

# Introduction à la dynamique et modélisation 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)



ipcc

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON climate change







# Plan du cours

- ⇒ Objectif : comprendre les bases de la dynamique du climat et la façon dont on conçoit les futurs climatiques possibles
  - a. Notions de système Terre
  - b. Equilibre énergétique du système Terre
  - c. Principaux modes de la variabilité climatique
  - d. Qu'est-ce qu'un modèle de climat
  - e. Evolution récente du climat et variabilité naturelle
  - f. Projections climatiques

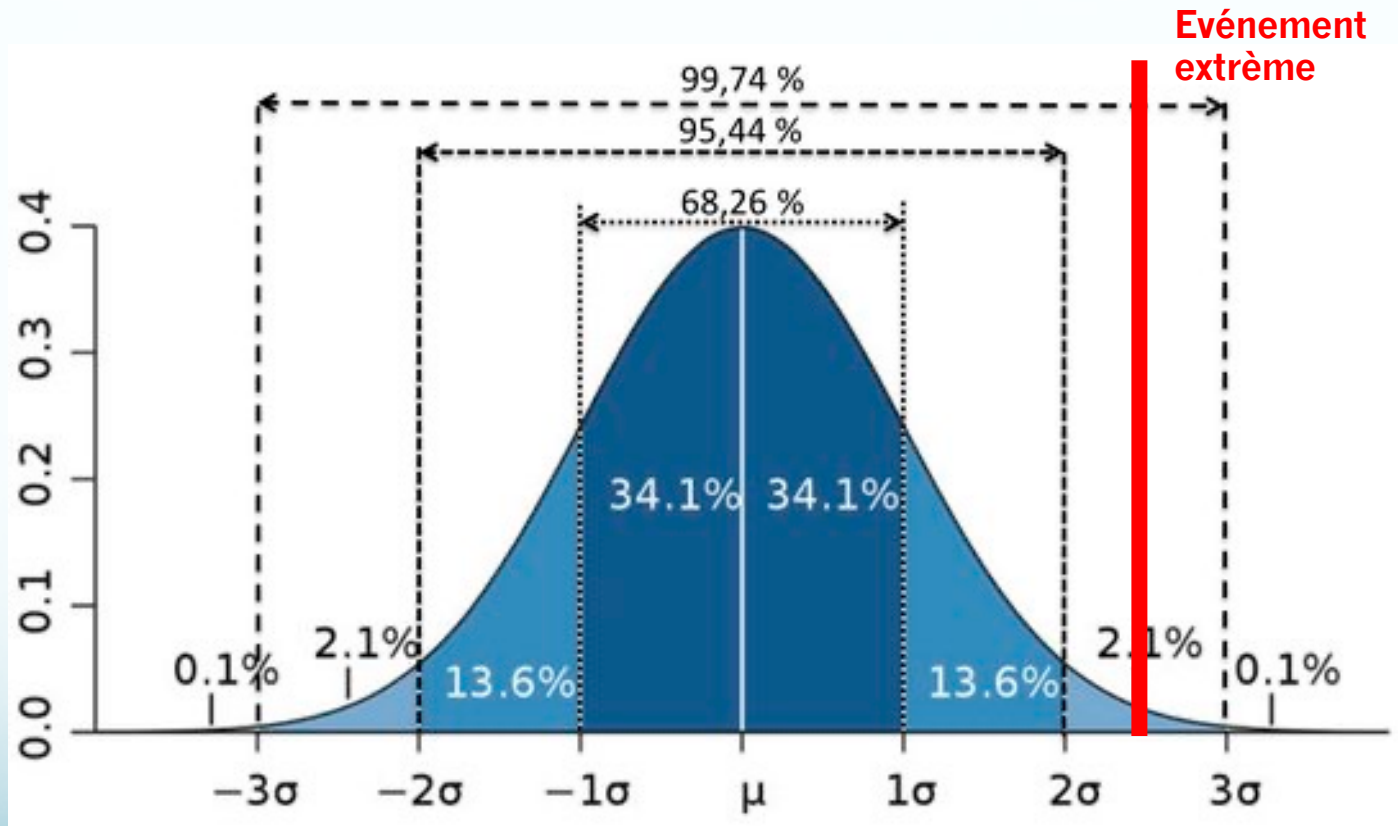


Qu'est-ce que le climat ?

# 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**.

# Le climat est statistique



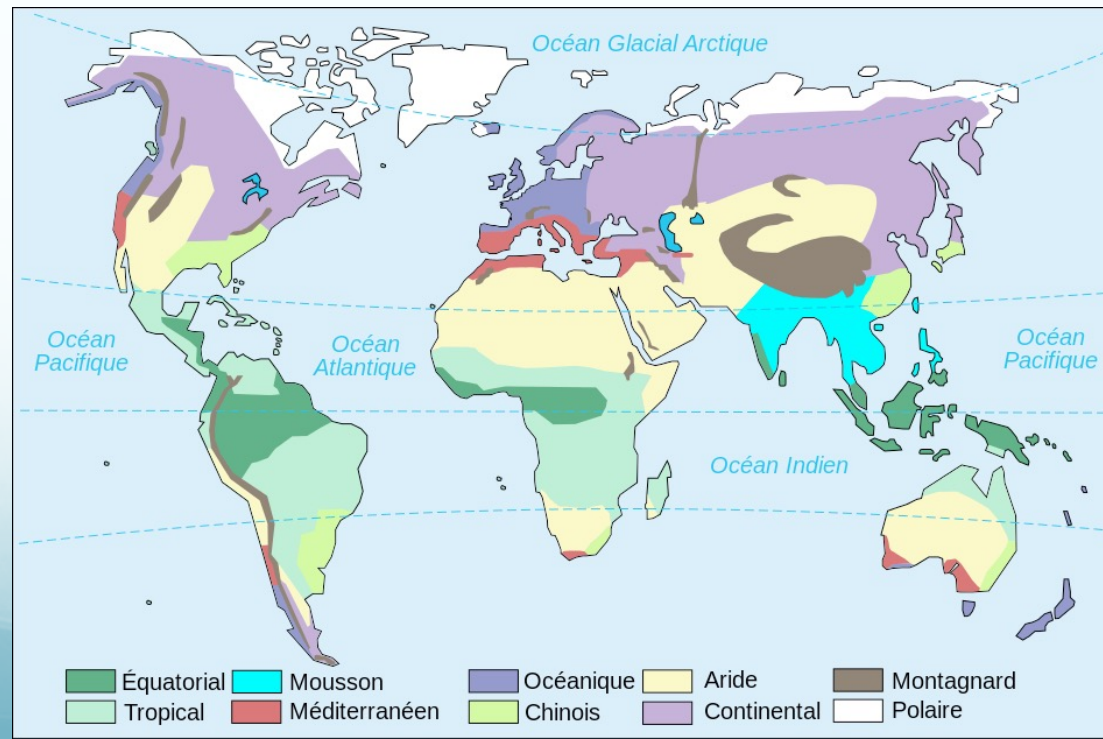


# Définition du climat

- 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

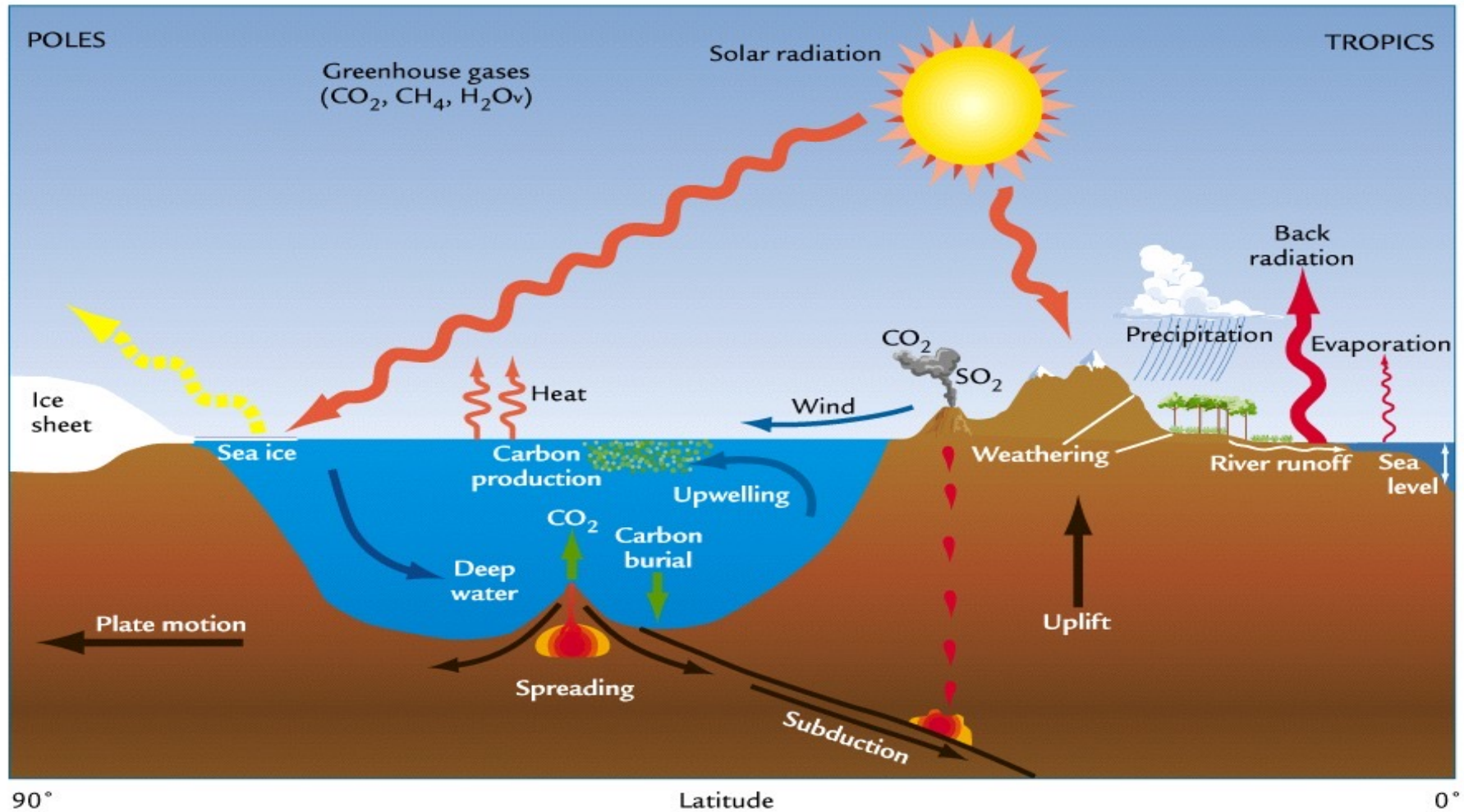


# Définition du climat

- 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 !**



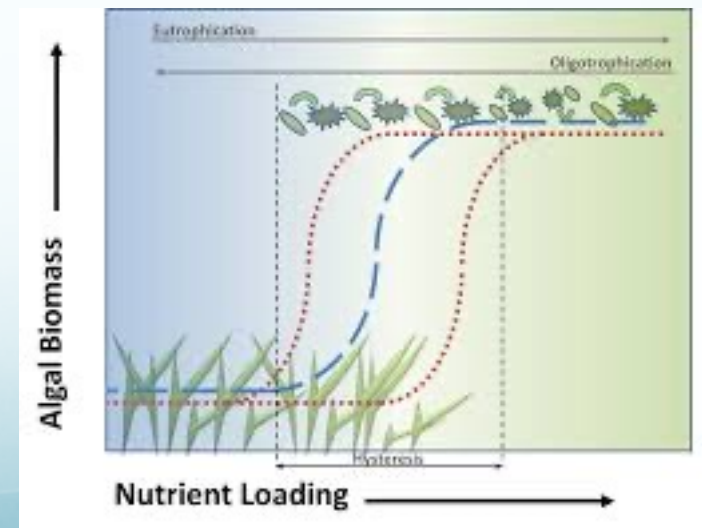


# Notion de système climatique

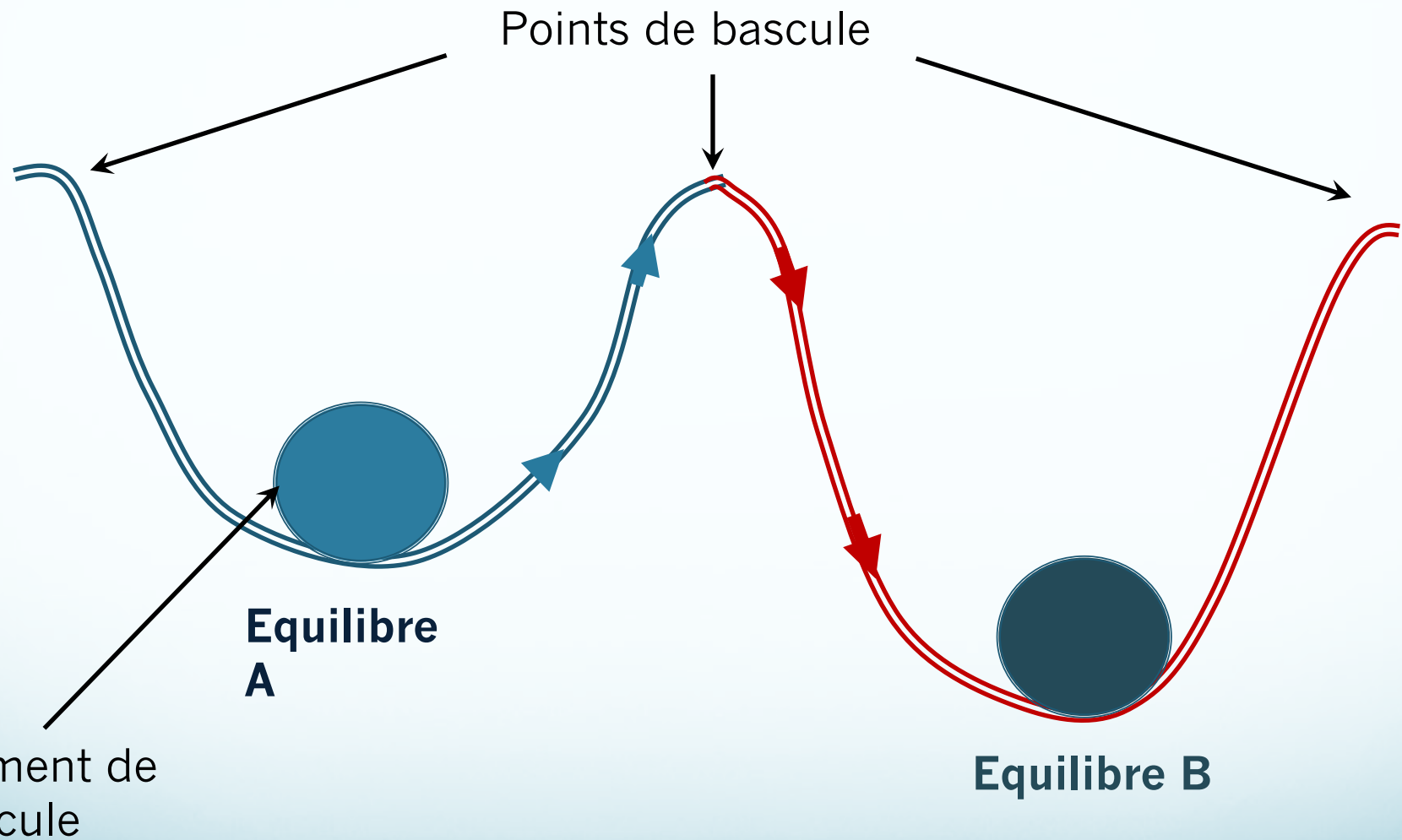
- Par analogie à un **système physique**, on définit le **système climatique** comme constitué de plusieurs composantes (atmosphère, l'océan, banquise, surfaces continentales, végétation, calottes glaciaires...) et leurs interactions.
- Il s'agit d'un **système ouvert**, qui échange en permanence de 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.

# Exemples de systèmes dynamiques

- Certains lacs aux conditions de forçage très proches peuvent être ou non eutrophisés
- **Marten Scheffer** a pu expliquer cela grâce à la notion de point de bascule appliqué à cet écosystème particulier
- Il existe d'autres exemples dans des modèles mathématiques très simples
- Ces instabilités viennent de l'exemple de **non-linéarité et de rétroactions positives**
- Ils amènent de **irréversibilités**



# Qu'est ce qu'un point de bascule ?



Lenton et al. (2008) : Le terme “**point de bascule**” se réfère à un seuil critique au delà duquel une petite perturbation peut modifier qualitativement l'état d'un système.

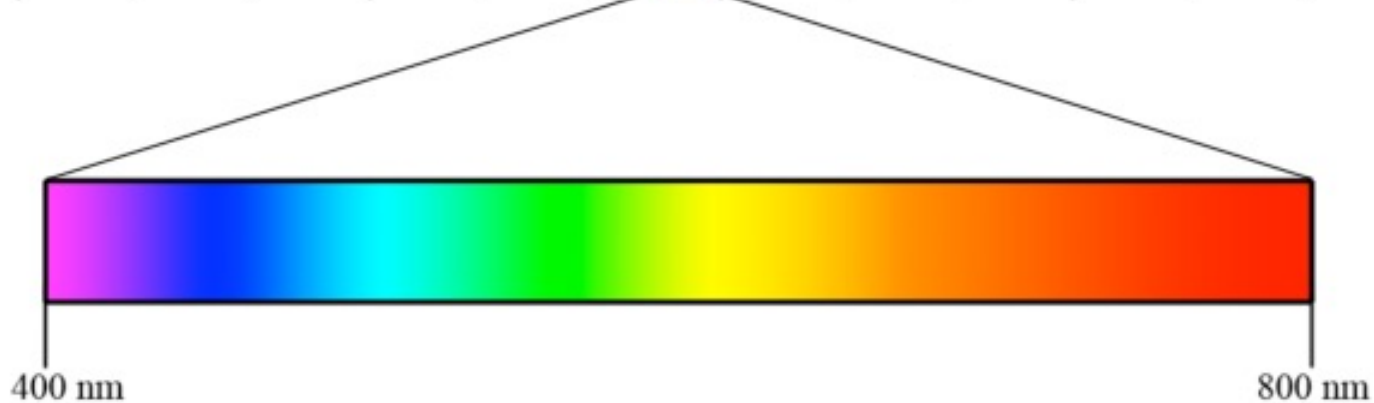
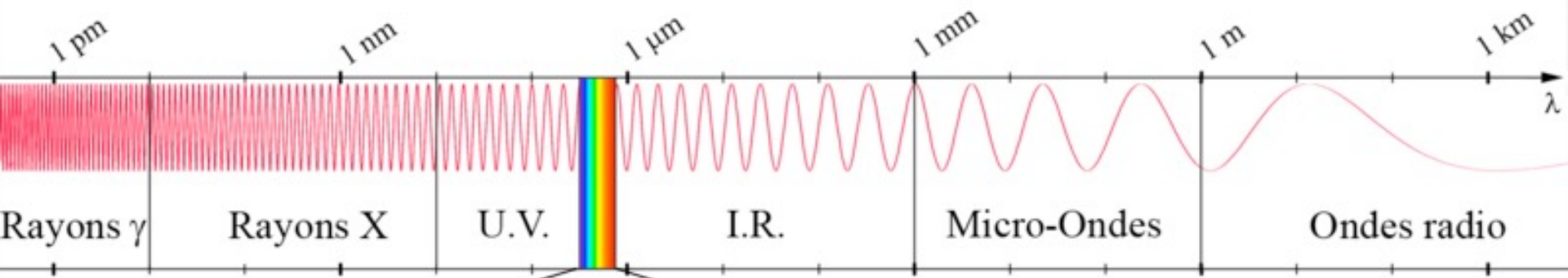


# Plan du cours

- Définition du climat
- Equilibre énergétique du système Terre
- Principaux modes de la variabilité climatique
- Qu'est ce qu'un modèle de climat ?
- Utilité des modèles de climat : quelques applications

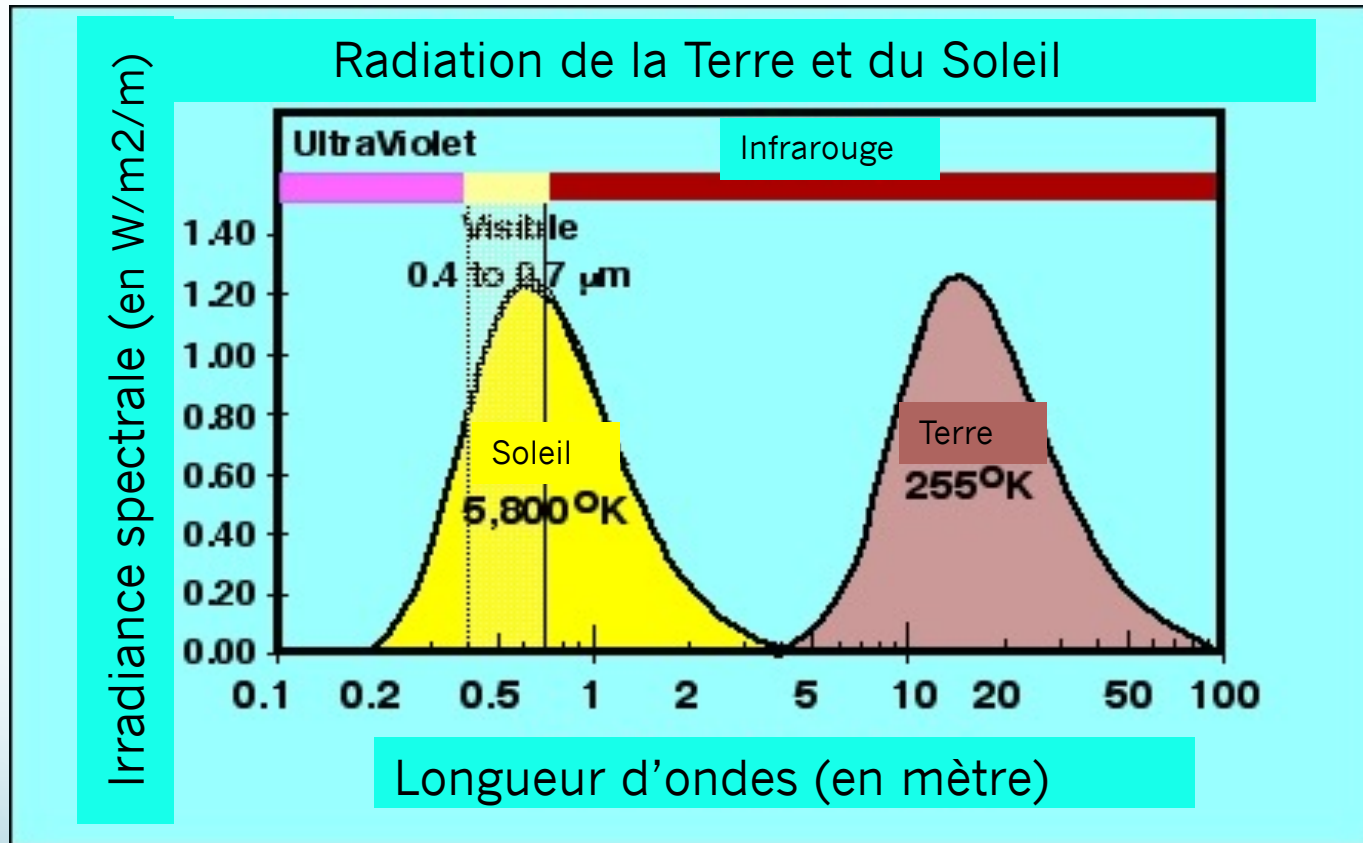
# Ondes et rayonnement électromagnétiques

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 que la distribution de luminance énergétique spectrale du rayonnement thermique du corps noir est fonction de sa température

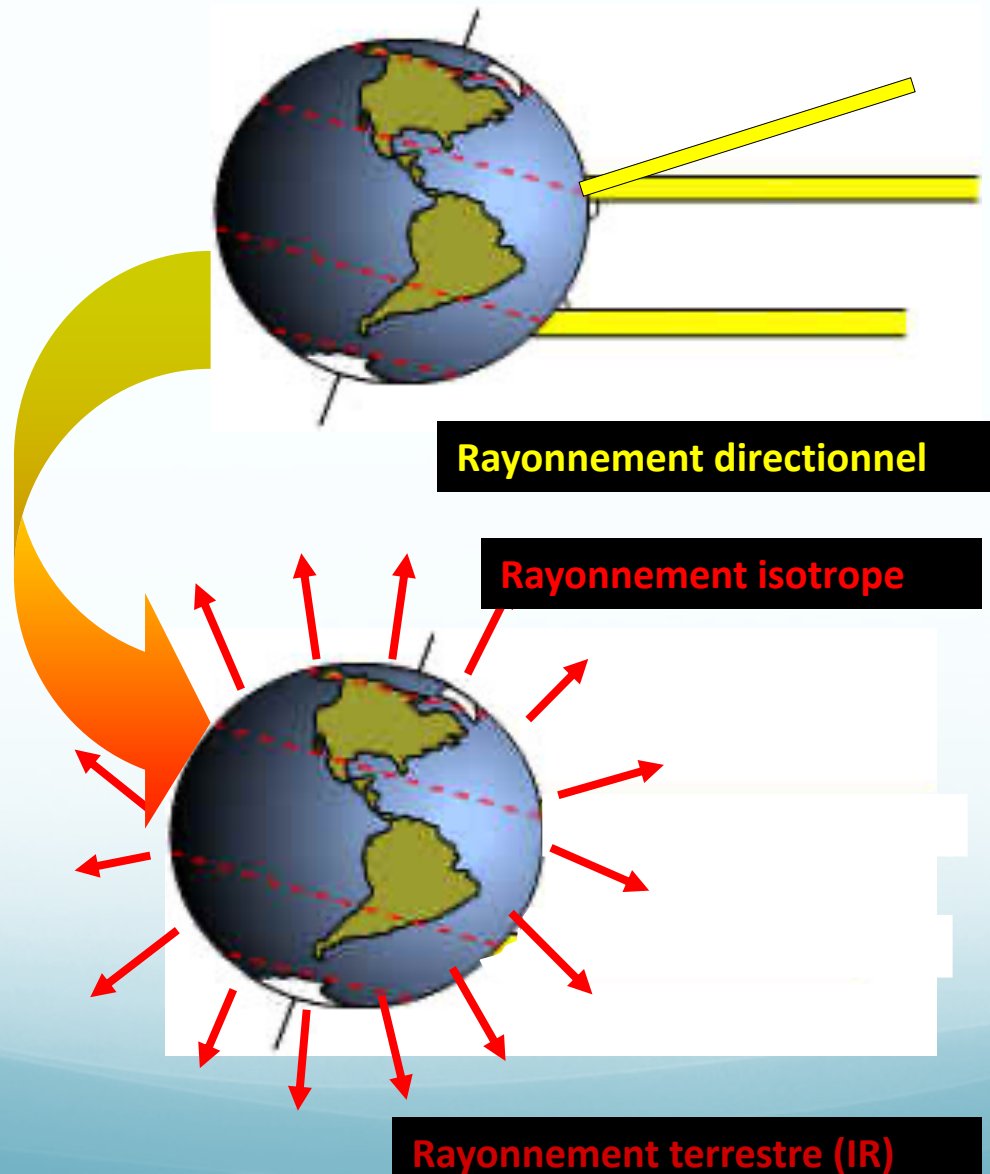


Loi de **Stefan-Boltzmann** stipule le flux d'énergie émis par un corps noir est lié à sa température à la puissance 4.

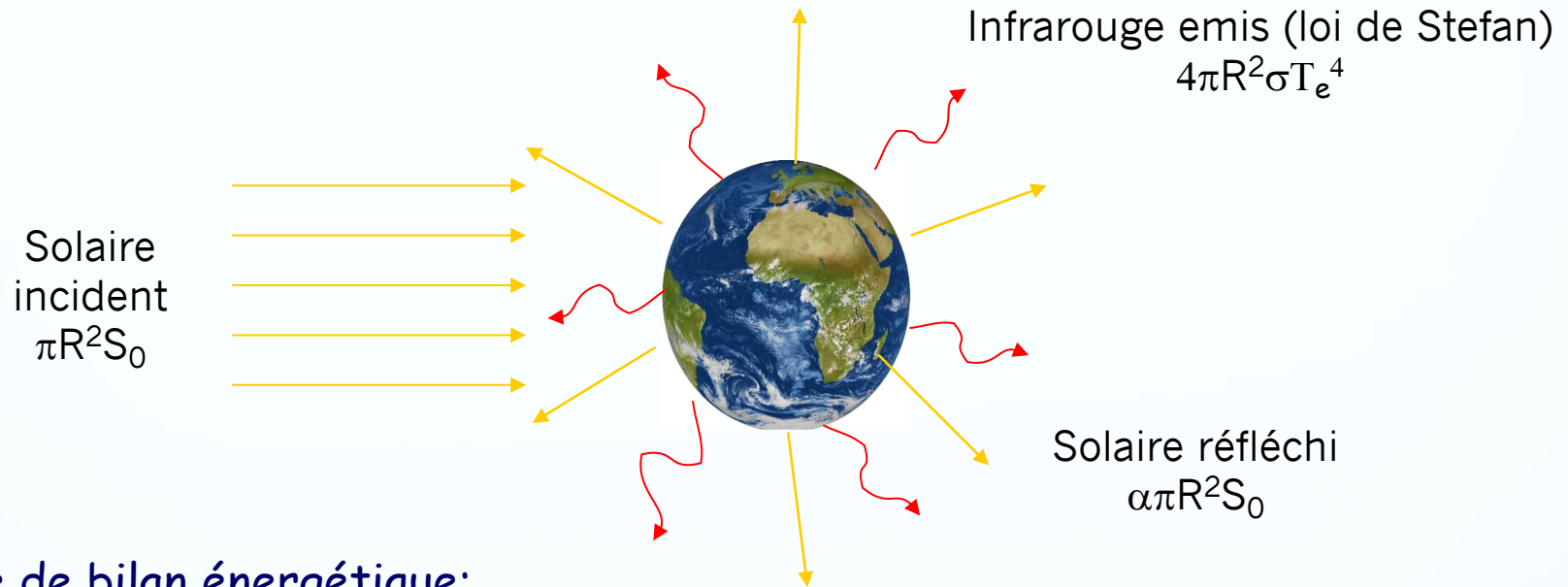
$$F = \sigma T^4$$



# Equilibre radiatif de la Terre



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

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

→  $T_e = 255\text{K}$

Effet de serre:

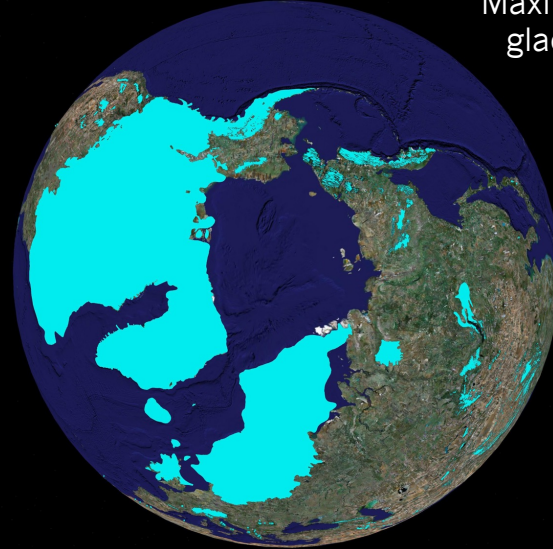
$T_s = 288\text{K}$

# Plusieurs états stables du climat planétaire

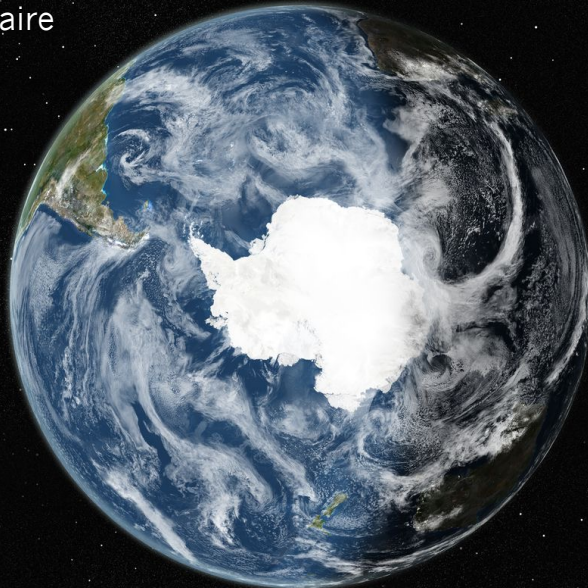
Boule de neige



Maximum glaciaire



Interglaciaire



Sans cryosphère

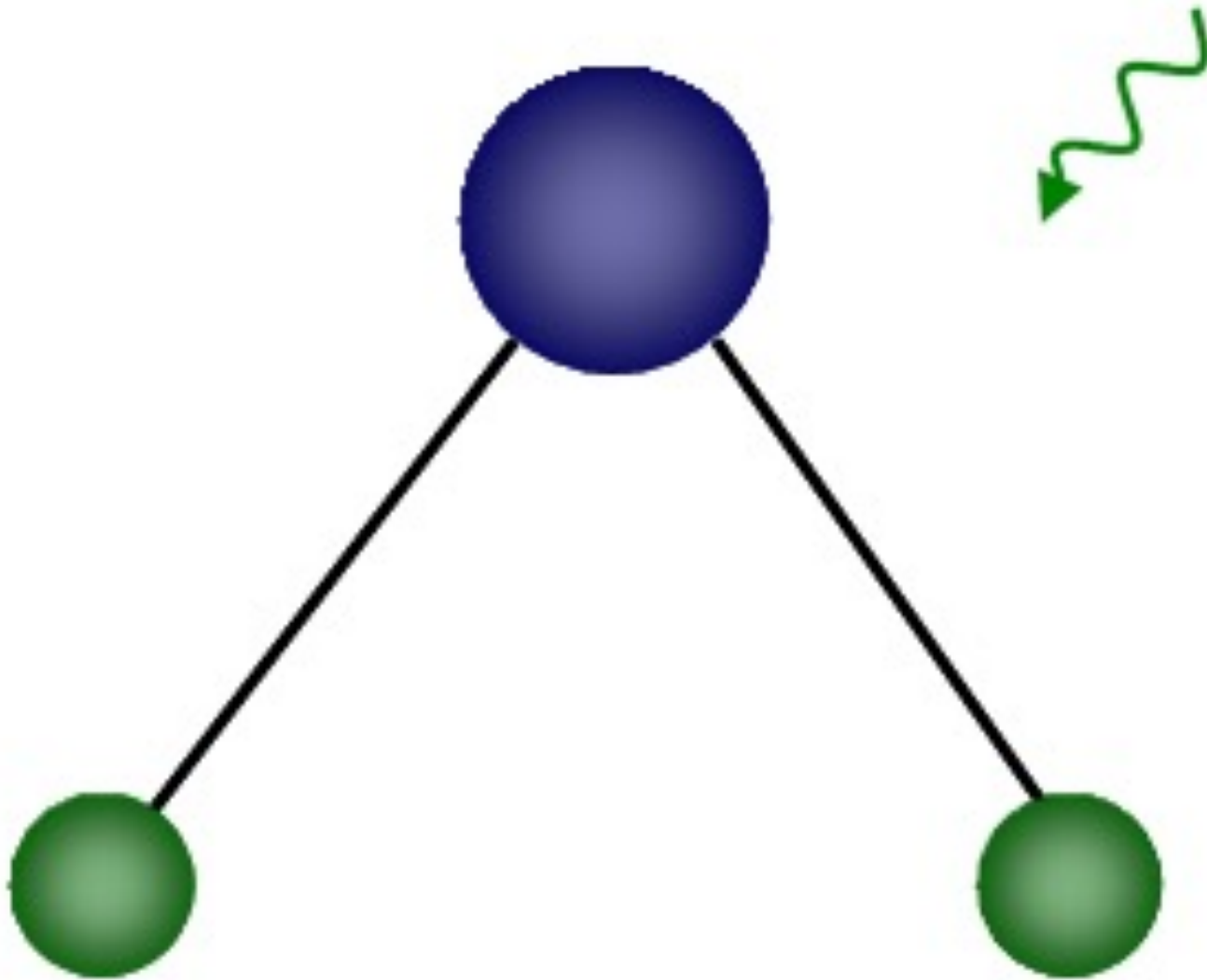


# Histoire de l'effet de serre

- **1780 : Horace-Bénédict de Saussure** mesure les effets thermiques du rayonnement solaire (Héliothermomètre)
- **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



