

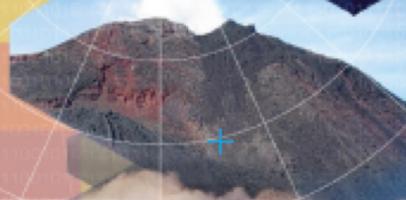
Introduction à la dynamique et modélisation du climat

Didier Swingedouw
didier.swingedouw@u-bordeaux1.fr

http://www.epoc.u-bordeaux.fr/indiv/Didier/public_html/Cours.html

CLIMAT

Modéliser pour comprendre et anticiper



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

Qu'est-ce que le climat ?

Définition du climat

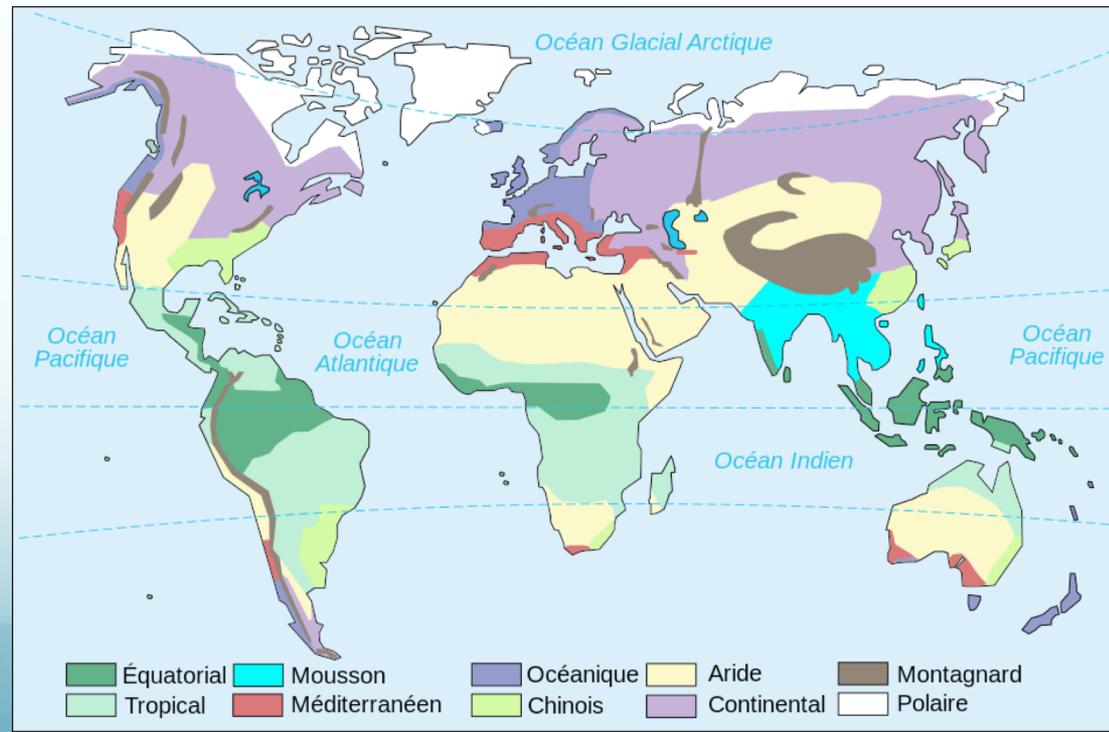
- Larousse : Ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un lieu donné.
- Wikipédia : Le climat est la distribution statistique des conditions de l'atmosphère terrestre dans une région donnée pendant une période donnée. Il se distingue de la météorologie 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

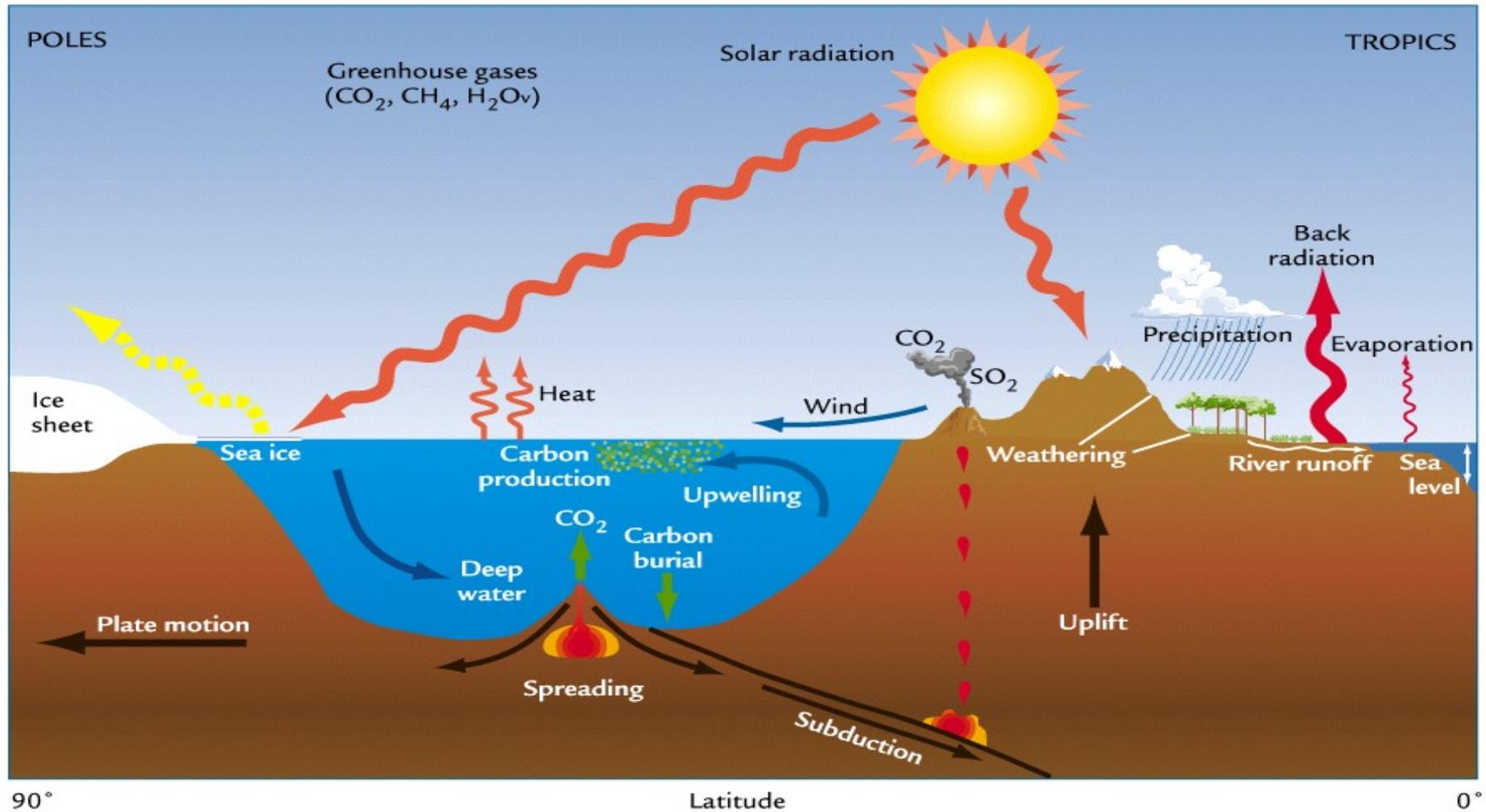


Définition du climat

- Le climat n'est pas un système physique ?
- Pourquoi 30 ans ?
- Antropocentrisme 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 !

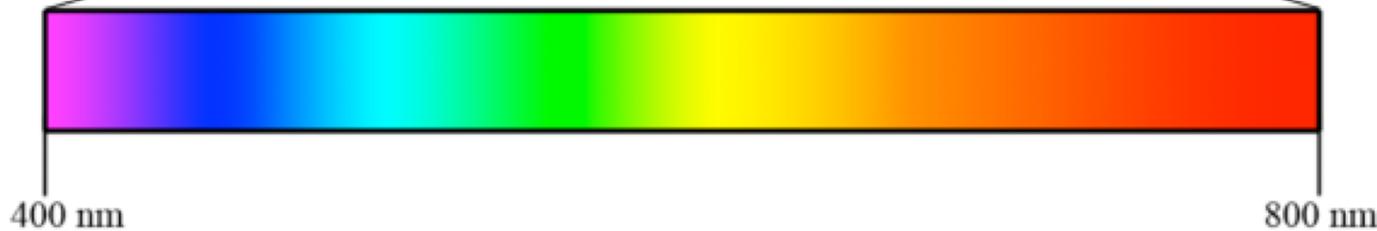
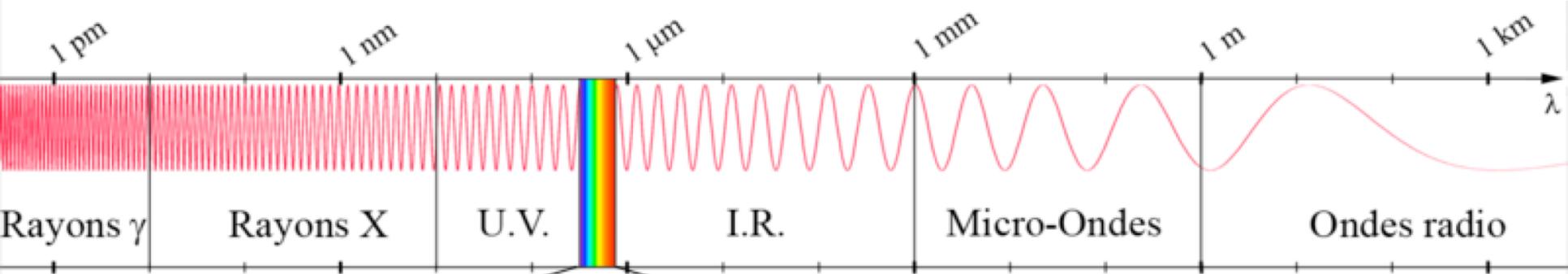
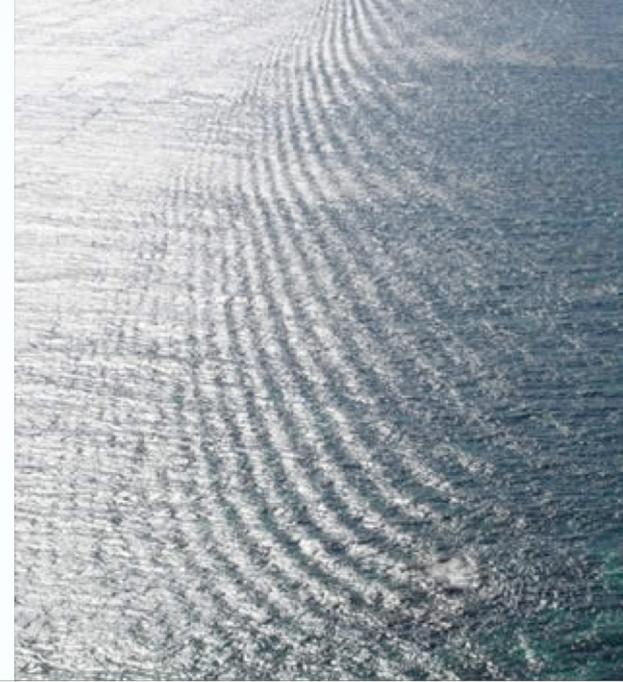


Notion de système climatique

- 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.

