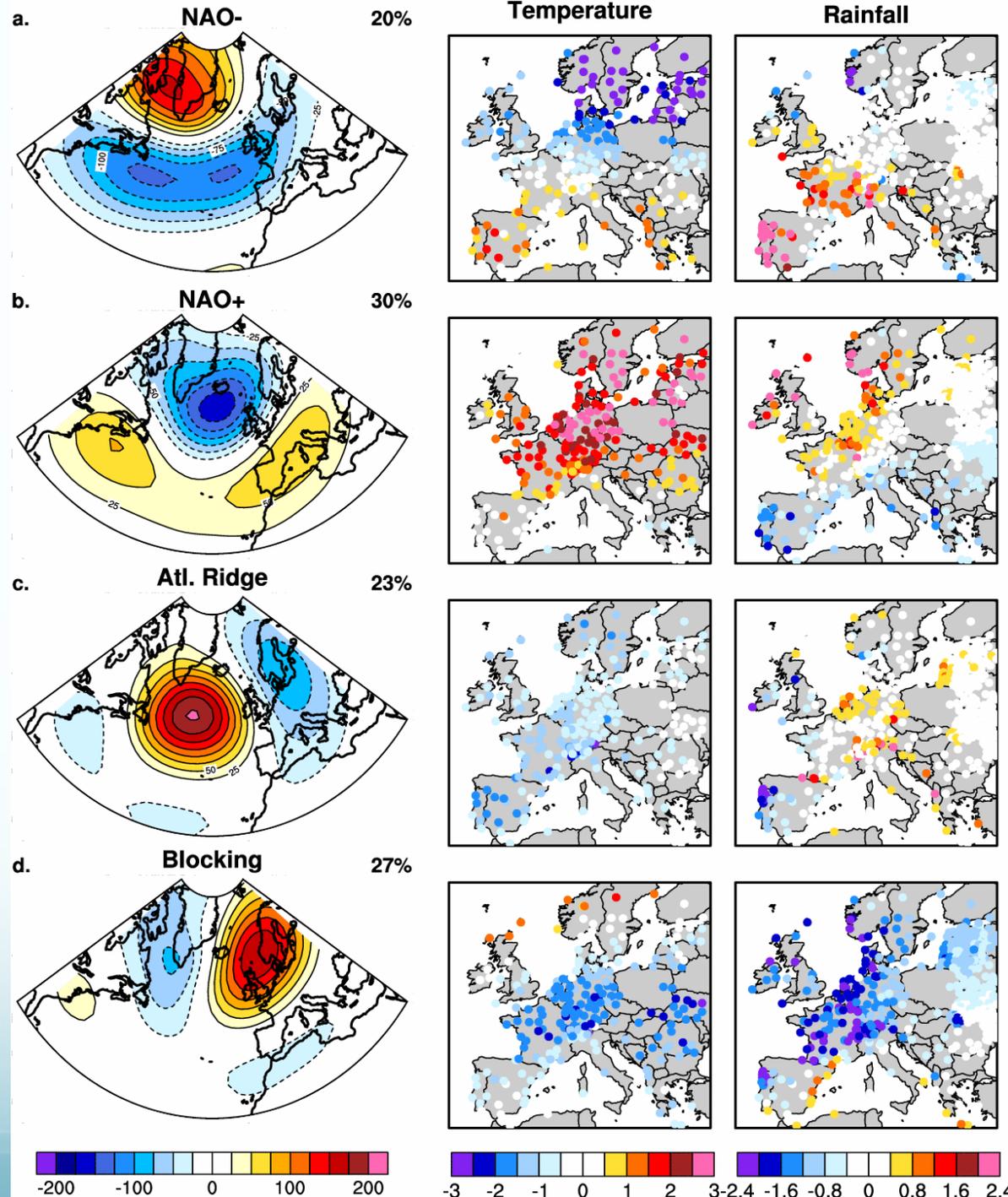


# Evolution temporelle NAO



# Régimes de temps

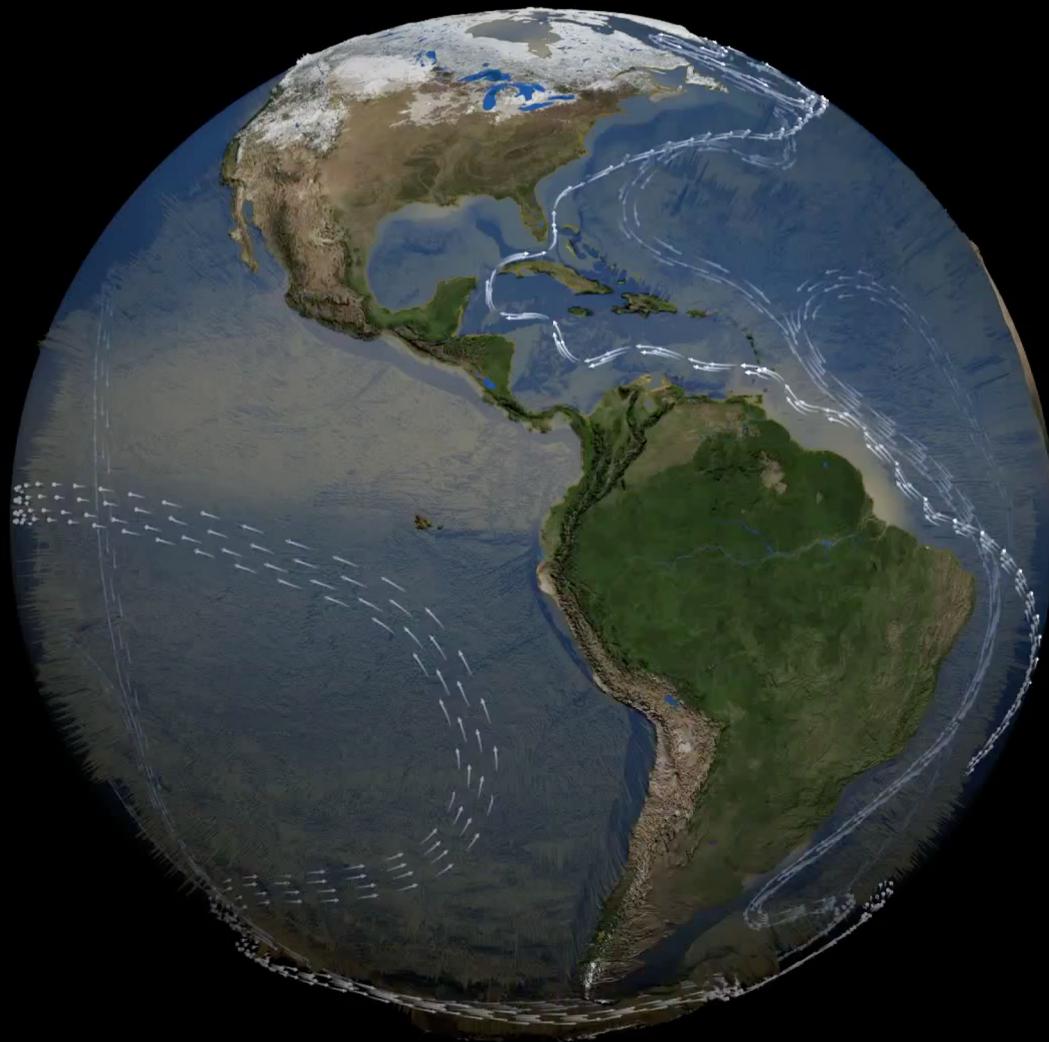
- Obtenu par méthode de « clustering »
- Etats privilégiés de l'atmosphère
- Quel faisait il hier régime hier ? => <http://www.cerfacs.fr/~cassou/Regimes/regime.html>