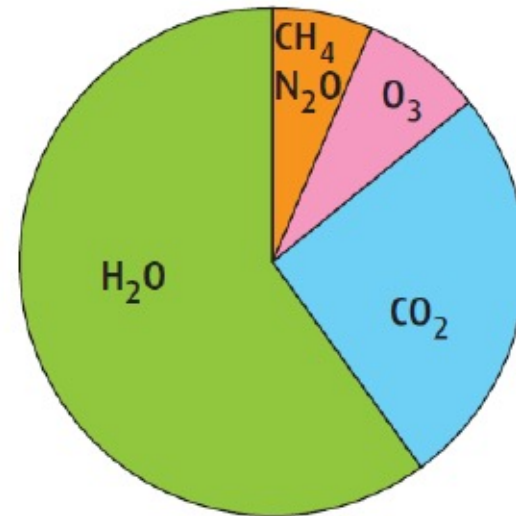
# Principe de l'effet de serre



# Principaux gaz à effet de serre

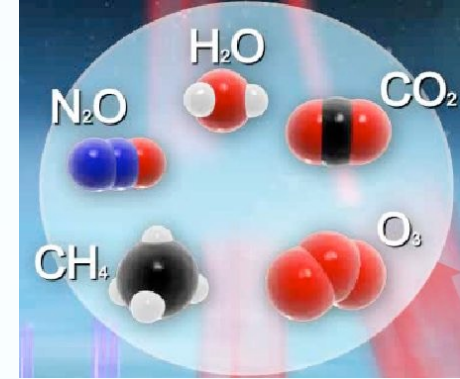
## Effet de serre ciel clair

	(W.m <sup>-2</sup> )	(%)
Vapeur d'eau	75	60 %
CO <sub>2</sub>	32	26 %
Ozone	10	8 %
N <sub>2</sub> O + CH <sub>4</sub>	8	6 %
Total ciel clair	125	100 %

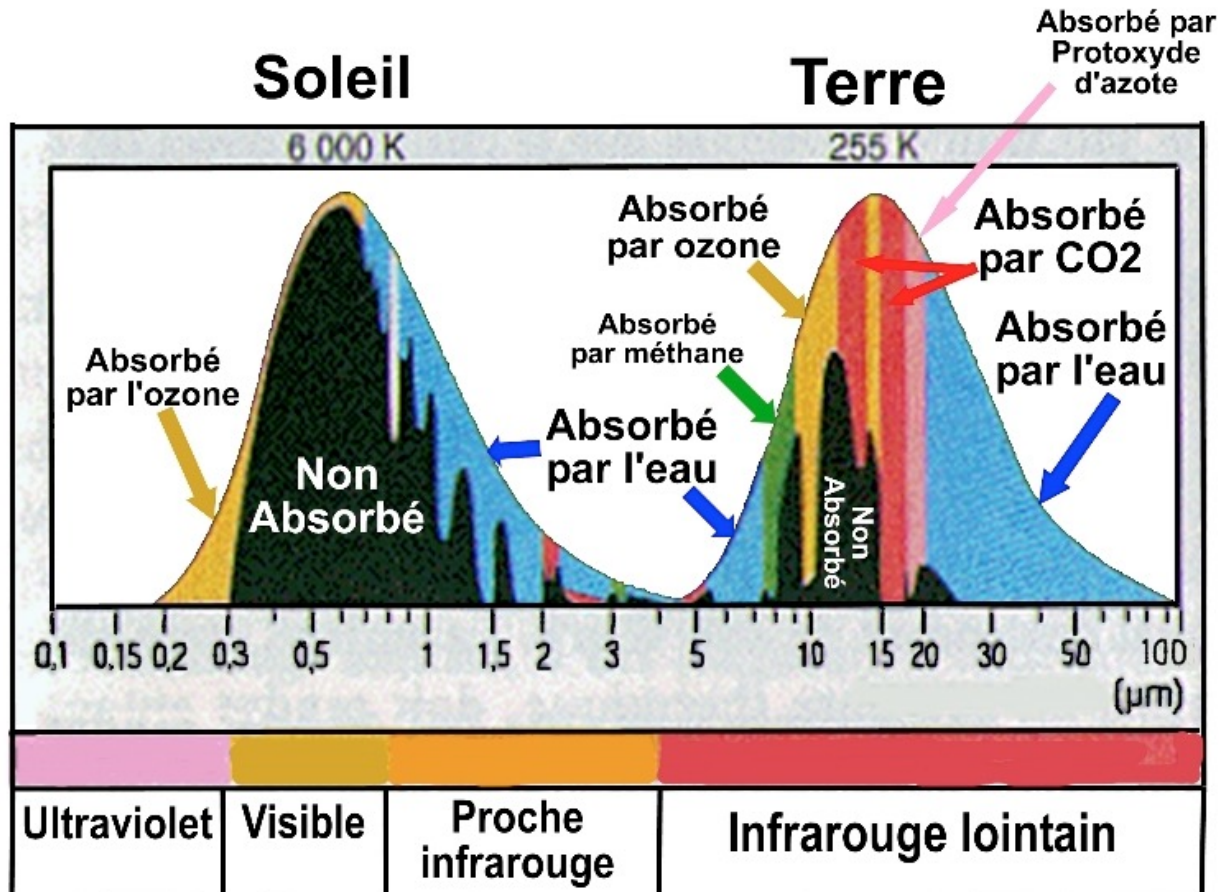


Dufresne et Treinier,  
La Météorologie

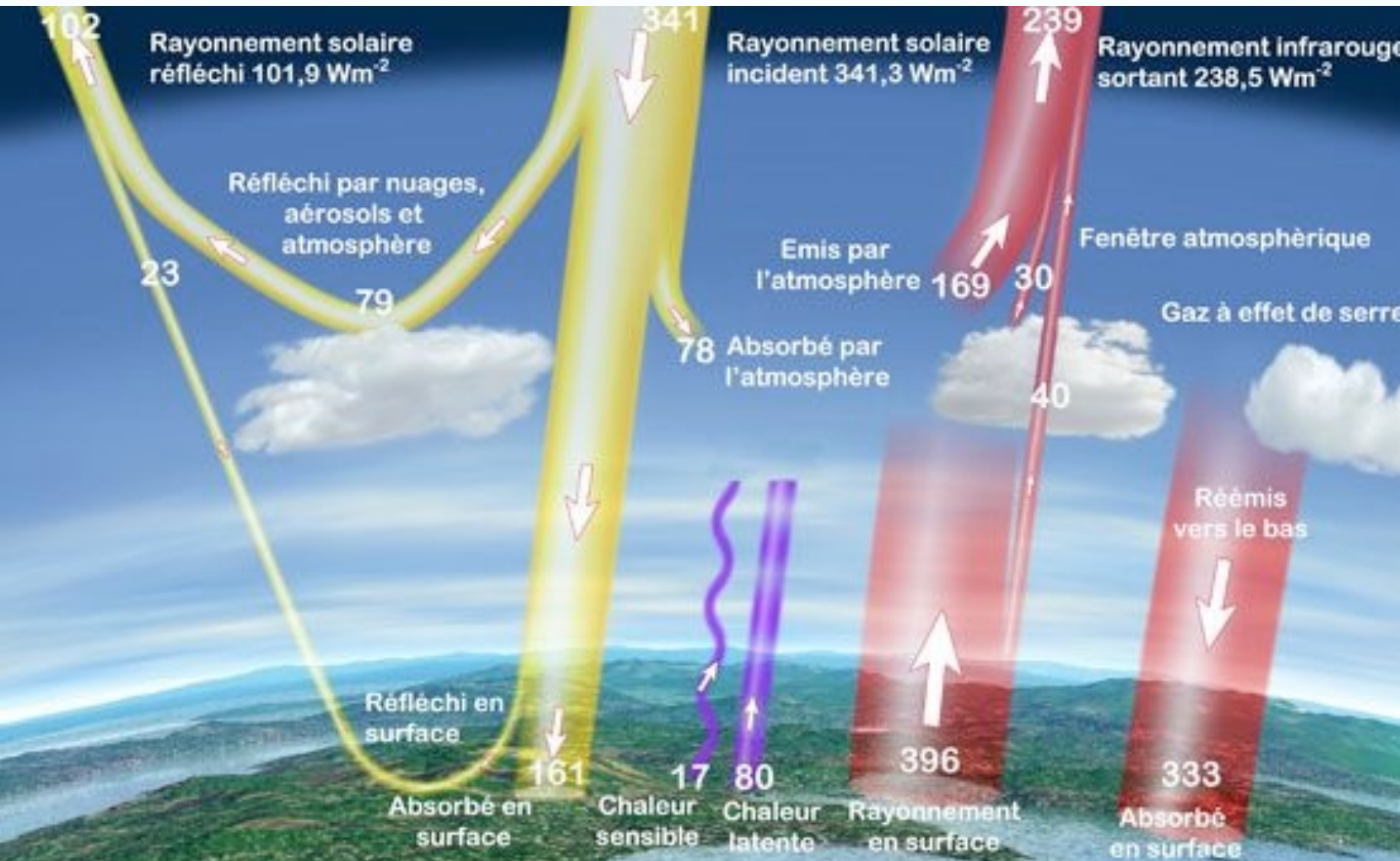
# Gaz à effet de serre



## Spectre d'absorption du rayonnement thermique



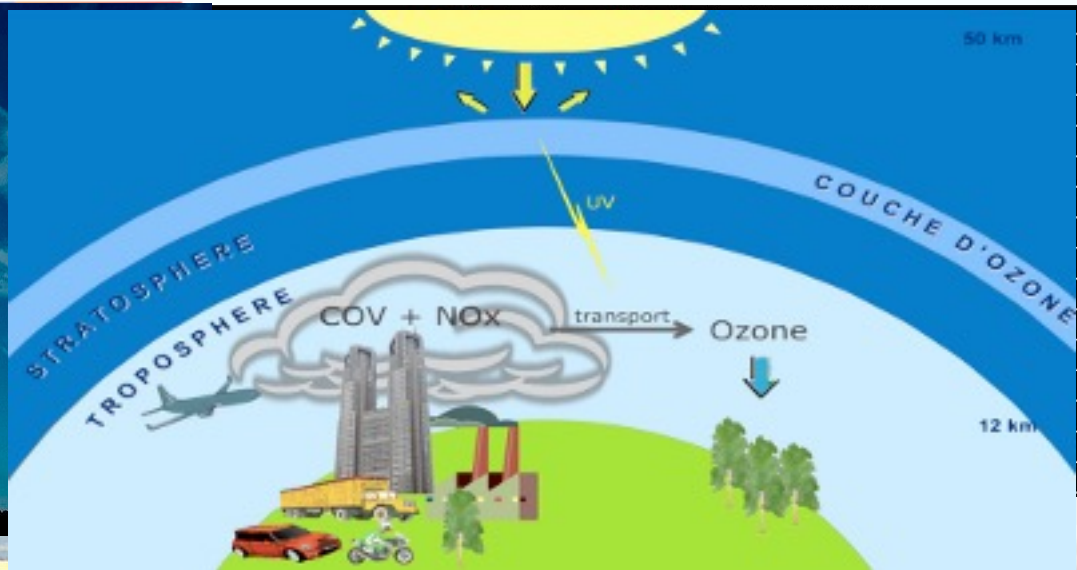
# Bilan radiatif "réel"





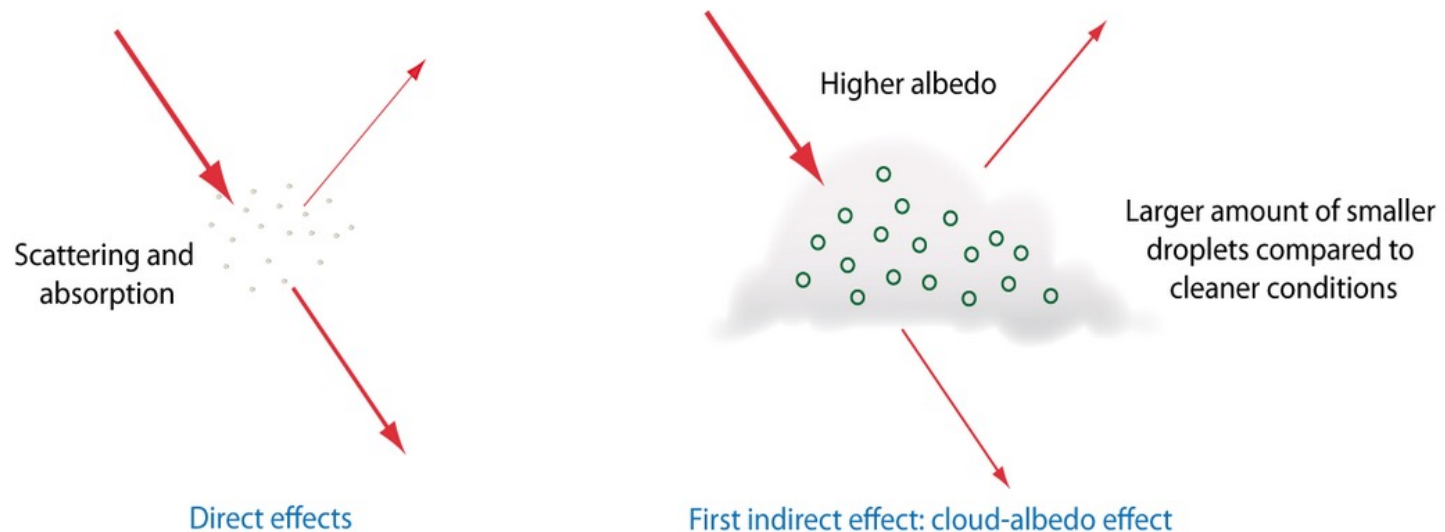
# Différents forçages climatiques

Volcans,  
aerosols,



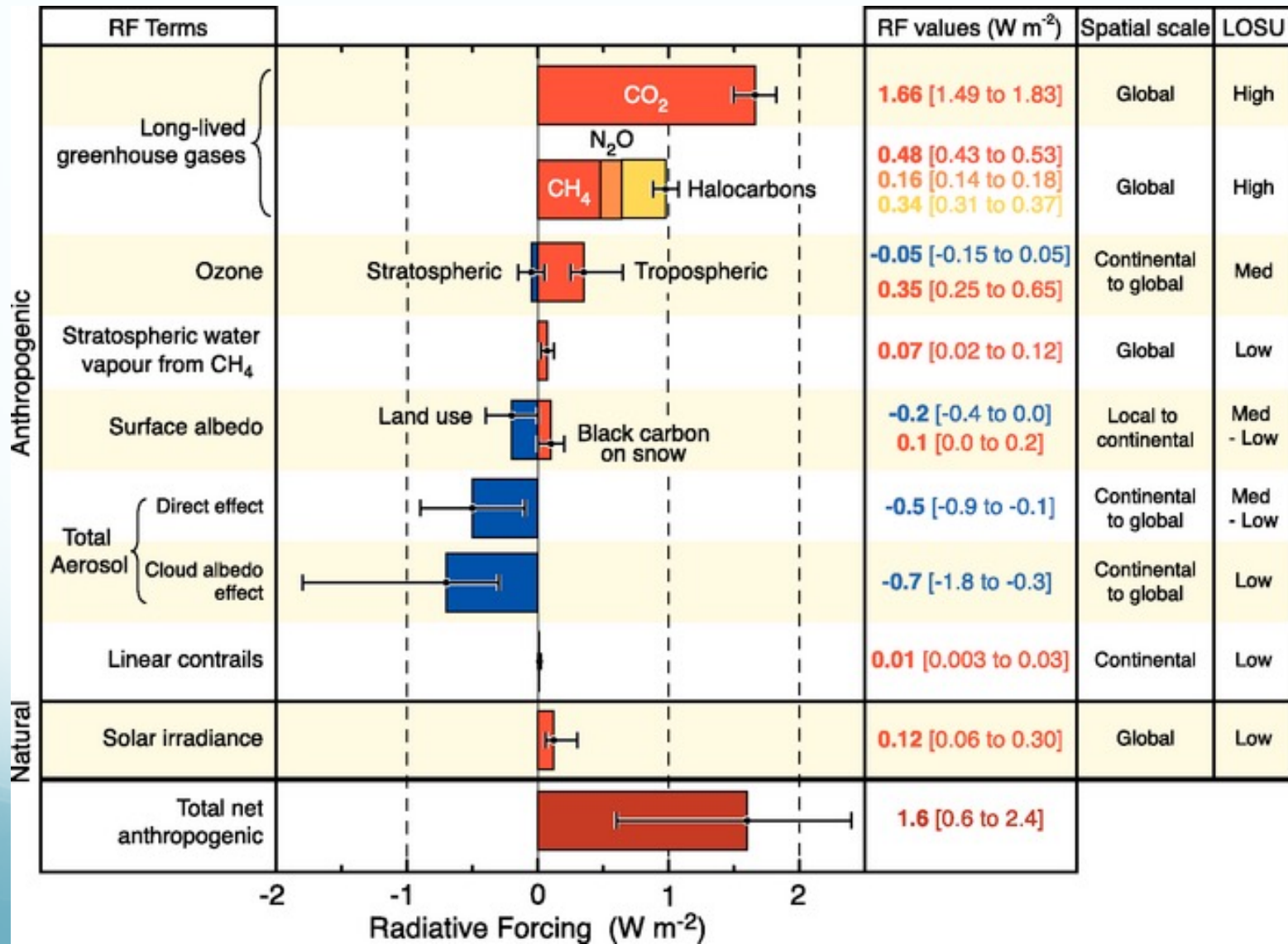
# L'effet particulier des aérosols

- ▶ Effet *direct* : diffusion (−) & absorption (+) du rayonnement solaire. Signe dépend du type d'aérosol, mais dans l'ensemble, forçage (−).
- ▶ 1<sup>er</sup> effet *indirect* : noyaux de condensation pour nuages (−).



Source : Goosse et al. [online](#) textbook.

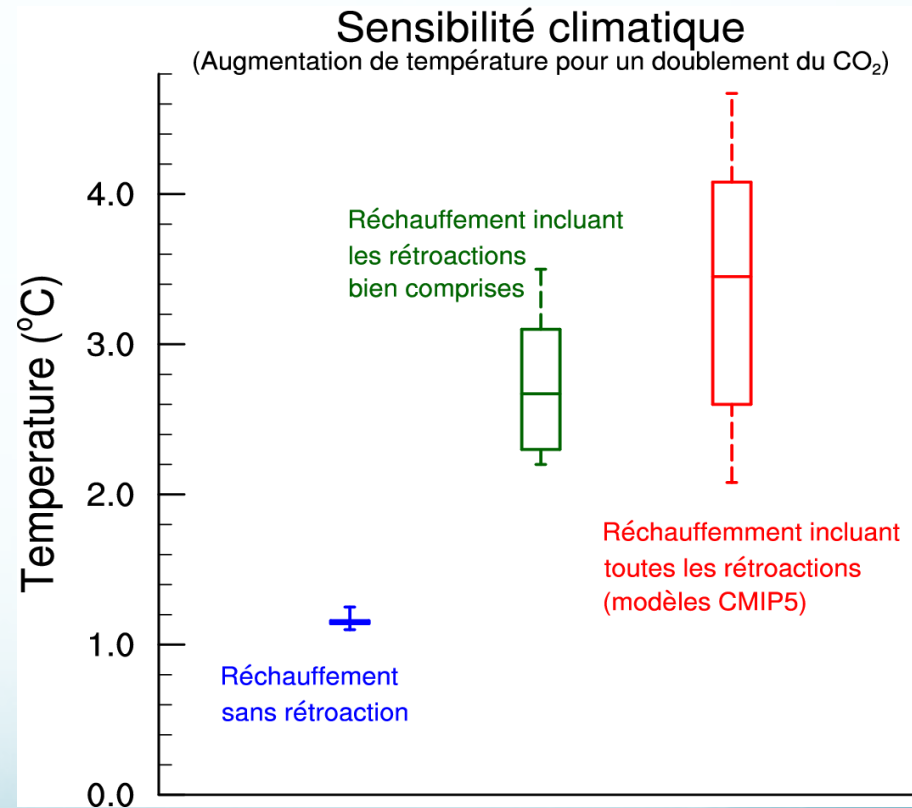
# Changement de forçage externe (100 dernières années)





# 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

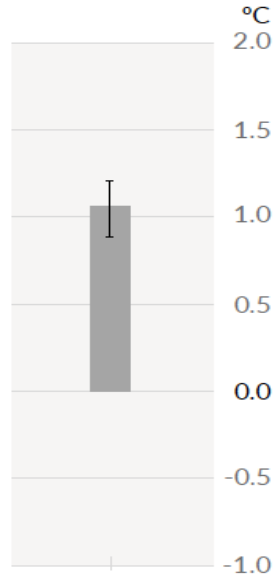




# Observed warming is driven by emissions from human activities, with greenhouse gas warming partly masked by aerosol cooling

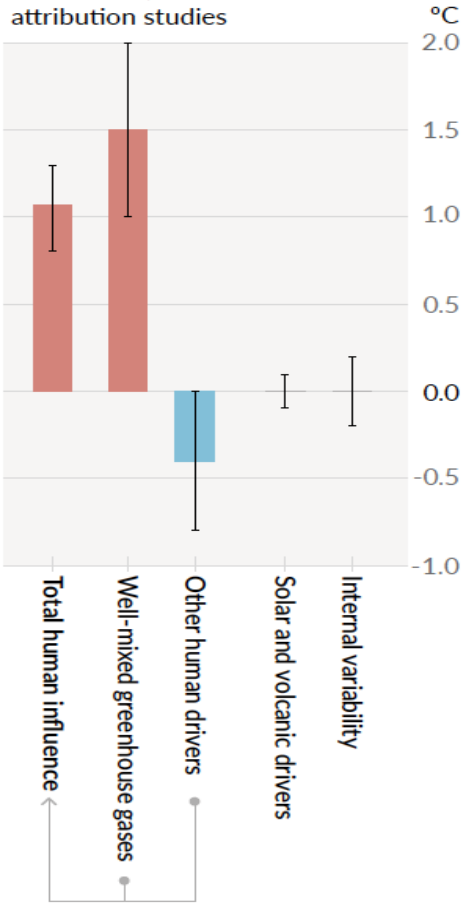
## Observed warming

a) Observed warming 2010-2019 relative to 1850-1900

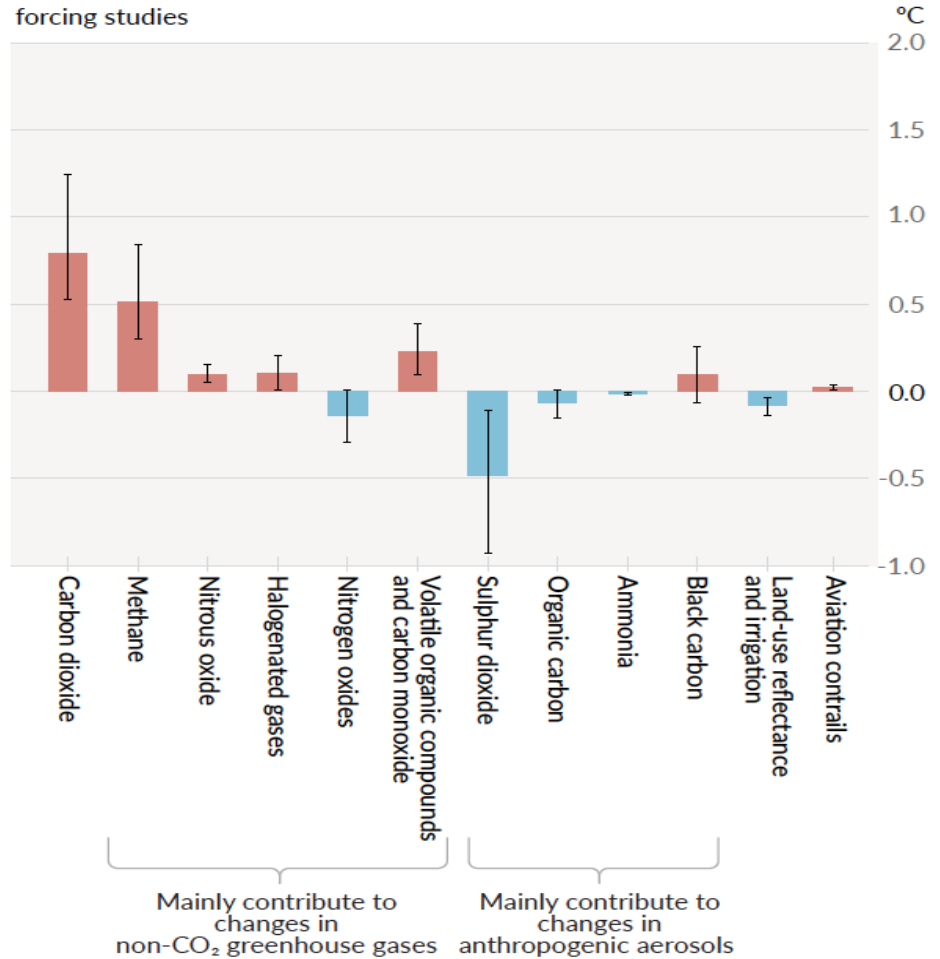


## Contributions to warming based on two complementary approaches

b) Aggregated contributions to 2010-2019 warming relative to 1850-1900, assessed from attribution studies

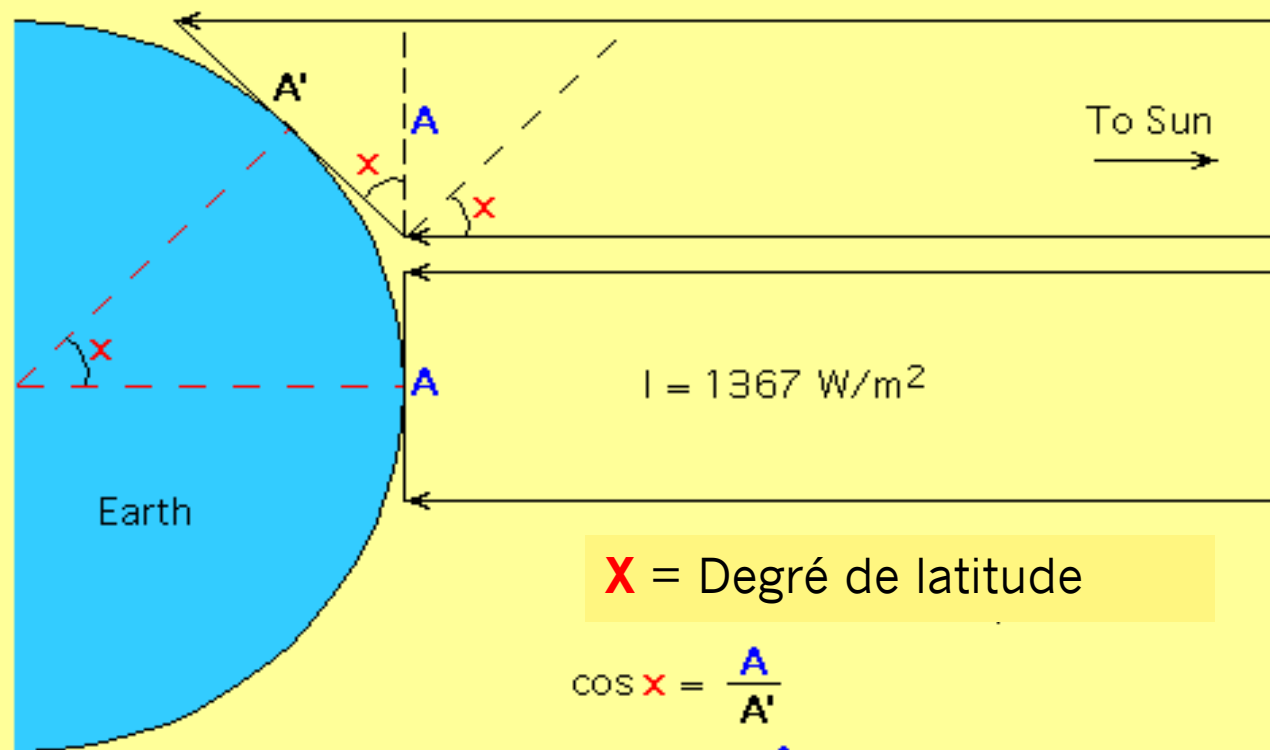


c) Contributions to 2010-2019 warming relative to 1850-1900, assessed from radiative forcing studies



# Pour sortir de l'approche à une dimension !

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

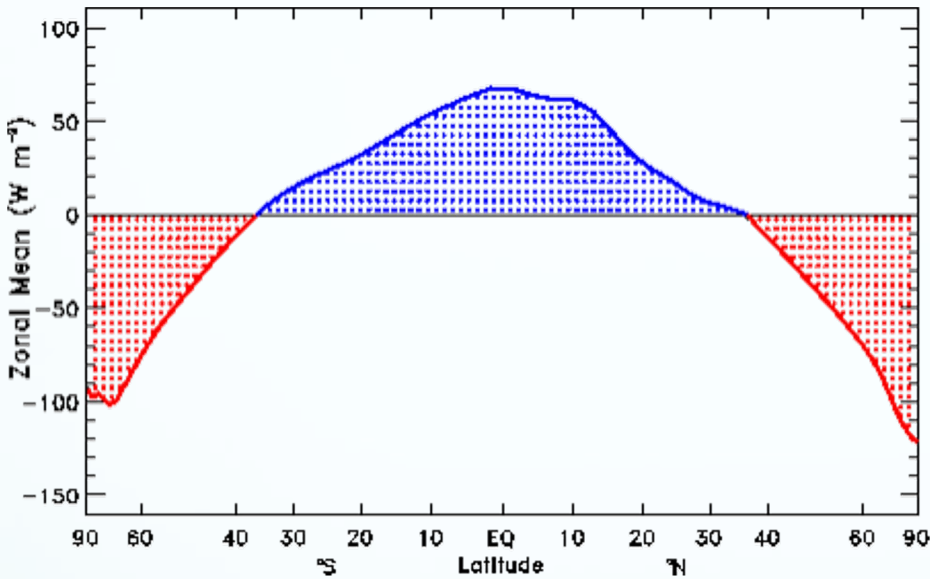


$x$  = Degré de latitude

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

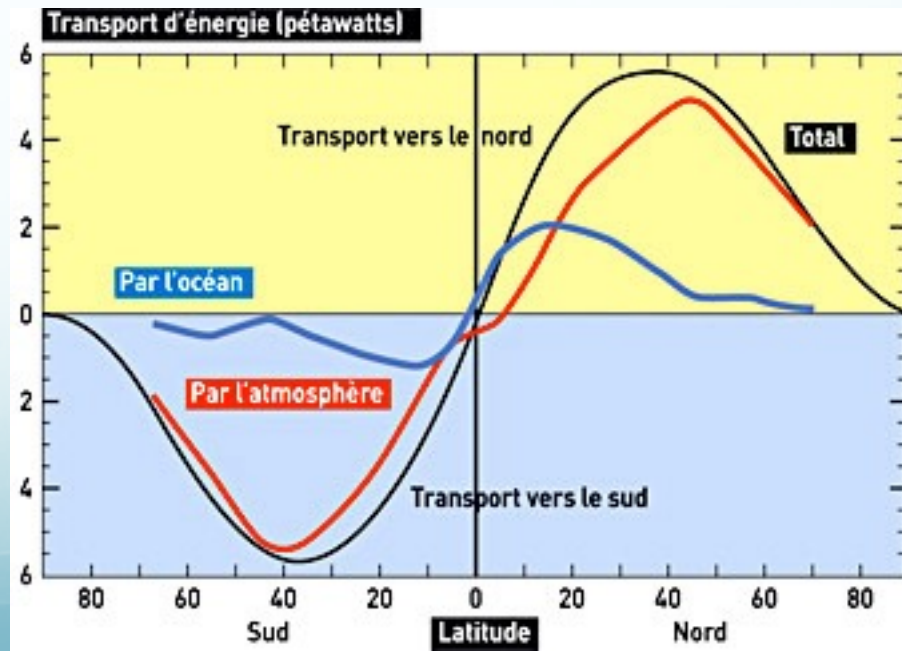
$$A' = \frac{A}{\cos x}$$

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

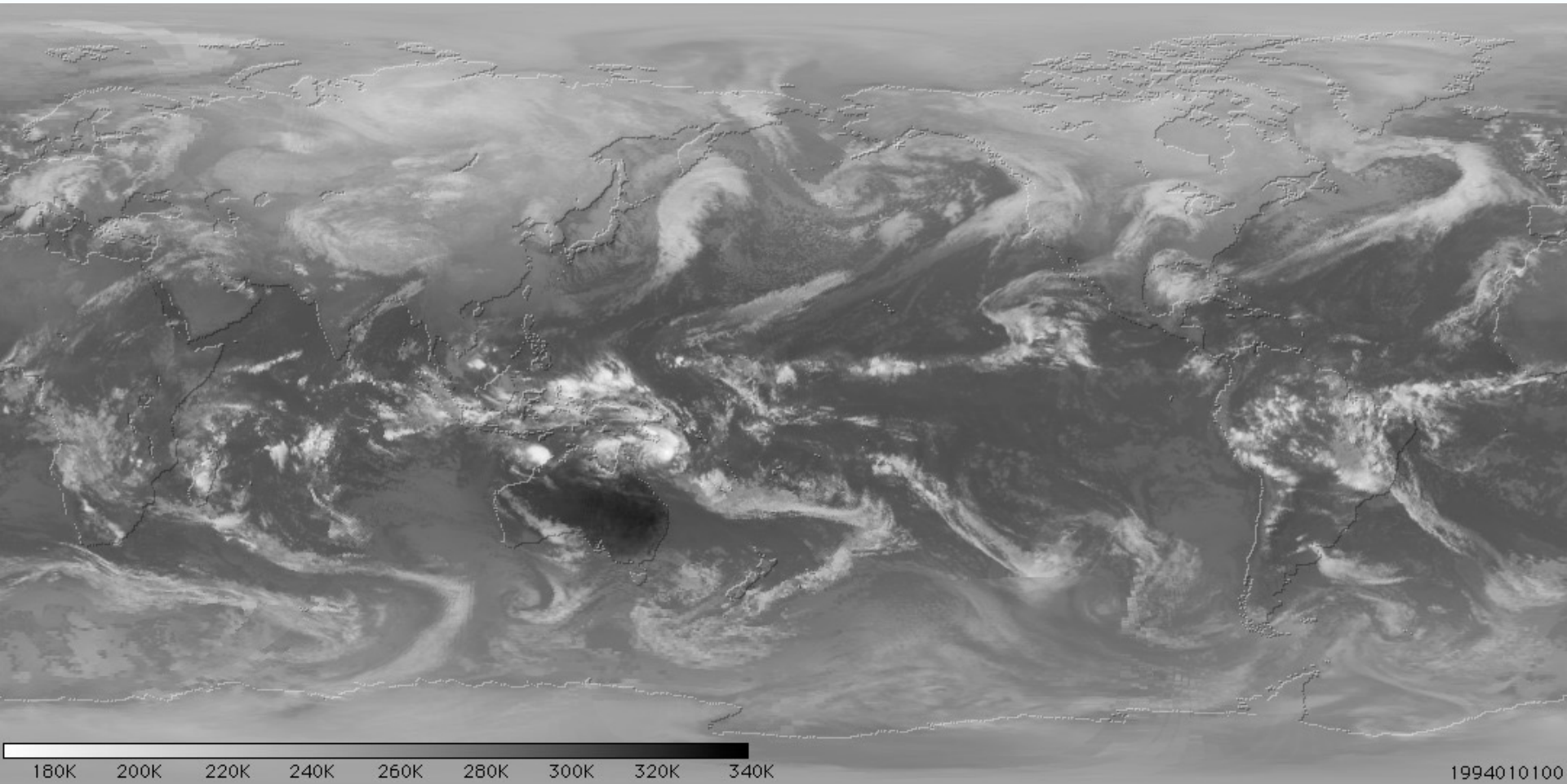


Transport vers le Nord par l'atmosphère et par l'océan (PW)