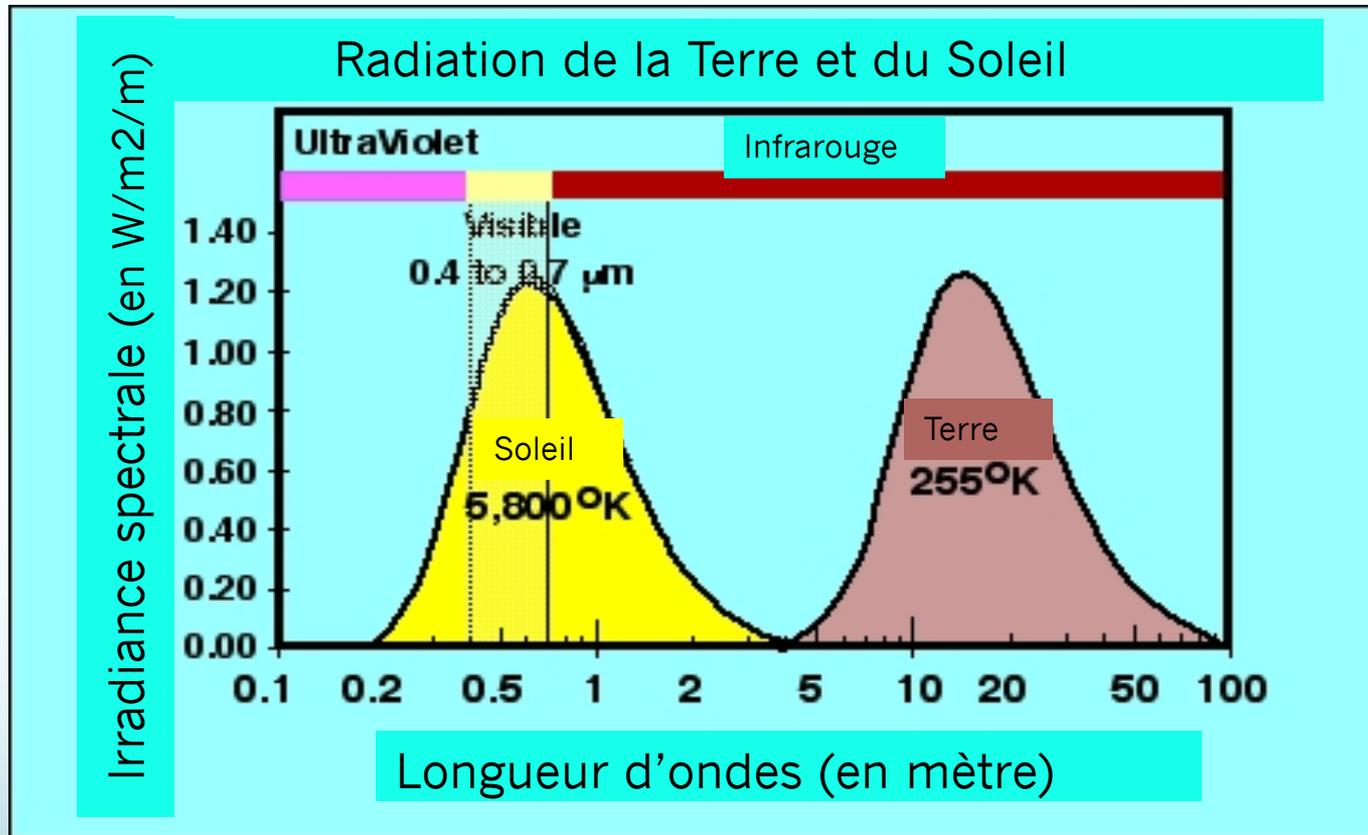
Ondes et rayonnement électromagnétiques

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



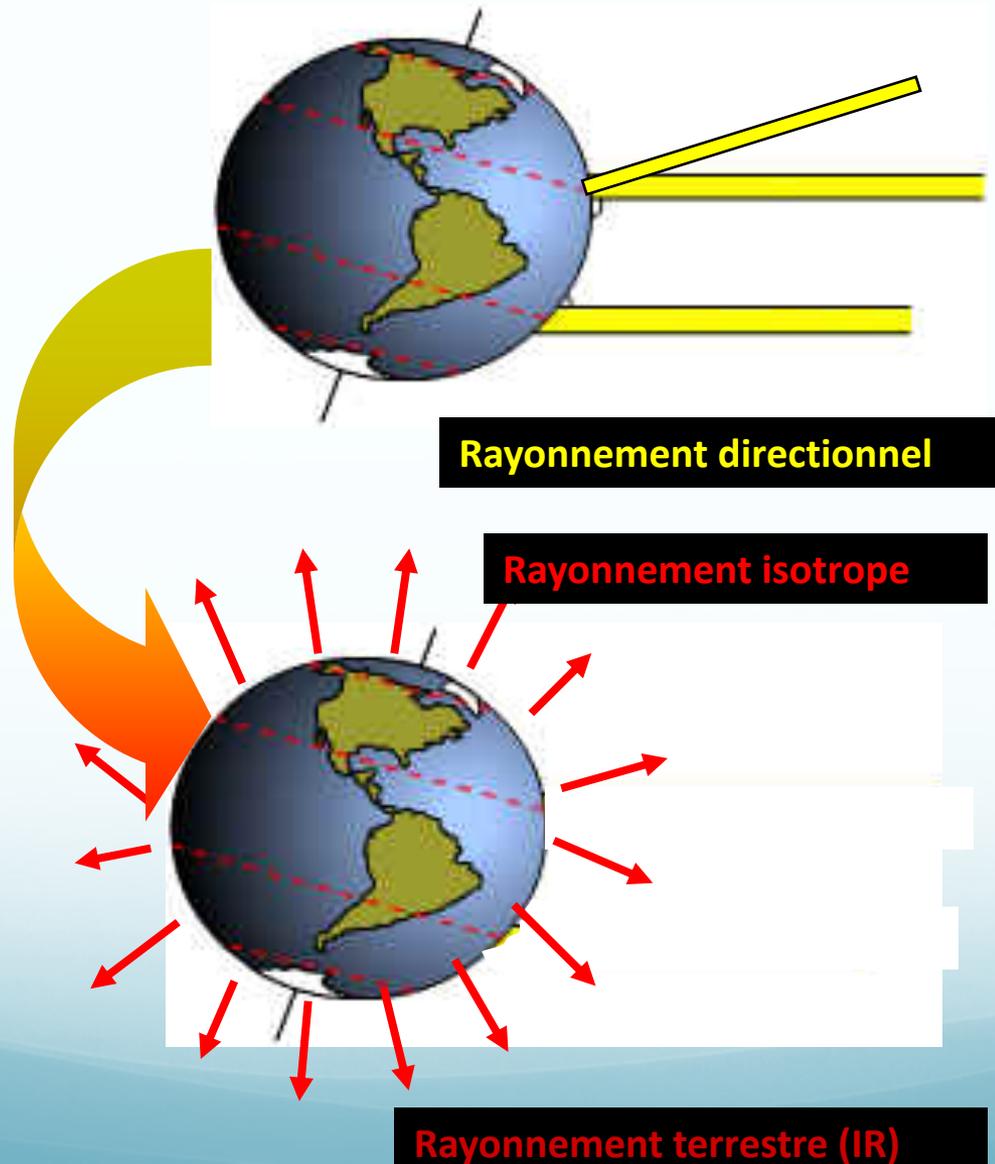
Loi de **Stefan-Boltzmann** stipule le flux d'énergie émis par un corps noir est lié à sa température à la puissance 4.