# Quelques grands modes de variabilité climatique

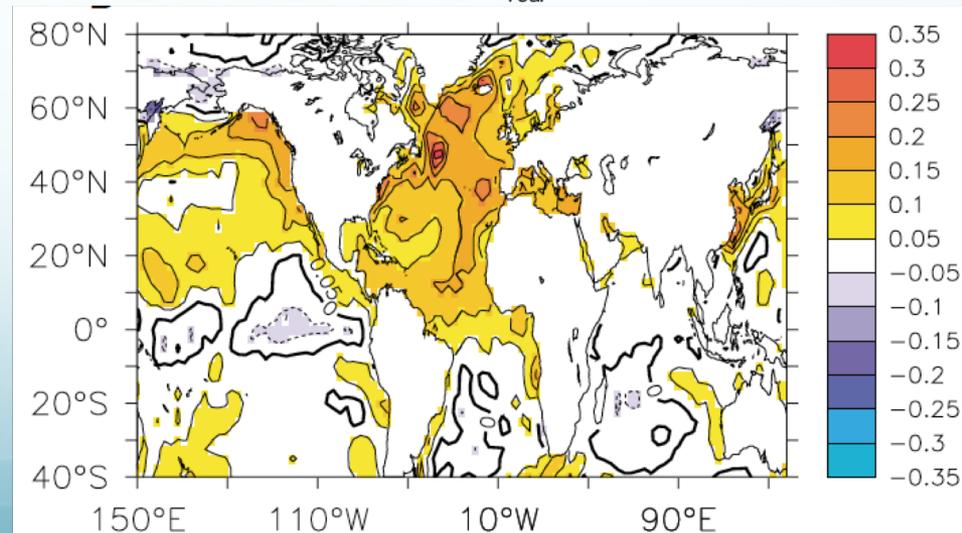
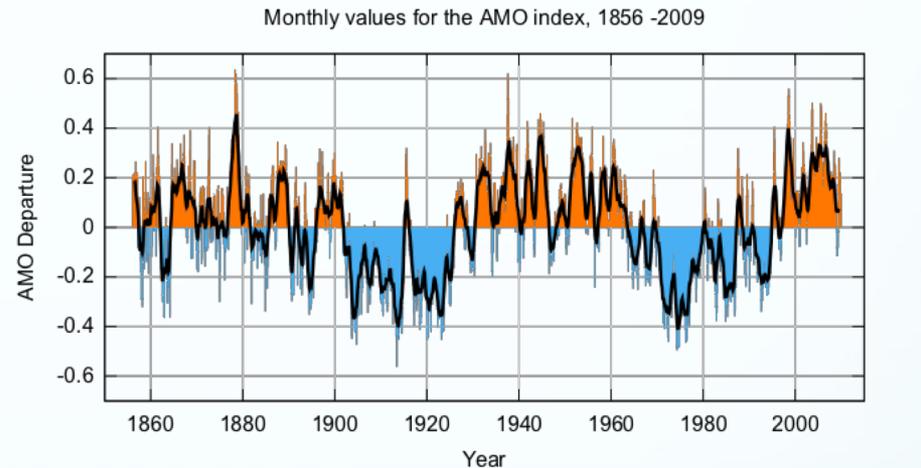
- Oscillation El Nino : ENSO
- Oscillation Nord Atlantique : NAO
- Variabilité multi-décennale atlantique : AMV
- Oscillation décennale Pacifique : PDO

# Circulation thermohaline



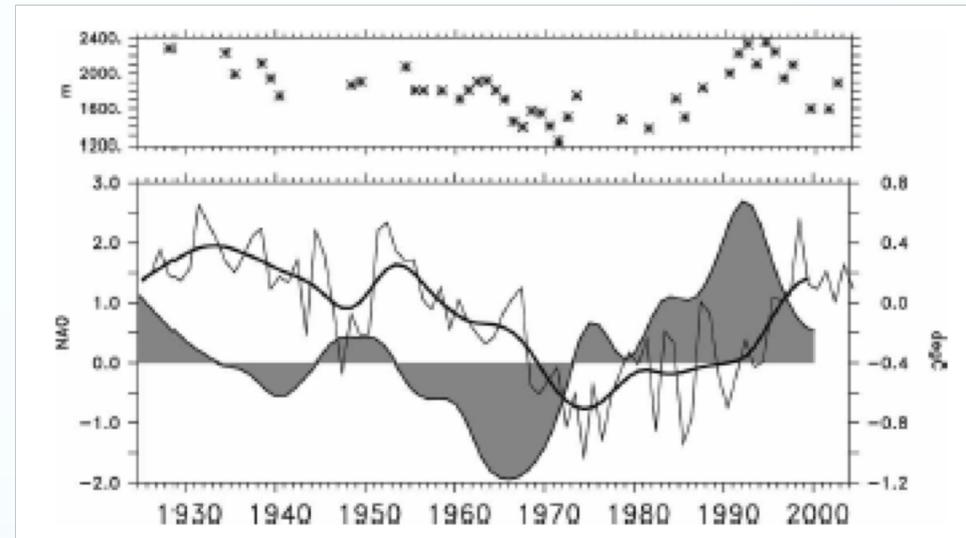
# Variabilité multi-décennale atlantique

- Variations de température de surface en Atlantique Nord
- associé à des changements de circulation thermohaline



# Lien dynamique

- NAO mène l'AMOC de 5-10 ans
- AMOC mène AMO de 5-10 ans
- NAO comme métronome de l'océan et du climat ?
- Rétroaction entre les deux ?