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



# Circulation atmosphérique

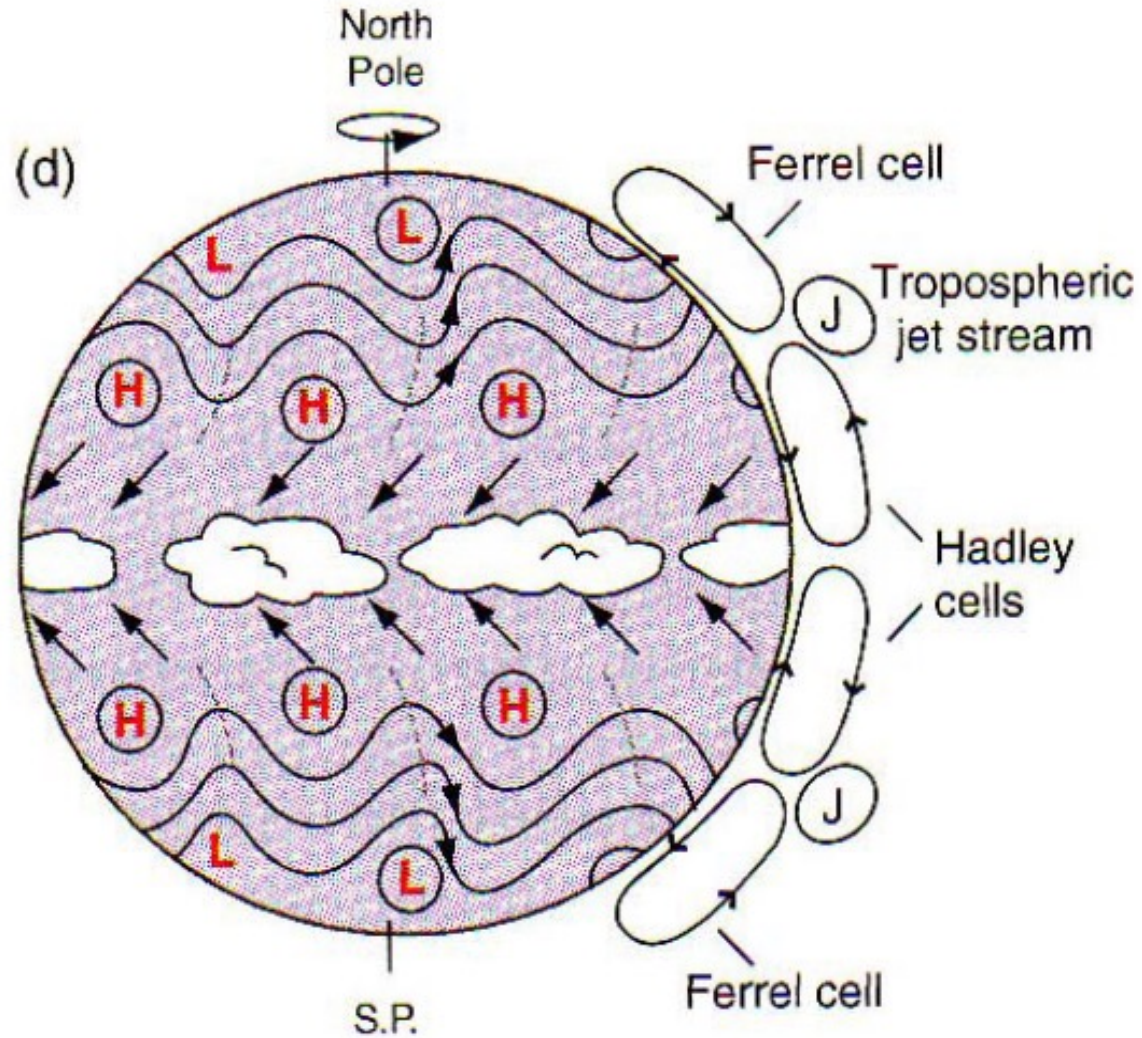


180K 200K 220K 240K 260K 280K 300K 320K 340K

1994010100



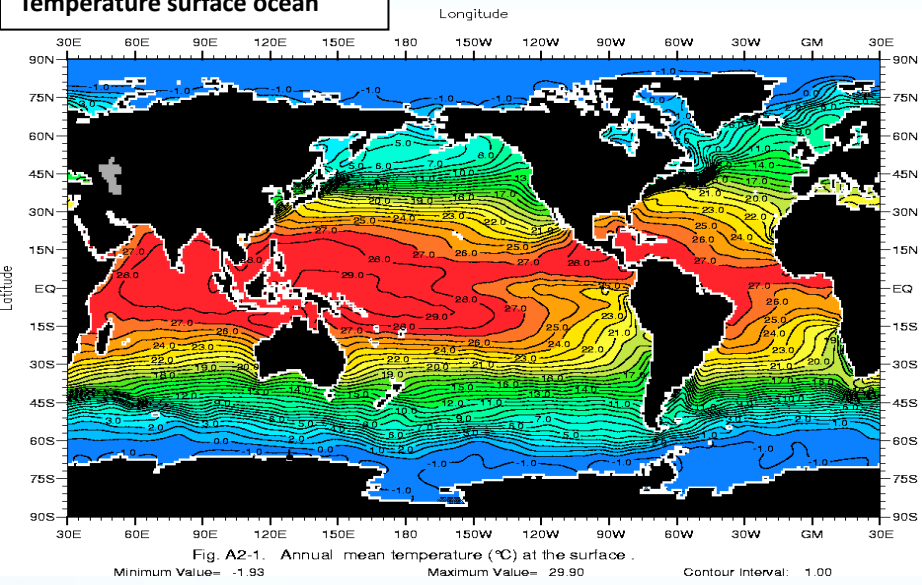
# Circulation atmosphérique



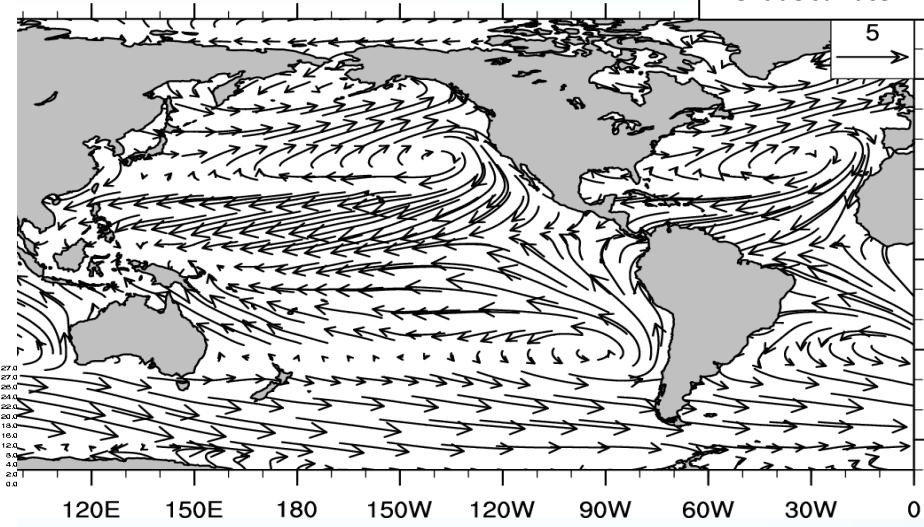
# Circulation océanique

# Circulation océanique

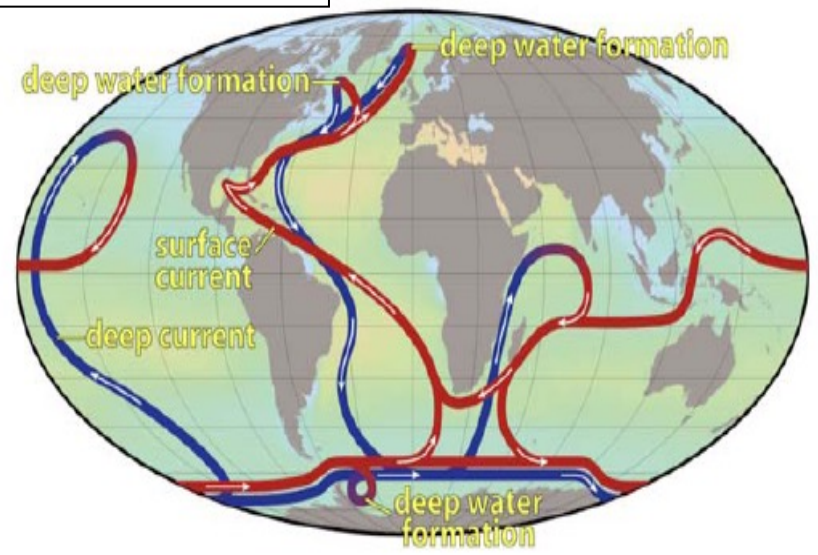
Température surface océan



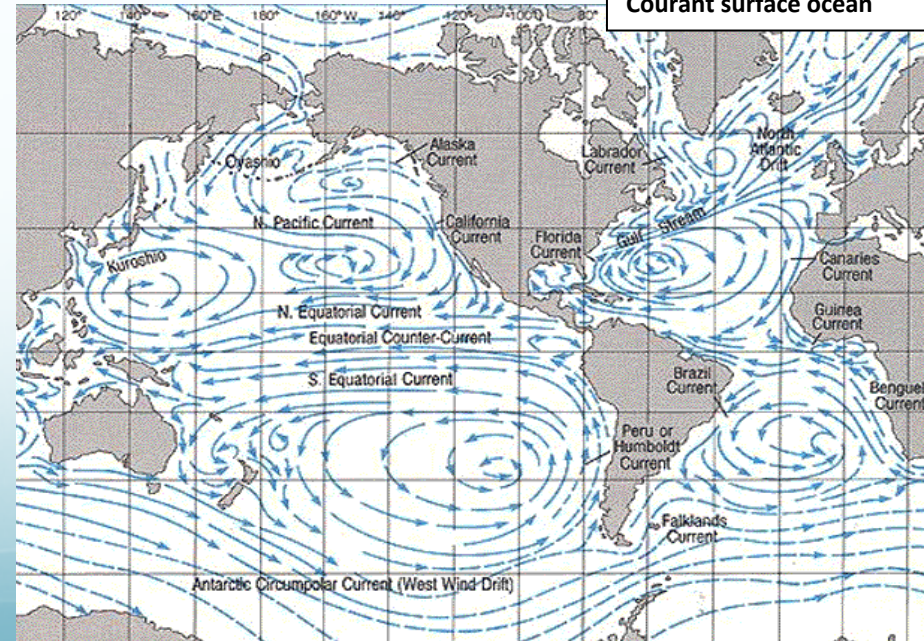
Vent de surface



Circulation thermohaline

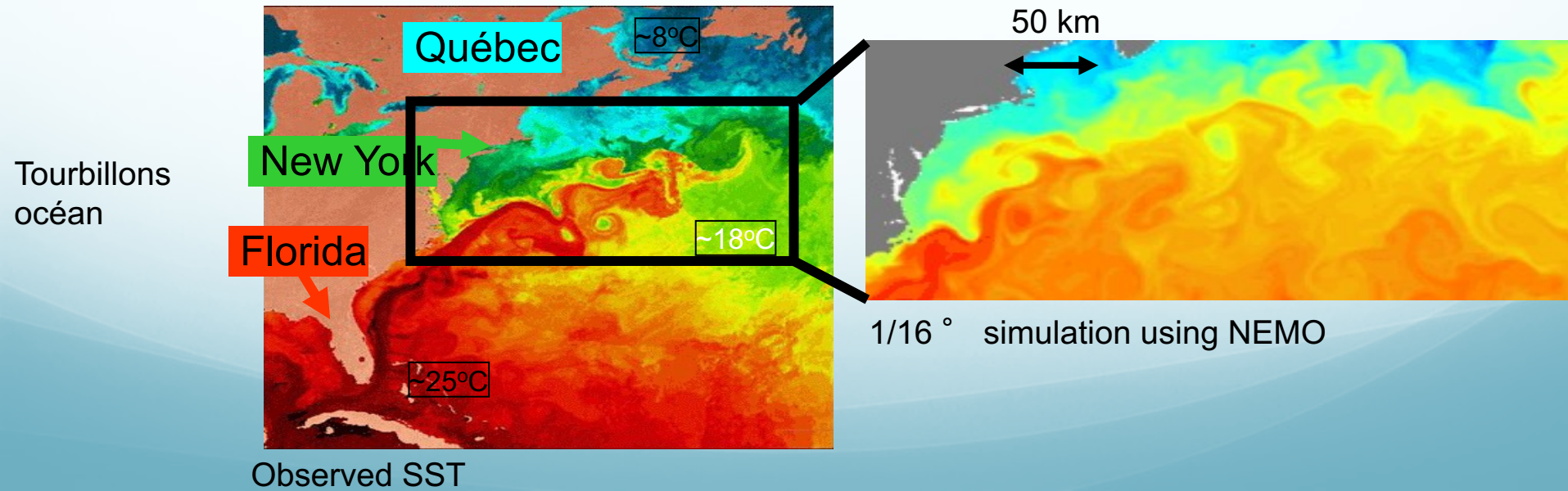
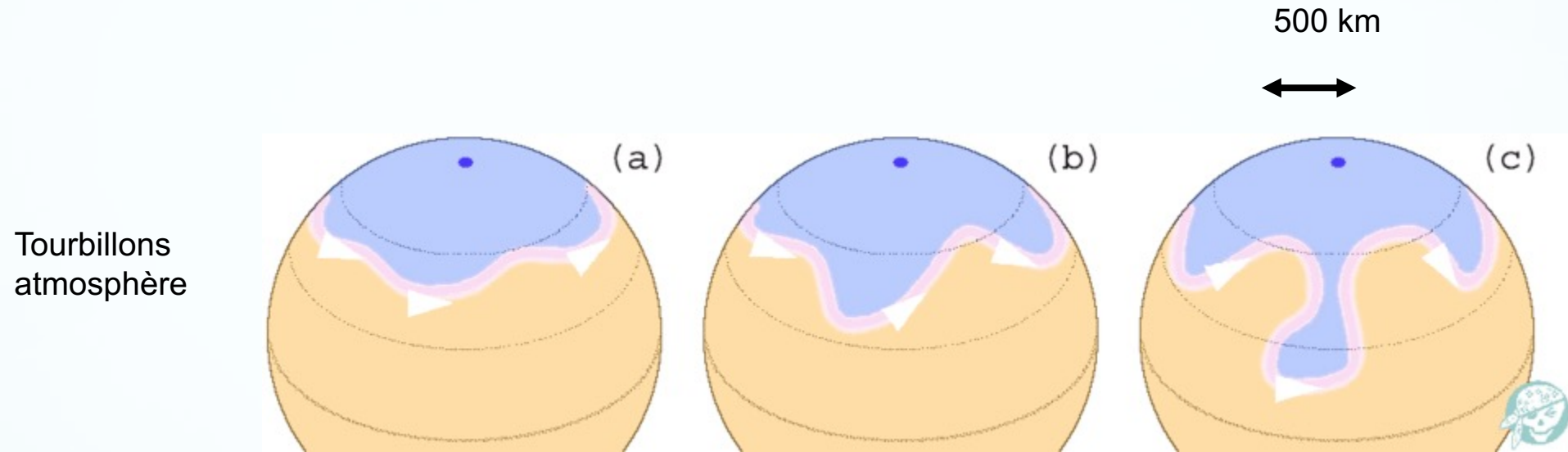


Courant surface océan



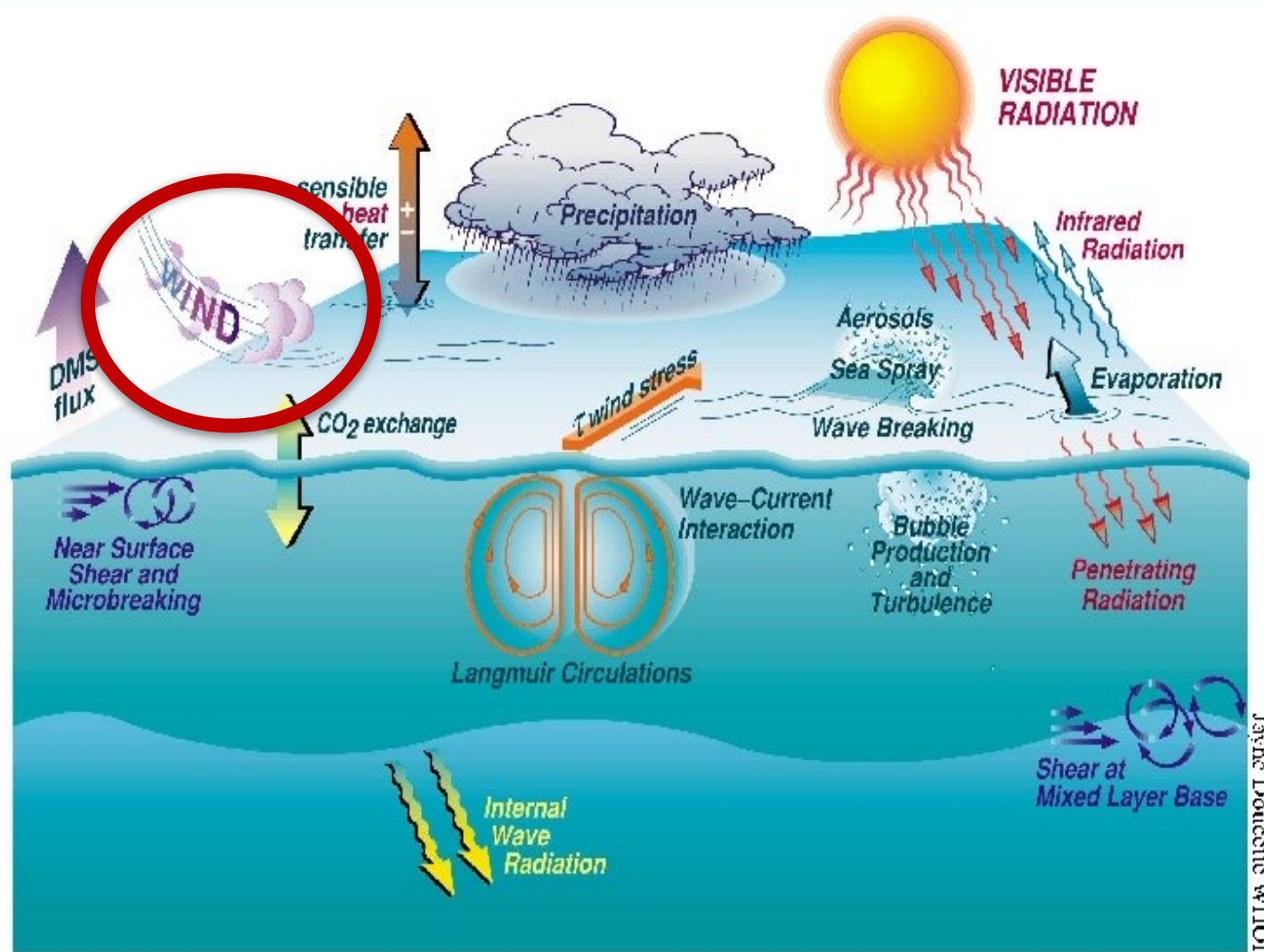


# Différentes tailles d'instabilités



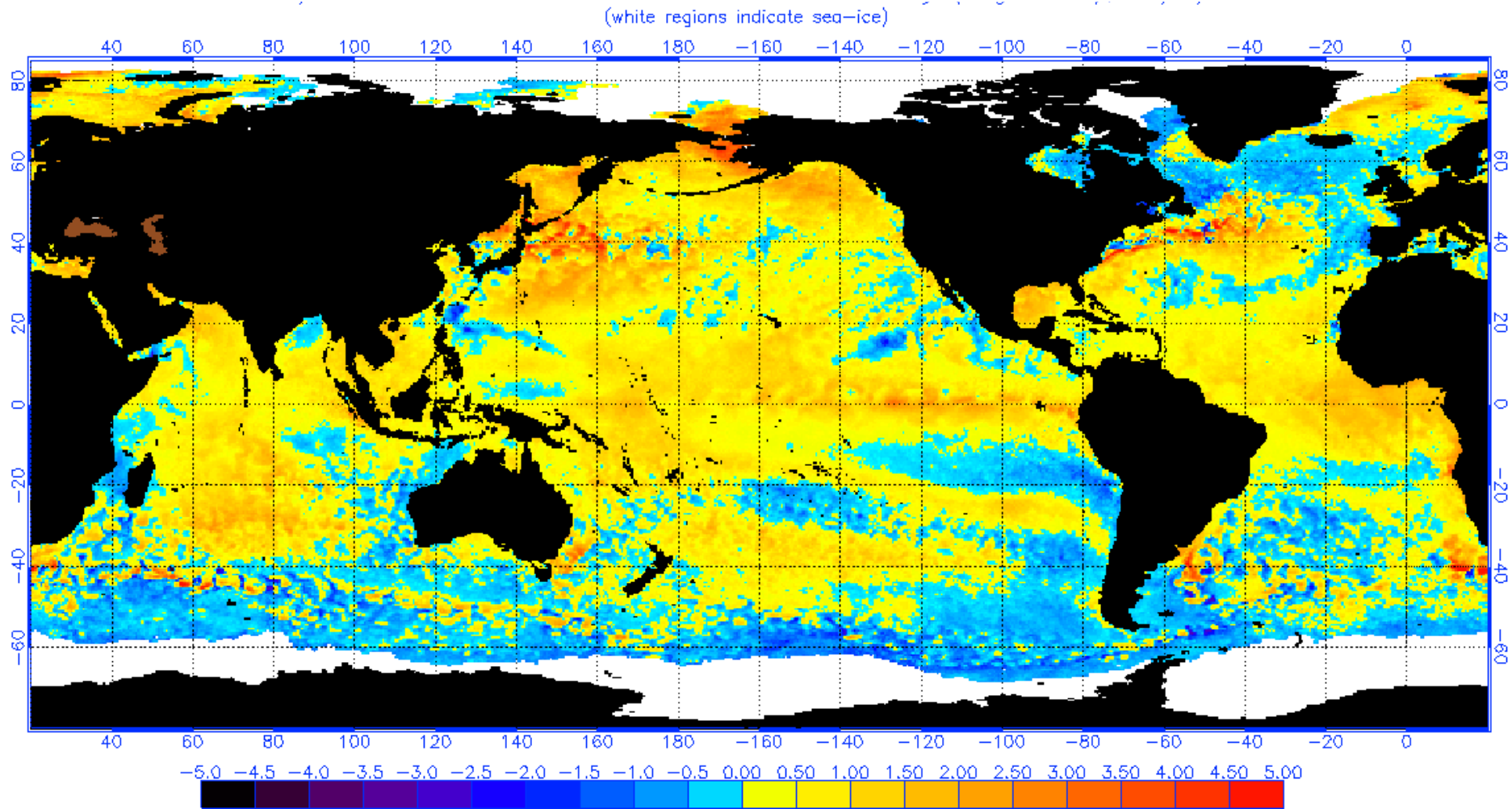


# Interactions océan-atmosphère



# La température de surface du mois d'Octobre 2018

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



# Plan du cours

- Définition du climat
- Equilibre énergétique du système Terre
- Principaux modes de la variabilité climatique
- Qu'est ce qu'un modèle de climat ?
- Utilité des modèles de climat : quelques applications

# Quelques grands modes de variabilité climatique

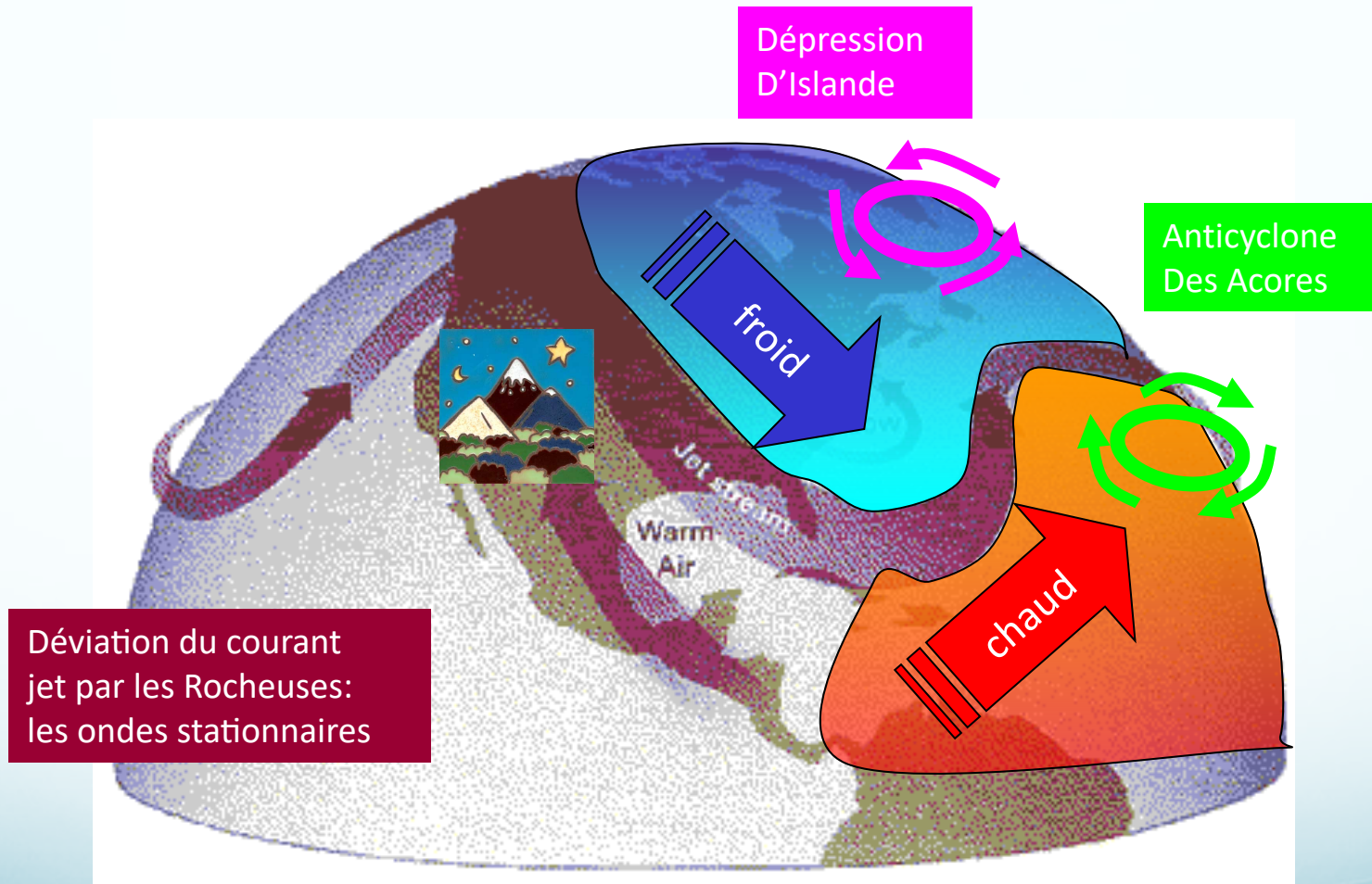
- Oscillation Nord Atlantique : NAO
- Oscillation El Nino : ENSO
- Variabilité multi-décennale atlantique : AMV
- Oscillation décennale Pacifique : PDO



# Quelques grands modes de variabilité climatique

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

# Les ondes stationnaires

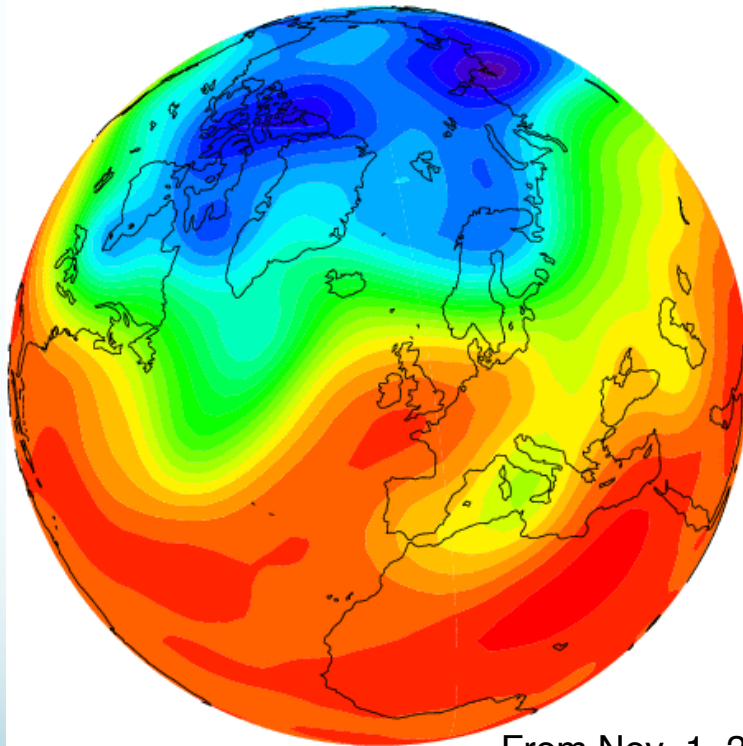


Les ondes stationnaires associées à la présence de massifs montagneux expliquent en grande partie l'asymétrie zonale entre les bords Ouest et Est du bassin Atlantique.