$$F = \sigma T^4$$

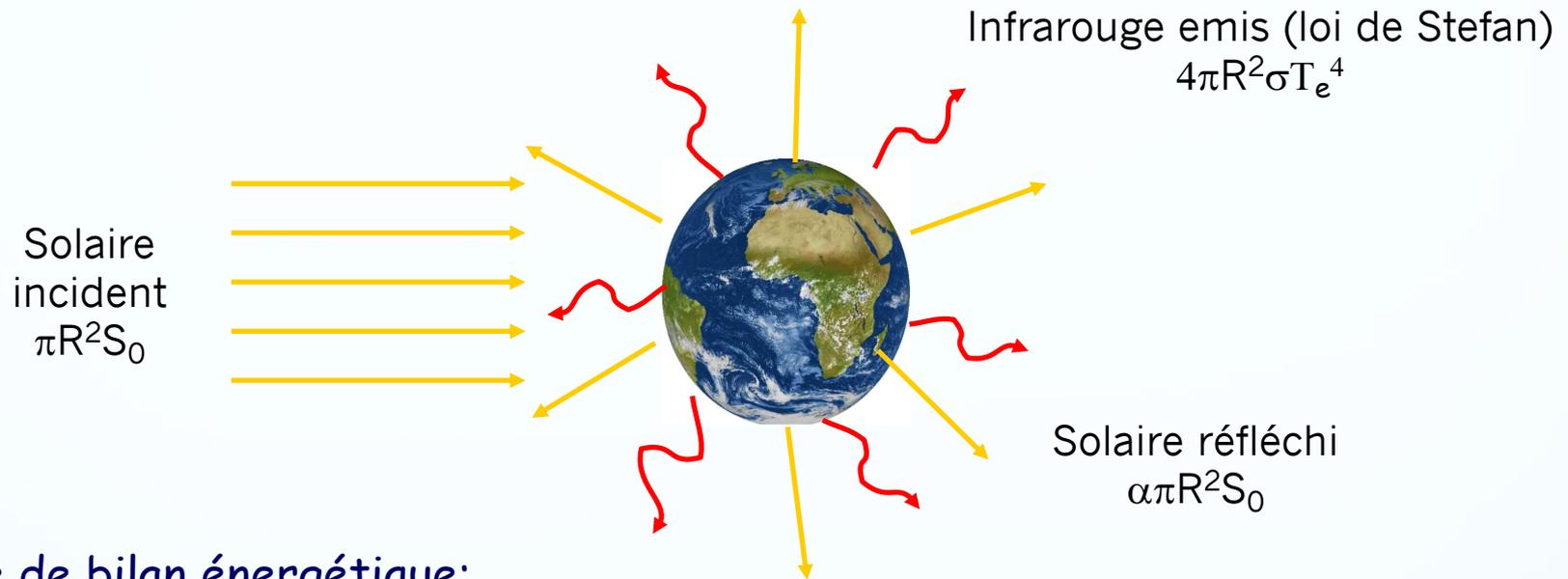
Plan du cours

- 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

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

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

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

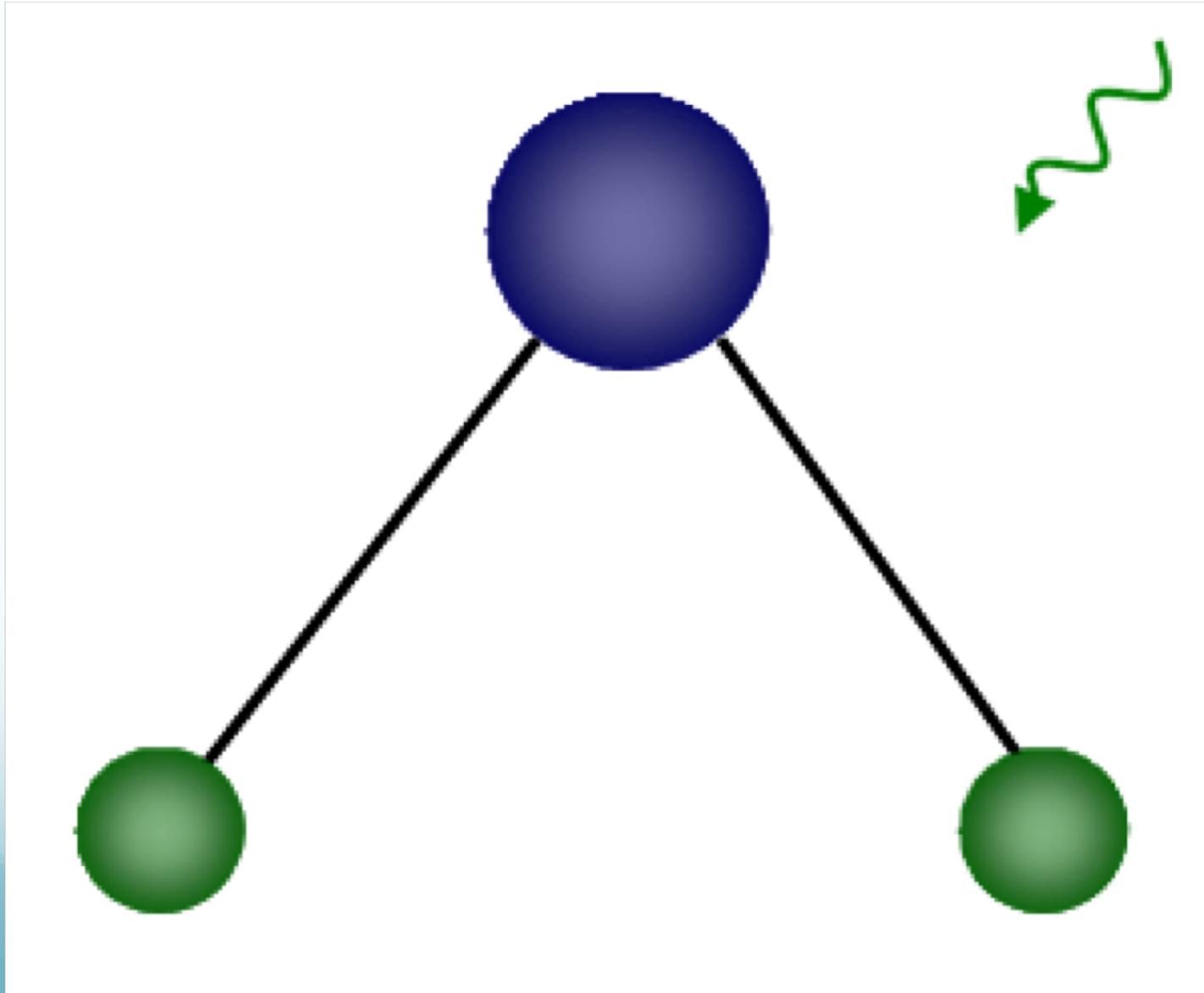
Effet de serre:

$T_s = 288\text{K}$

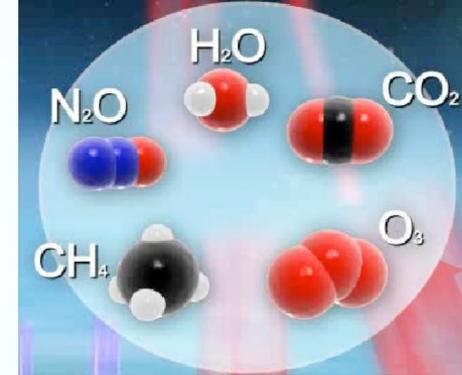
Histoire de l'effet de serre

- **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

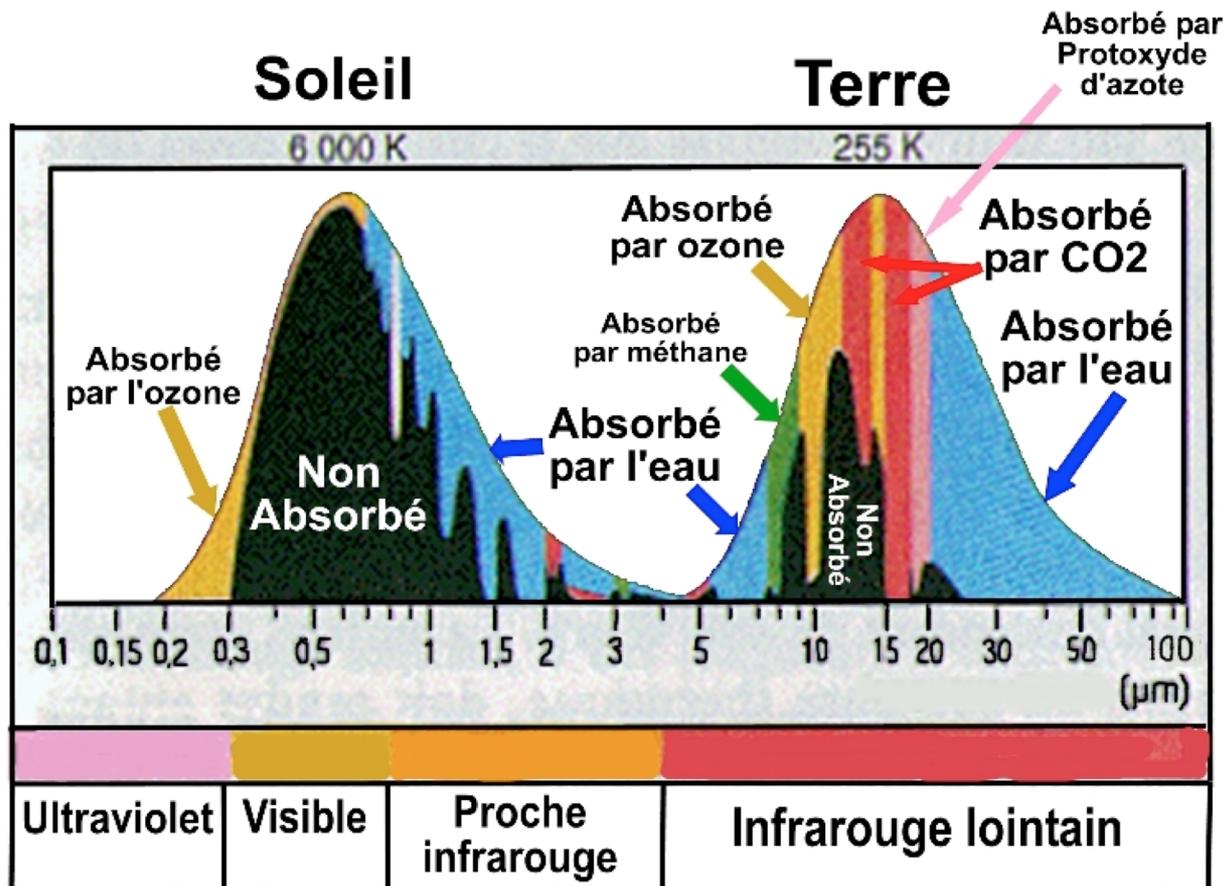
Principe de l'effet de serre



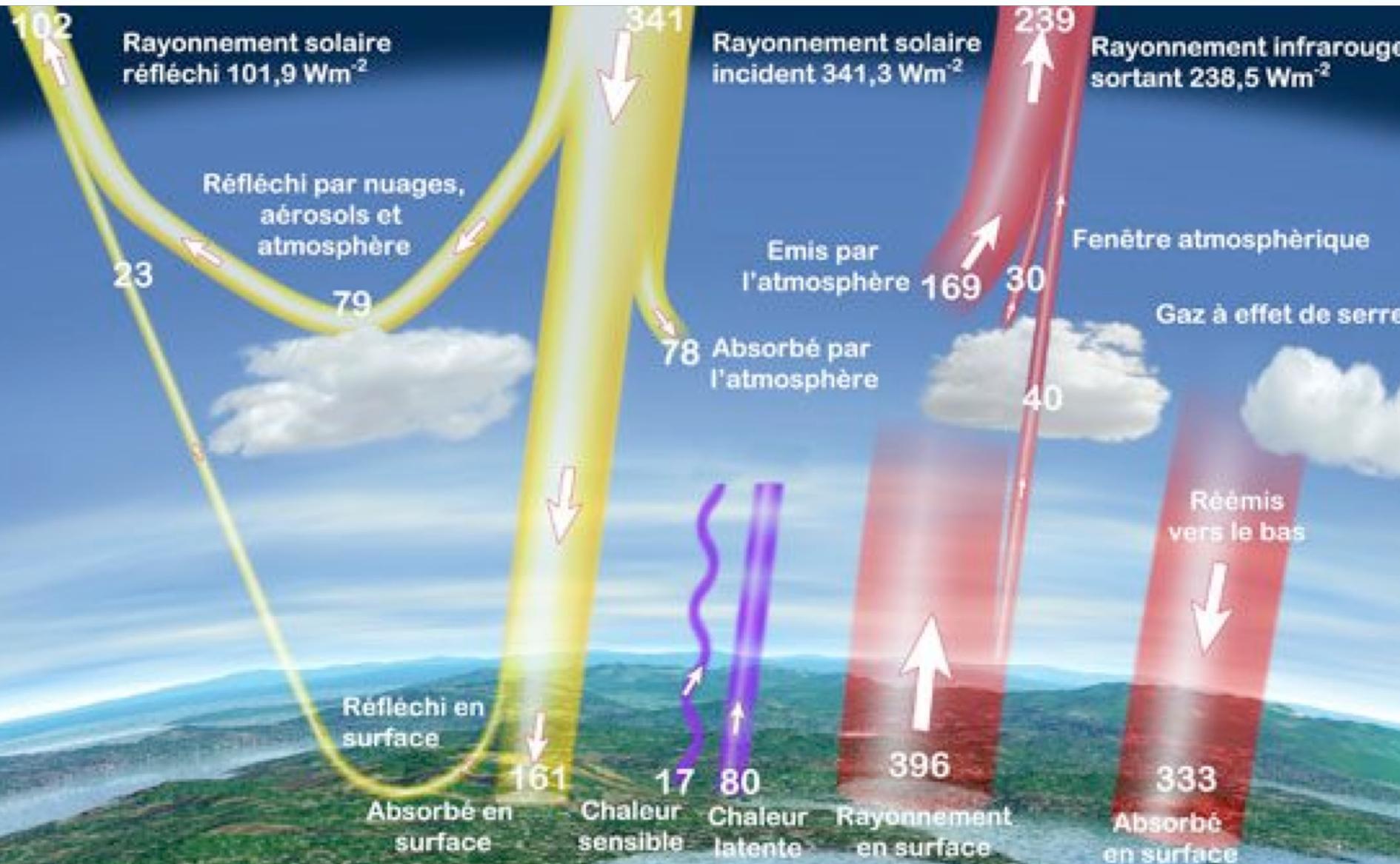
Gaz à effet de serre



Spectre d'absorption du rayonnement thermique

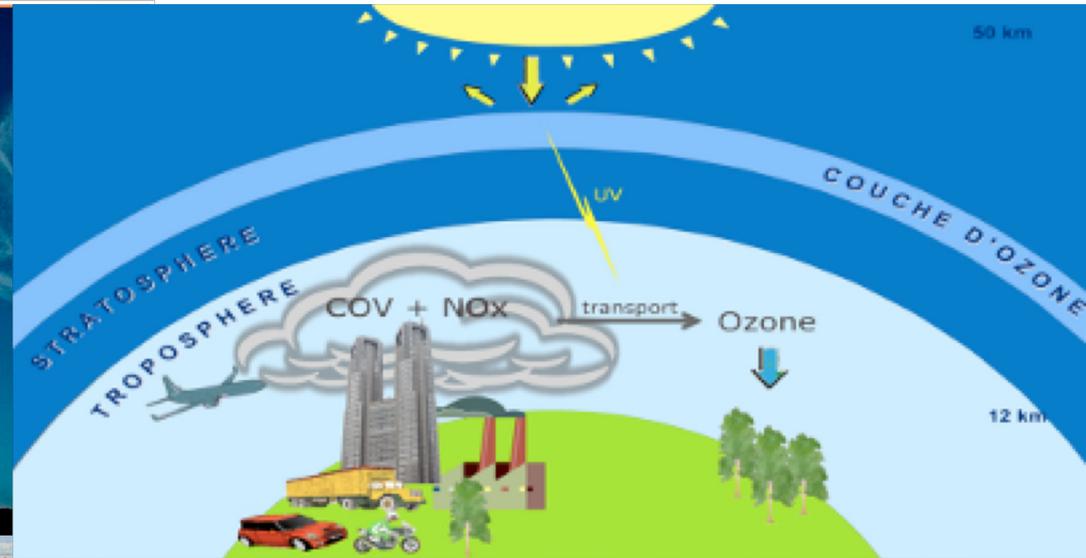


Bilan radiatif "réel"

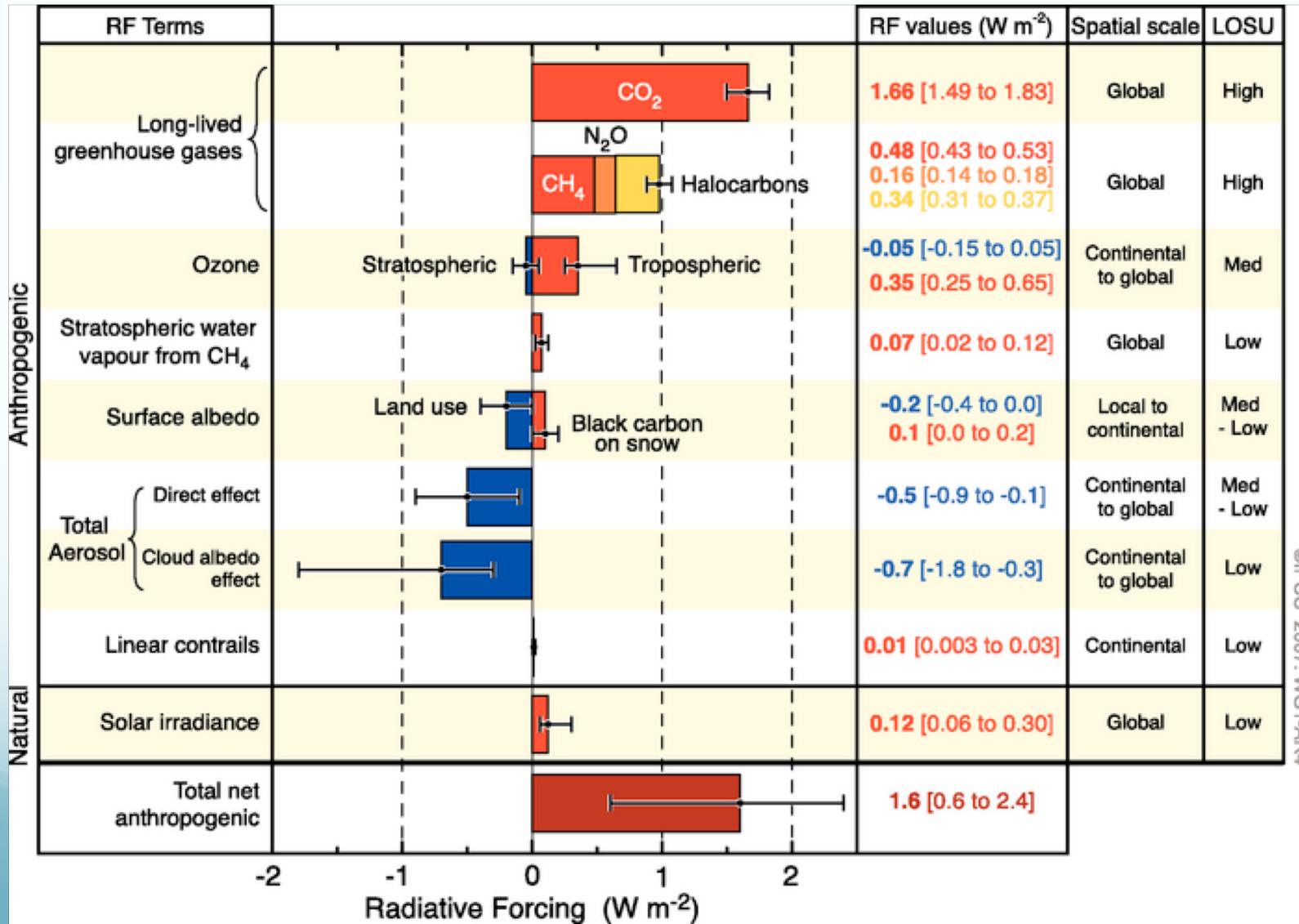


Différents forçages climatiques

Volcans,
aerosols,

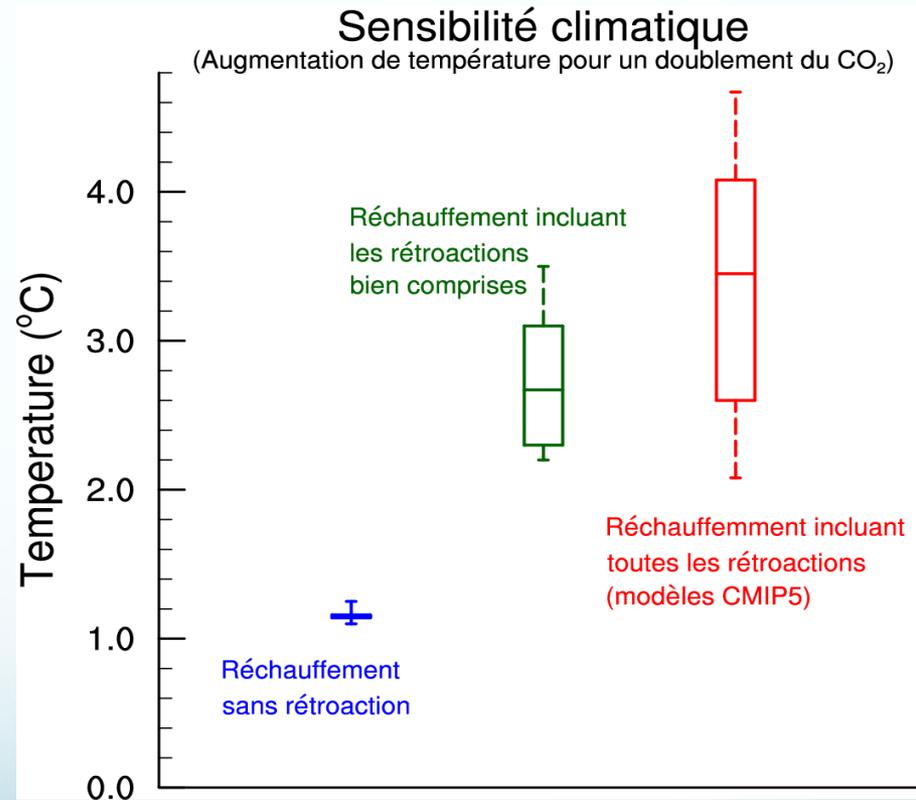


Changement de forçage externe (100 dernières années)