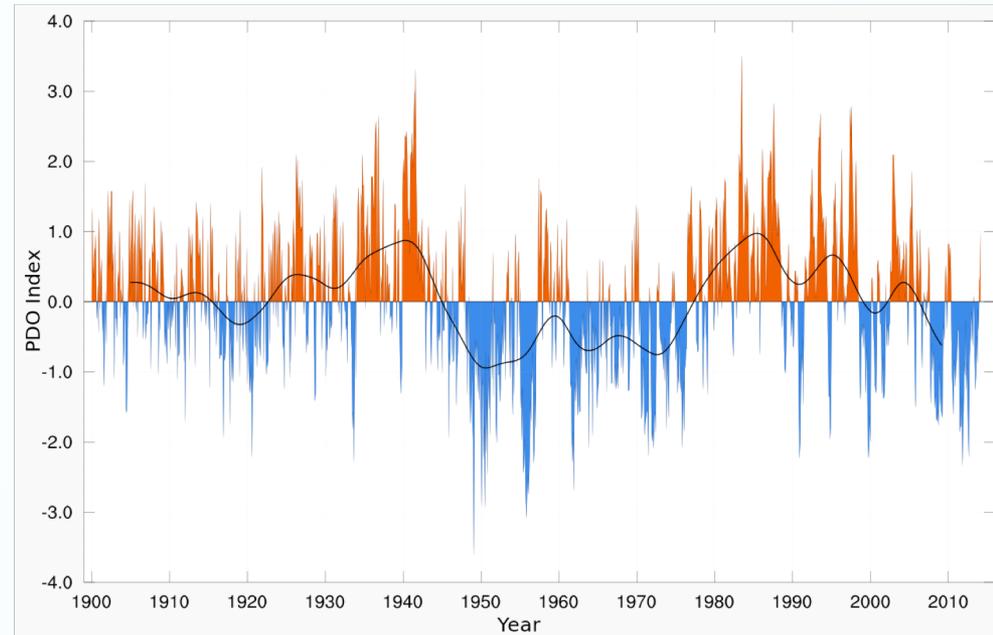
Latif et al. 2006

# Quelques grands modes de variabilité climatique

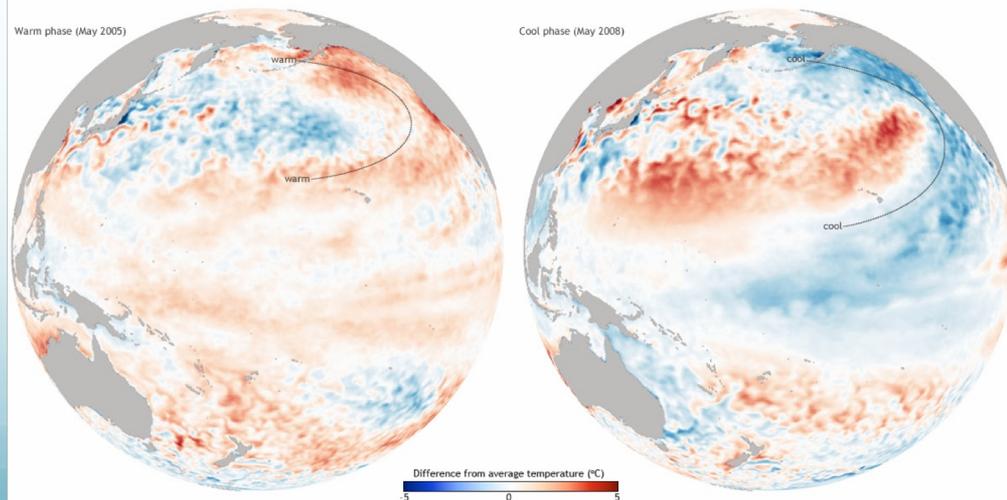
- Oscillation El Nino : ENSO
- Oscillation Nord Atlantique : NAO
- Variabilité multi-décennale atlantique : AMV
- Oscillation décennale Pacifique : PDO