# Variations de pression en Atlantique

Geopotentiel à 500 millibars

20071101



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

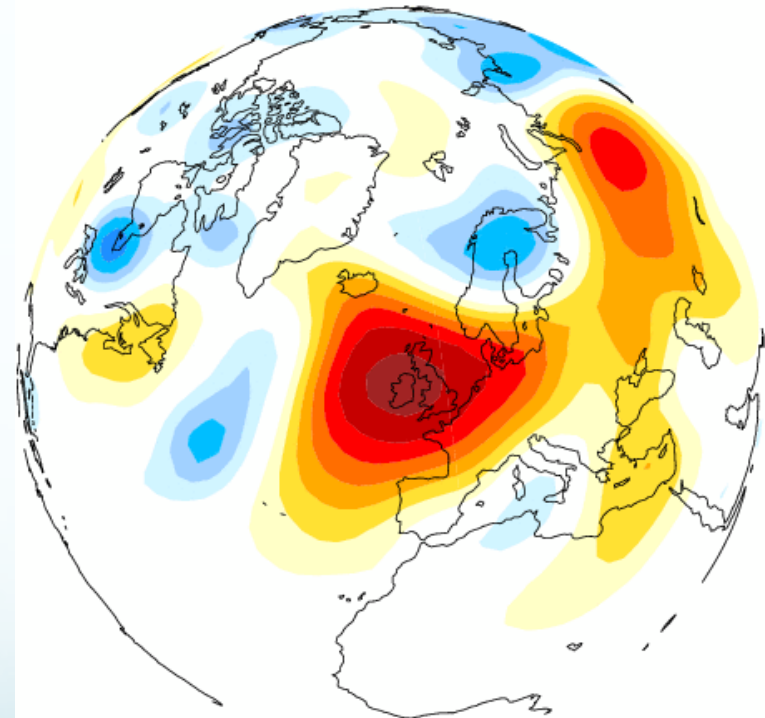
Meter



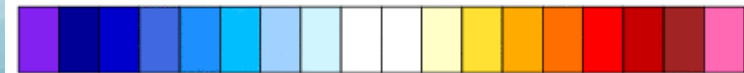
4850 4970 5090 5210 5330 5450 5570 5690 5810 5930

Anomalies de Geopotentiel

20071101



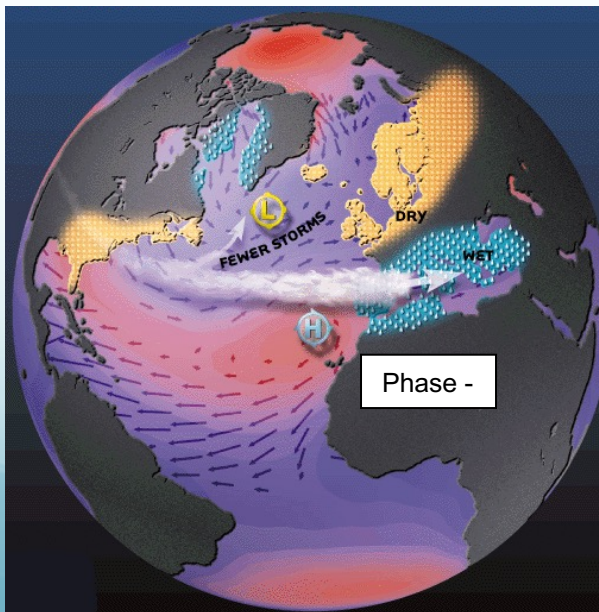
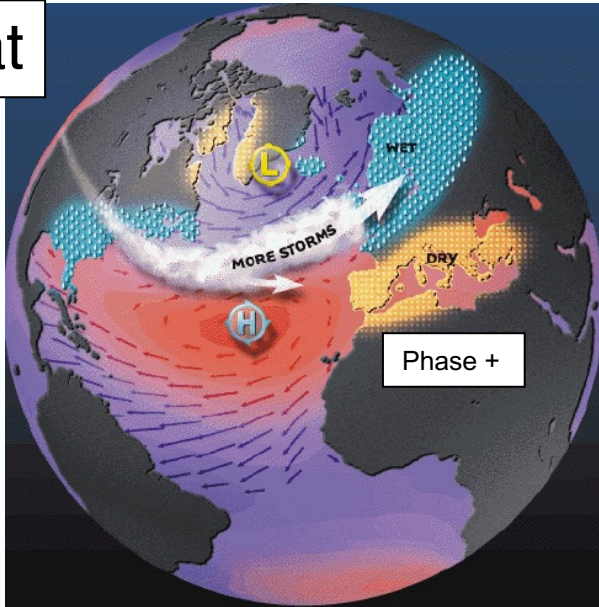
Meter



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

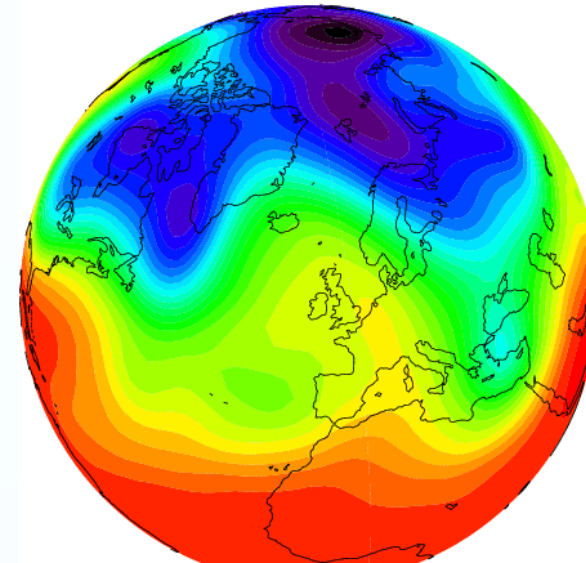
# L'oscillation Nord Atlantique (NAO)

Climat



Blocking

20080218

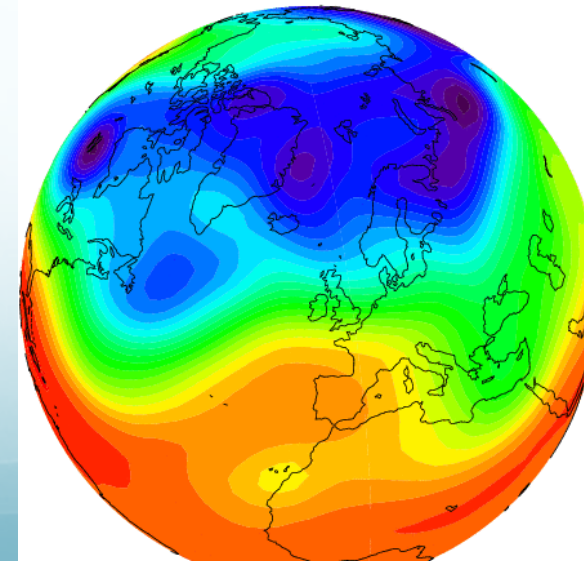


Météo

Déferlement anticyclonique

NAO-

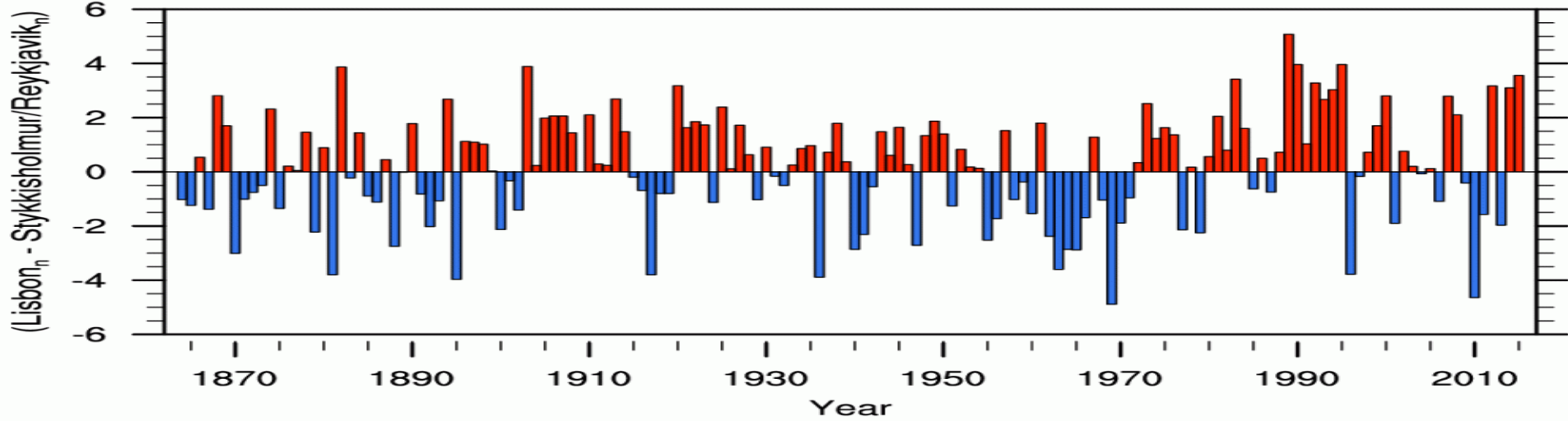
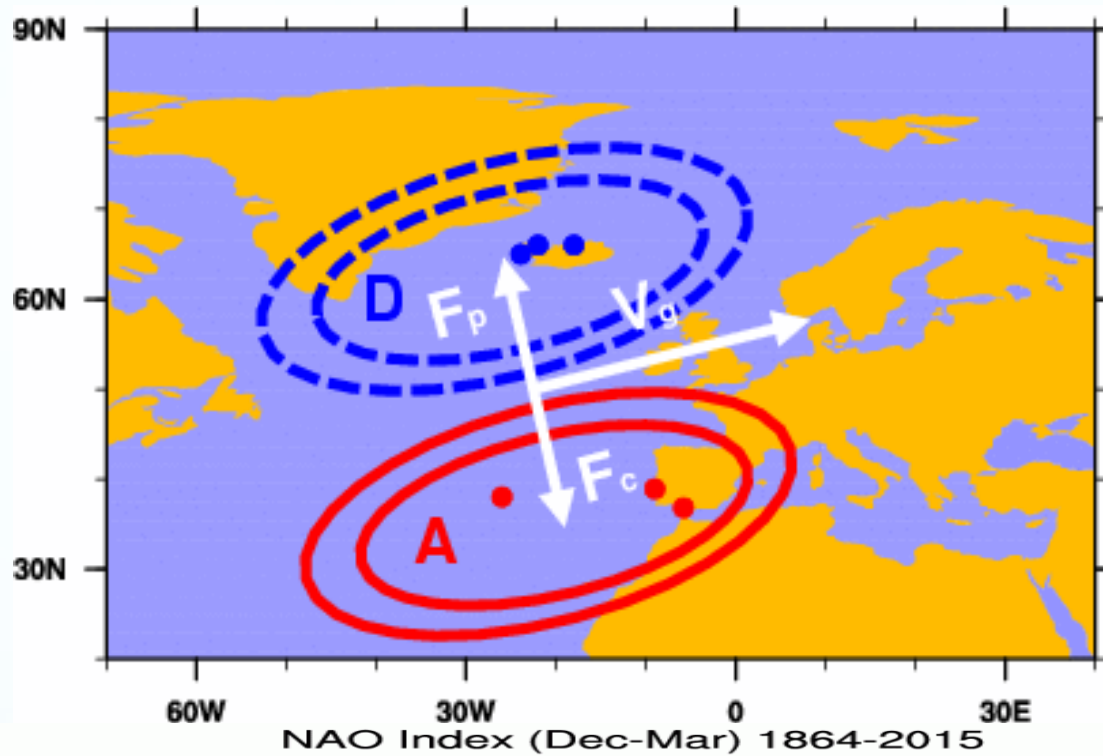
19850131



Déferlement cyclonique



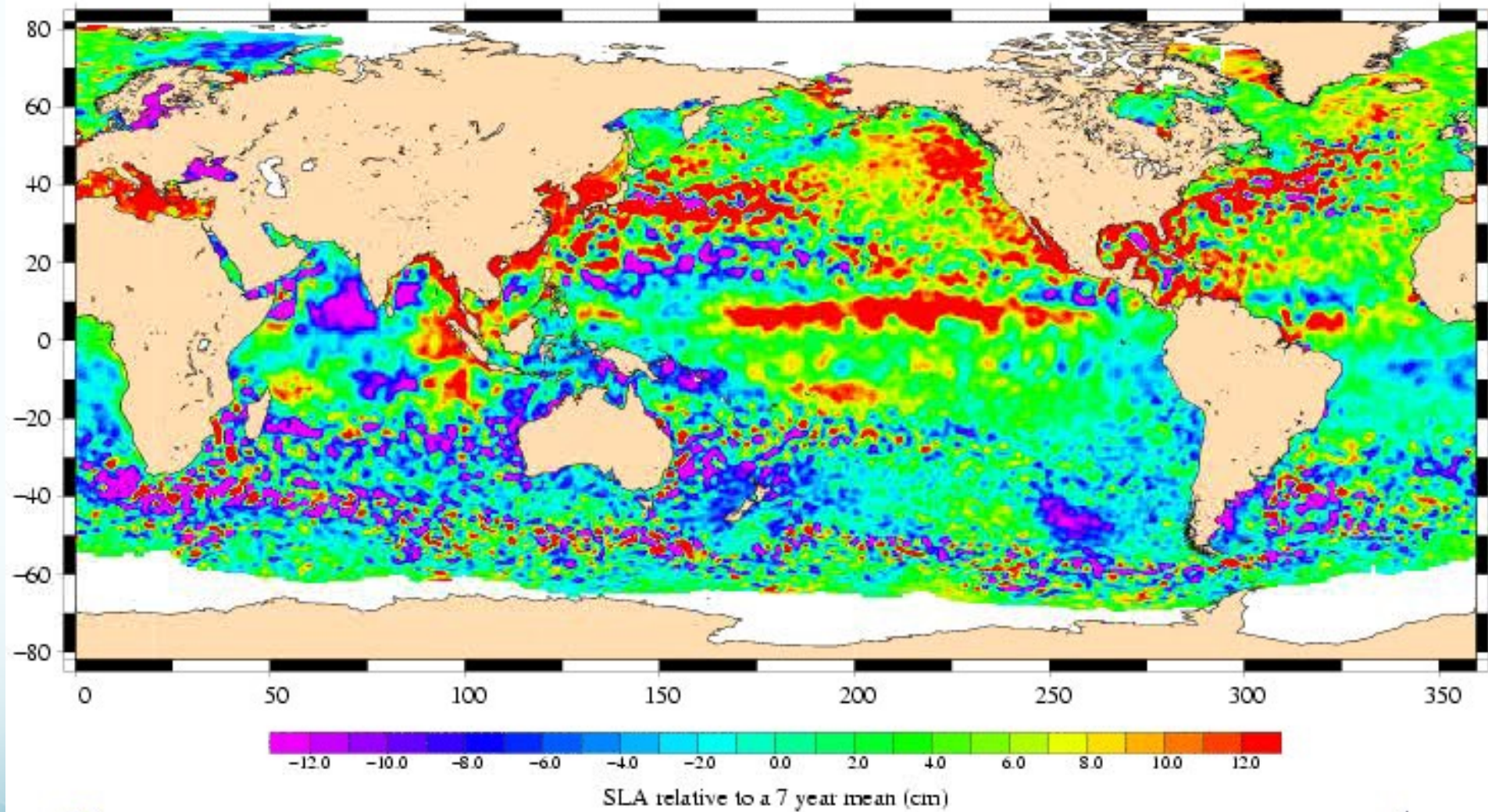
# Explication physique de la NAO



# Quelques grandes modes de variabilité climatique

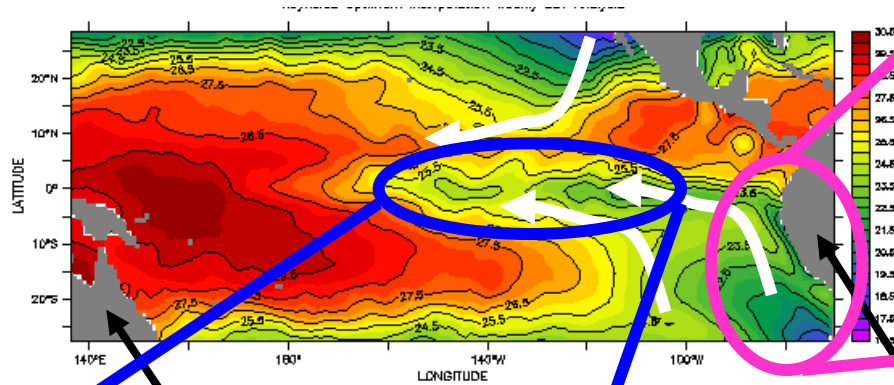
- Oscillation Nord Atlantique : NAO
- Oscillation El Nino : ENSO
- Variabilité multi-décennale atlantique : AMV
- Oscillation décennale Pacifique : PDO

1992/10/14



# Conditions normales dans le Pacifique

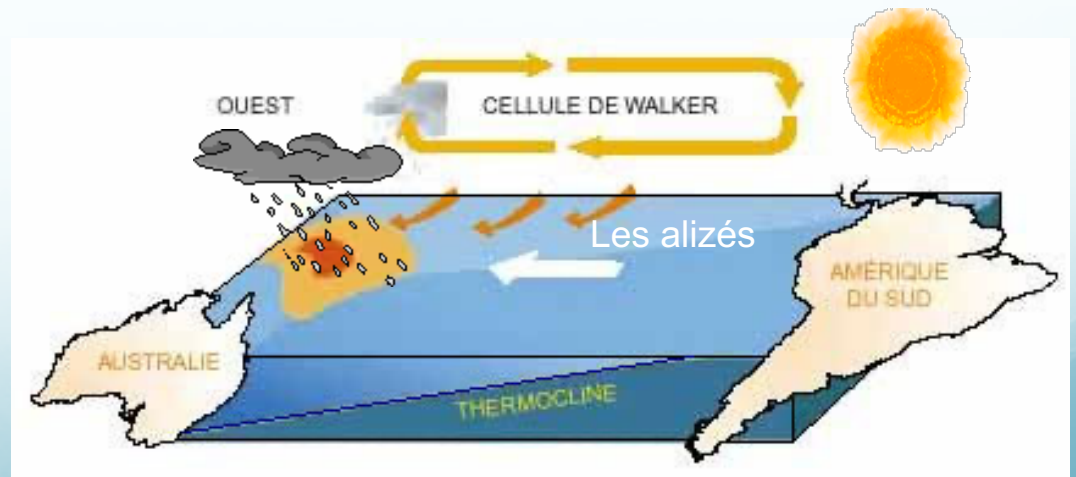
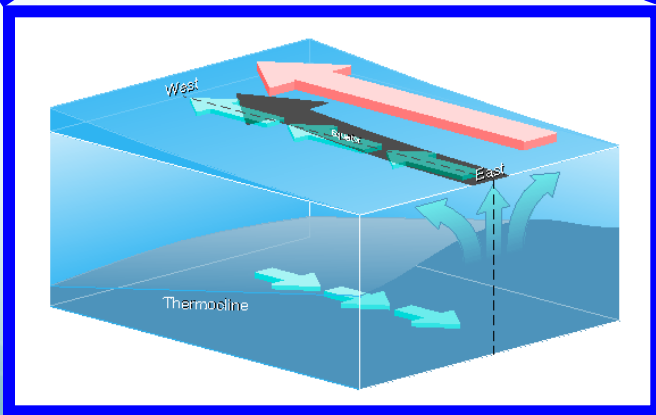
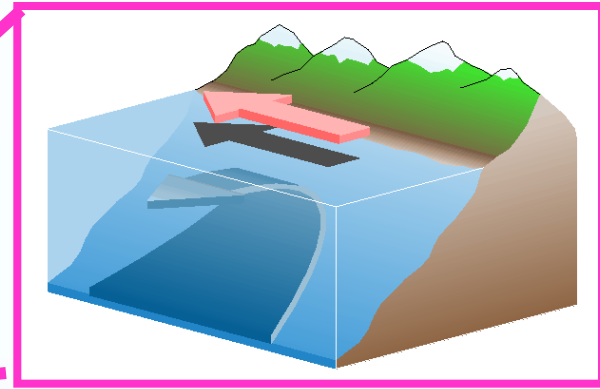
## Température de surface



Weekly Means of SST (deg C)

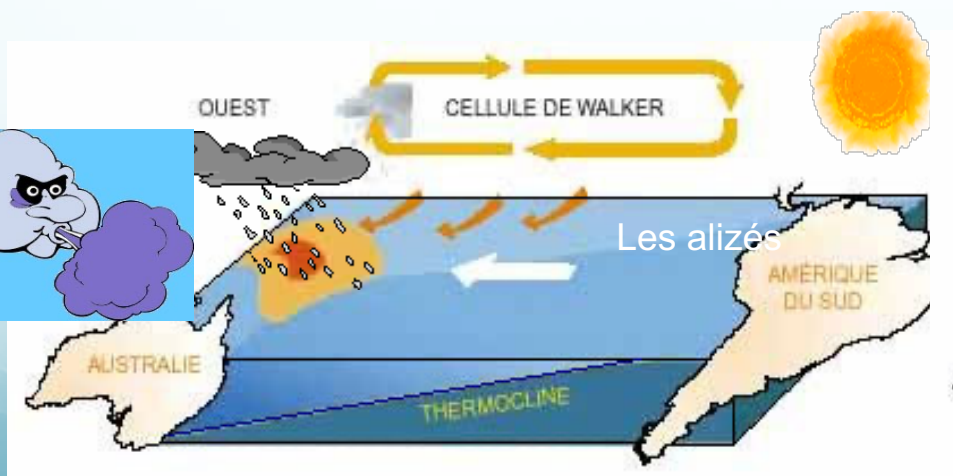
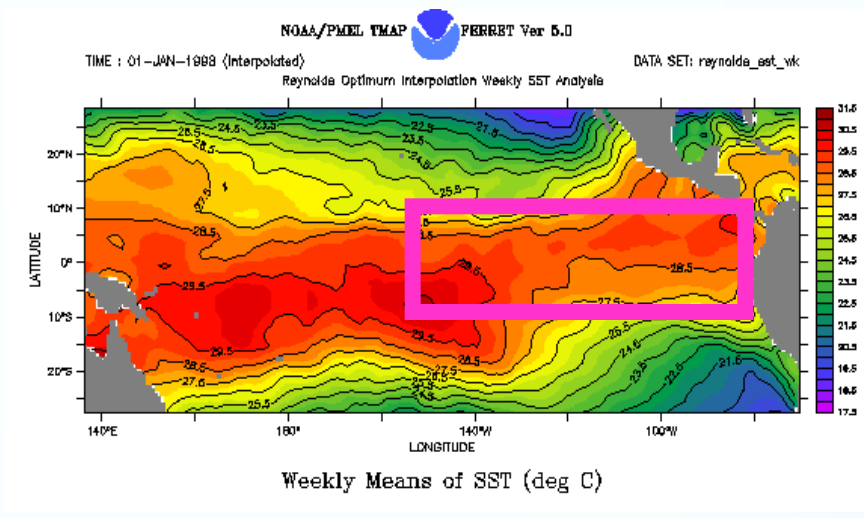
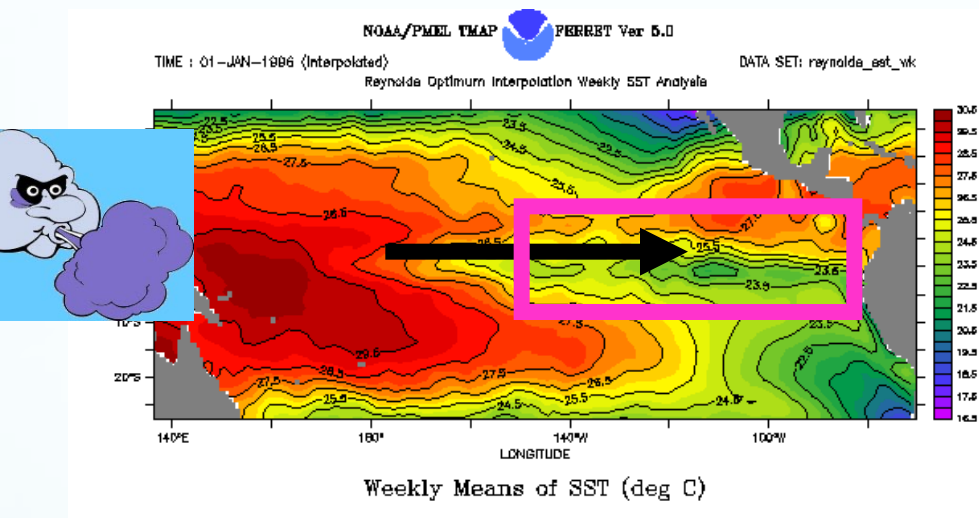
**Australie**

**Amérique du Sud**

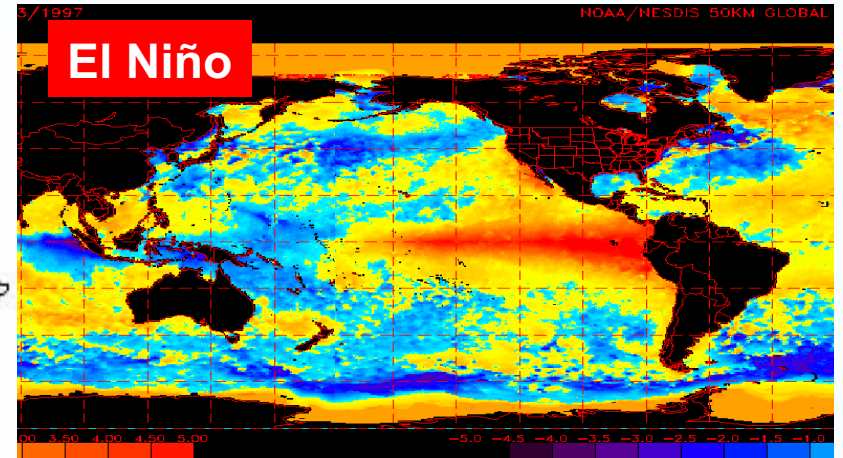
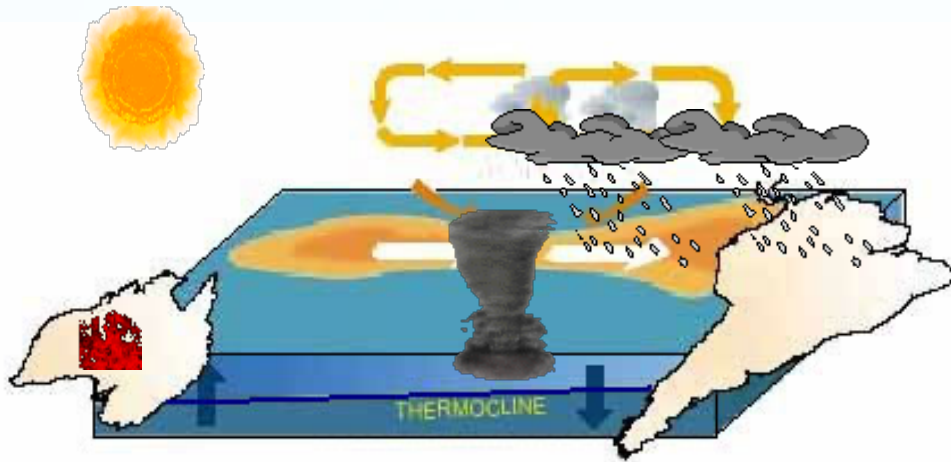




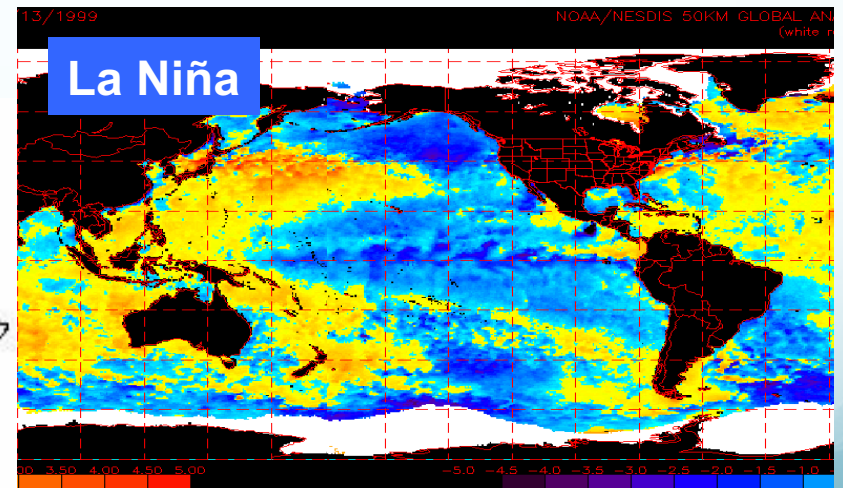
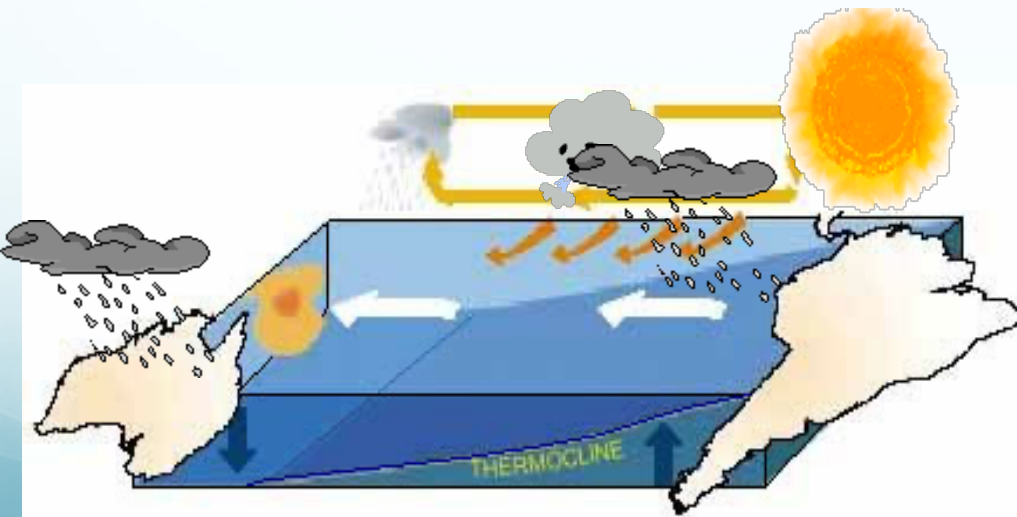
# El Niño : Une oscillation couplée océan-atmosphère dans le Pacifique



# La petite sœur : La Niña



Anomalies de température du 13 Nov. 1997

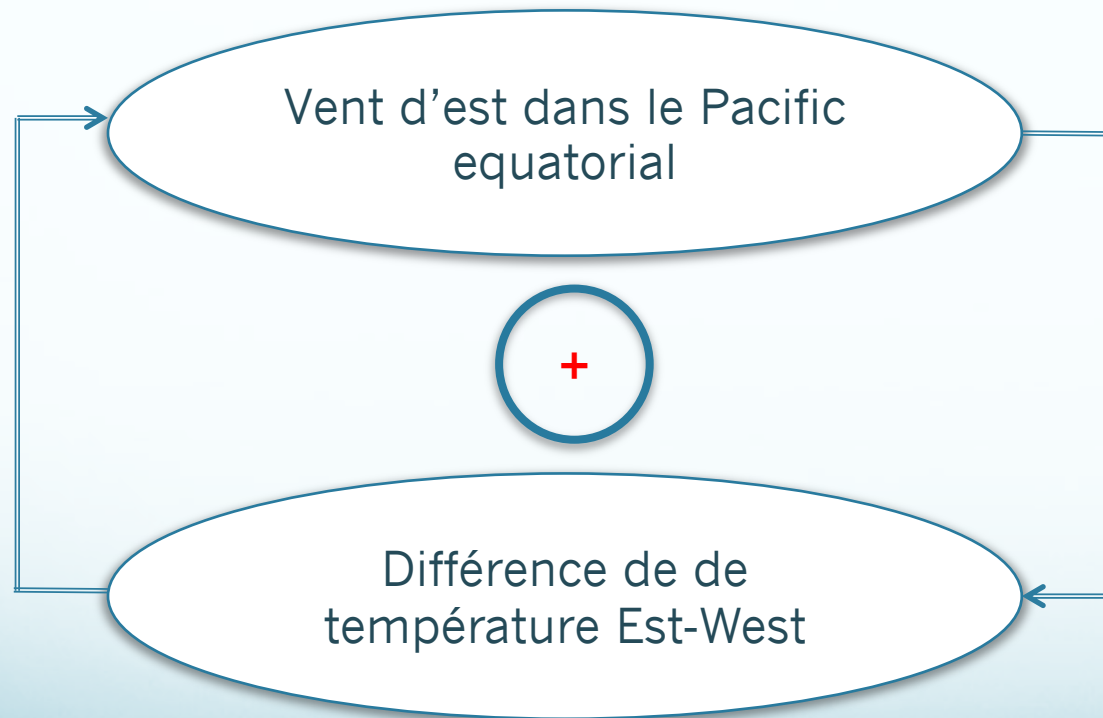


Anomalies de température du 11 Nov. 1998

# Rétroaction positive de Bjercknes



Jacob Bjerknes (1897-1975)

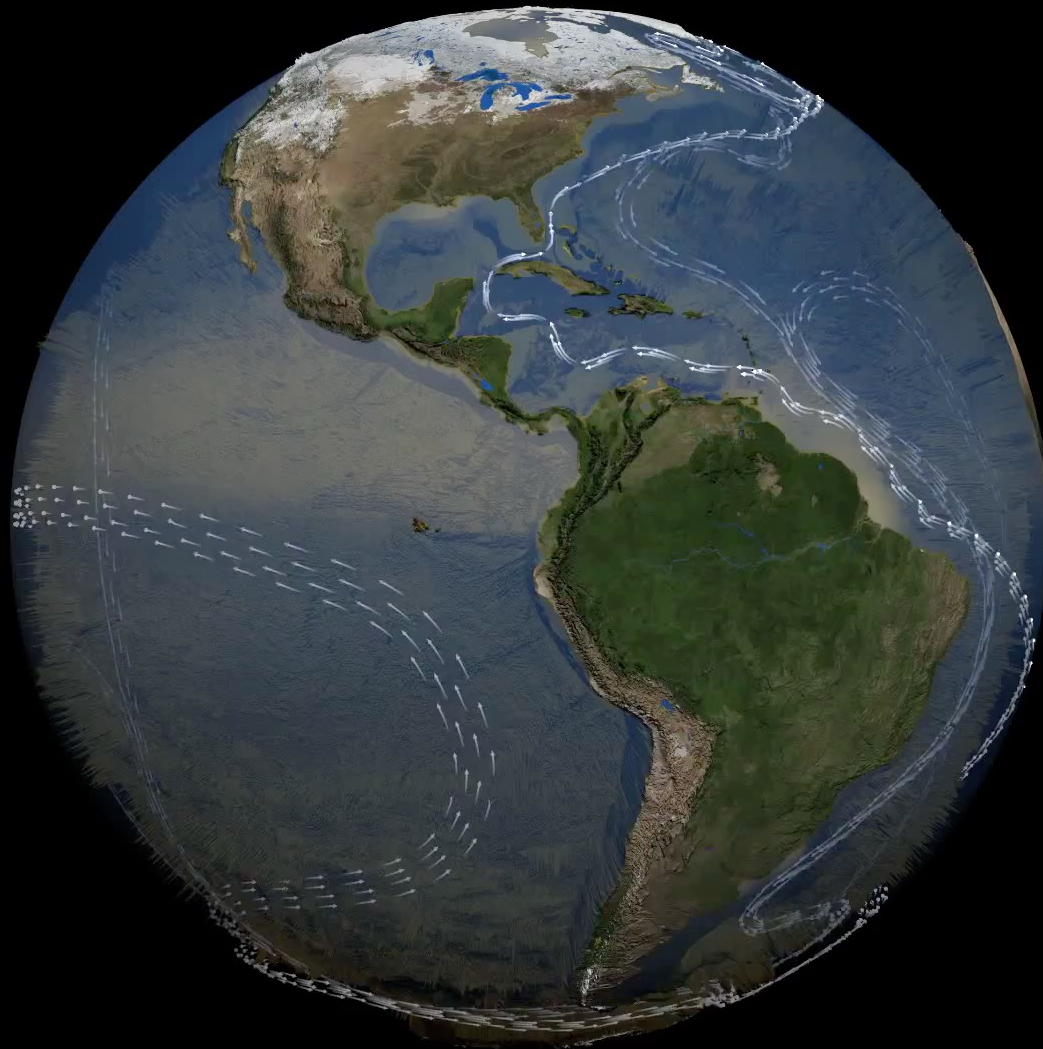


# Quelques grands modes de variabilité climatique

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



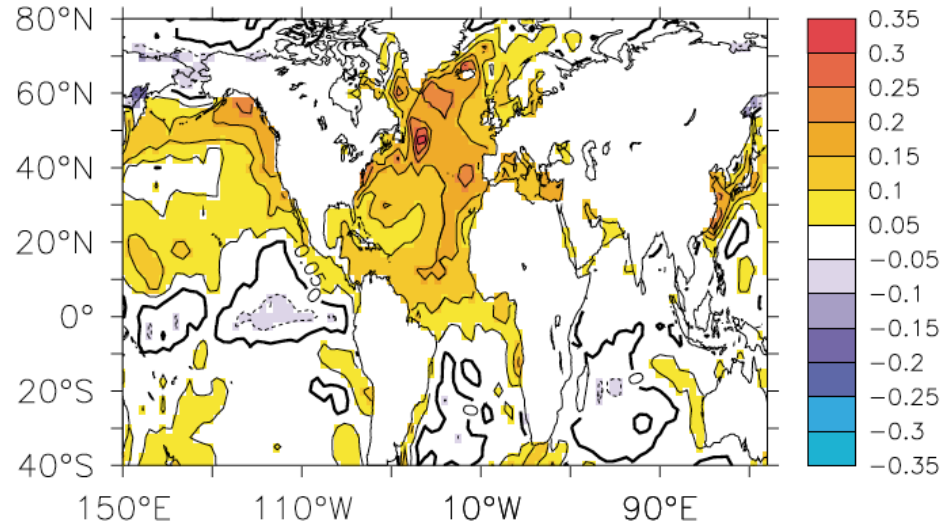
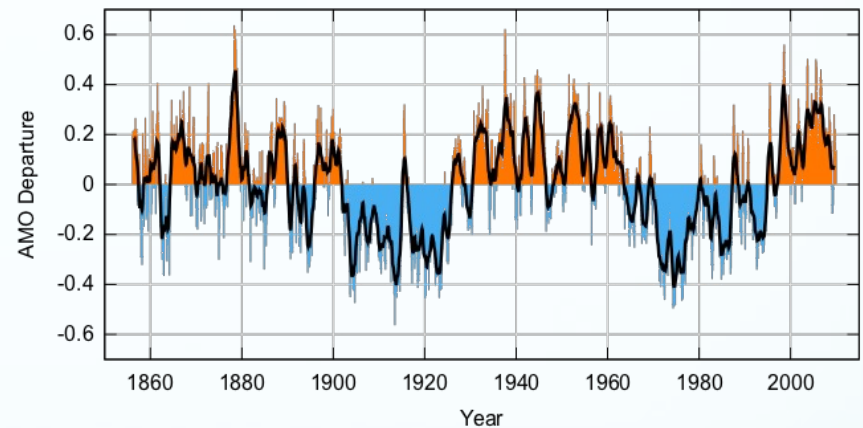
# Circulation thermohaline