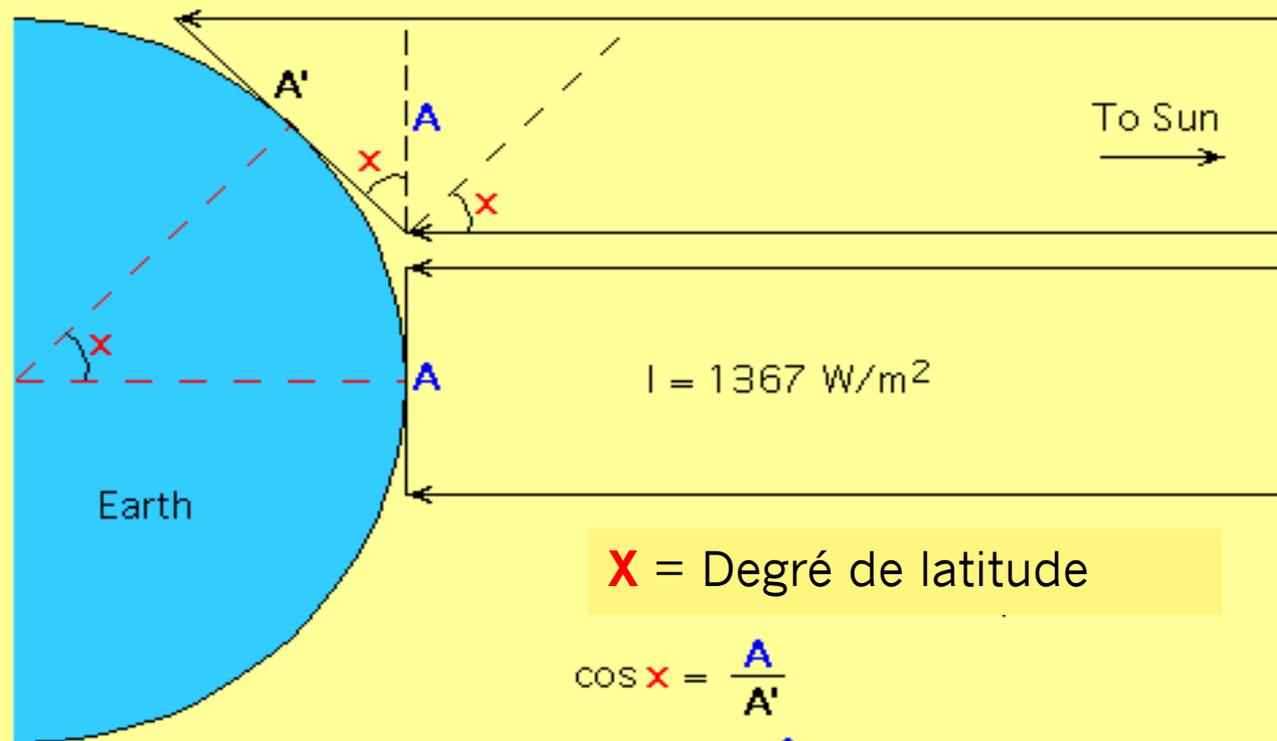
Notion de sensibilité climatique

- Augmentation de température pour un doublement de CO_2 (de 280 à 560 ppm par ex.)
- Evaluation des rétroactions robustes :
 - Albedo
 - Vapeur d'eau
 - nuages



Pour sortir de l'approche à une dimension !

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

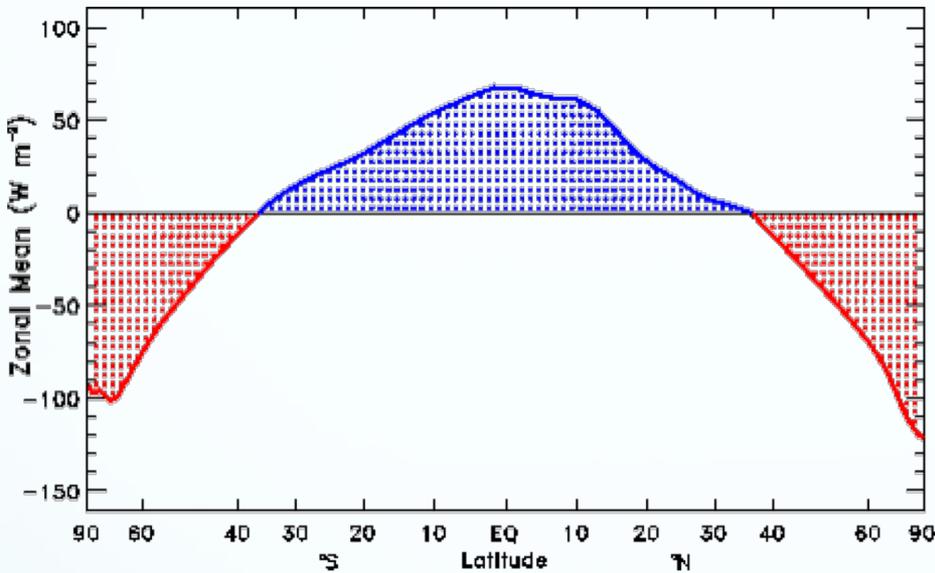


X = Degré de latitude

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

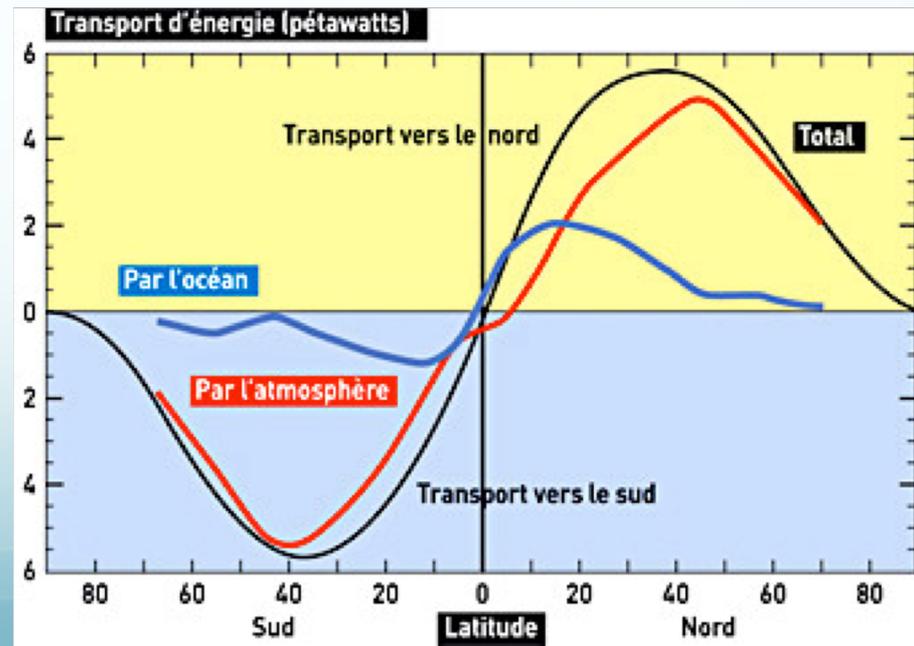
$$A' = \frac{A}{\cos X}$$

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

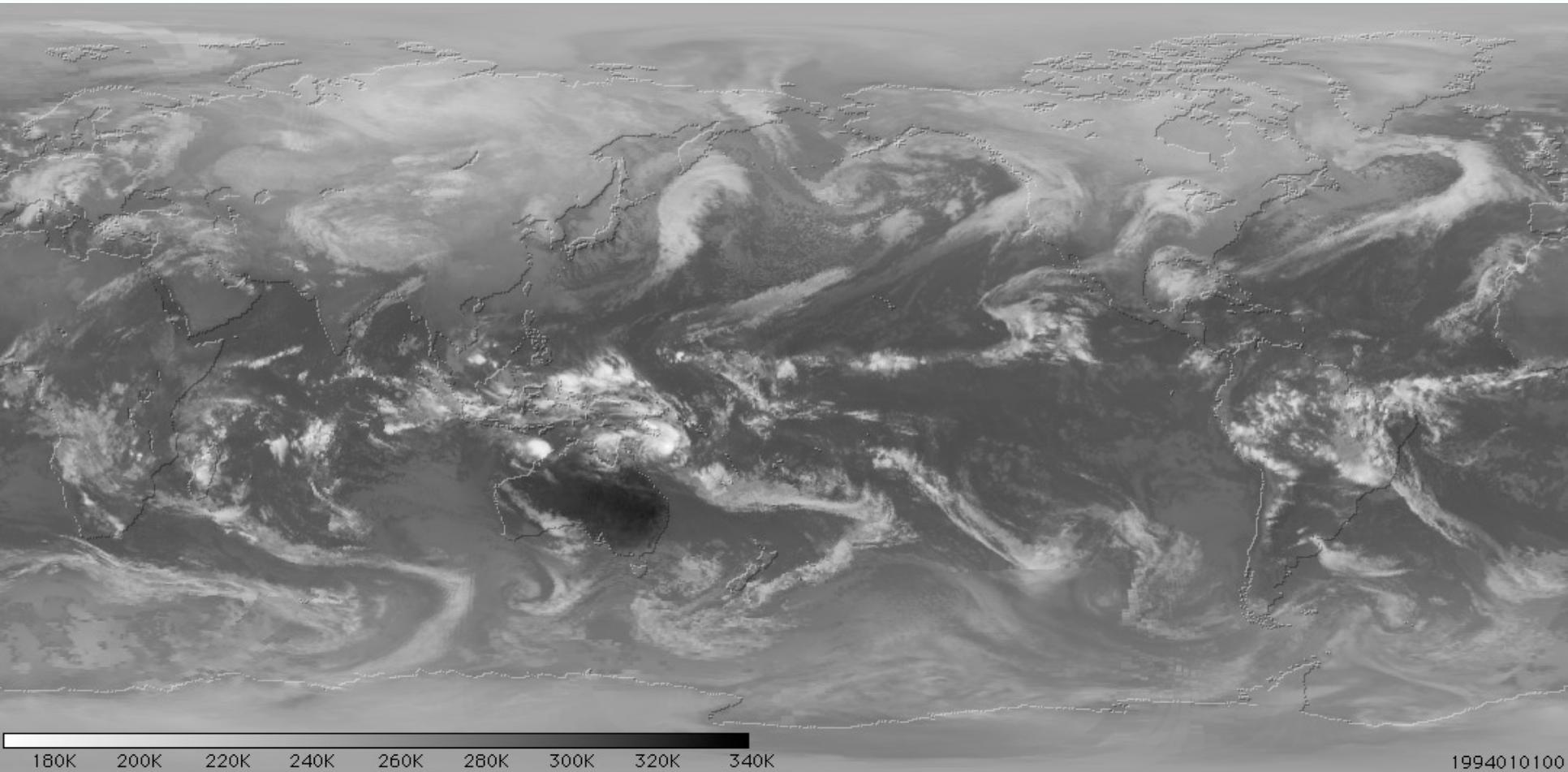


Transport vers le Nord par l'atmosphère et par l'océan (PW)