# Oscillation décennal pacifique

- Variations pluri-décennale des SST du Pacifique Nord
- Structure complexe

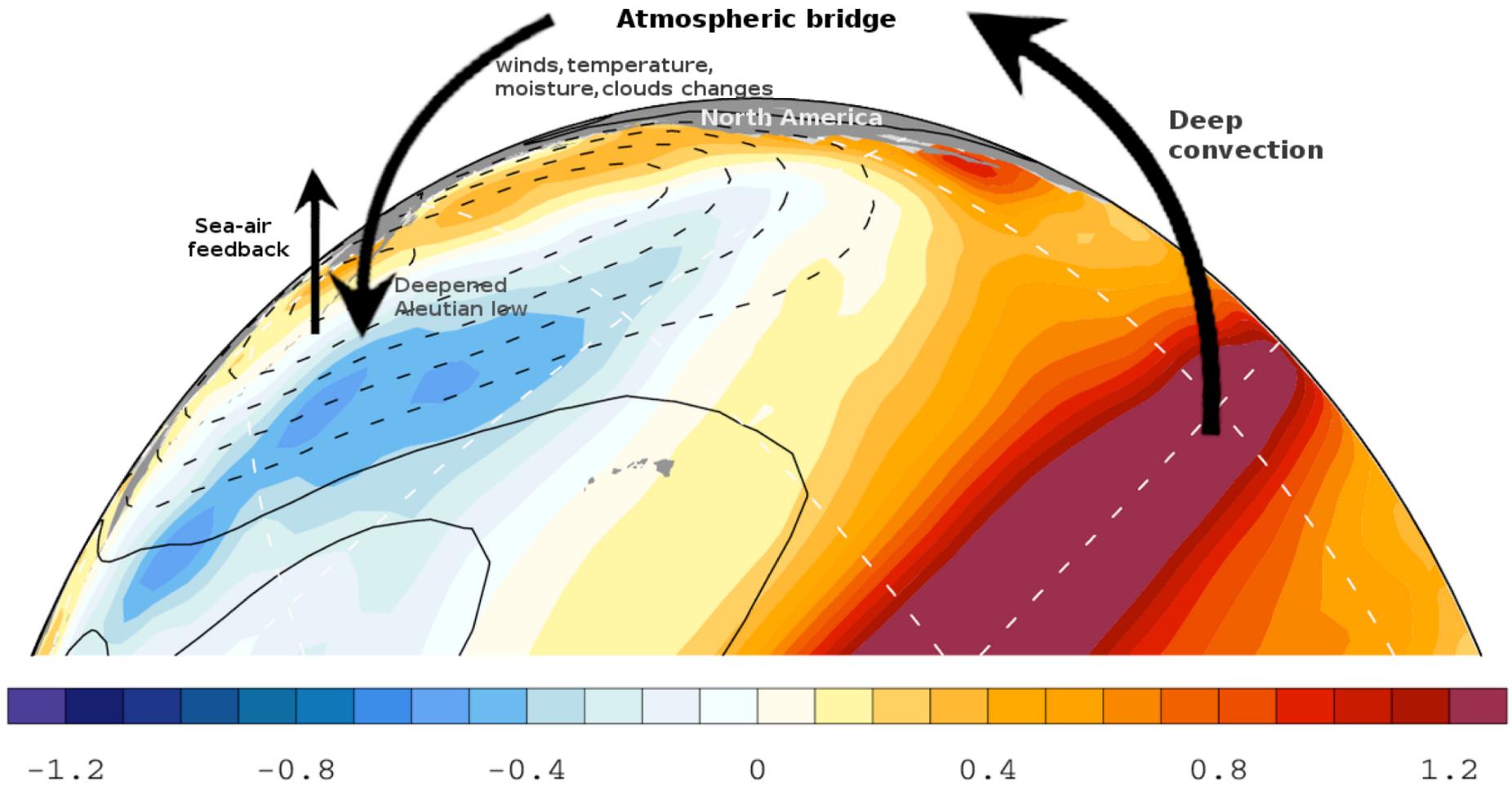


Pacific Decadal Oscillation

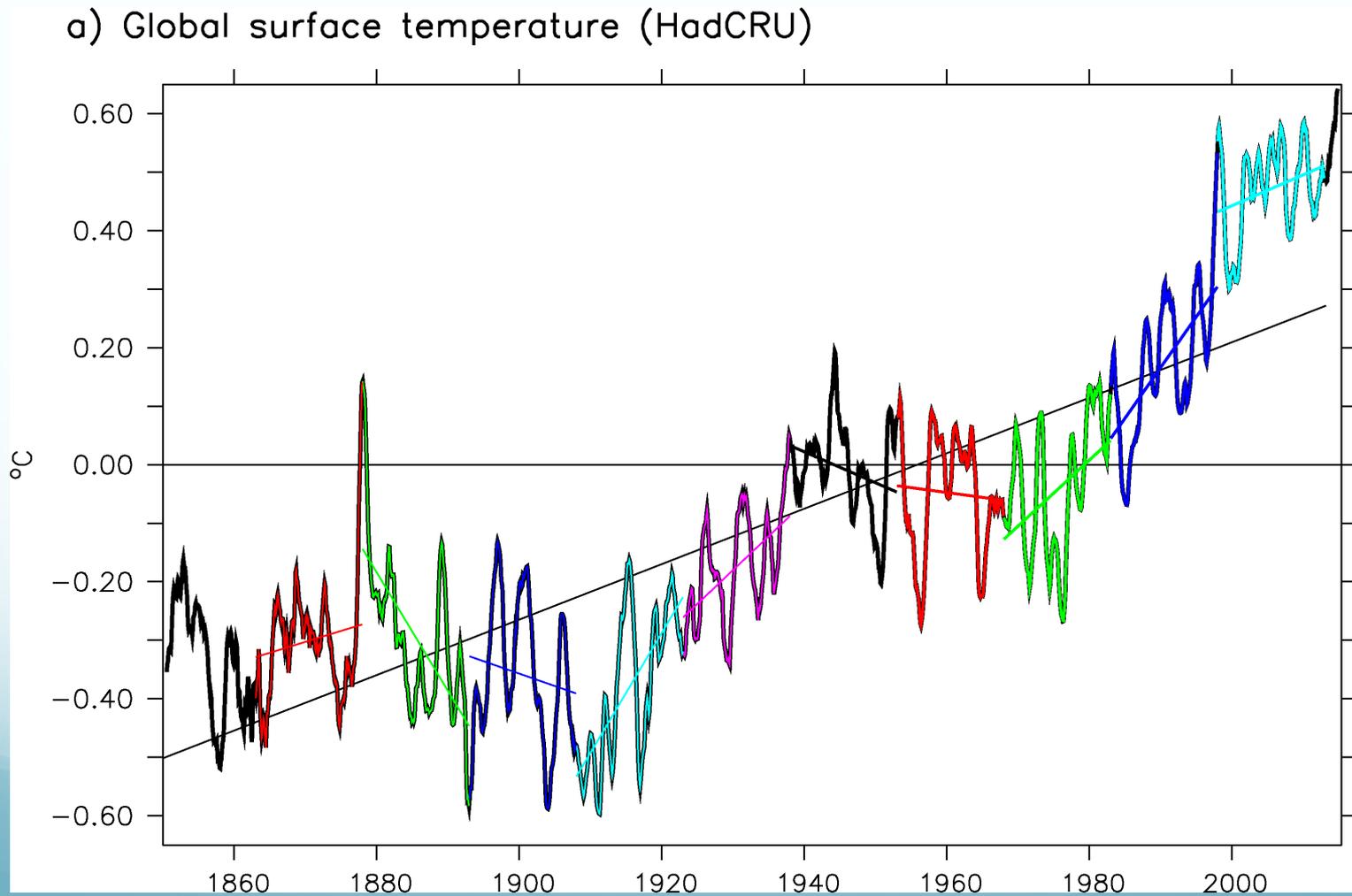


# Oscillation décennal pacifique

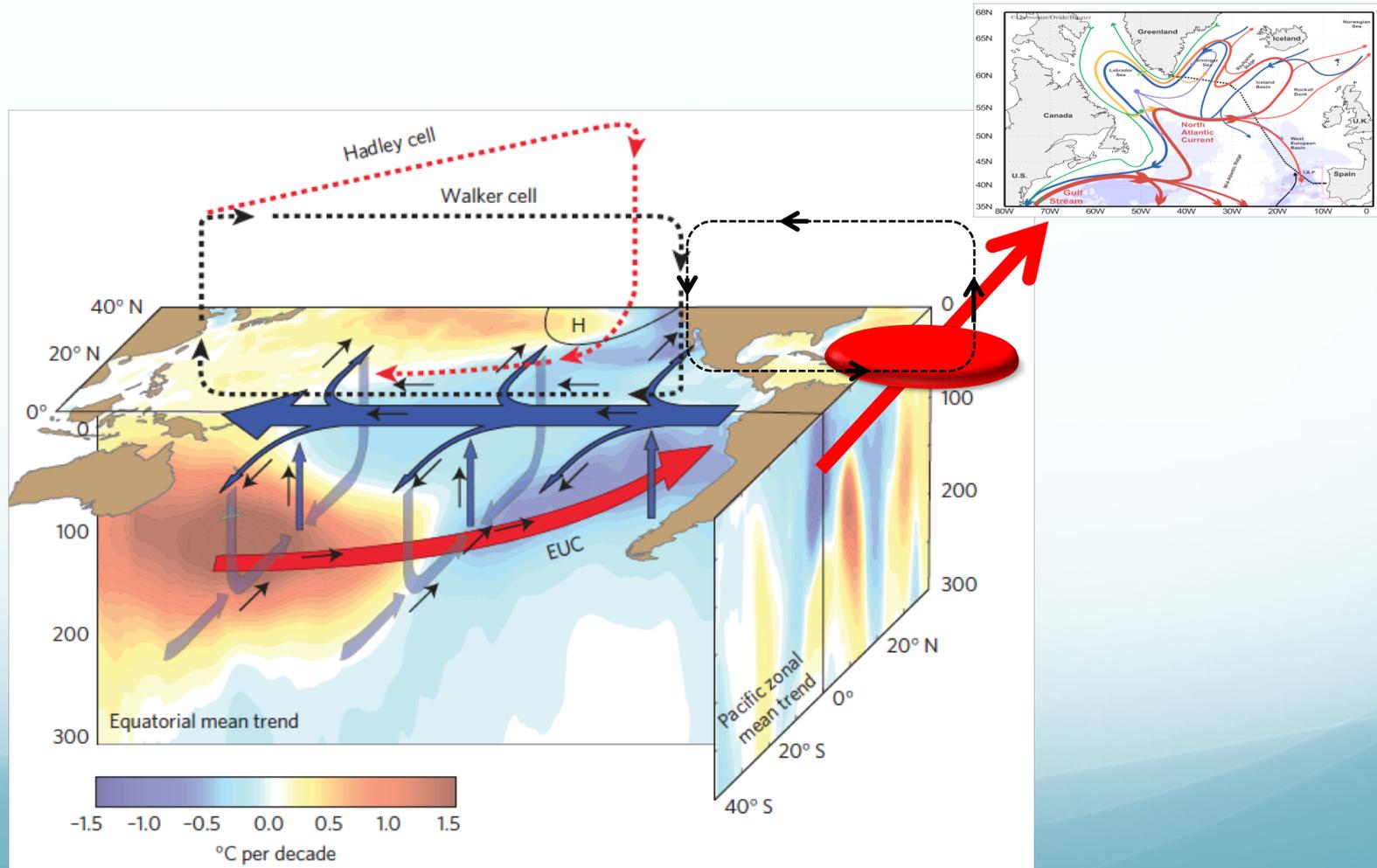
Expression basse fréquence de El Nino, via un pont atmosphérique et des rétroactions locales vent-flux de chaleur