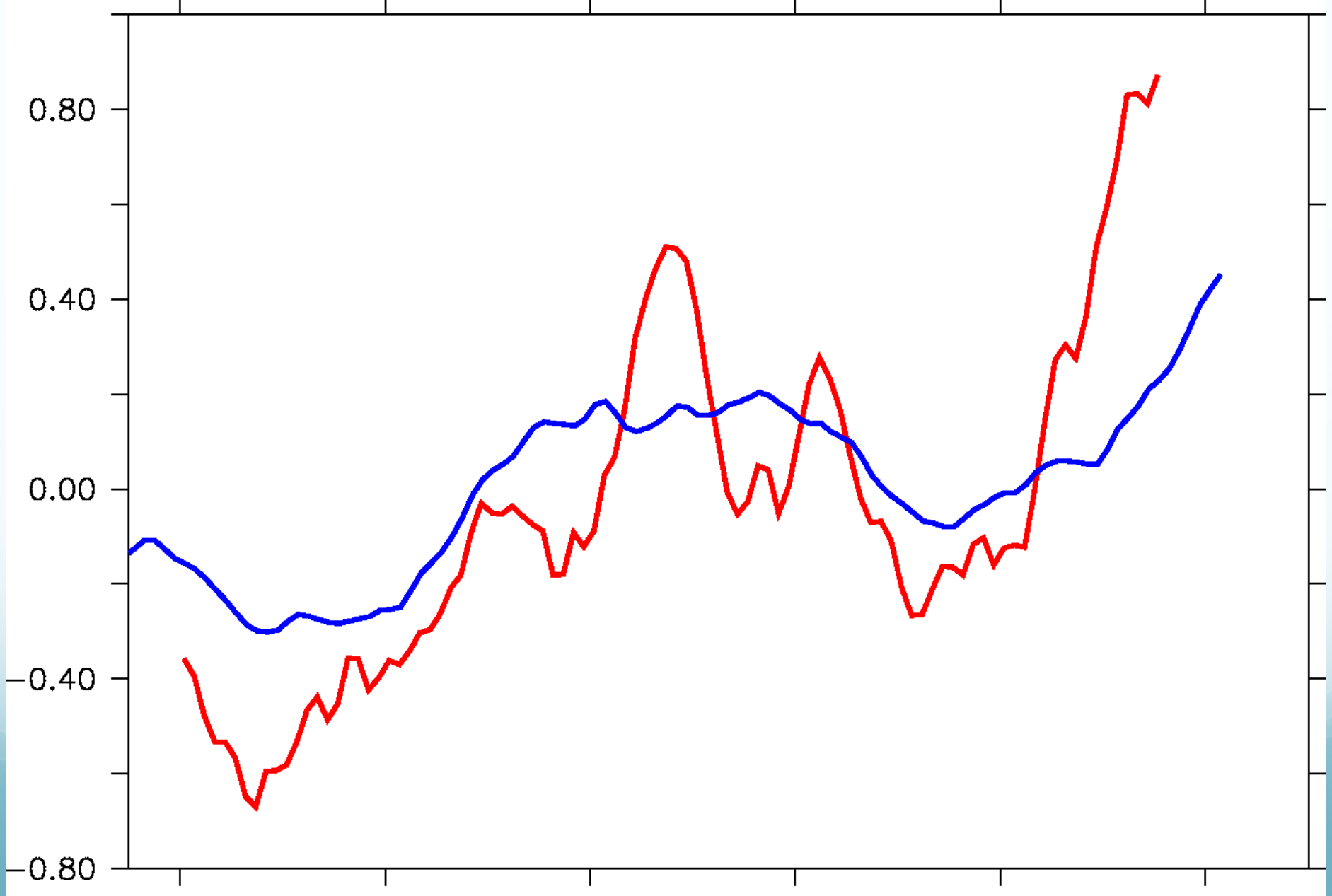
# Variabilité multi-décennale atlantique

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

Monthly values for the AMO index, 1856 -2009



— Atlantic ocean  
— Tmin Arcachon



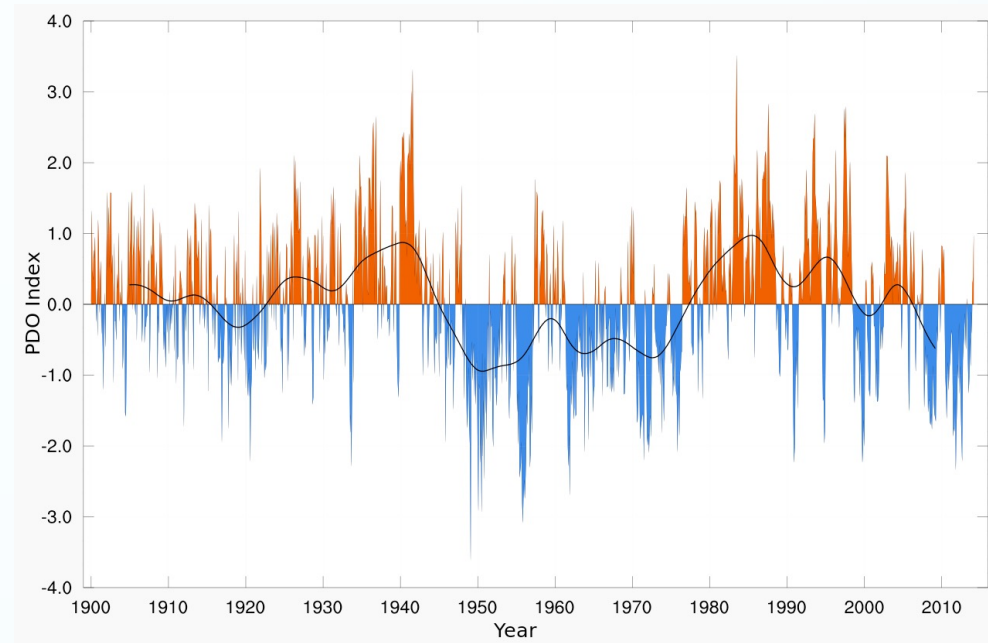
# Quelques grands modes de variabilité climatique

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



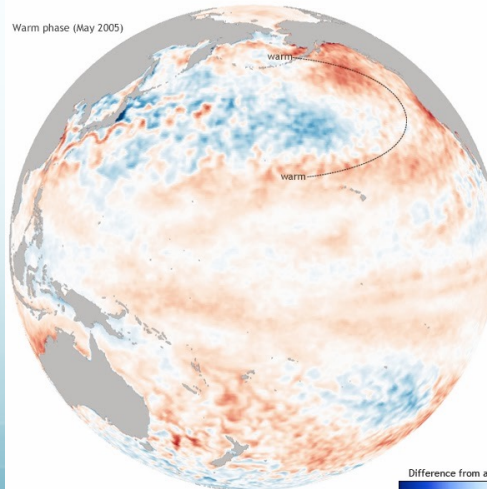
# Oscillation décennal pacifique

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

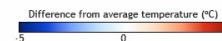
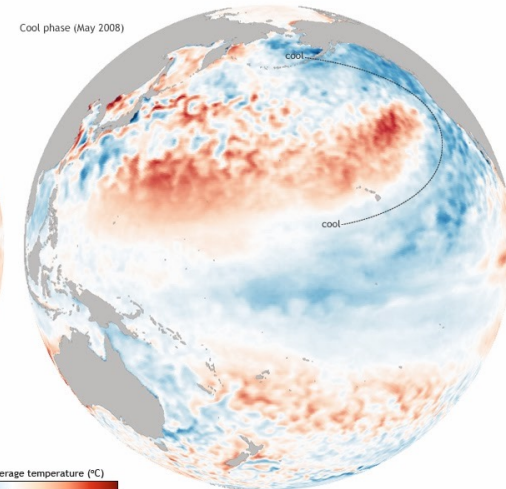


Pacific Decadal Oscillation

Warm phase (May 2005)

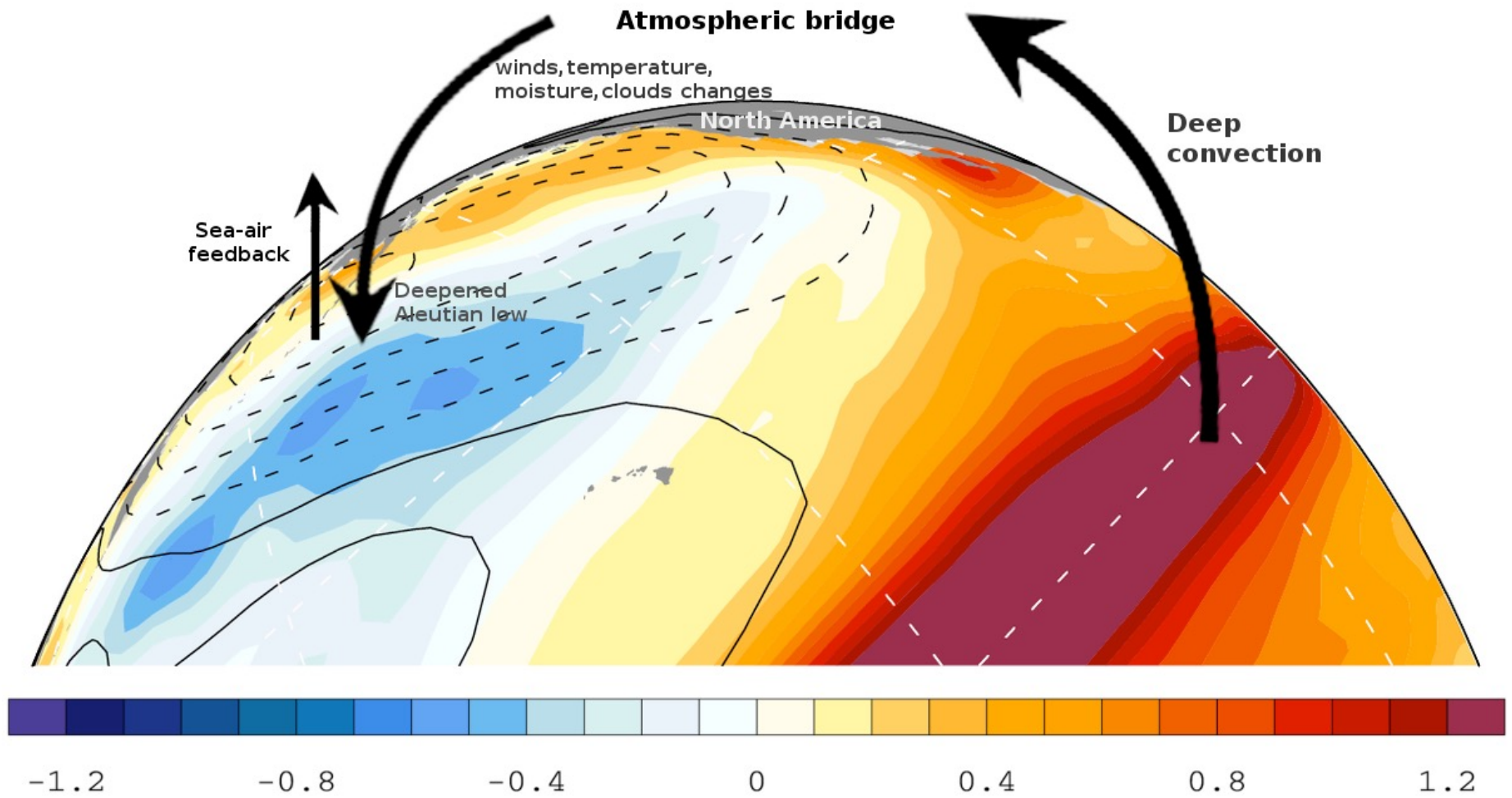


Cool phase (May 2008)



# Oscillation décennal pacifique

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



# Plan du cours

- Définition du climat
- Equilibre énergétique du système Terre
- Principaux modes de la variabilité climatique
- Qu'est ce qu'un modèle de climat ?
- Utilité des modèles de climat : quelques applications

Avez-vous déjà entendu parler  
de modélisation du climat ?



# Equation de Navier Stokes

Newton:  $m\vec{a} = \sum \vec{F}$

$$\rho \left( \underbrace{\frac{d\vec{V}}{dt}}_{\text{acceleration}} + \underbrace{2\vec{\Omega} \times \vec{V}}_{\text{Coriolis}} \right) = \rho g \underbrace{-\text{grad}(p)}_{\text{pression}} + \underbrace{\gamma \Delta \vec{V}}_{\text{viscosité}} + \underbrace{\vec{f}}_{\text{forçages}}$$

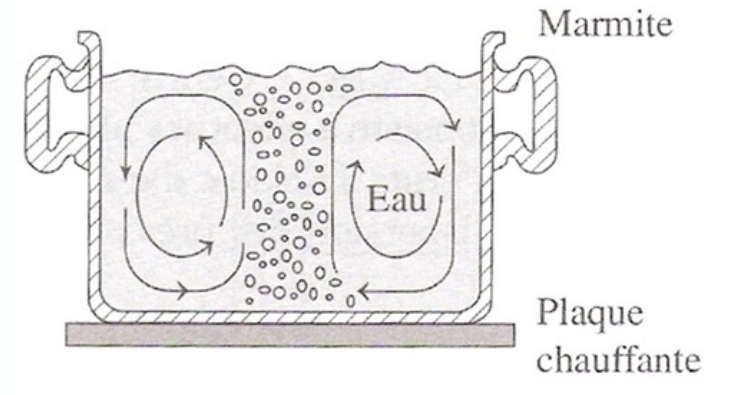


# Autres lois inclues dans les modèles

- Conservation de la masse et du volume
- Conservation de la chaleur
- Schéma radiatif dans l'atmosphère
- Reactions chimiques
- Interactions biologiques

# Modèle de Lorenz

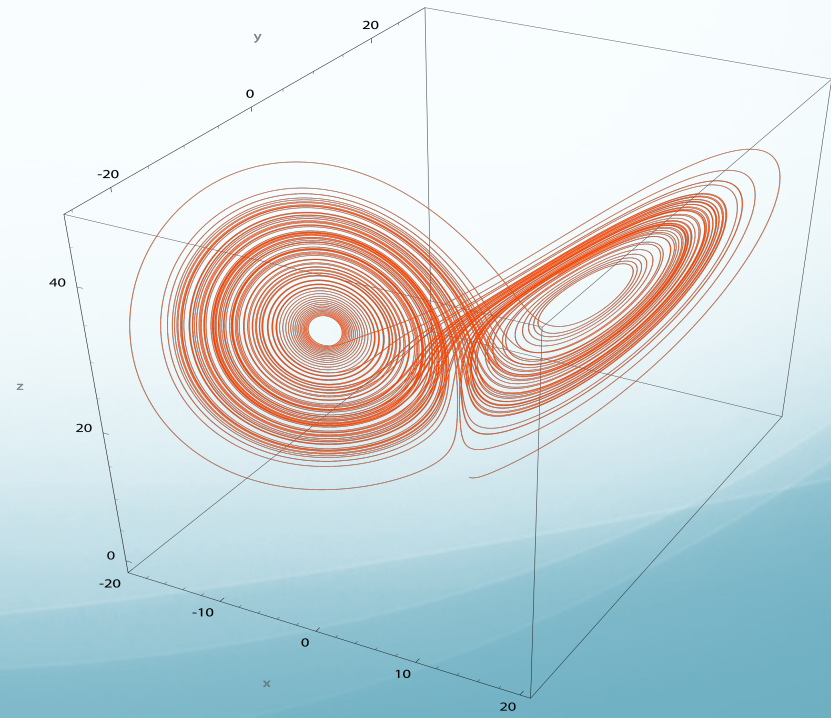
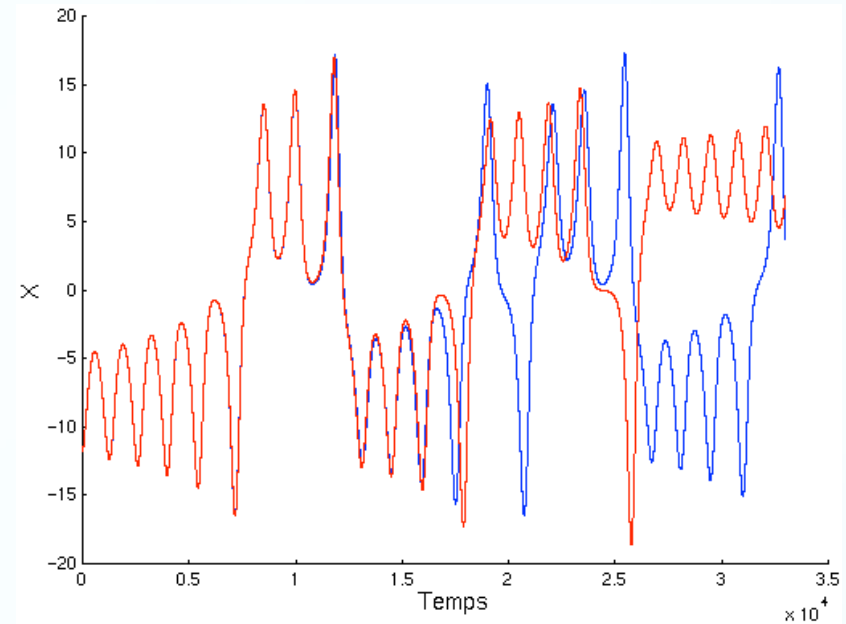
- Modèle simplifié de l'équation Navier Stokes appliqué au phénomène de convection (dite de Rayleigh-Bernard)
  - X est la vitesse de montée
  - Y le gradient de T horizontal
  - Z est le gradient de T vertical
- Système non linéaire
- Simplification de la réalité !



$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = \sigma(y(t) - x(t)) \\ \frac{dy(t)}{dt} = \rho x(t) - y(t) - x(t)z(t) \\ \frac{dz(t)}{dt} = x(t)y(t) - \beta z(t) \end{cases}$$

# Modèle de Lorenz

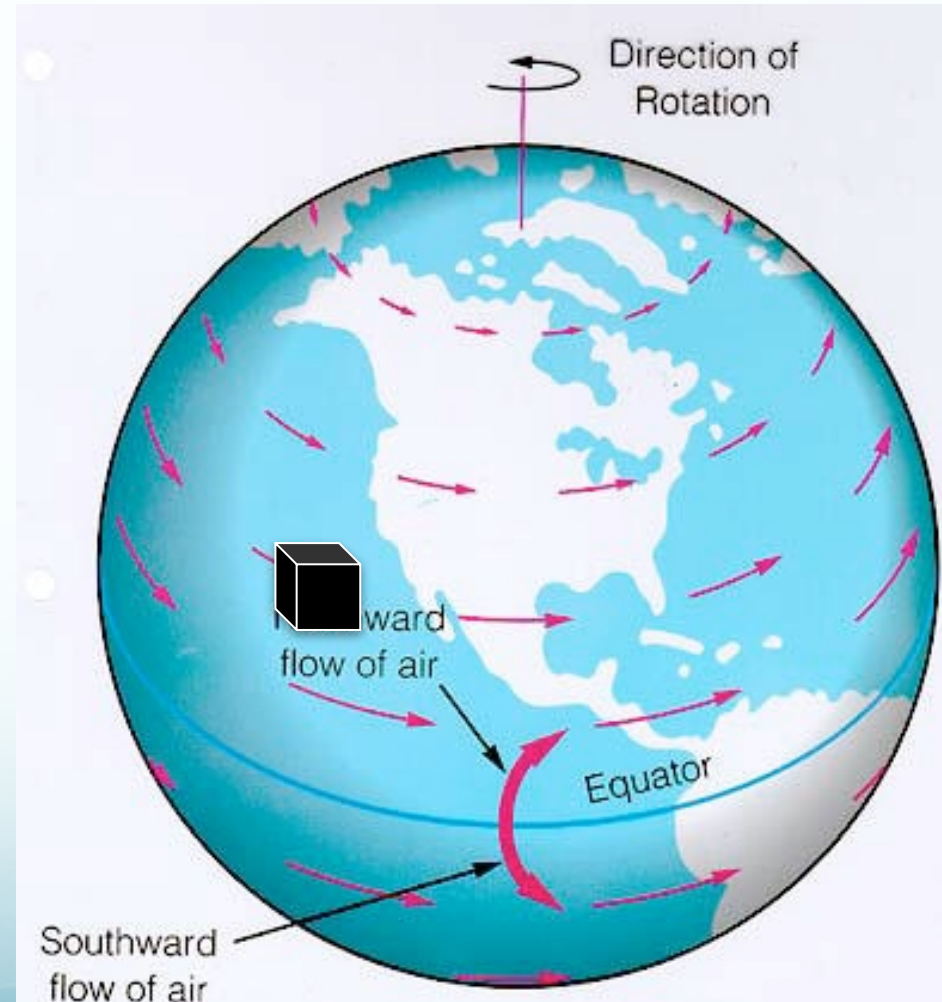
- Sensibilité aux conditions initiales
- Attracteurs étranges





# Qu'est-ce qu'un modèle (complexe) de climat

- C'est un modèle qui propose de résoudre les équations de Navier Stokes en faisant le minimum d'approximations
- Comme on ne sait pas résoudre les équations analytiquement, on le fait discrètement, c'est à dire pas de temps après pas de temps pour de petites modifications



# Résolution numérique des équations

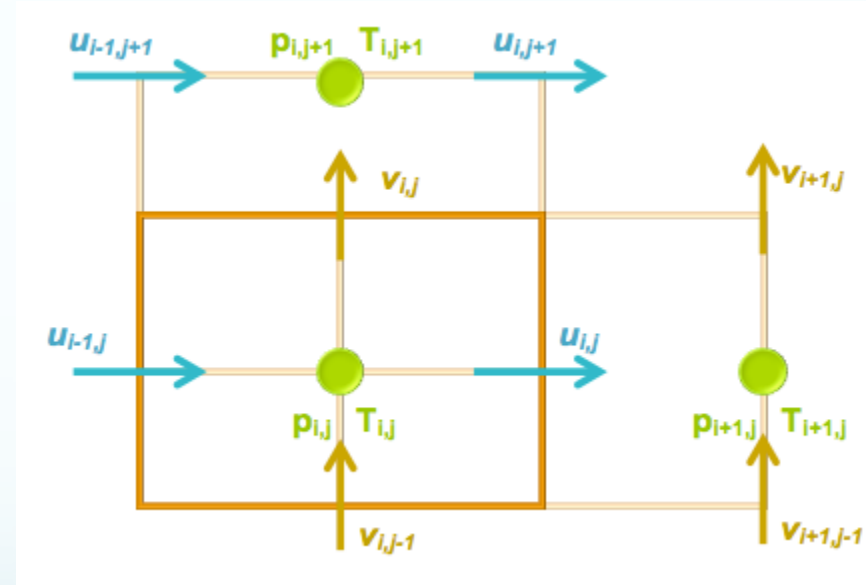
Pression, vitesse dépend de  $i, j, k$  (espace) et du temps discret  $p$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = (u_{i,j,k,p+1} - u_{i,j,k,p}) / \Delta t$$

$\Delta t$  est le pas de temps de résolution

$$\frac{\partial u}{\partial x} = (u_{i+1,j,k,p} - u_{i,j,k,p}) / \Delta x$$

$\Delta x$  est la résolution spatiale en espace



# Le rêve de Richardson

- Un amphithéâtre de mathématiciens pour faire les calculs
- (~1<sup>e</sup> guerre mondiale) : premières prévisions météorologiques numériques
- Il a fallu 20 jours pour faire la prévision d'un jour...

Grille du “modèle”

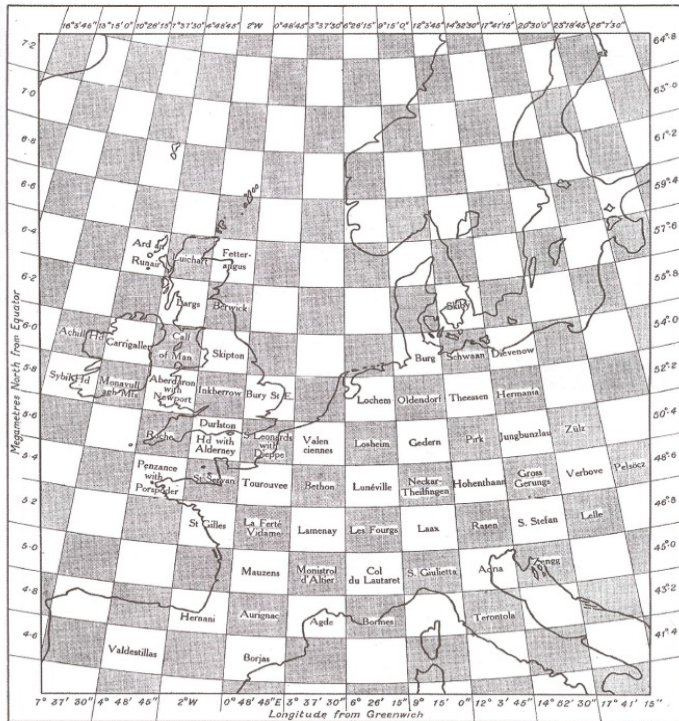
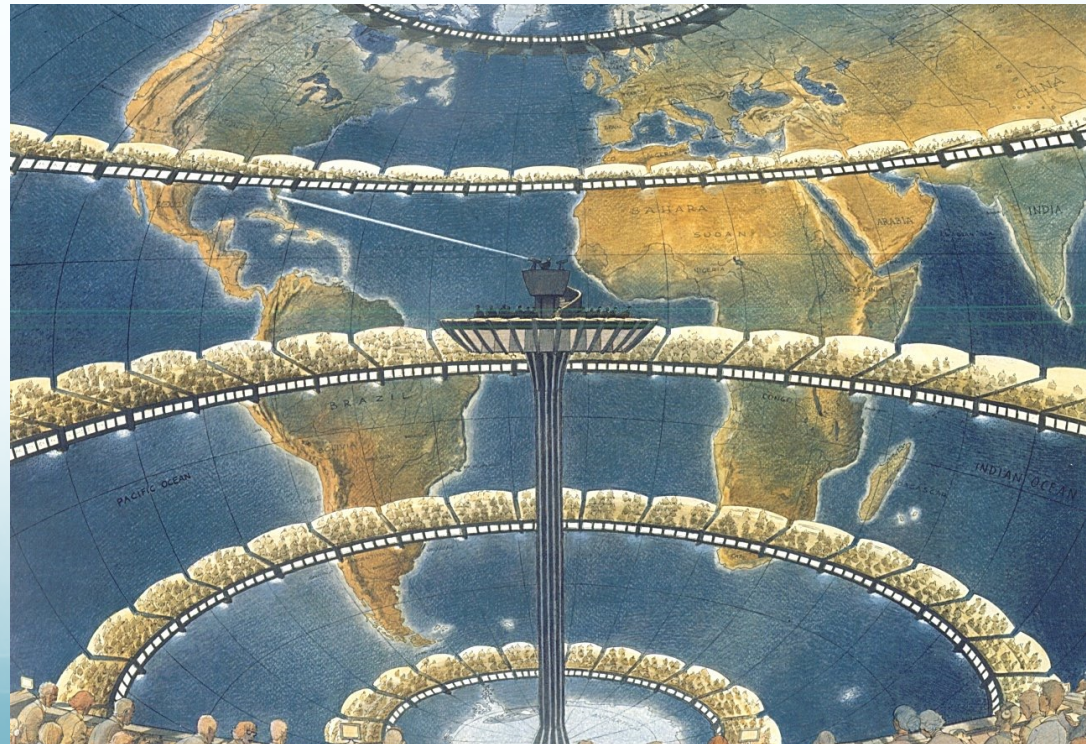


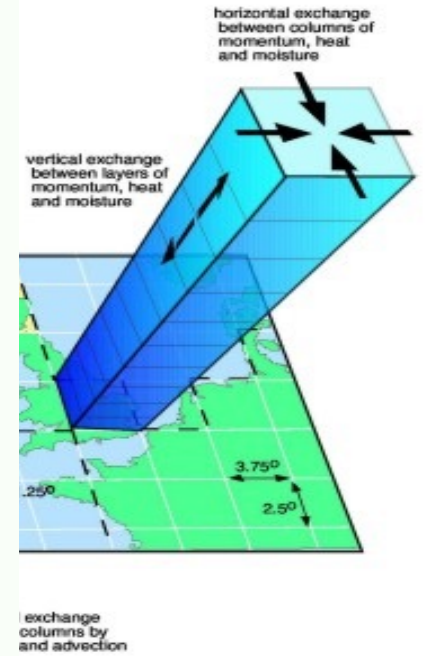
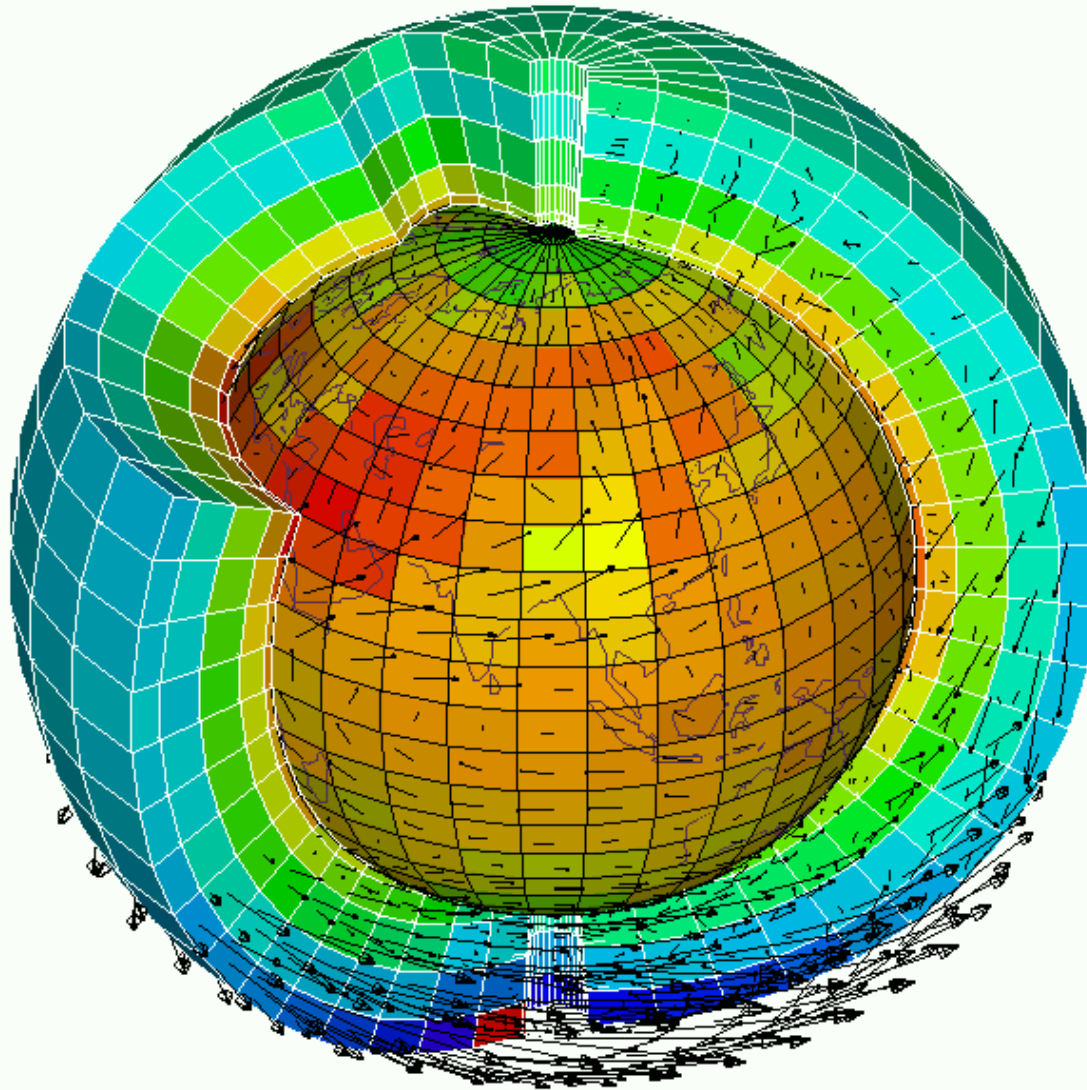
Figure 1.6 Richardson's idealised computational grid. (Frontispiece of WPNP)