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



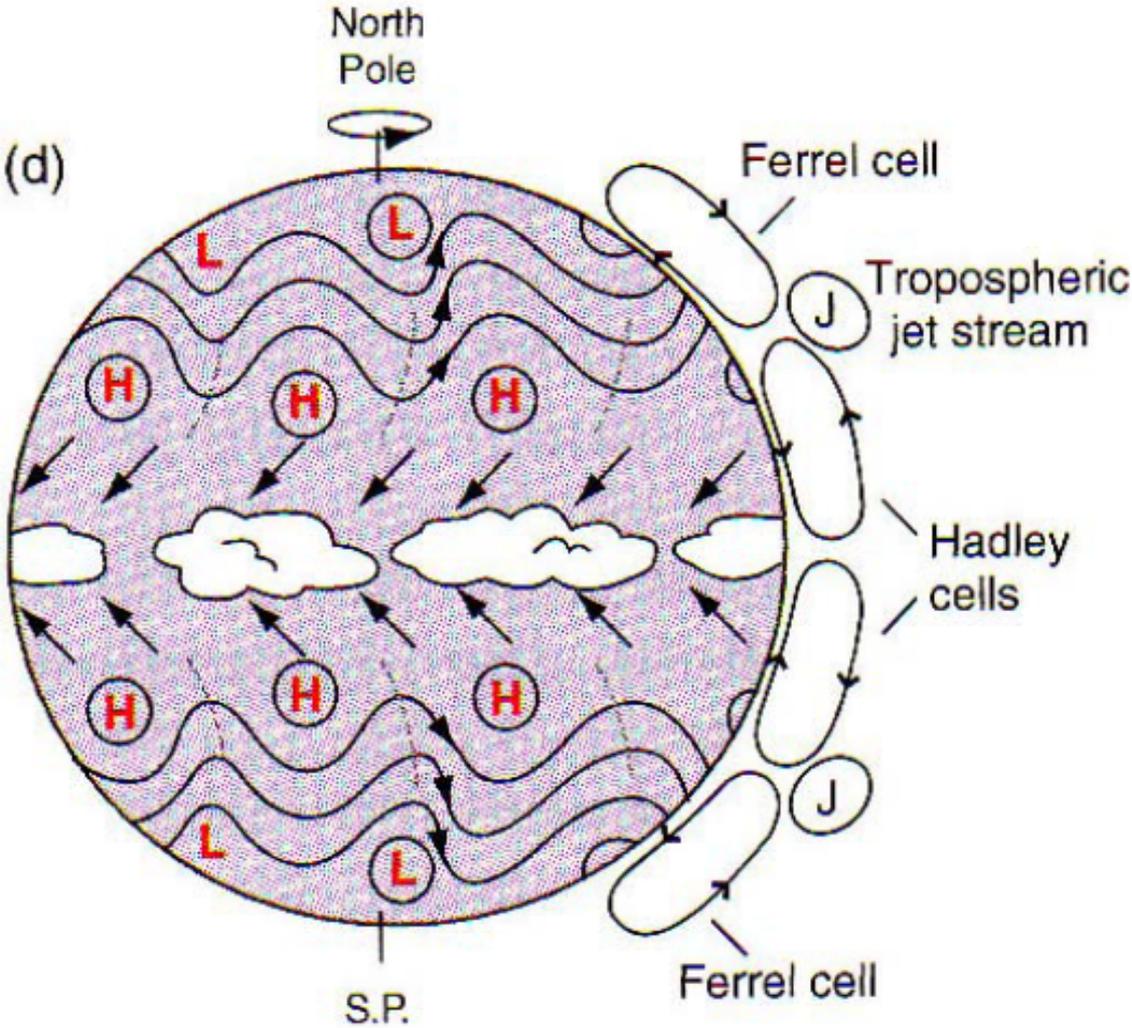
Circulation atmosphérique



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

1994010100

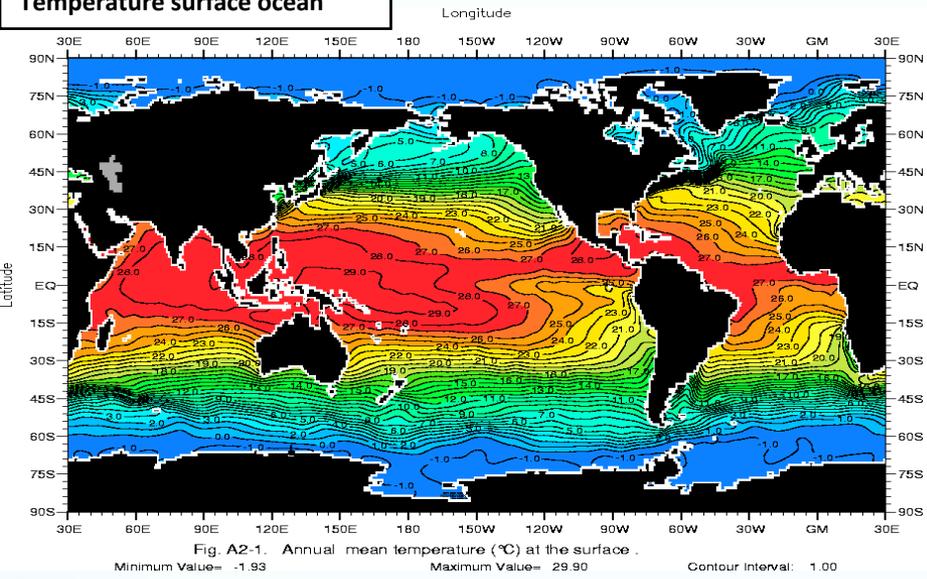
Circulation atmosphérique



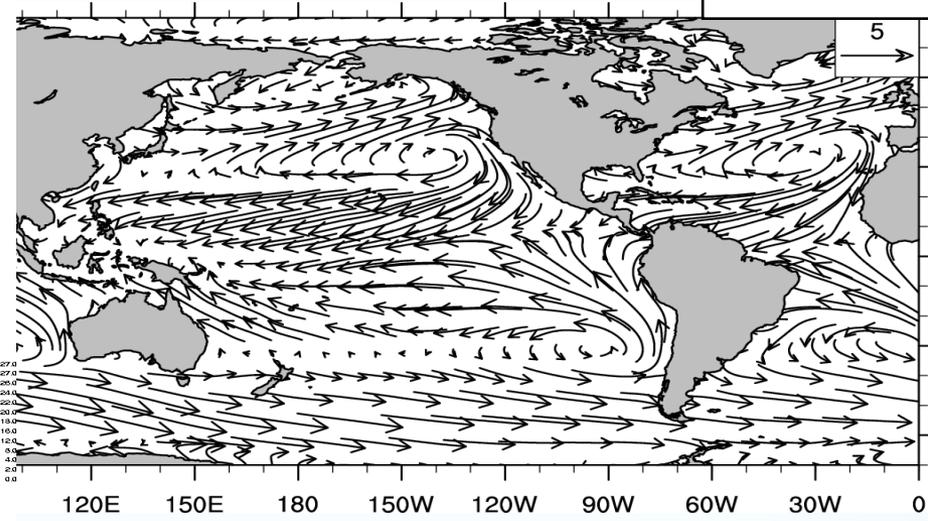
Circulation océanique

Circulation océanique

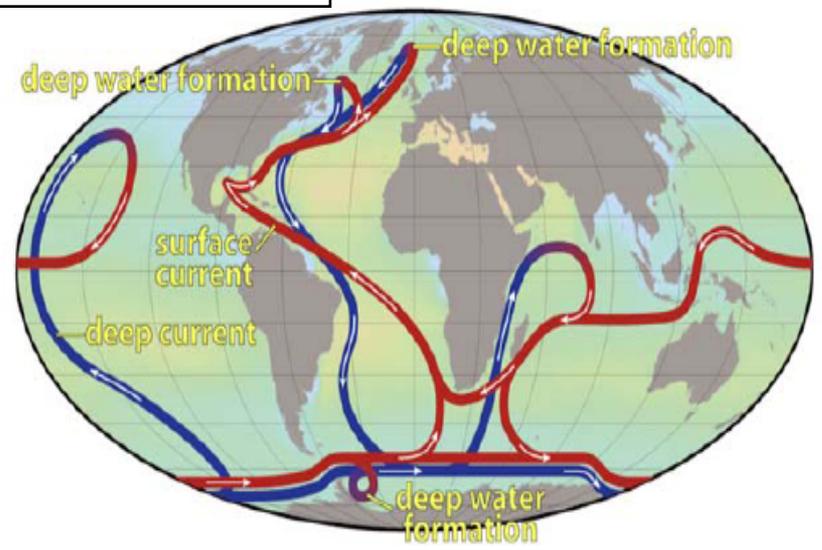
Température surface océan



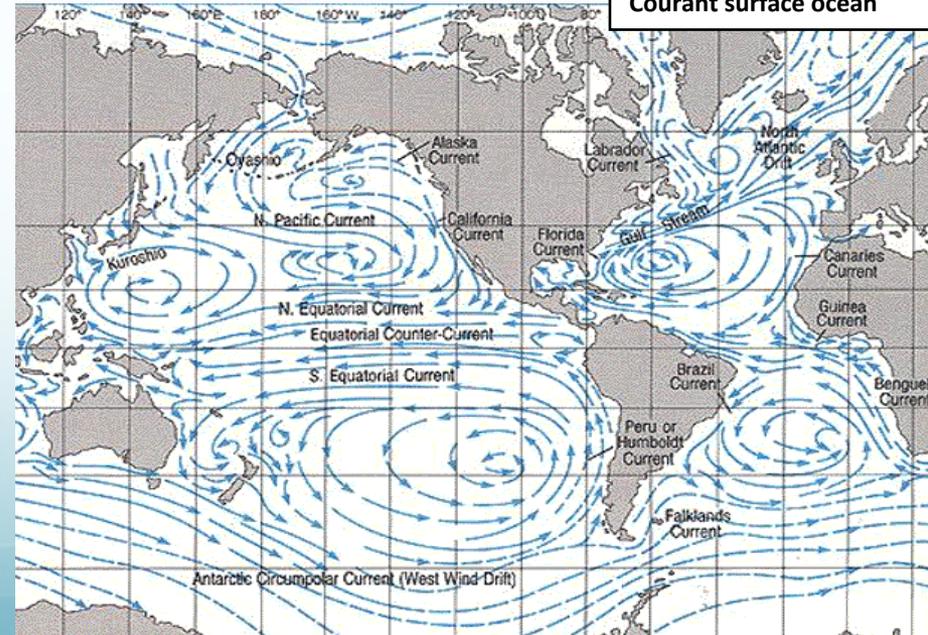
Vent de surface



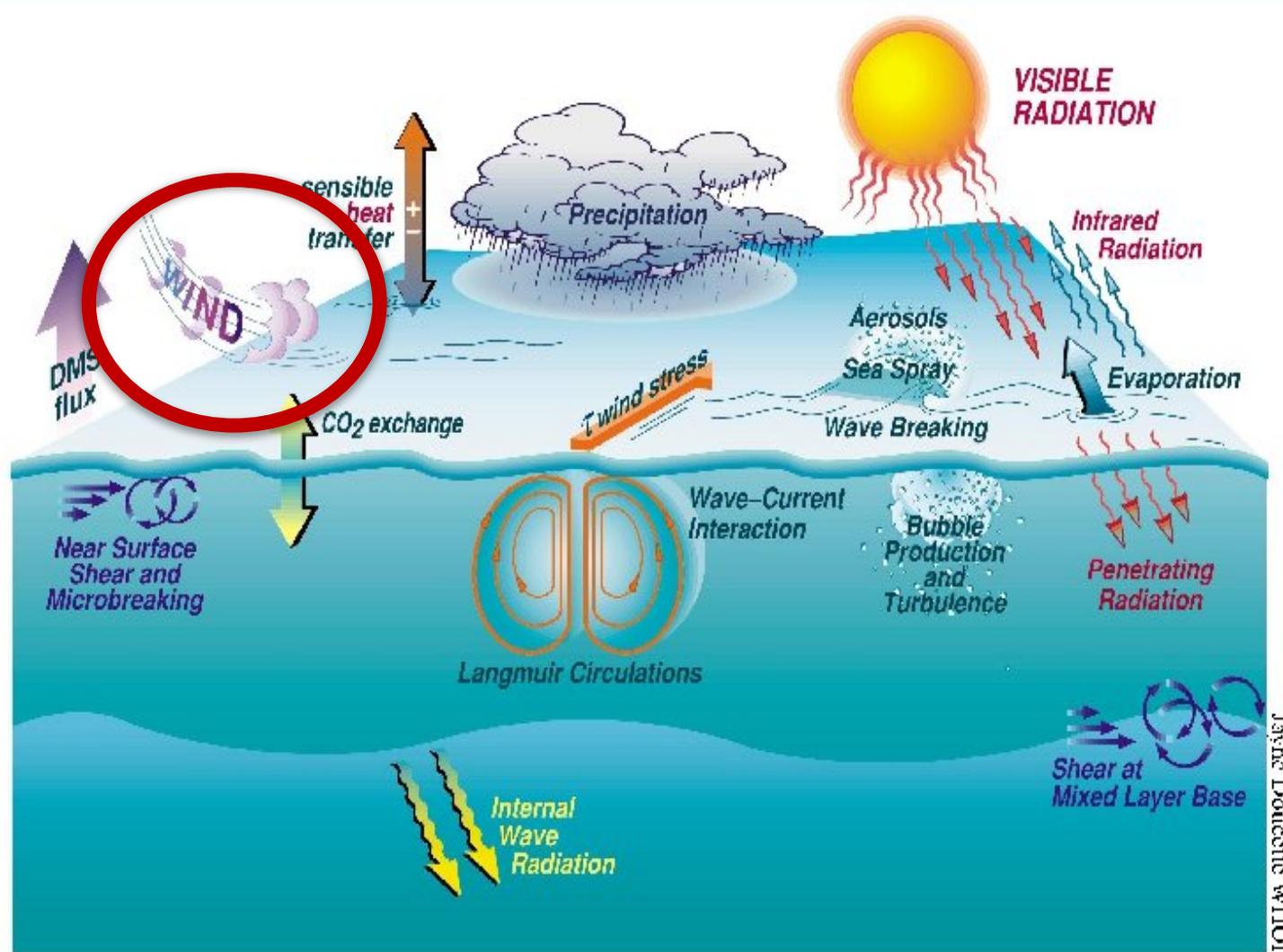
Circulation thermohaline



Courant surface océan