# Un hiatus en température ?



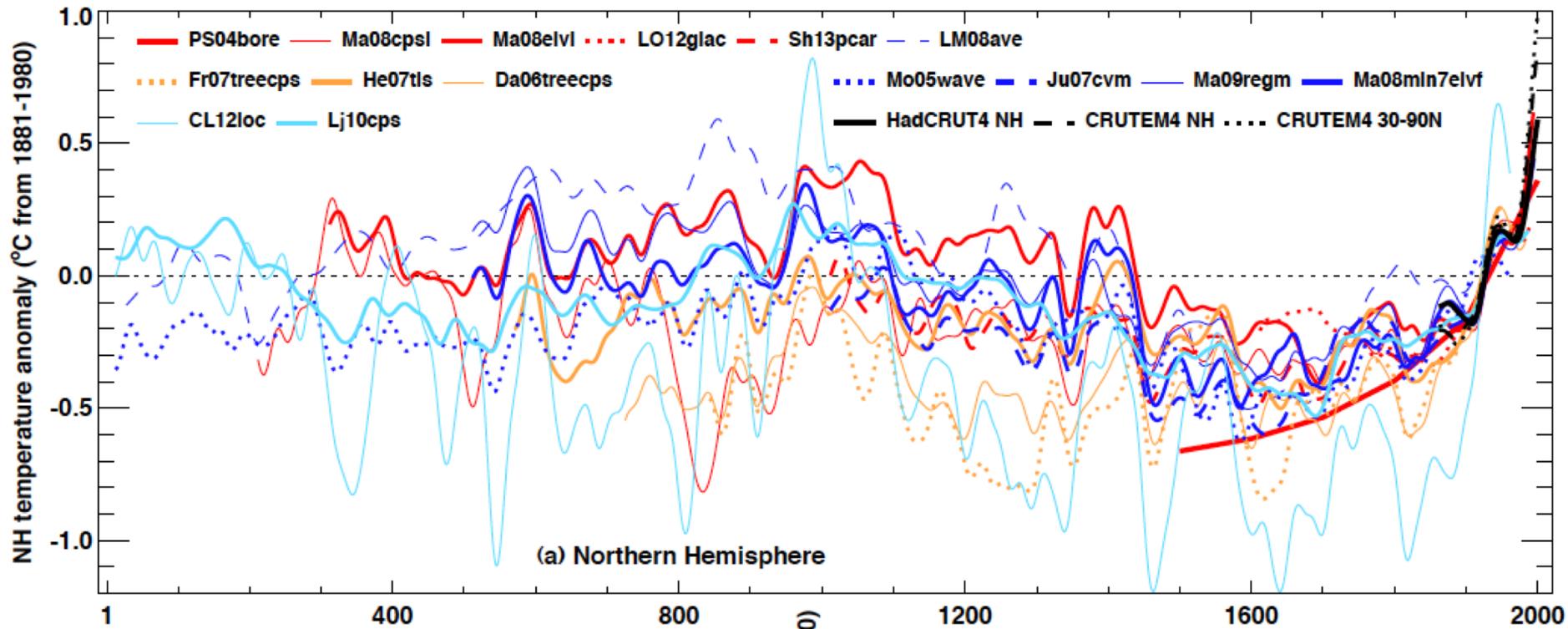
# Lié à la PDO ! (et à l'AMO !?)



# Utilité des paléoclimats

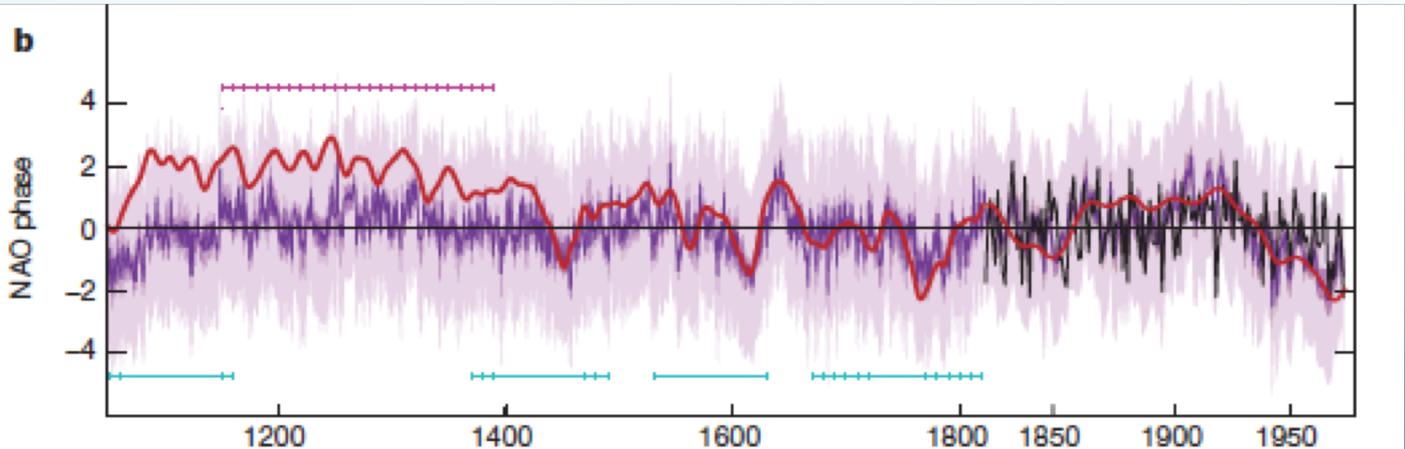
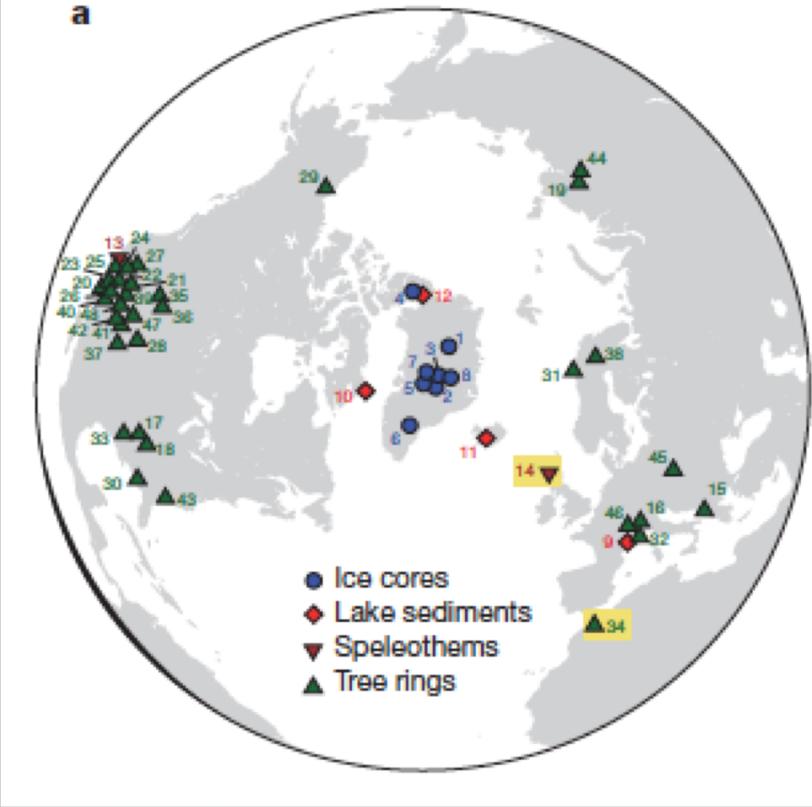
- Période instrumentale restreinte à 150 ans (premier thermomètre inventée 1624 par le jésuite Jean Leurechon)
- Proxy (de l'anglais « par procuration ») sont de formidable machine à remonter dans le temps
- Mais indicateur indirect de variables climatiques