Les calculateurs



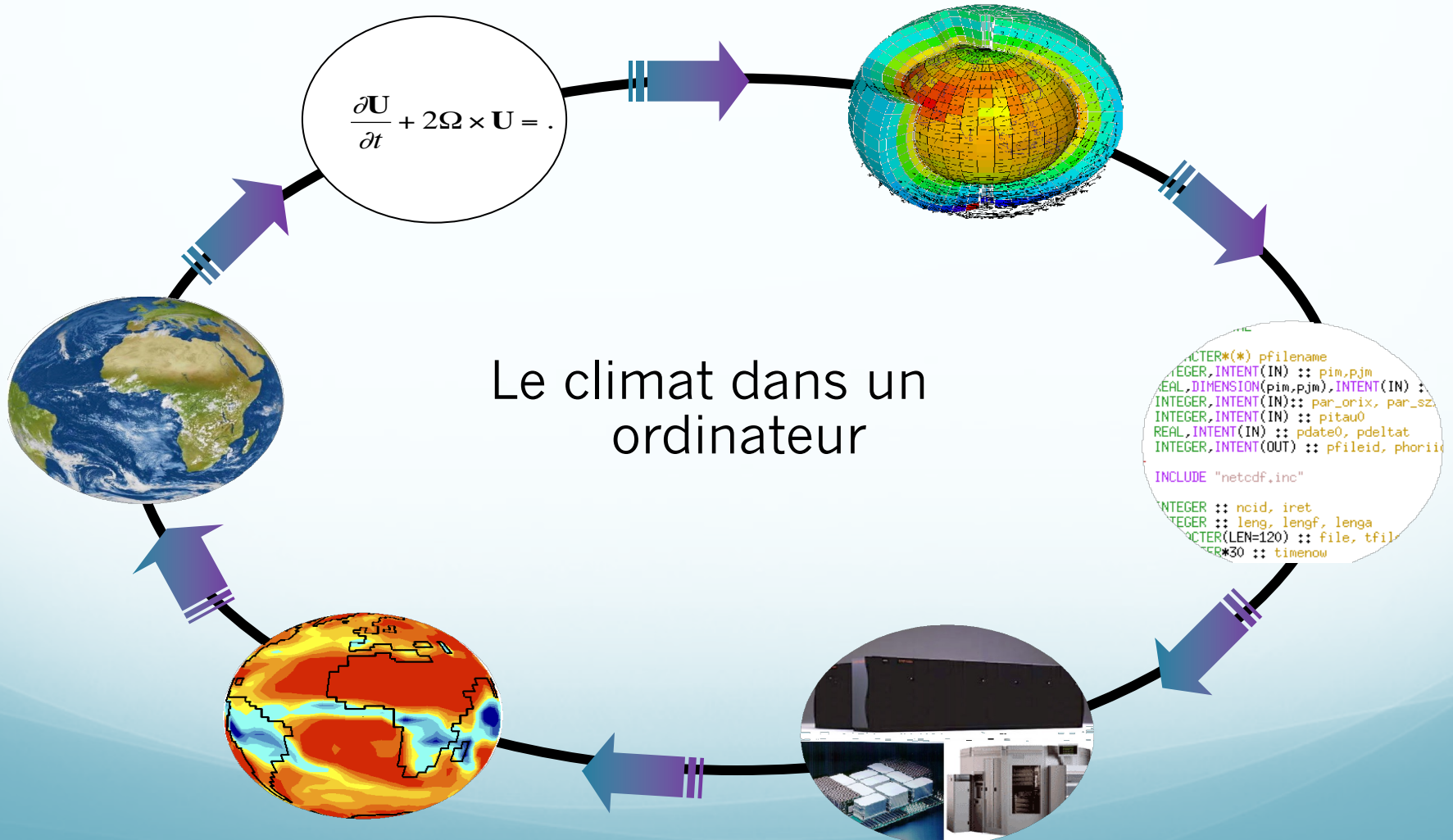


# Le maillage de la Terre dans un modèle



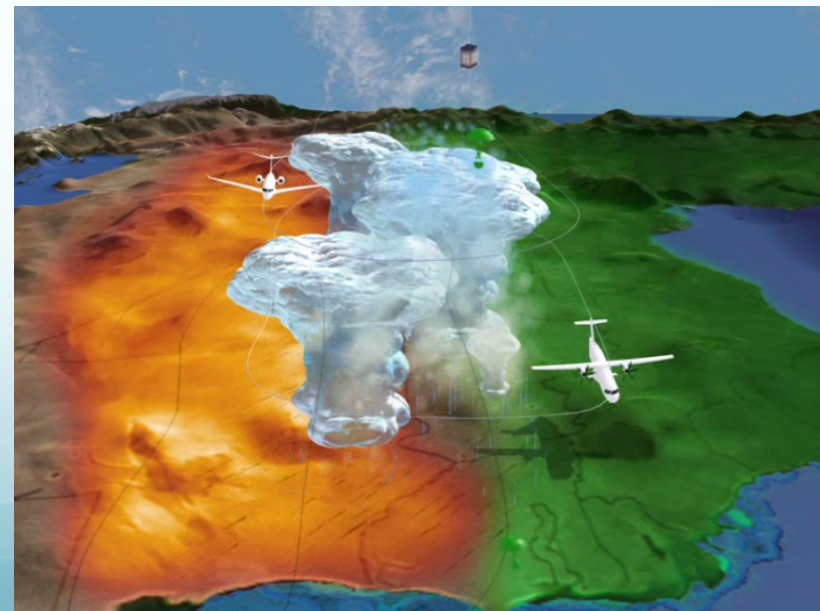
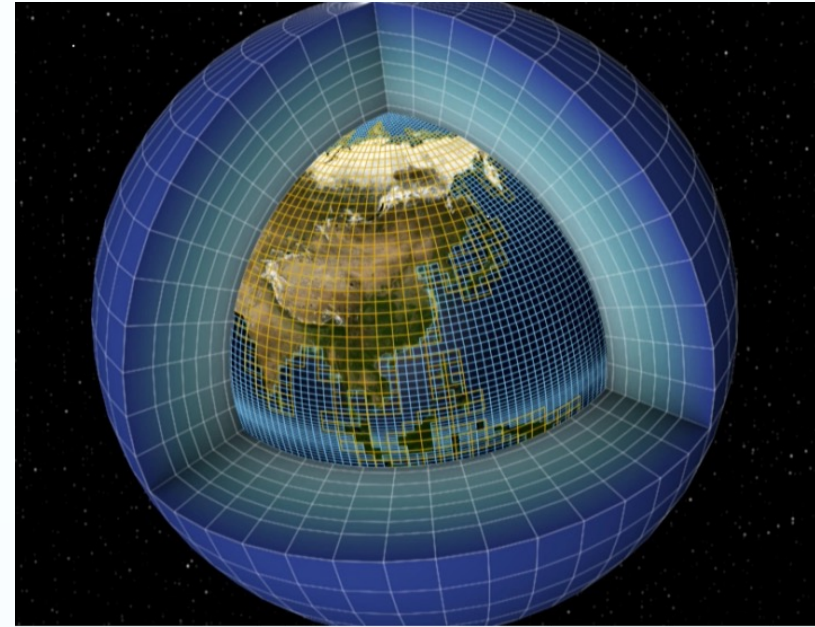


# Principe de la modélisation du climat



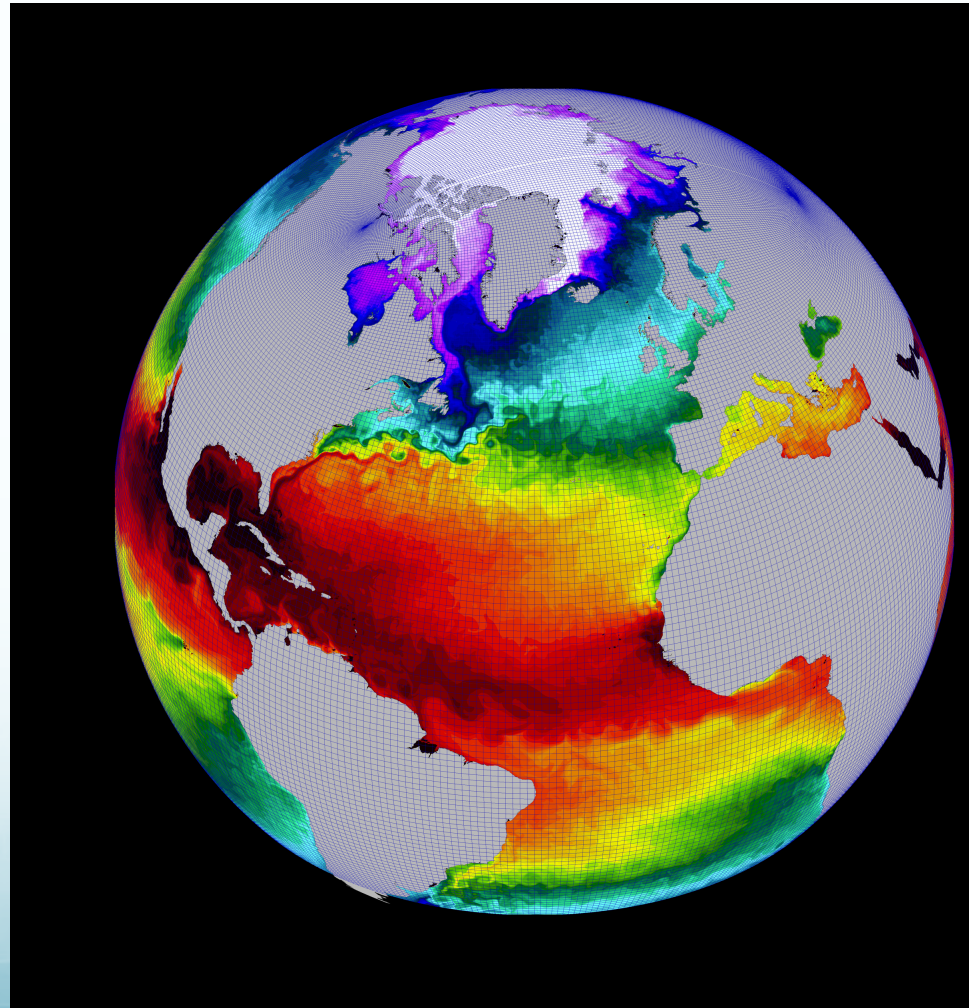
# Modèle d'atmosphère

- Les mêmes que ceux utilisés pour la météo, mais avec des mailles plus grandes (100km)
- Paramétrisation sous maille notamment pour prendre en compte les nuages et la convection atmosphérique



# Modèle d'Océan

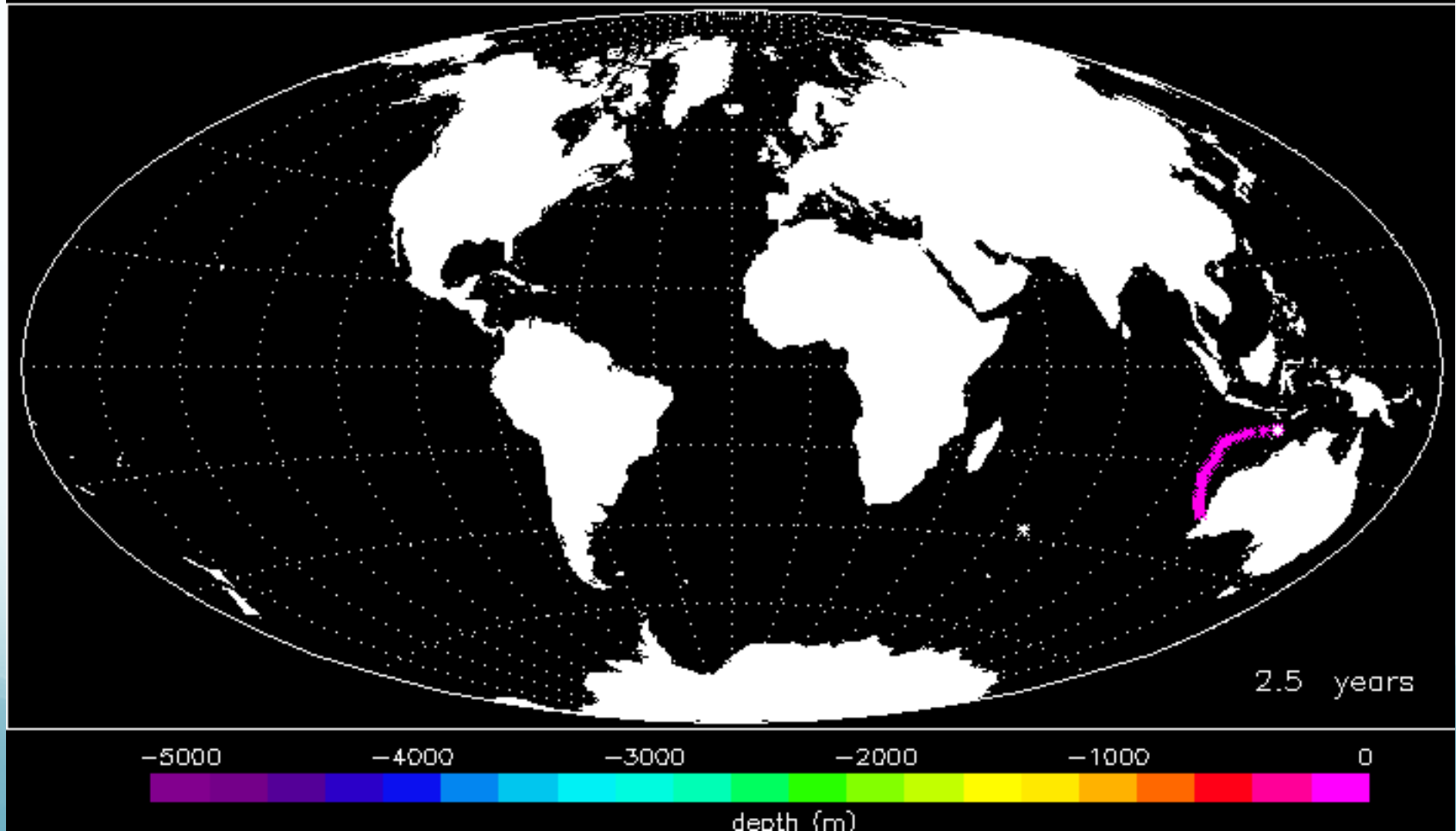
- Modèles plus récents par rapport atmosphère
- Problématiques spécifiques (tourbillon plus petit, salinité, chauffé par le dessus...)



# Trajectoire lagrangienne dans un modèle d'océan

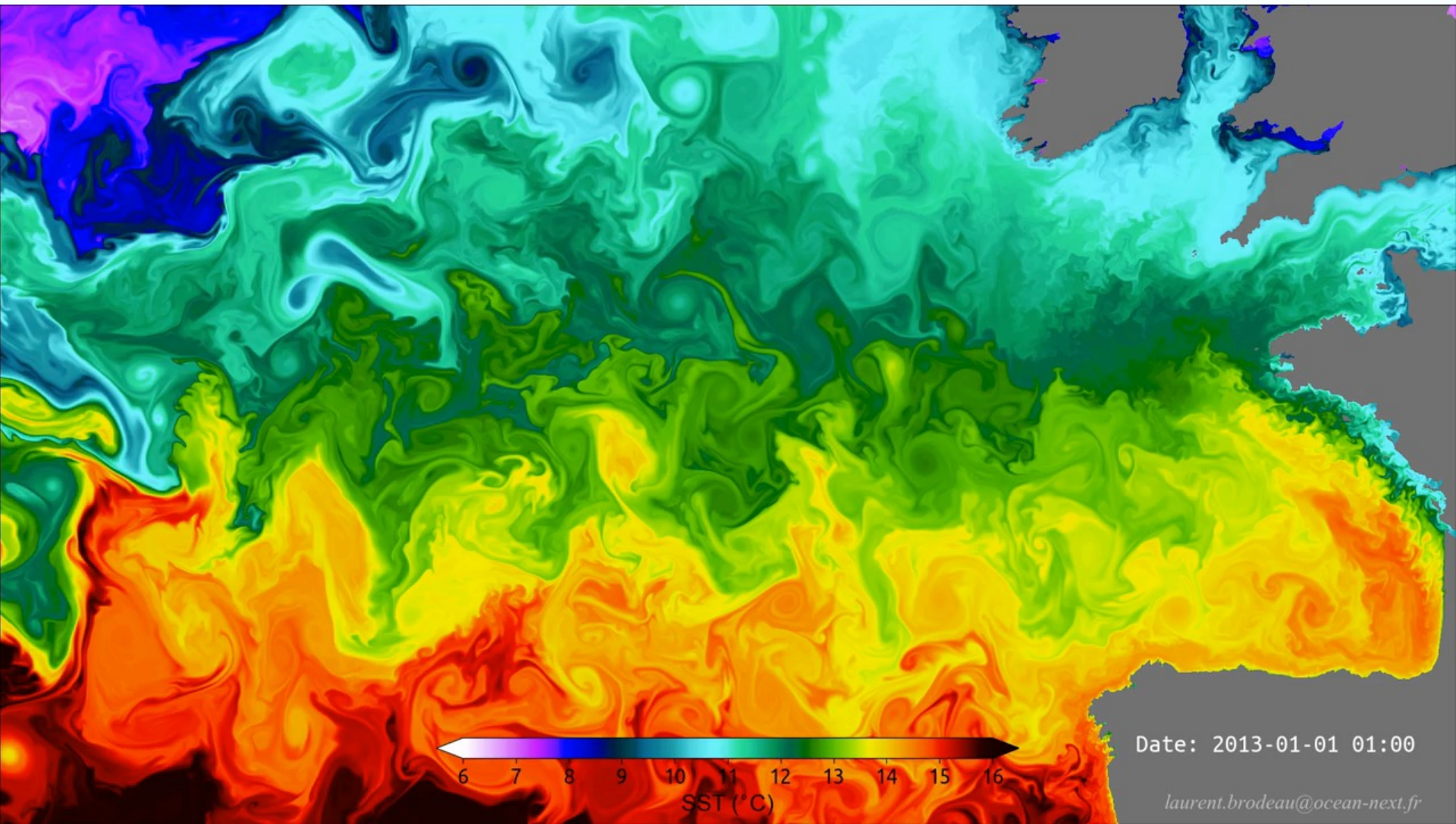
"Global" trajectory in the OPA model

<http://www.univ-brest.fr/lpo/ariane>



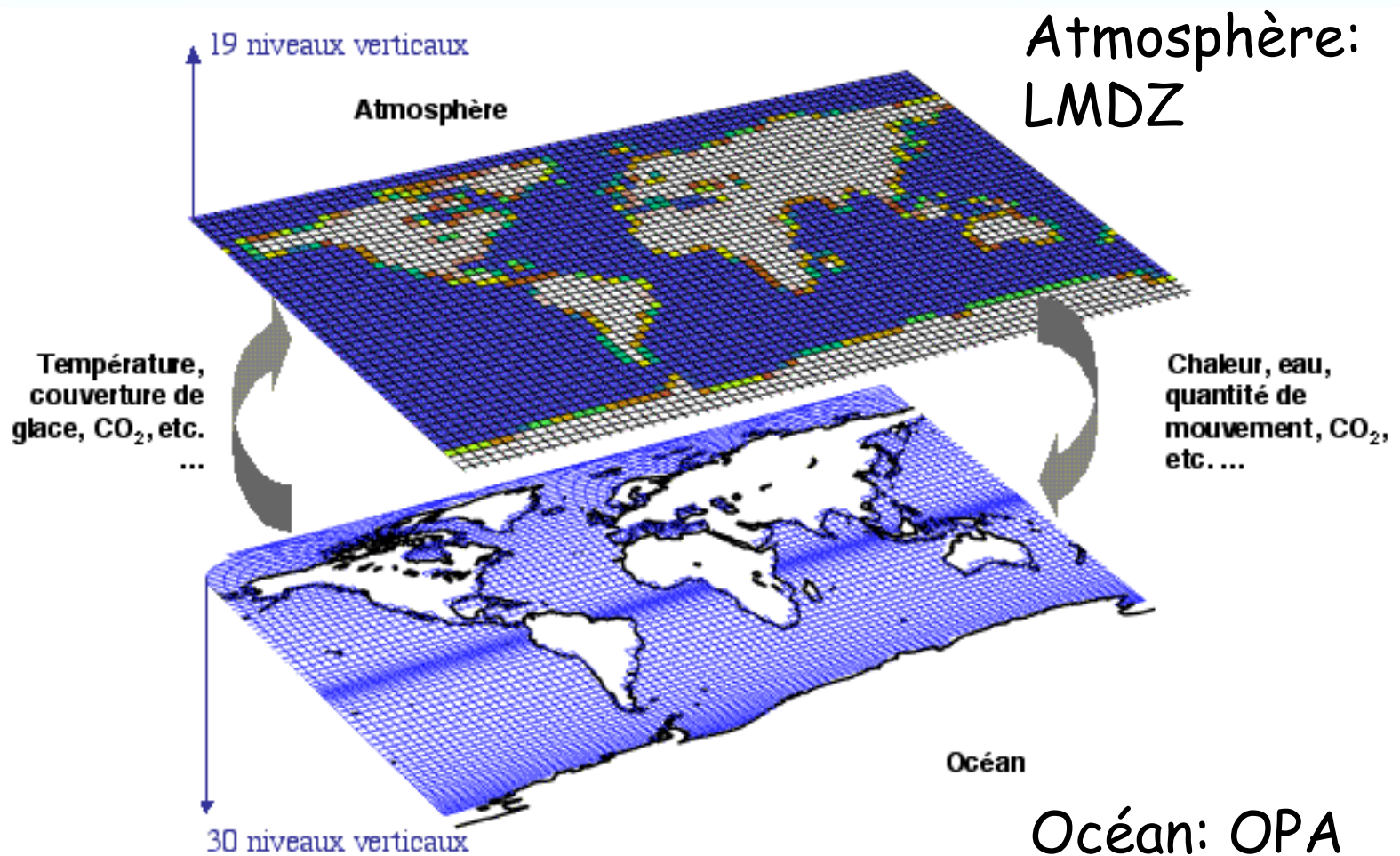


# Océan, un monde fascinant



# Modèles couplés océan-atmosphère

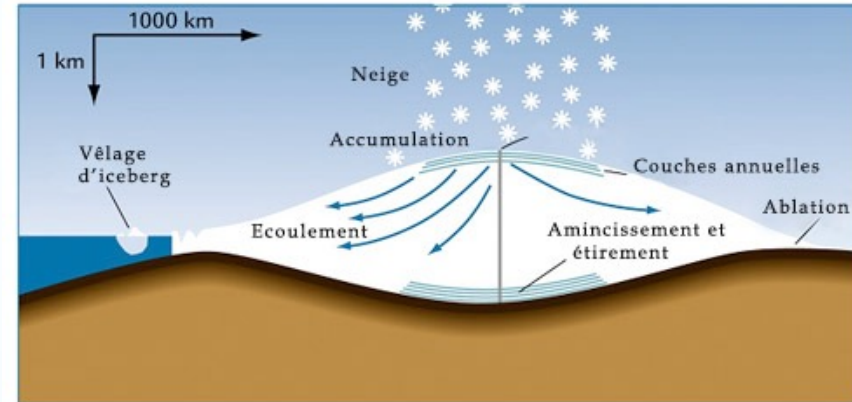
Exemple du modèle de l'IPSL





# Autres composantes...

- Banquise au pôles
- Calotte de glace
- Surface terrestre : terre et végétation
- Biogéochimie marine
- Chimie atmosphérique
- ...

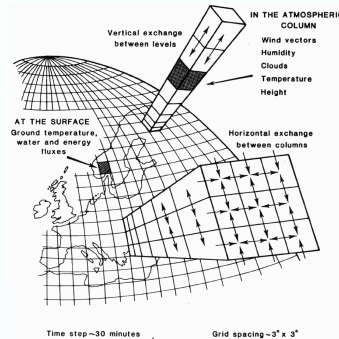


## Conditions Initiales « météo »

$T_0, V_0, P_0, q_0$

# Modèle

Calcul de  
T, Vent, Pression  
q Vapeur d'eau



Statistiques  
Mois/saisons

## Conditions aux limites

Relief, nature du sol

Albedo

Température de surface des océans

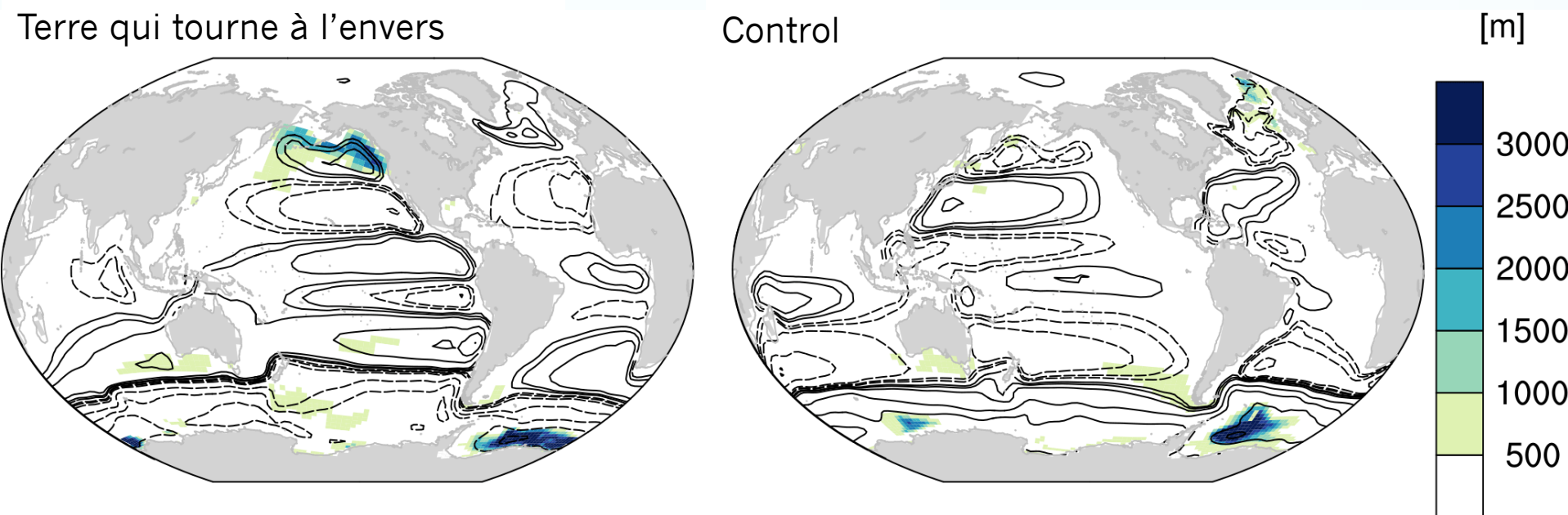
Composition de l'atmosphère (CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>)

Rayonnement solaire incident



# Terre qui tourne à l'envers

Circulation barotrope (en contour,) et zone de convection (en couleur)



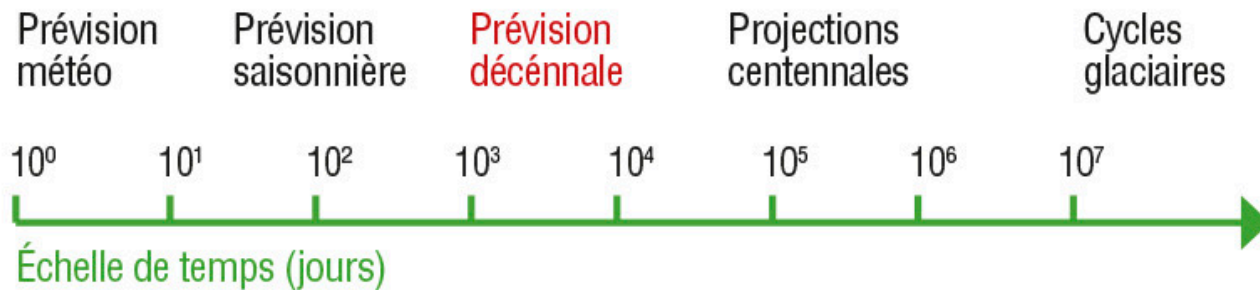
# Prévision décennale

© D. Swingedouw

**Importance  
conditions initiales**



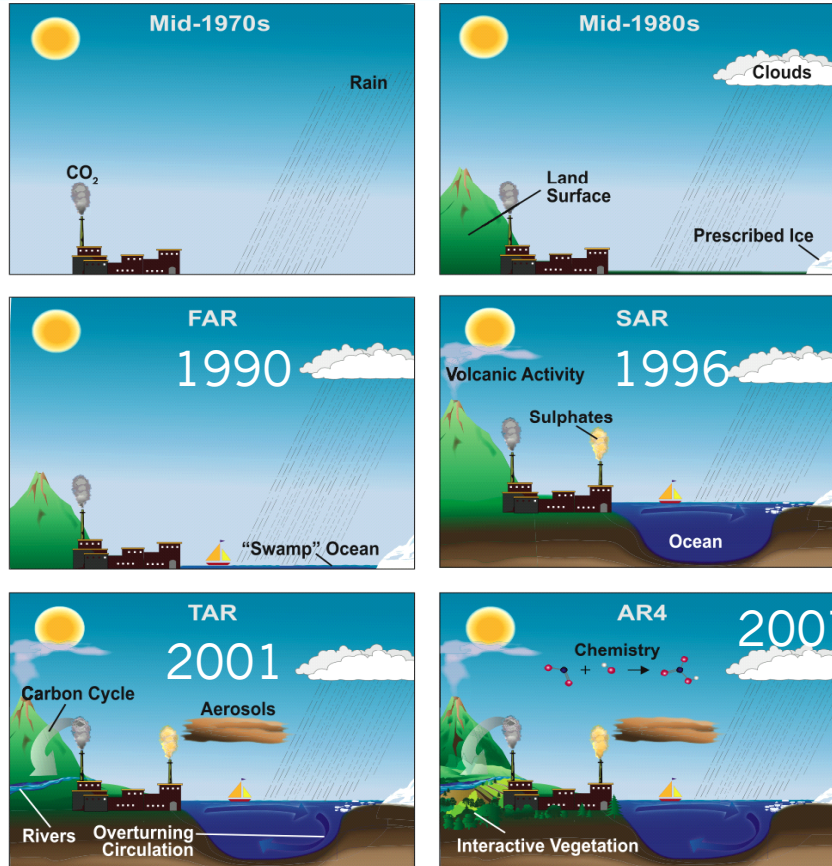
**Importance  
conditions aux limites**



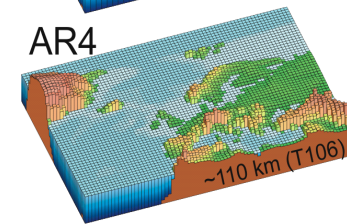
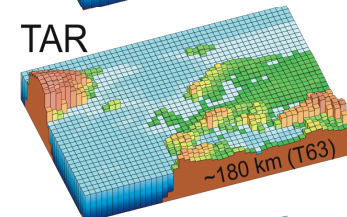
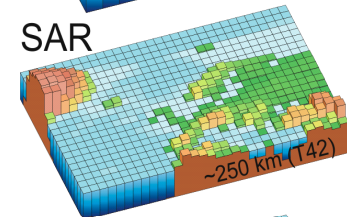
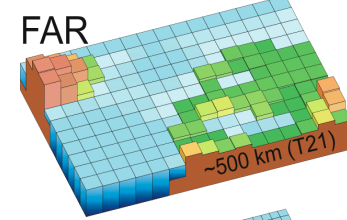
► Schéma montrant l'importance relative des conditions initiales et aux limites pour le climat selon les échelles de temps.