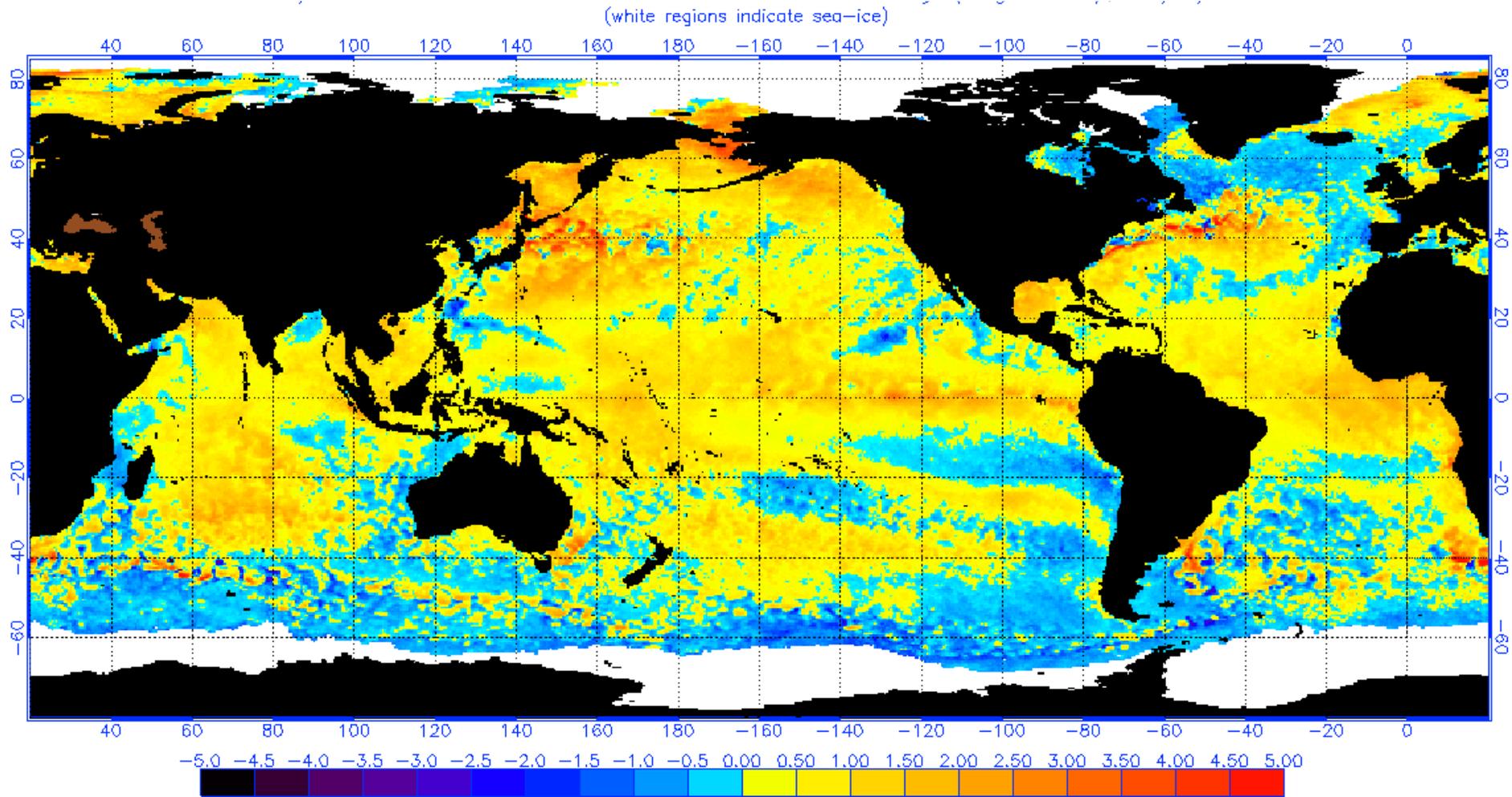


Interactions océan-atmosphère



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



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

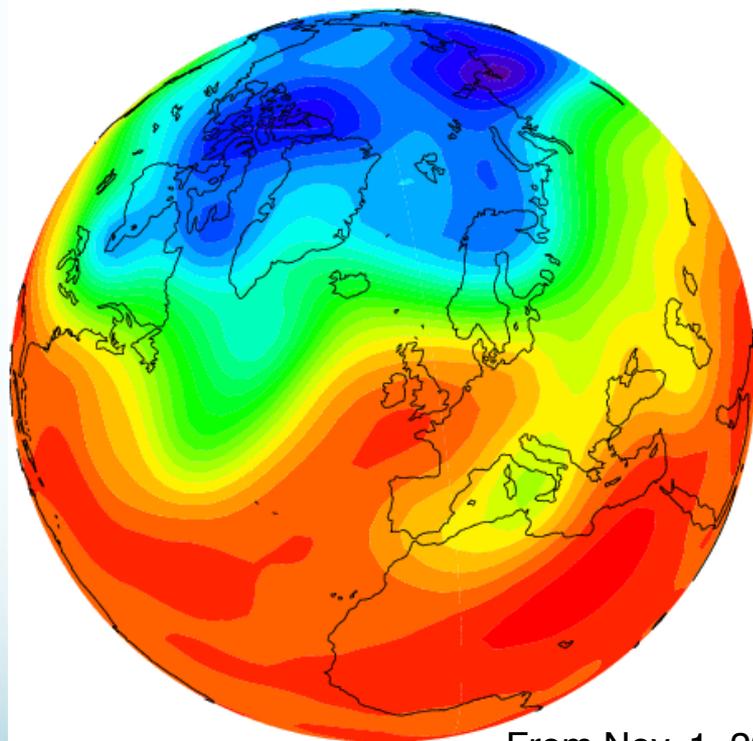
Quelques grands modes de variabilité climatique

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

Variations de pression en Atlantique

Geopotentiel à 500 millibars

20071101



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

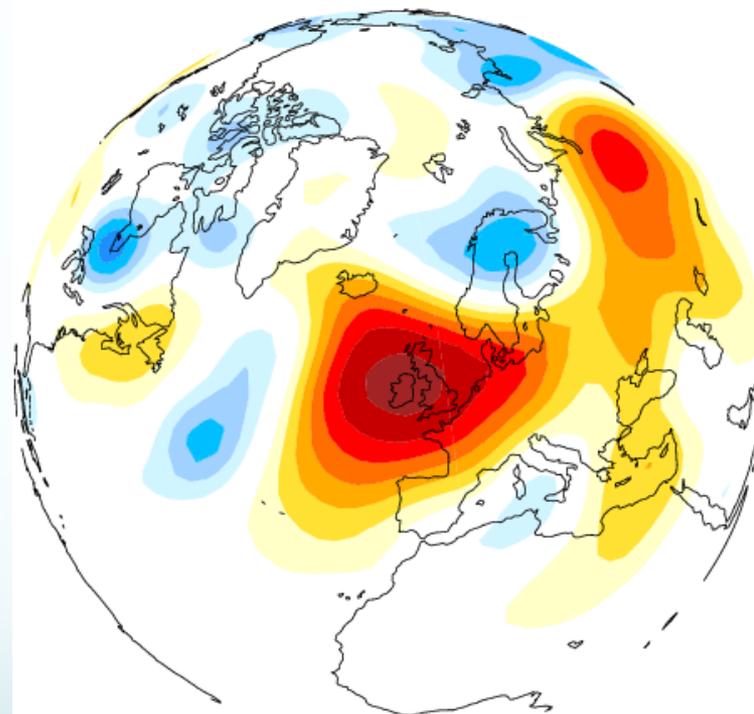
Meter



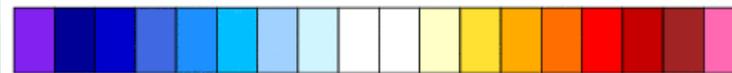
4850 4970 5090 5210 5330 5450 5570 5690 5810 5930