# Dernier millénaire

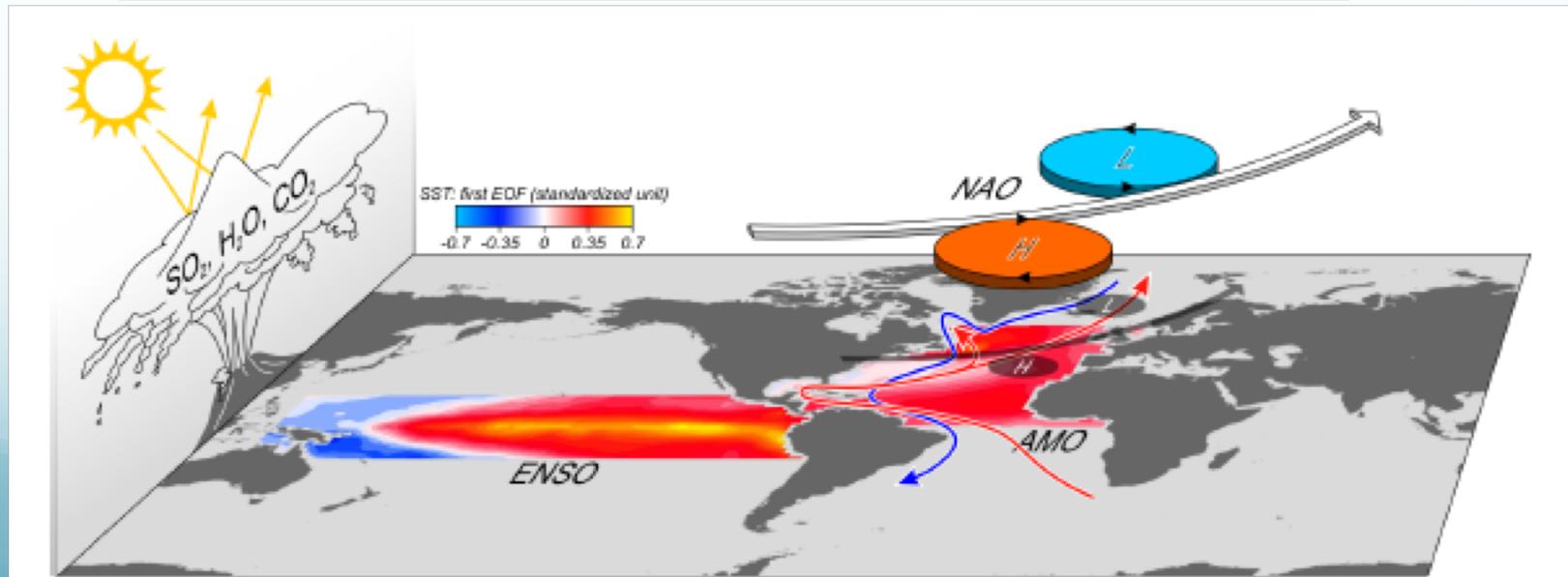
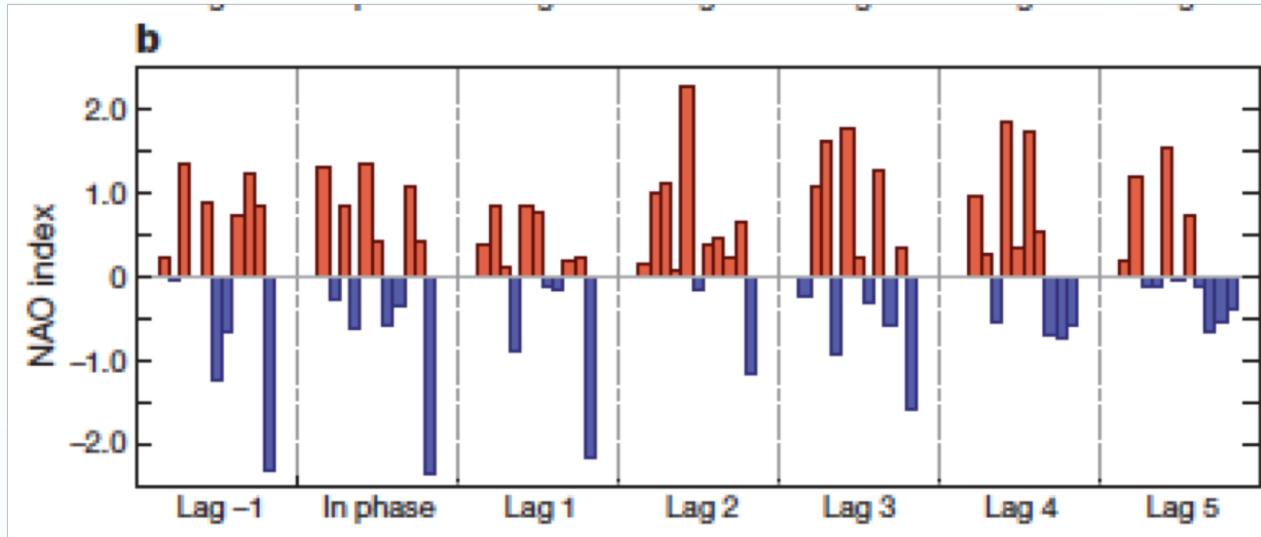


# Reconstruction grands modes de variabilité

- Avec suffisamment de proxies, on peut tenter de reconstruire les grands indices climatiques sur de longues périodes de temps
- Exemple de la NAO (Ortega et al. 2015)



# Interaction volcanans - NAO



# Conclusion

- Climatologie : une science assez jeune, en plein développement
- Beaucoup de choses reste à découvrir sur la variabilité passé et future du climat
- Modèle un outil de compréhension important !

# Instability: Dansgaard-Oeschger

High-Resolution Greenland Ice Core Data Show Abrupt Climate Change Happens in Few Years