# Evolution des modèles climatiques

composantes

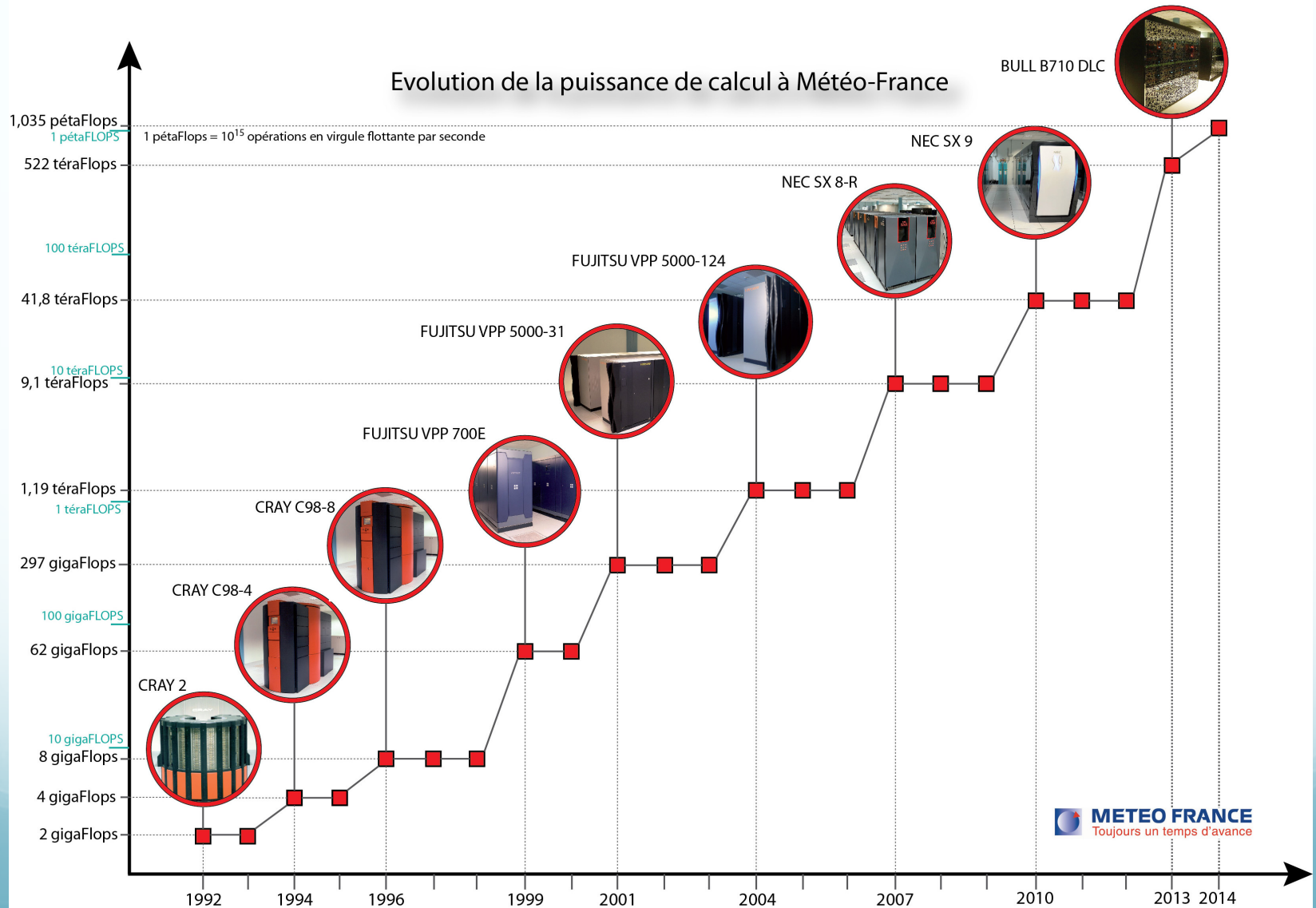


résolution



Prochains développements: cycle du carbone, stratosphère, couplage aux calottes glaciaires... et toujours amélioration des modèles d'atmosphère et d'océan

# Moyens de calcul





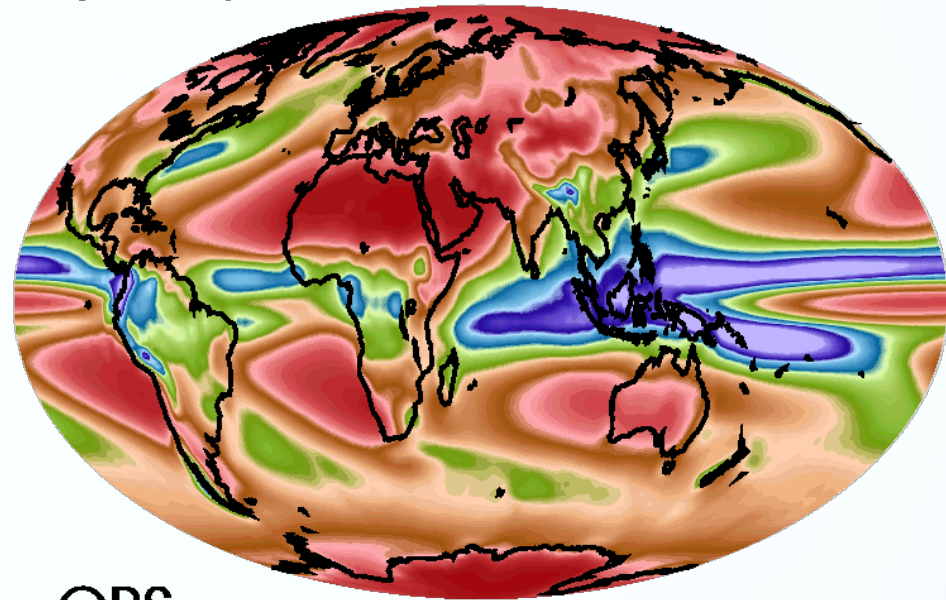
# Tester les modèles

Des moyens de mesures inédits:

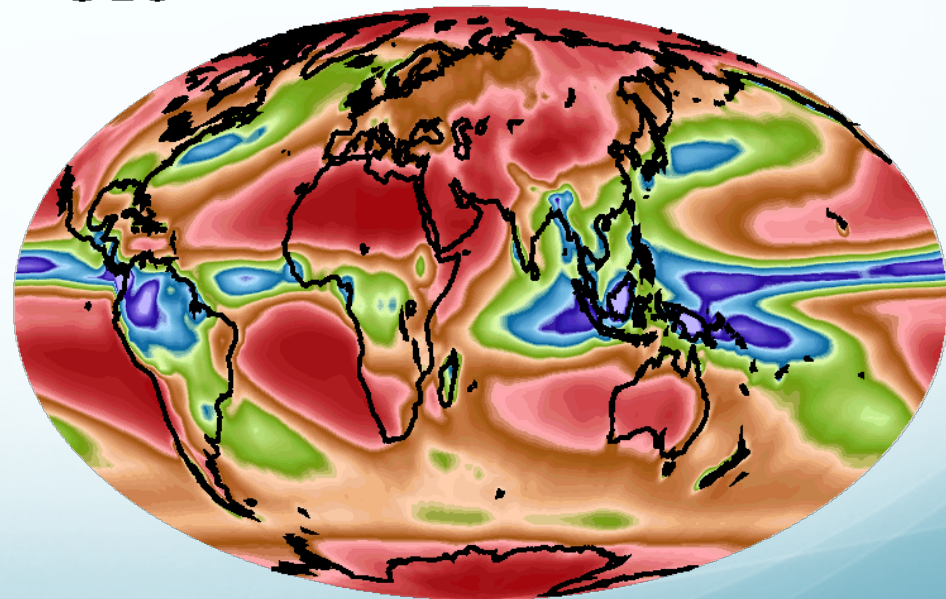
- Satellites
- Balises ARGO



CMIP5

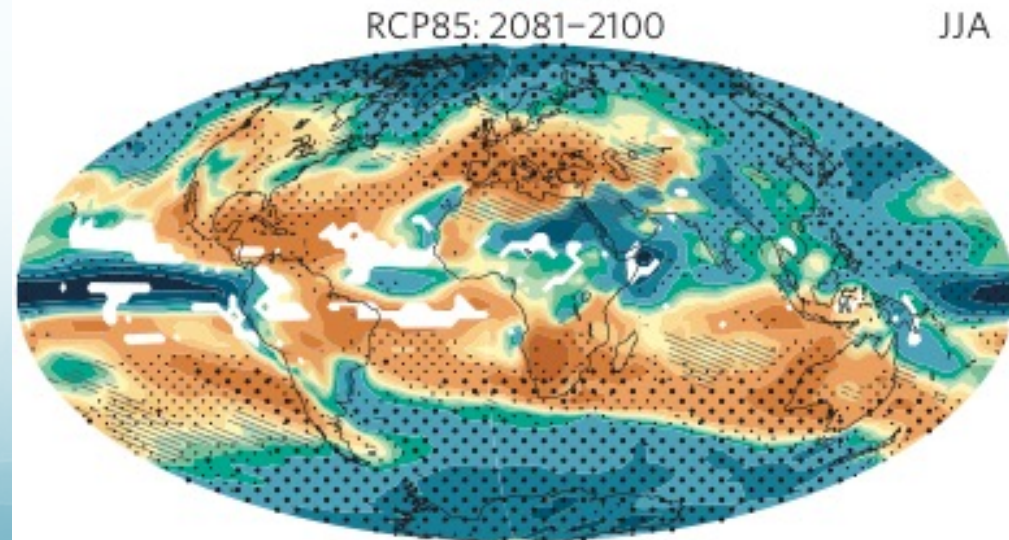
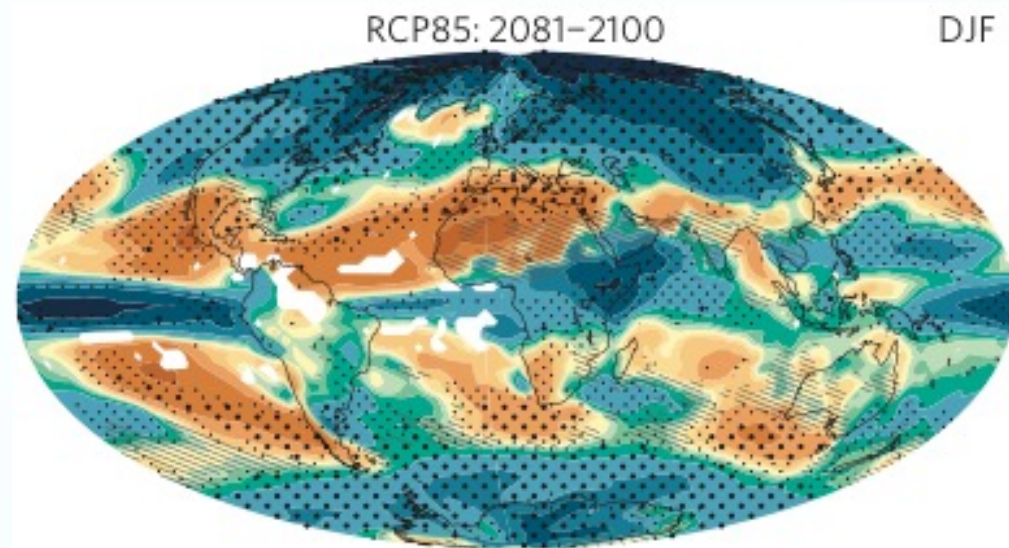


OBS



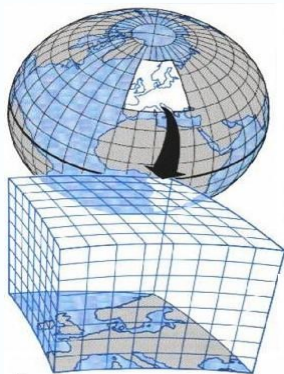
# Projection de précipitations

- Projections des changements de précipitation plus incertain
- Région méditerranéenne affectée (sécheresse) dans quasi tous les modèles



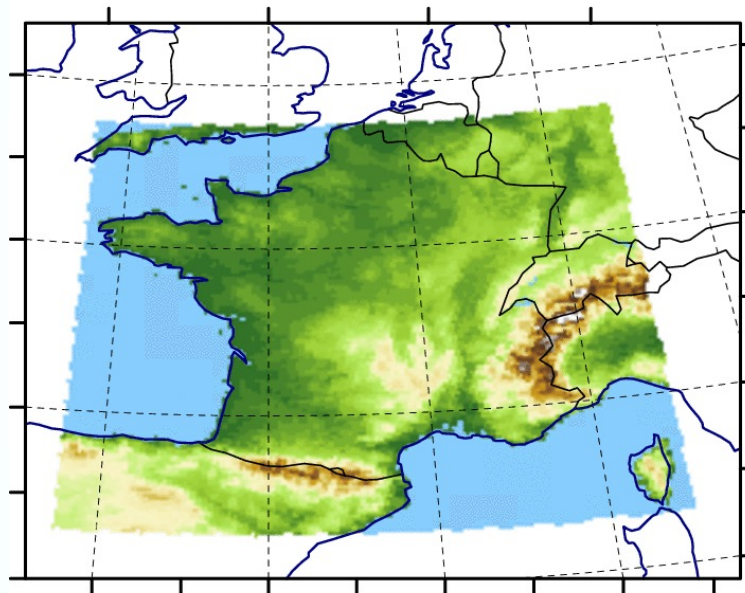


# Regionalisation

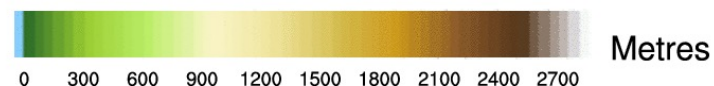
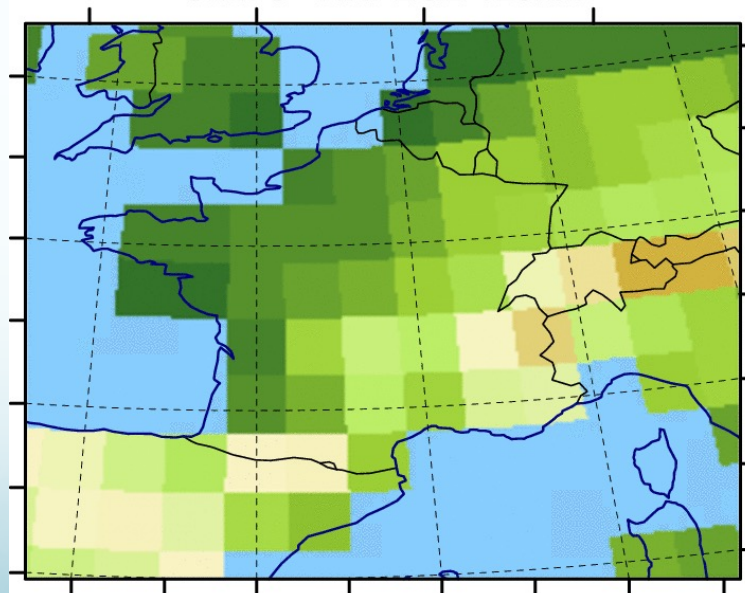


- Possibilité d'imbriquer les modèles les uns dans les autres
- Meilleure résolution du climat local (vent vallée du Rhone, événement cévenols, orages...)

CORDEX - ALADIN 12km



CMIP5 - ARPEGE 120km



# Plan du cours

- Définition du climat
- Equilibre énergétique du système Terre
- Principaux modes de la variabilité climatique
- Qu'est ce qu'un modèle de climat ?
- Utilité des modèles de climat : quelques applications

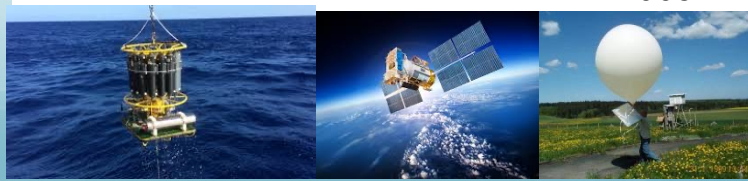
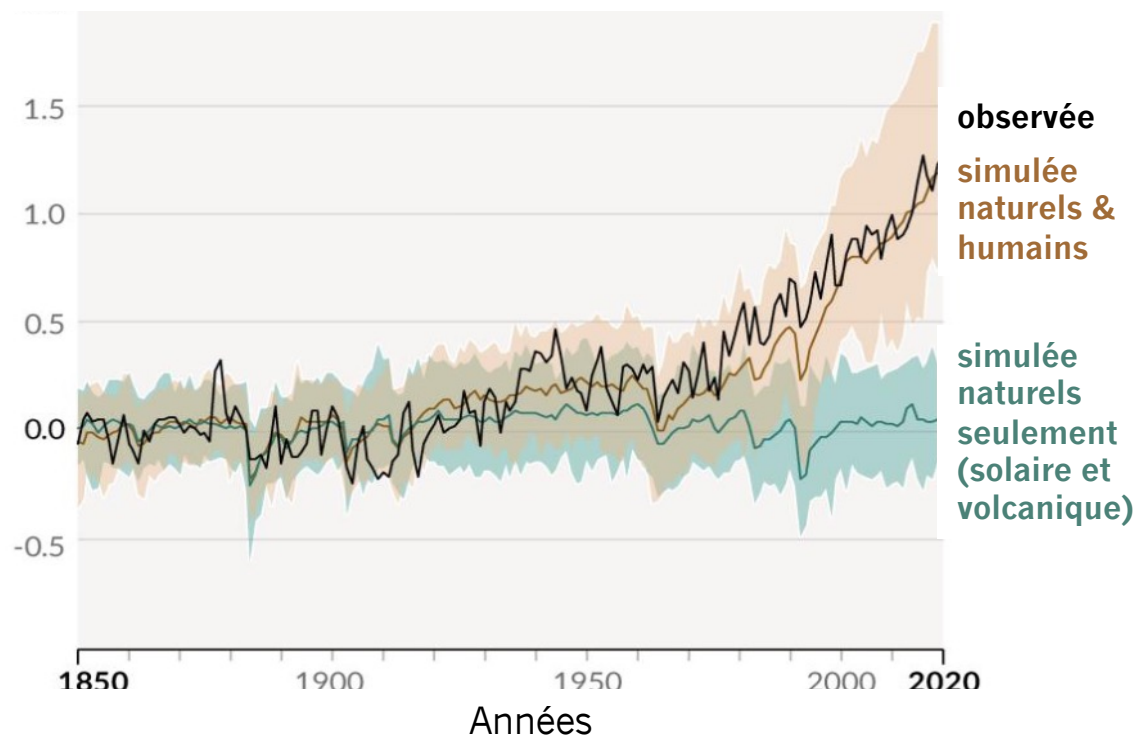


# Détection-attribution du changement climatique

# Un réchauffement indiscutablement anthropique

❖ Il est à présent sans équivoque que le changement climatique est dû aux activités anthropiques

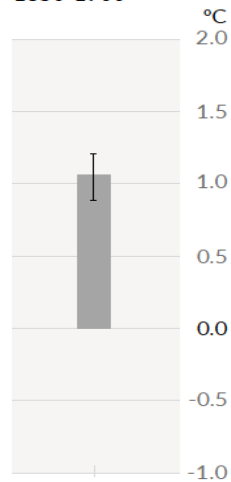
Changement de température globale observée et simulée avec les forçages **naturels & humains** ou **seulement naturels**



# Observed warming is driven by emissions from human activities, with greenhouse gas warming partly masked by aerosol cooling

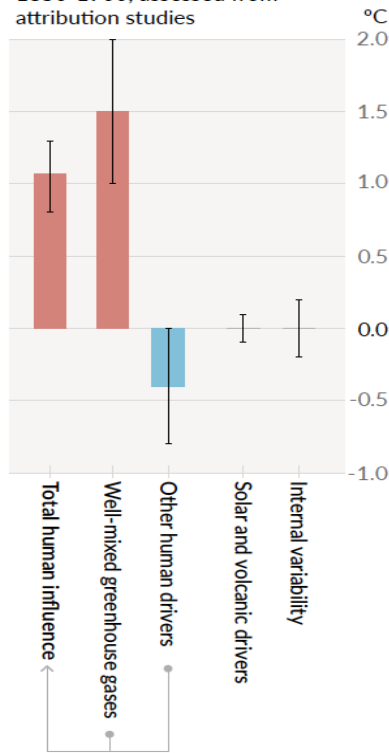
## Observed warming

a) Observed warming 2010-2019 relative to 1850-1900

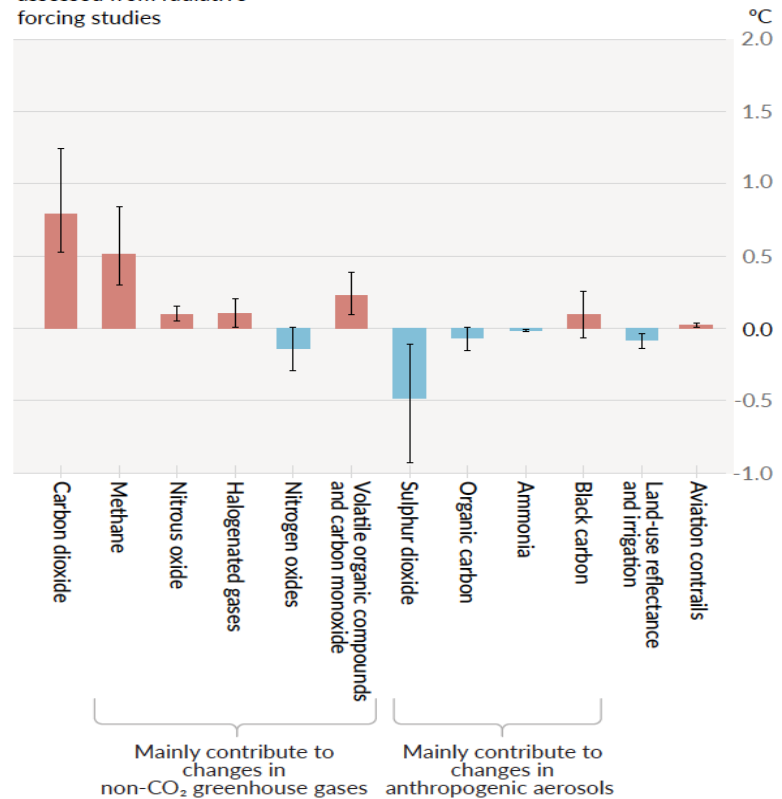


## Contributions to warming based on two complementary approaches

b) Aggregated contributions to 2010-2019 warming relative to 1850-1900, assessed from attribution studies



c) Contributions to 2010-2019 warming relative to 1850-1900, assessed from radiative forcing studies

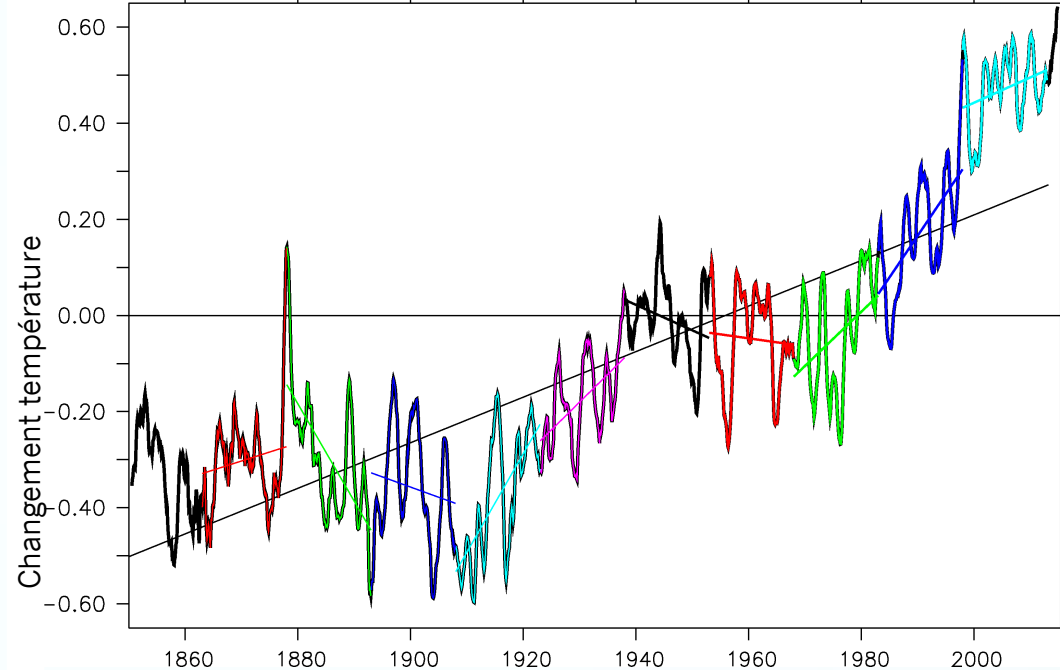


# Un plateau de température ?

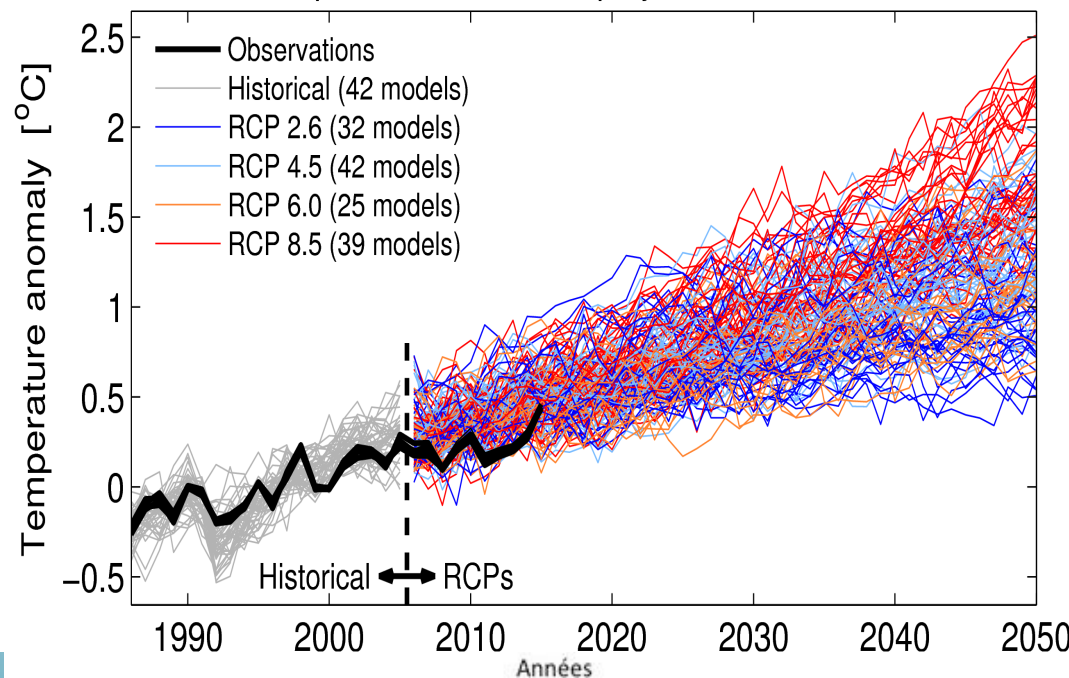
- Un réchauffement moindre pendant 15 ans
- Les modèles semblent presque sur-estimer le réchauffement:
  - Un passage transitoire ?
  - Une erreur dans la sensibilité climatique modèle ?



**Le climat  
a cessé de  
se  
réchauffer**

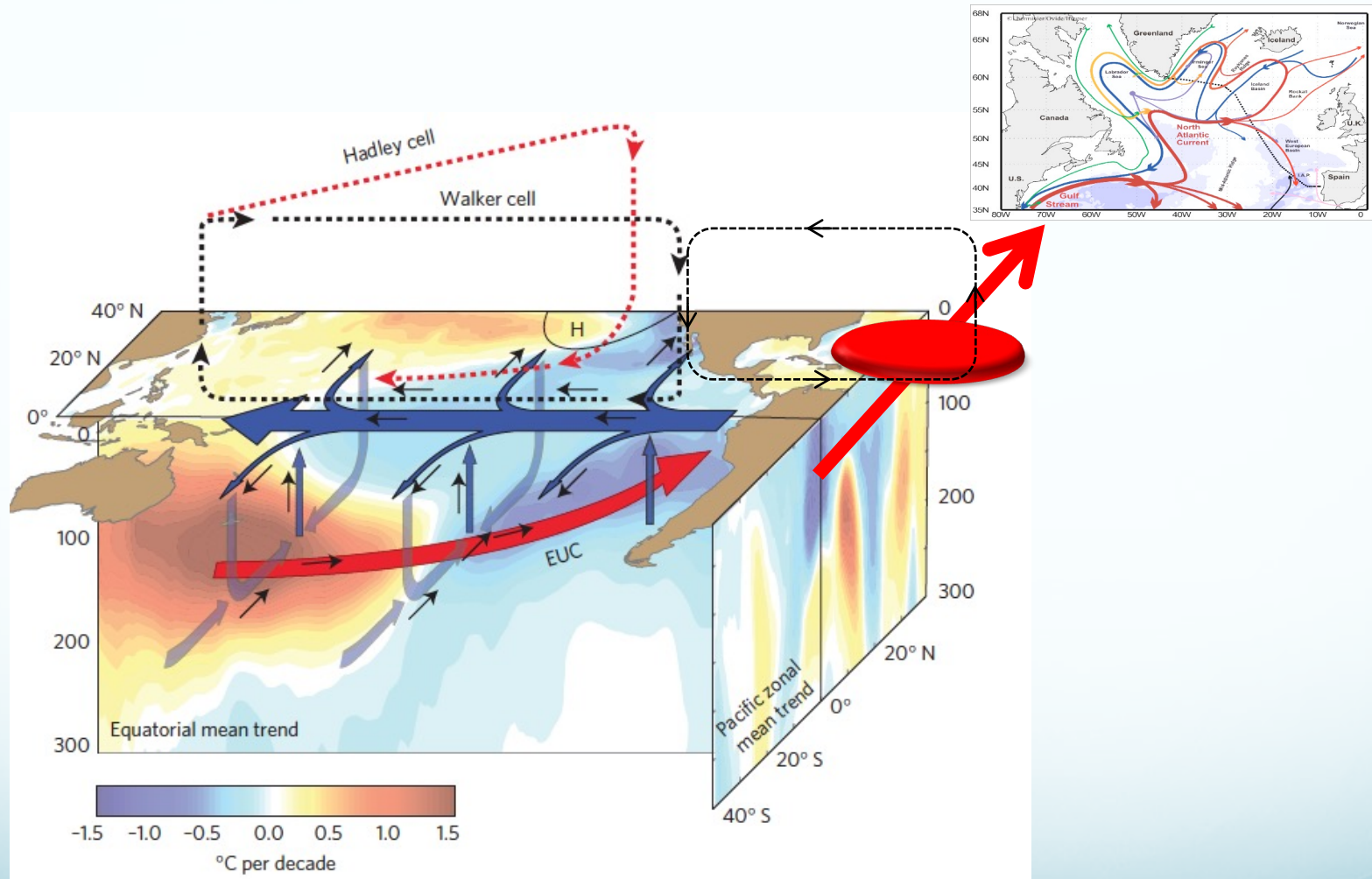


Global mean temperature near-term projections relative to 1986–2005





# Explication du hiatus? Qui mène la danse



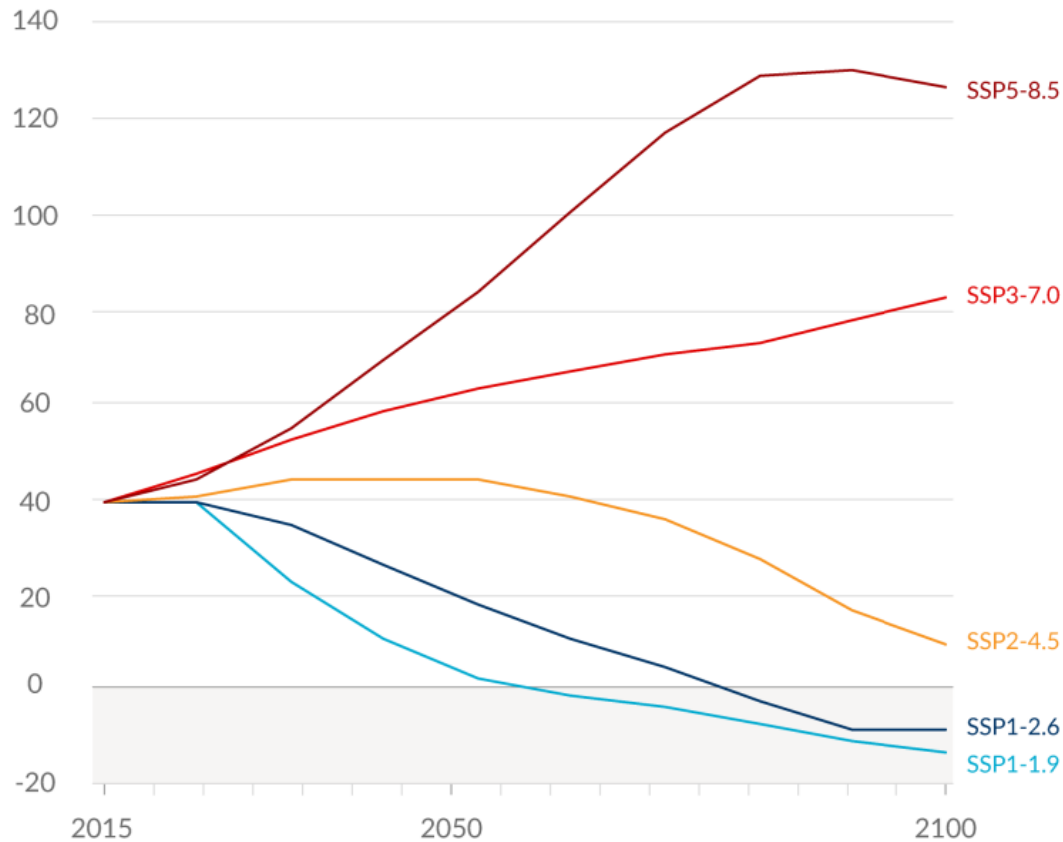
# Projections climatiques

# Des narratifs socio-économiques systémiques

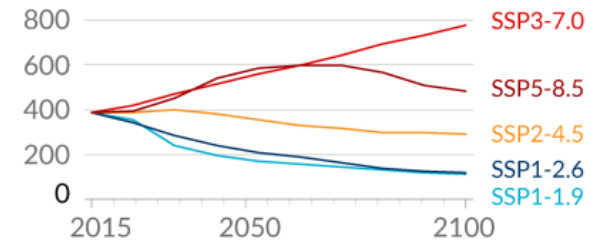
Scenario	Narratif
<b>SSP1</b> <b>Développement durable</b>	Fort coopération internationale, priorité donnée au développement durable, amélioration des conditions de vie et préférences des consommateurs pour des biens et services respectueux de l'environnement, peu intensifs en ressources et en énergie. <span style="float: right;">basses</span>
<b>SSP2</b> <b>Poursuite des tendances</b>	Les tendances sociales, économiques et technologiques actuelles se poursuivent, le développement et la croissance progressent de manière inégale selon les pays et les régions. Les institutions nationales et internationales œuvrent à la réalisation des objectifs de développement durable qui progresse lentement. L'environnement se dégrade malgré un développement moins intensif en ressources et en énergie.
<b>SSP3</b> <b>Rivalités régionales</b>	Résurgence des nationalismes, développement économique lent, persistance des inégalités et des conflits régionaux. Les pays sont guidés par des préoccupations en matière de sécurité et de compétitivité. Ils se concentrent sur les problèmes nationaux voire régionaux et sur les enjeux de sécurité alimentaire et énergétique. Faible priorité internationale pour la protection de l'environnement, qui se dégrade fortement dans certaines régions.
<b>SSP5</b> <b>Développement conventionnel</b>	Développement adossé à l'exploitation forte des énergies fossiles et marqué par des investissements élevés dans la santé, l'éducation et les nouvelles technologies. Adoption de modes de vie intensifs en ressources et en énergie à travers le monde. La croissance économique et le progrès technologique sont élevés. Les problèmes de pollution locale sont bien gérés et l'adaptation est facilitée notamment grâce au recul de la pauvreté.