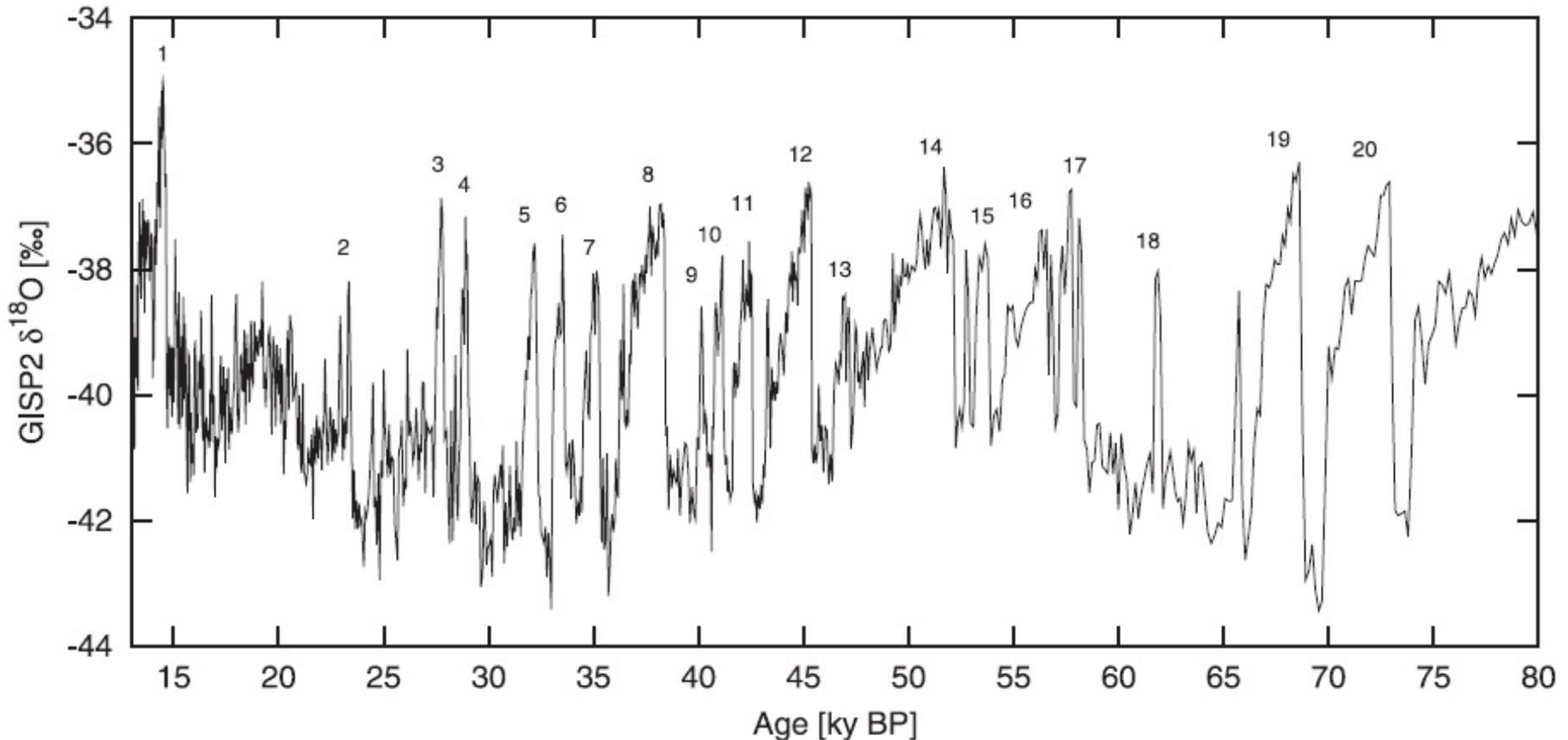
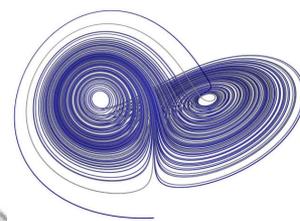
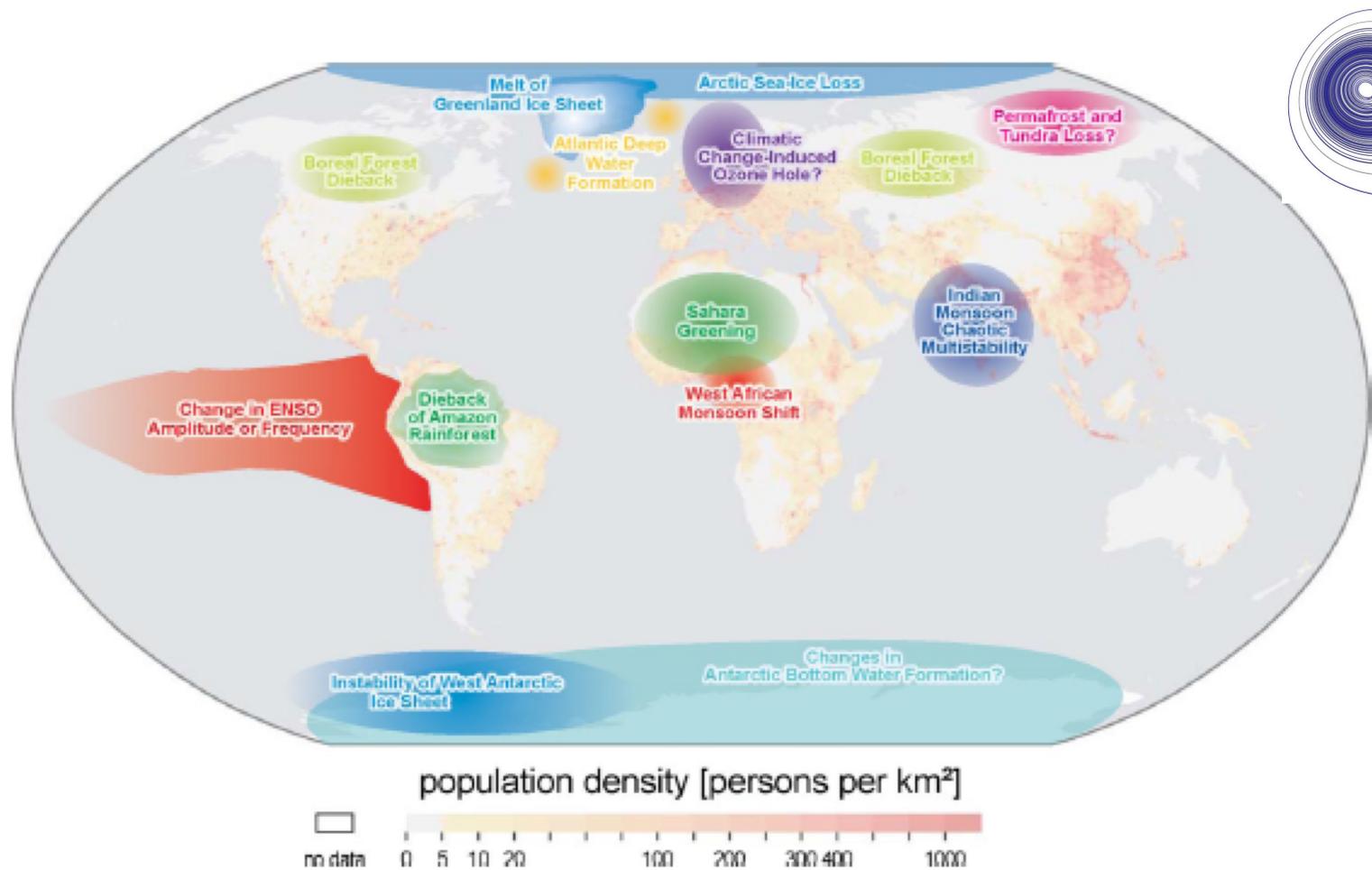
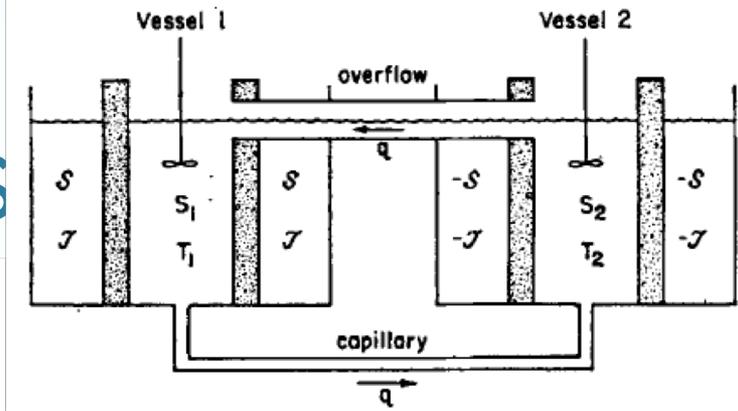


Figure 1. Oxygen isotope ( $\delta^{18}\text{O}$ ) record from Greenland (GISP2 ice core [Grootes and Stuiver, 1997]). Numerals above  $\delta^{18}\text{O}$  maxima denote the “classical” Dansgaard-Oeschger interstadial events [Johnsen et al., 1992; Dansgaard et al., 1993].