# Cinq scénarios futurs d'émission de CO<sub>2</sub> et autres gaz clefs

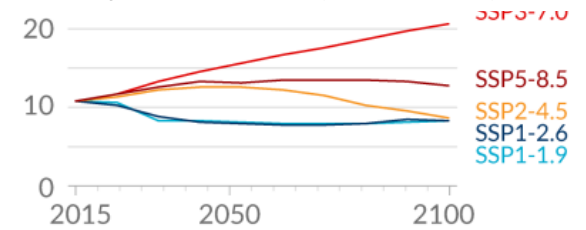
c: Dioxyde de carbone (GtCO<sub>2</sub>/an)



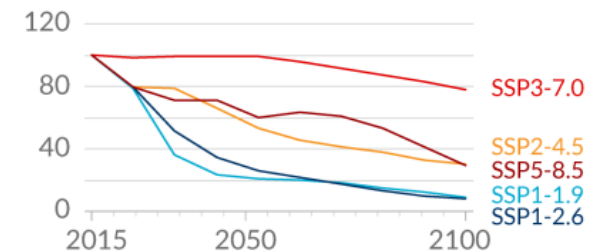
Méthane (GtCH<sub>4</sub>/an)



Protoxyde d'azote (GtN<sub>2</sub>O/an)



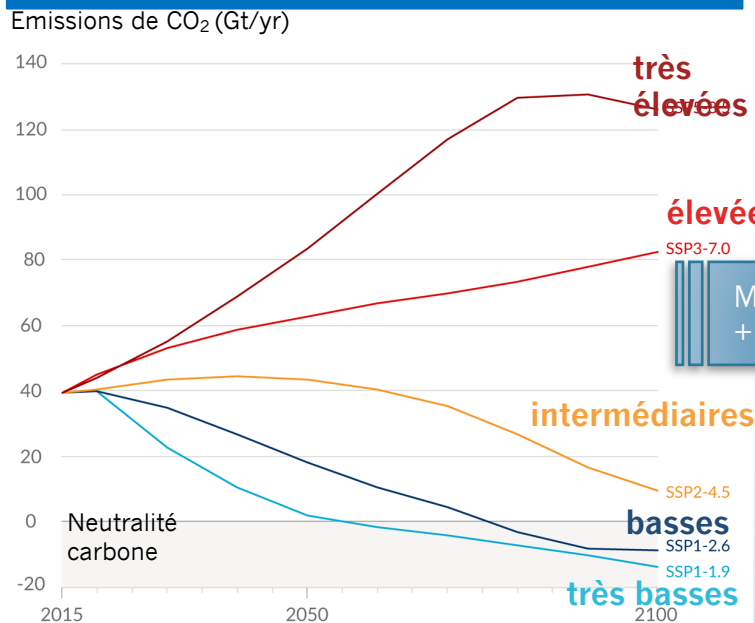
Pollution liée aux aérosols (MtSO<sub>2</sub>/an)



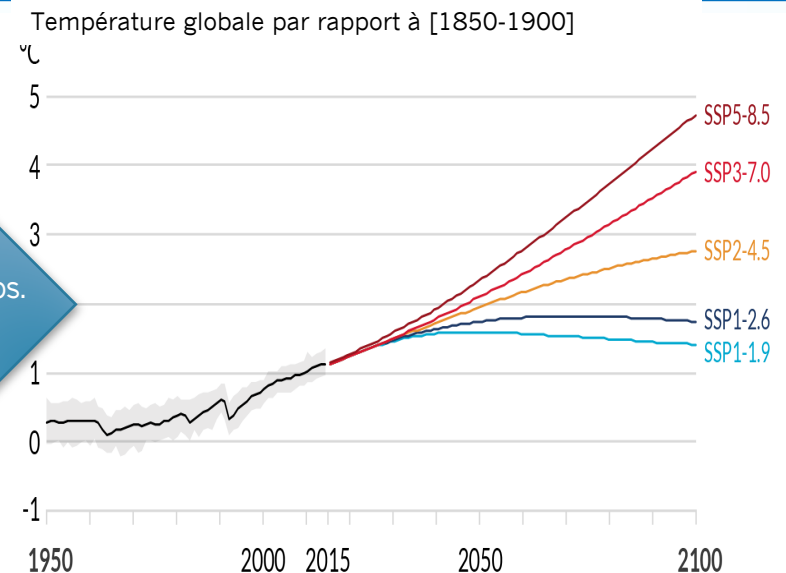


# Des narratifs socio-économiques systemiques *traduits* (1) en émission de gaz à effet de serre & usage des sols puis (2) en projections climatiques

(1) Sélection de 5 scénarios illustratifs contrastés



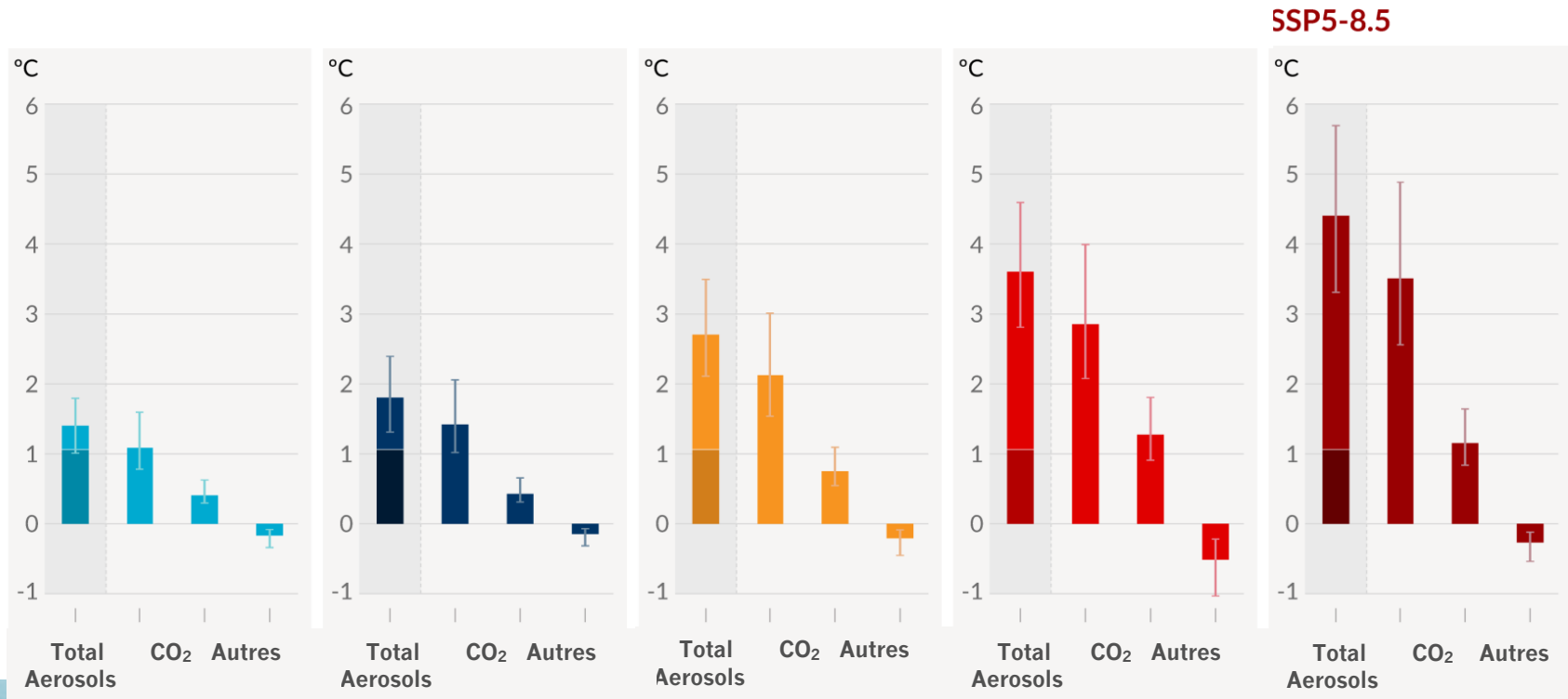
(2) Réchauffement global en fonction des 5 scénarios illustratifs



Modèles + obs.  
+ Processus

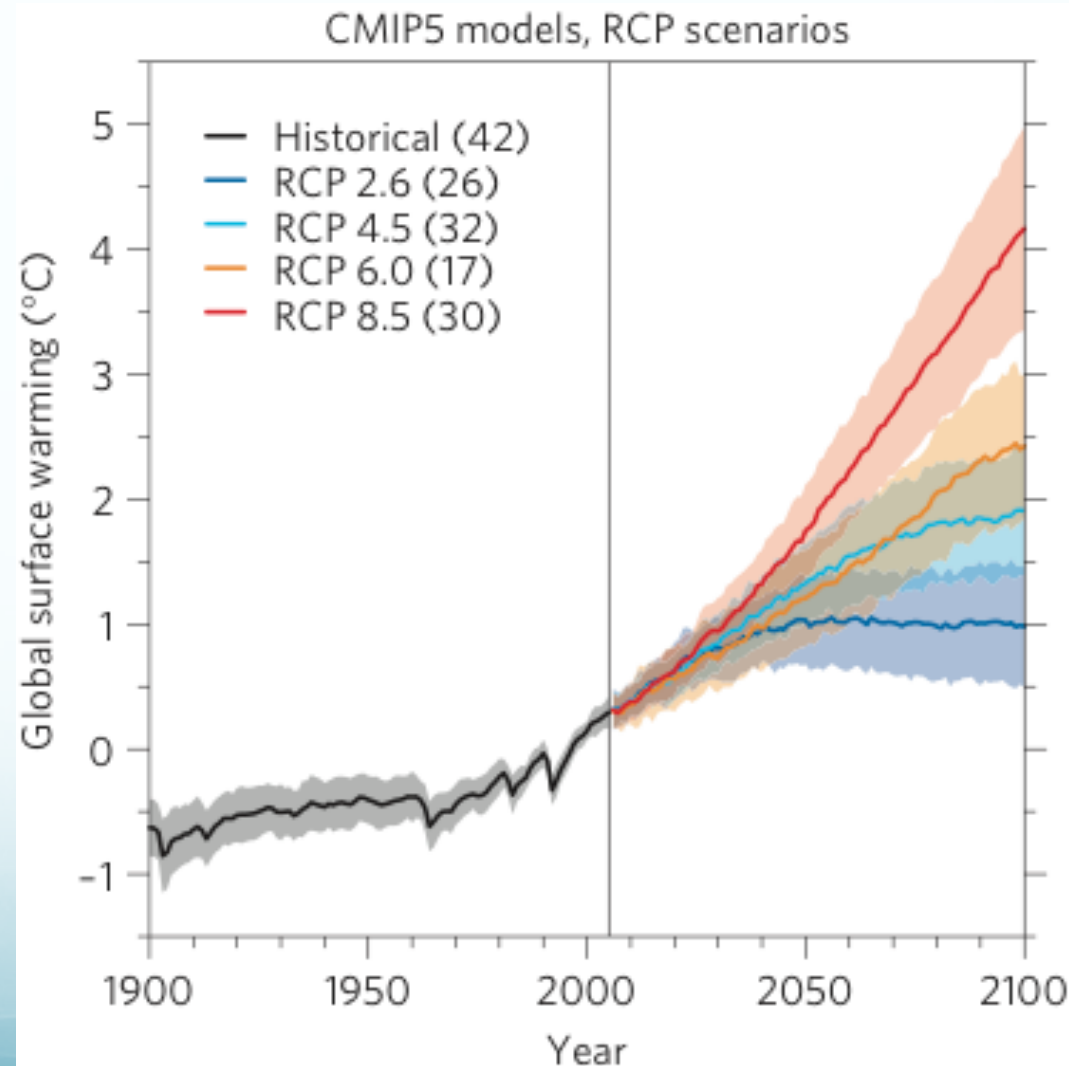
# Les impacts des émissions futures sont dominés par le CO<sub>2</sub>

Changement de température globale en 2081-2100 par rapport à 1850-1900 (en °C)

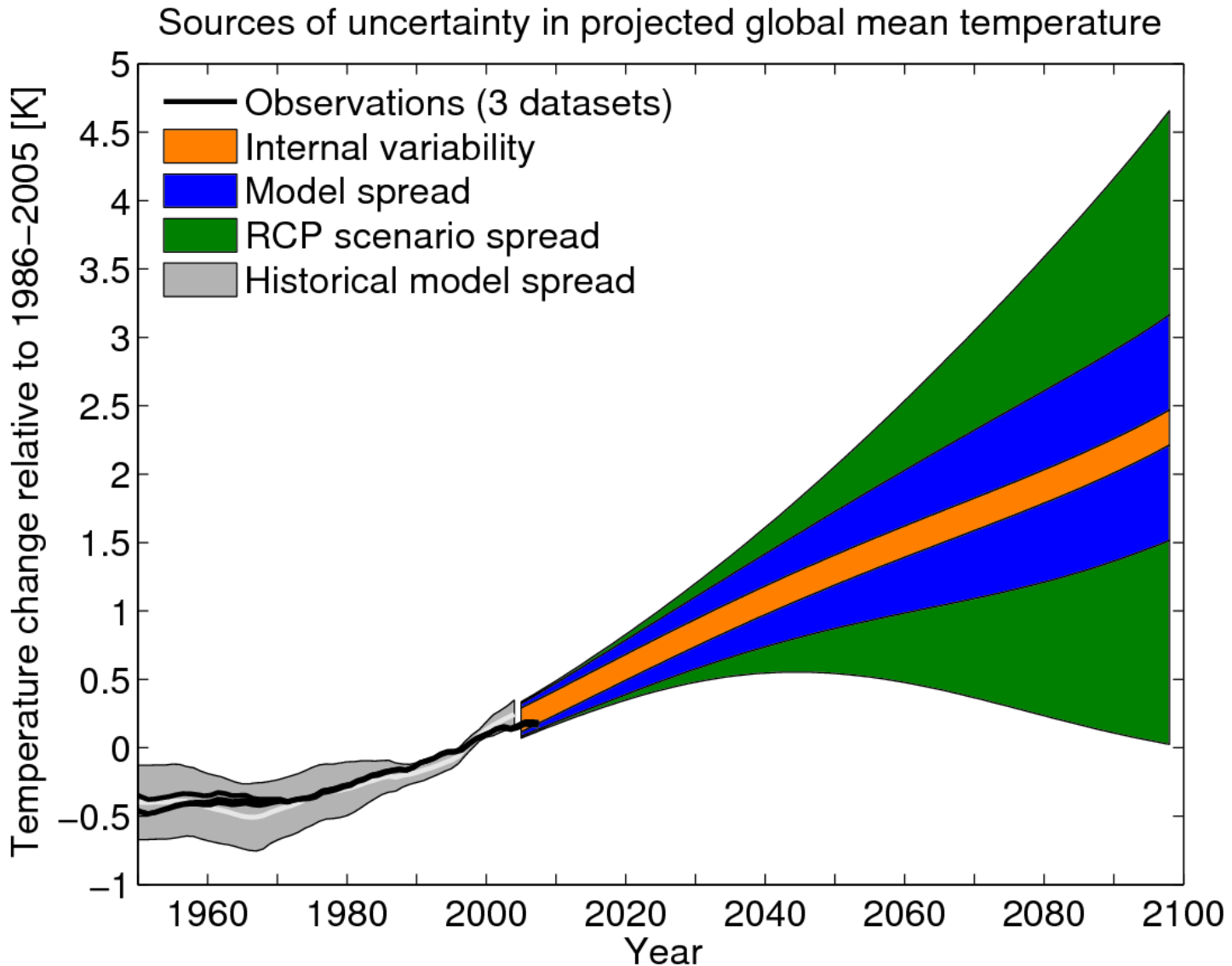


# Projections climatiques

- Des dizaines de modèles développés de par le monde
- Deux en France (Paris et Toulouse)
- Projettent un réchauffement entre 1 et 4°C en 2100 selon nos émissions

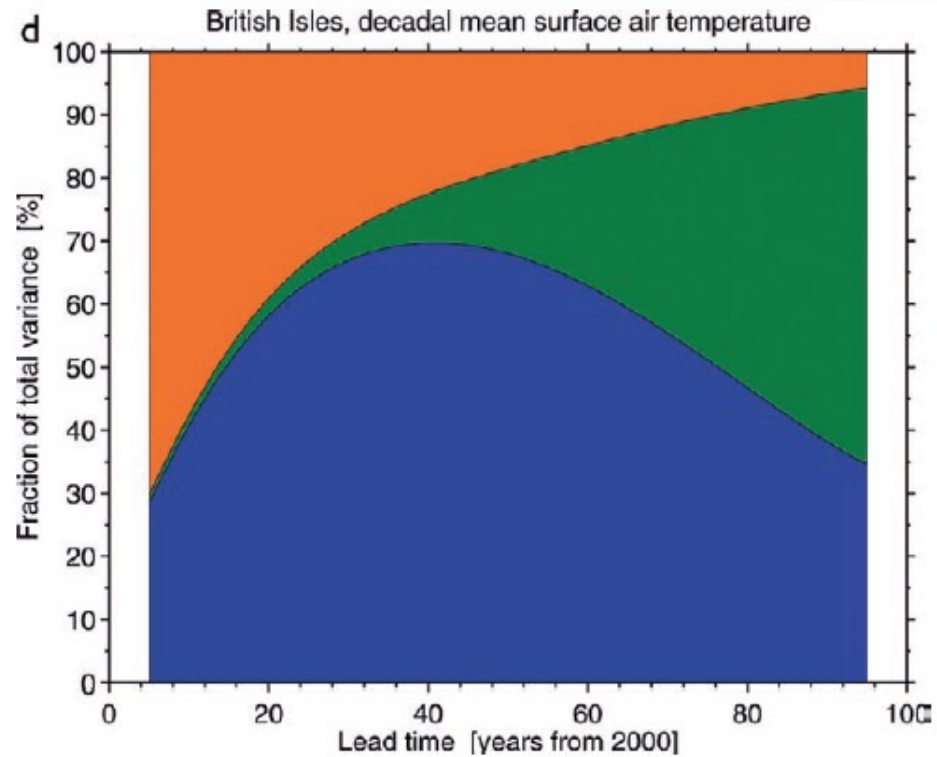
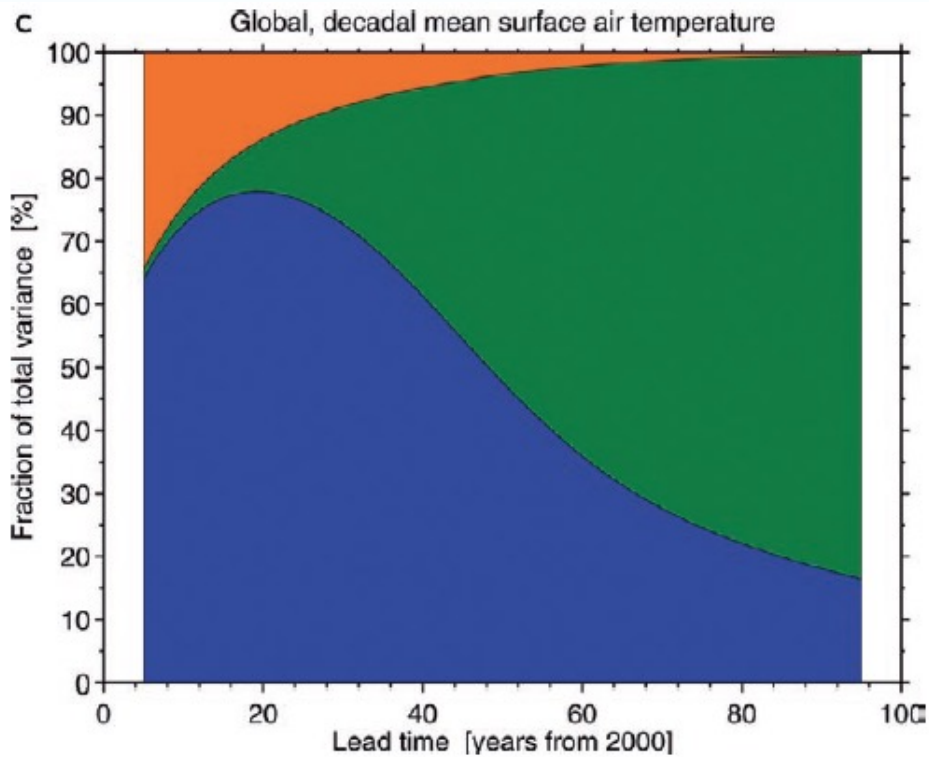


# Notion d'incertitudes





# Incertitudes



# Conclusions

- 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 !

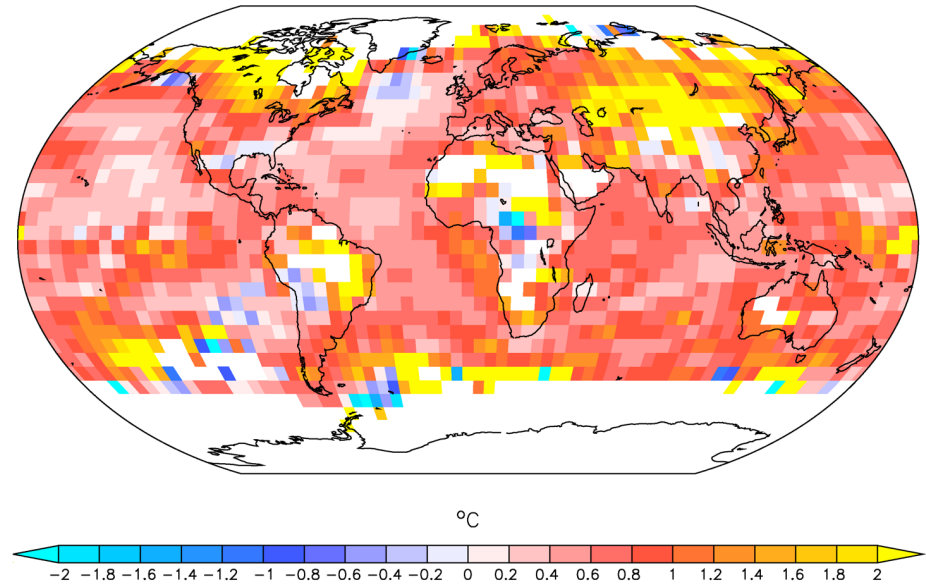
# Merci !



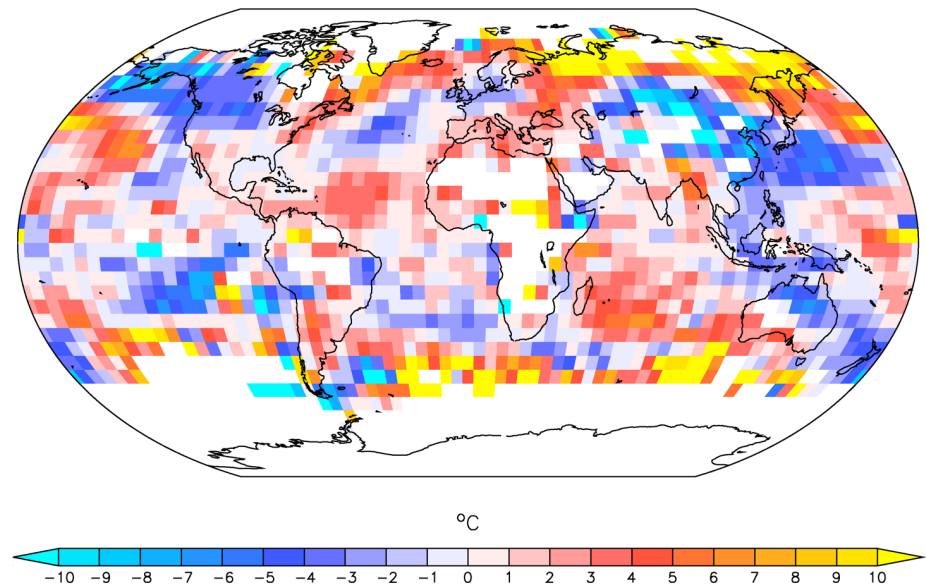
# Un plateau de température ?

- Si la tendance sur un siècle est assez homogène, celle sur 15 ans est beaucoup plus bruitée
- Une signature de la variabilité naturelle qui se superpose au signal de réchauffement ?

Tendance 1850-2012



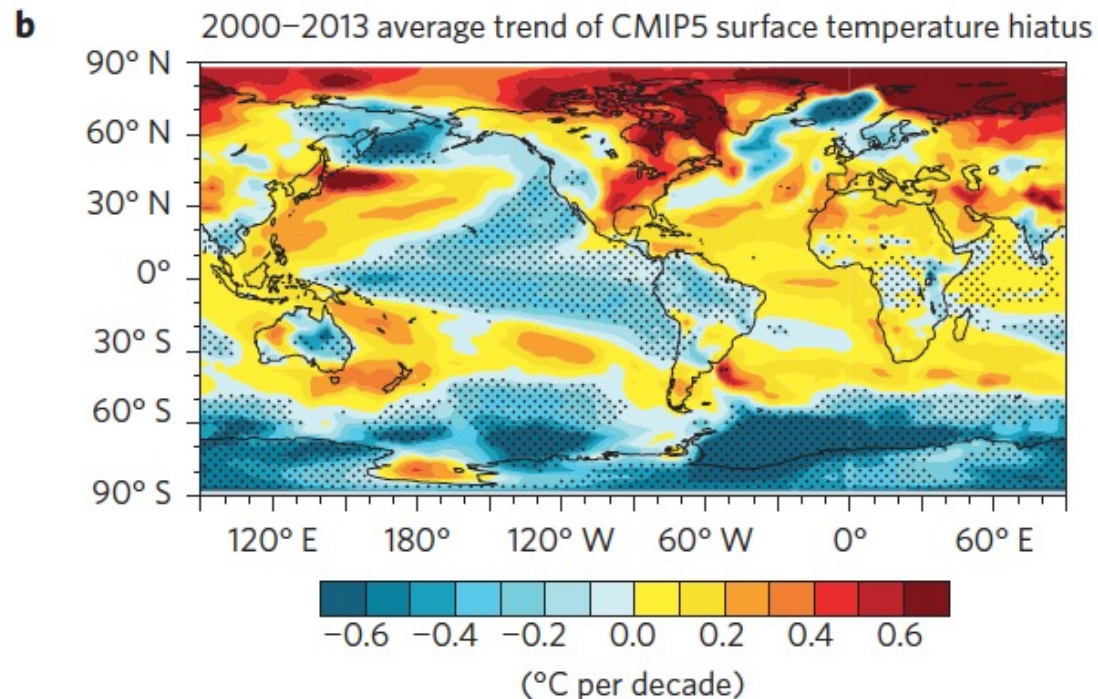
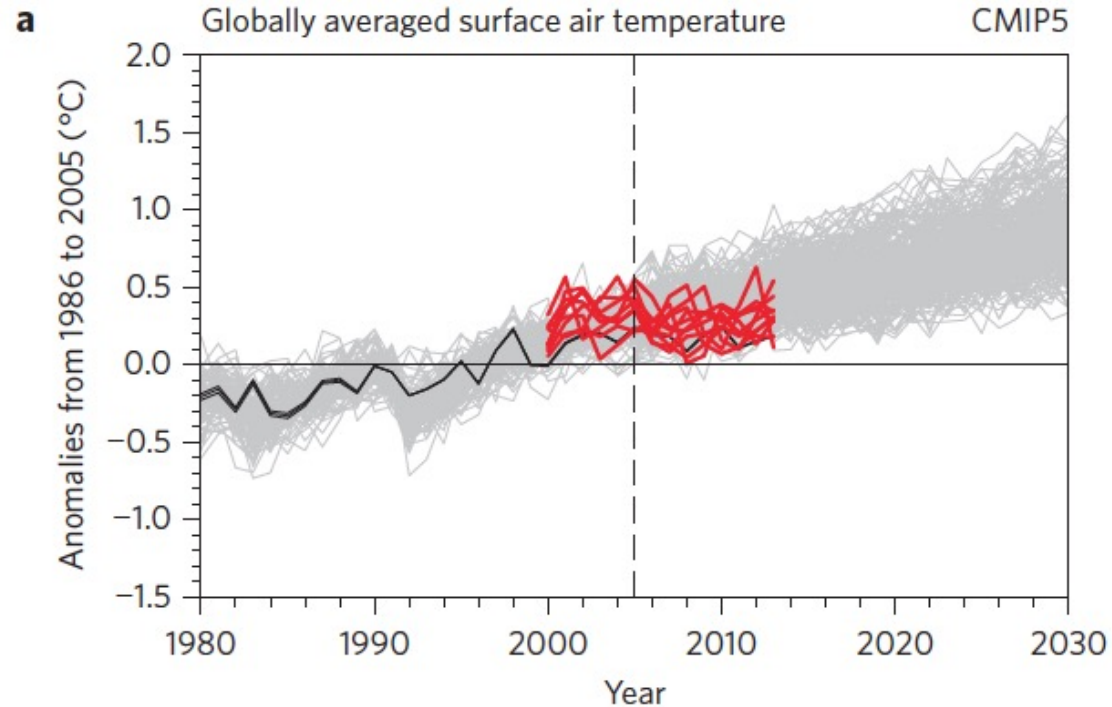
Tendance 1998-2012





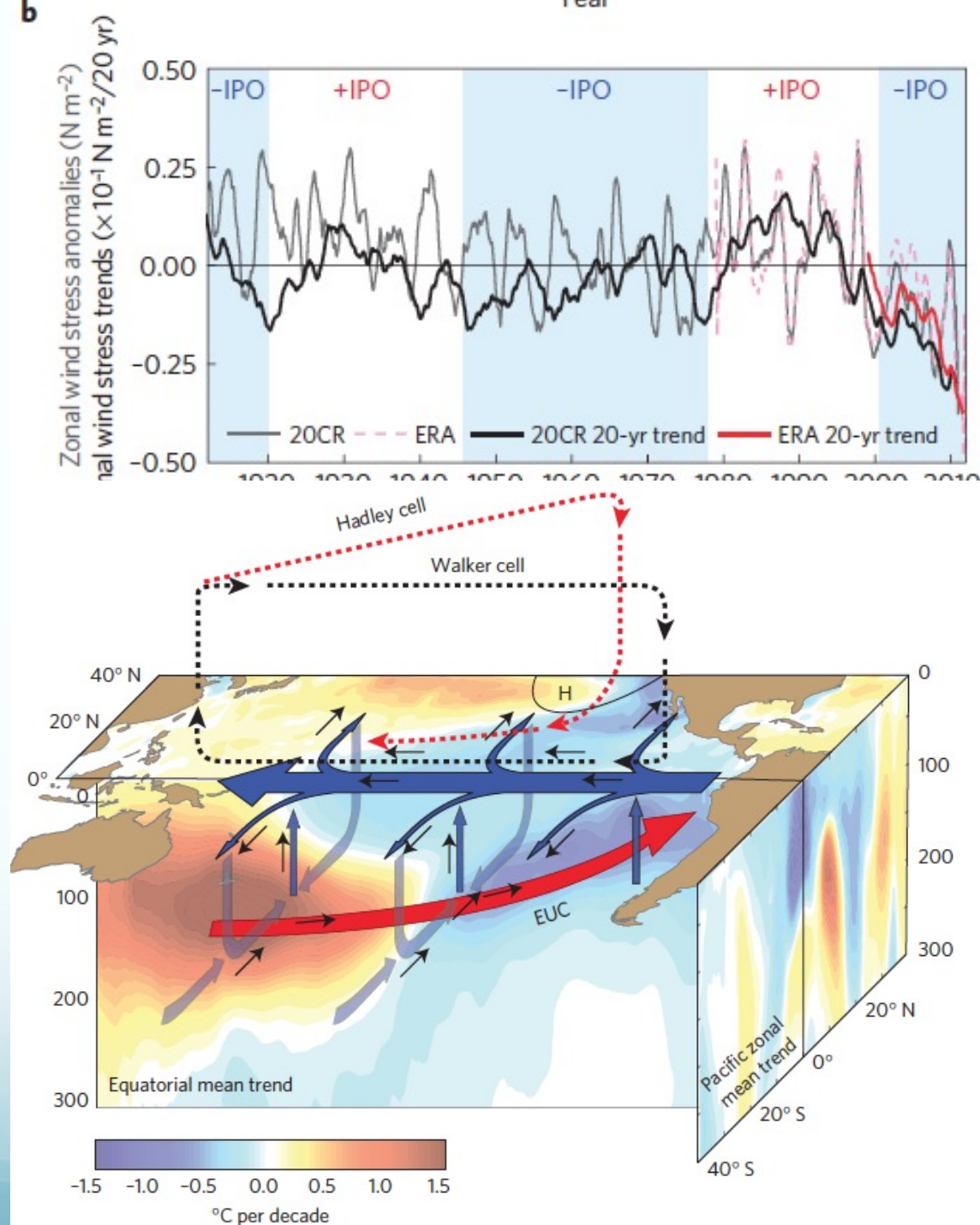
# Hiatus & Modèles

- Les modèles ne le reproduisent pas ?
- Meehl et al. 2014; il faut choisir ceux qui font une phase négative de la PDO !



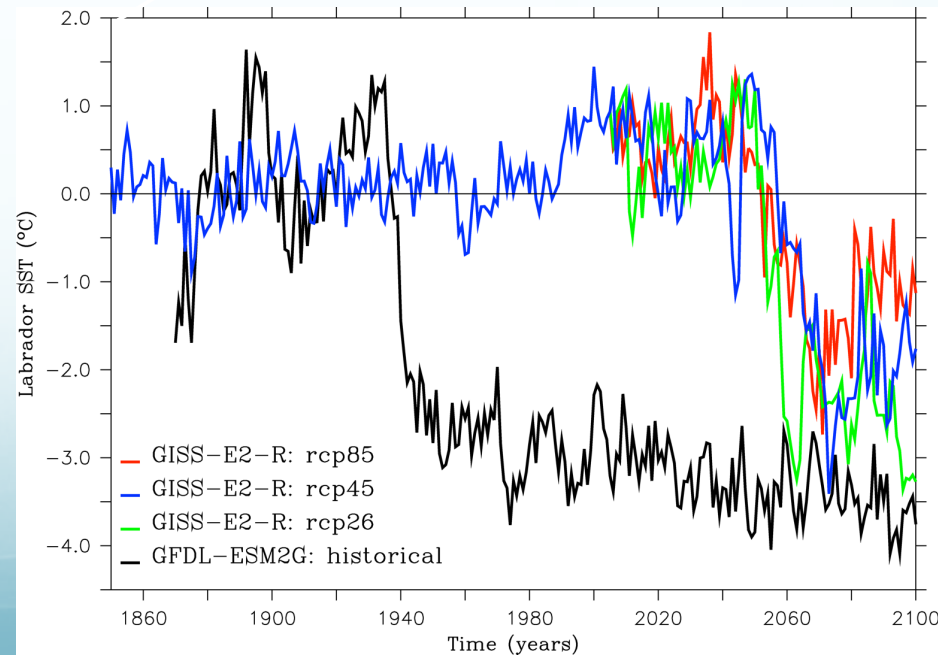
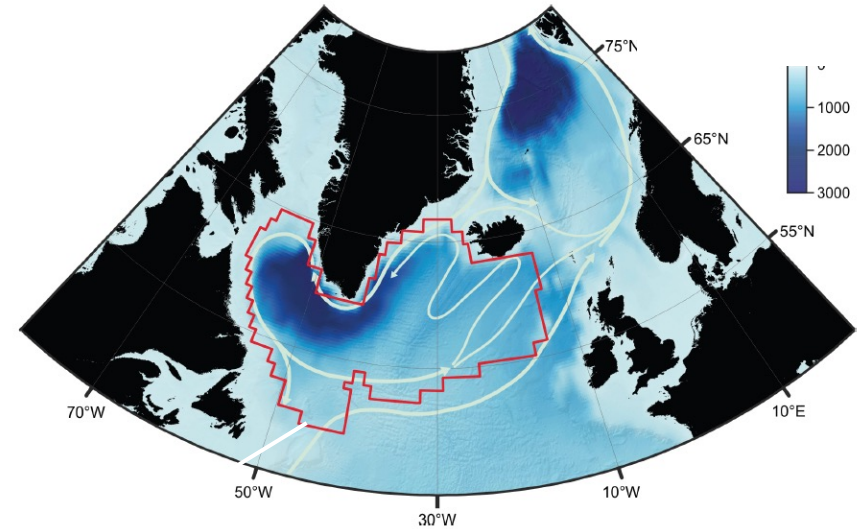
# Explication du hiatus?

- Les Alizées se sont renforcés fortement ces dernières années (England et al. 2014)
- Ajustement Pacifique amène plus d'eaux chaudes en profondeur et des eaux froides en surface



# Surprise climatique ?

- Certains modèles de climat prévoient des changements abrupts de température, avec un refroidissement de 2-3°C en moins de 10 ans dans la gyre subpolaire.





# L'étonnant scénario du refroidissement

Estimation d'écart de températures\* entre le début et la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (2015-2100).