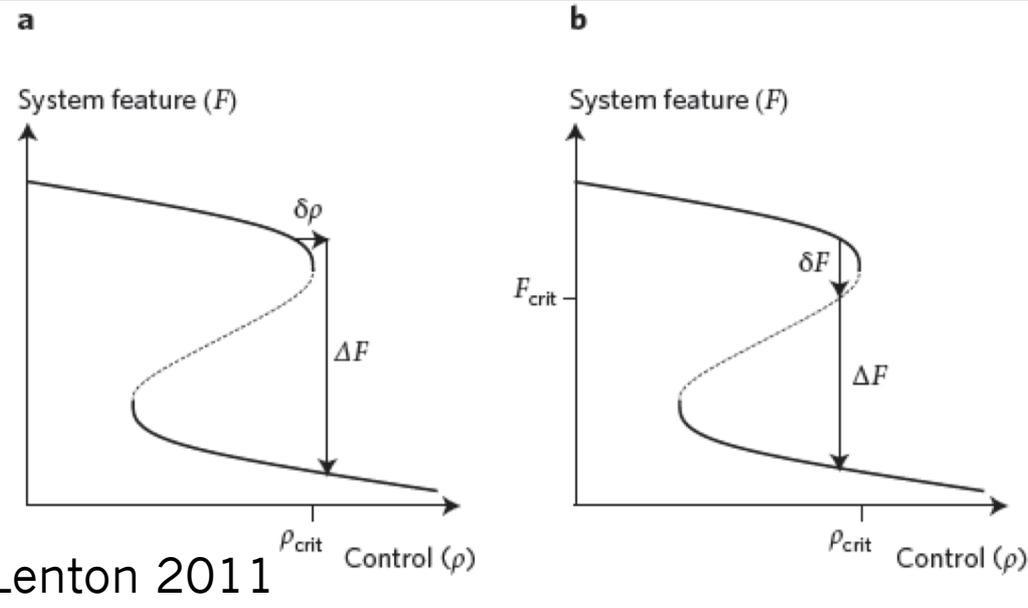
**Point de bascule (Lenton et al. 2008):** Terme qui se réfère à un seuil pour lequel une petite perturbation peut amener un grand changement.



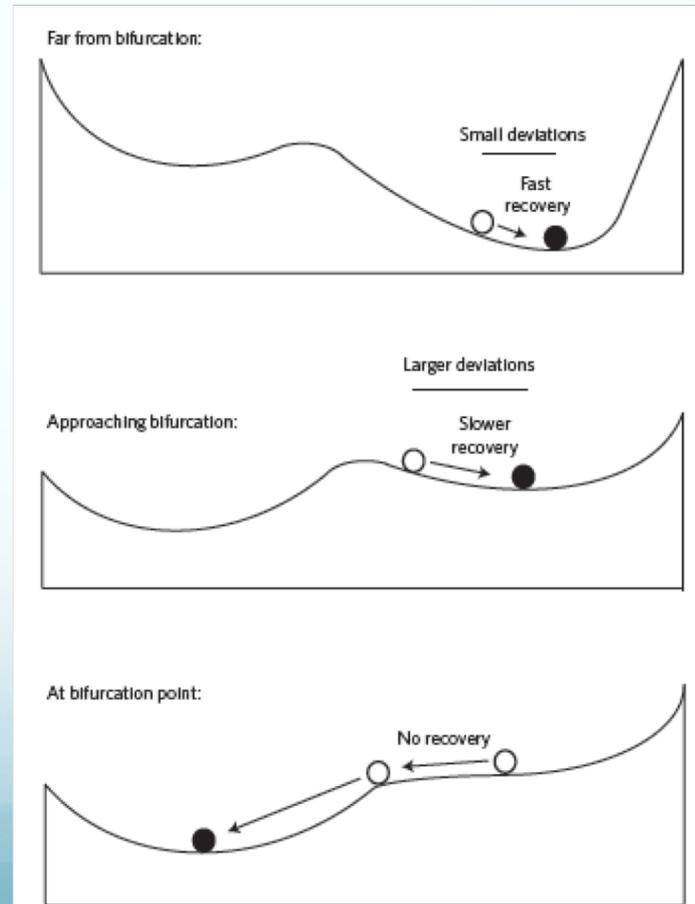
# Tipping points



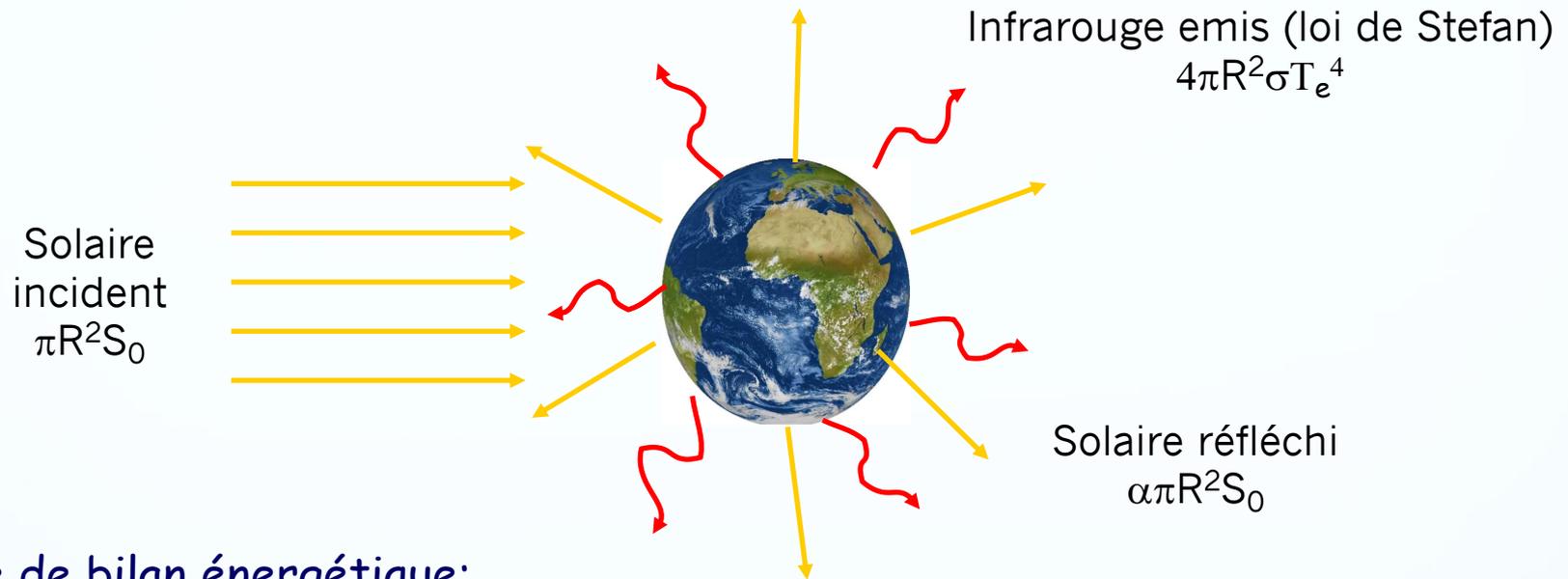
Stommel (1961)



Lenton 2011



# Un modèle simple de Terre



Modèle de bilan énergétique:

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

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

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

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

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

Effet de serre:

$T_s = 288\text{K}$