Anomalies de Geopotentiel

20071101

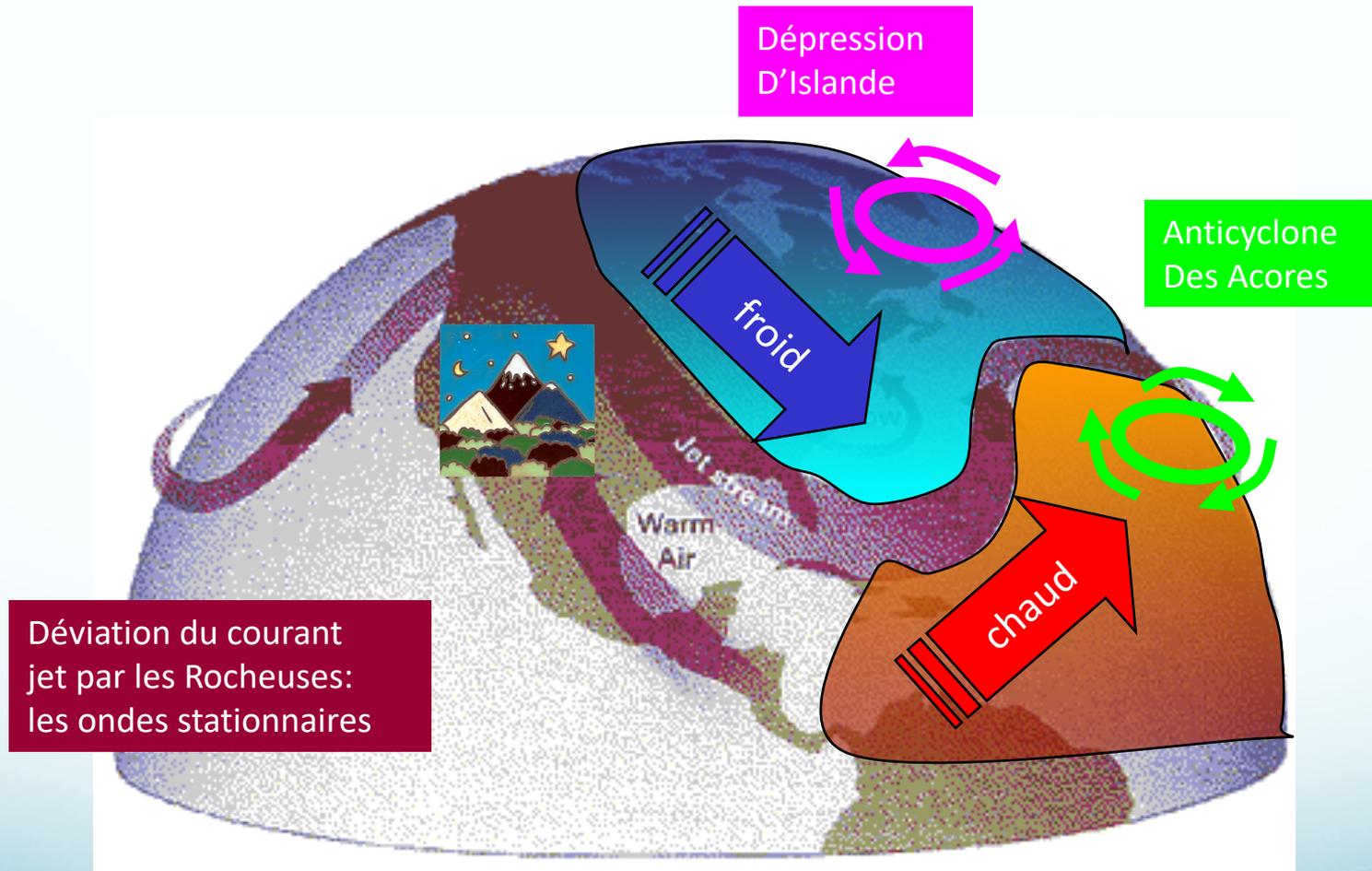


Meter



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

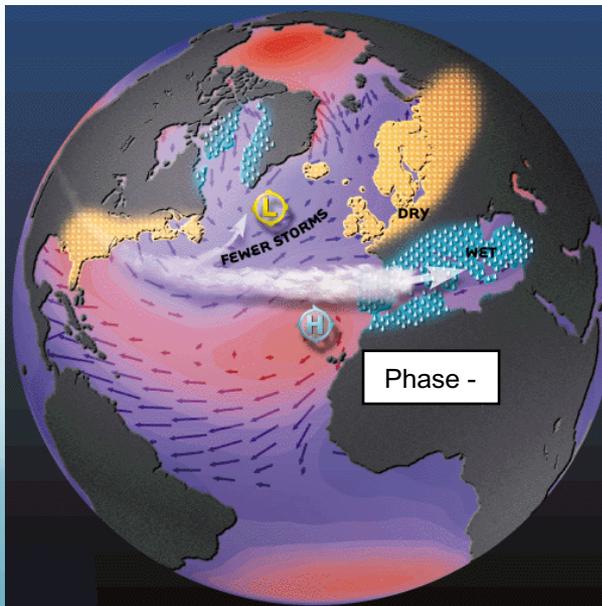
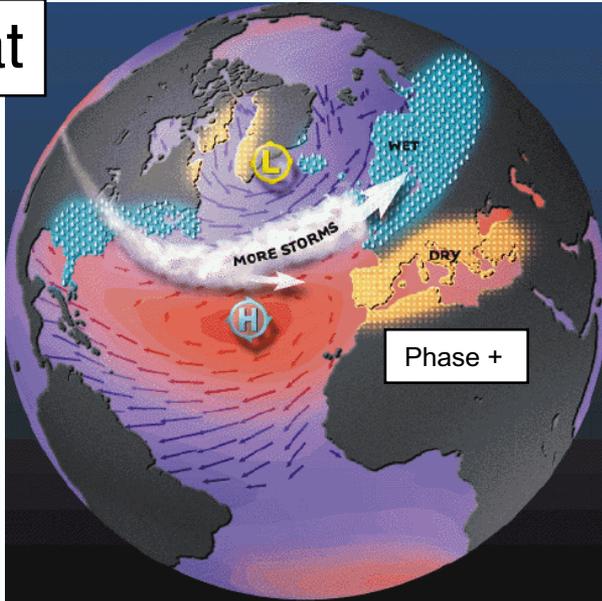
Les ondes stationnaires



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.

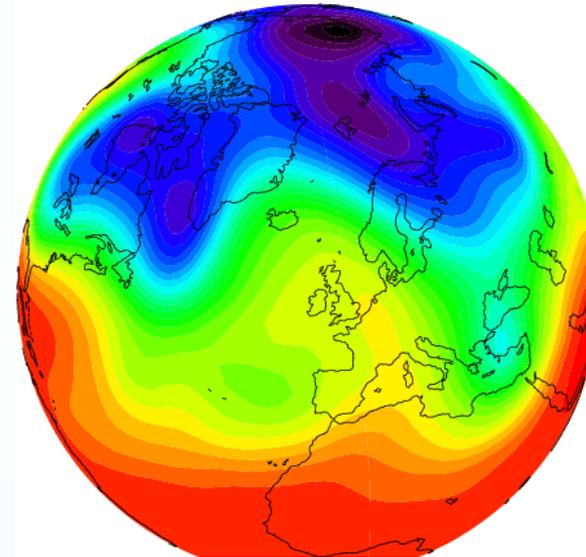
L'oscillation Nord Atlantique (NAO)

Climat



Blocking

20080218

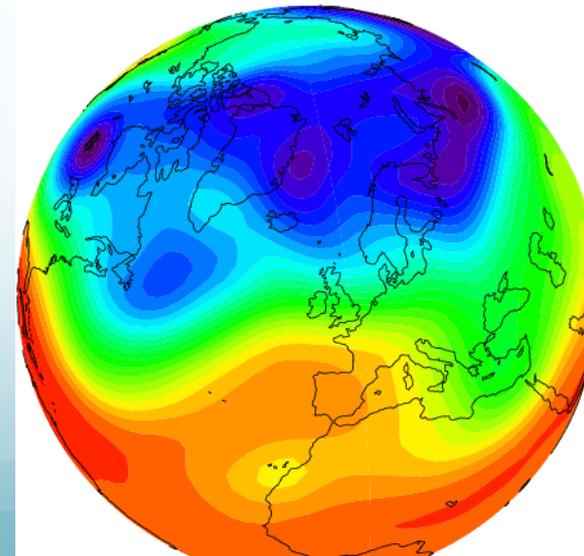


Météo

Déferlement anticyclonique

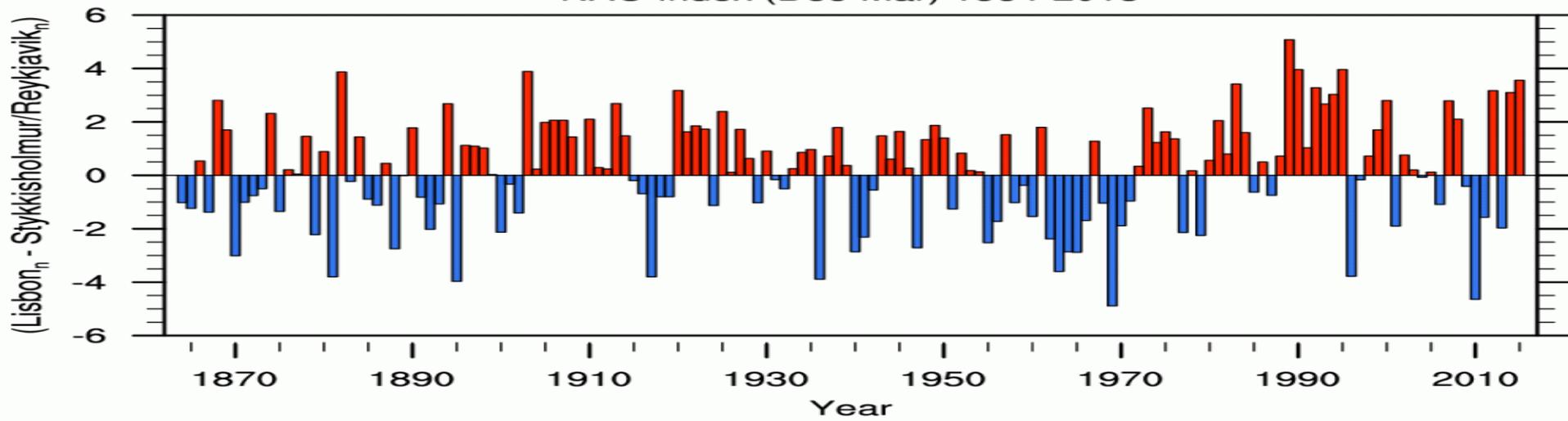
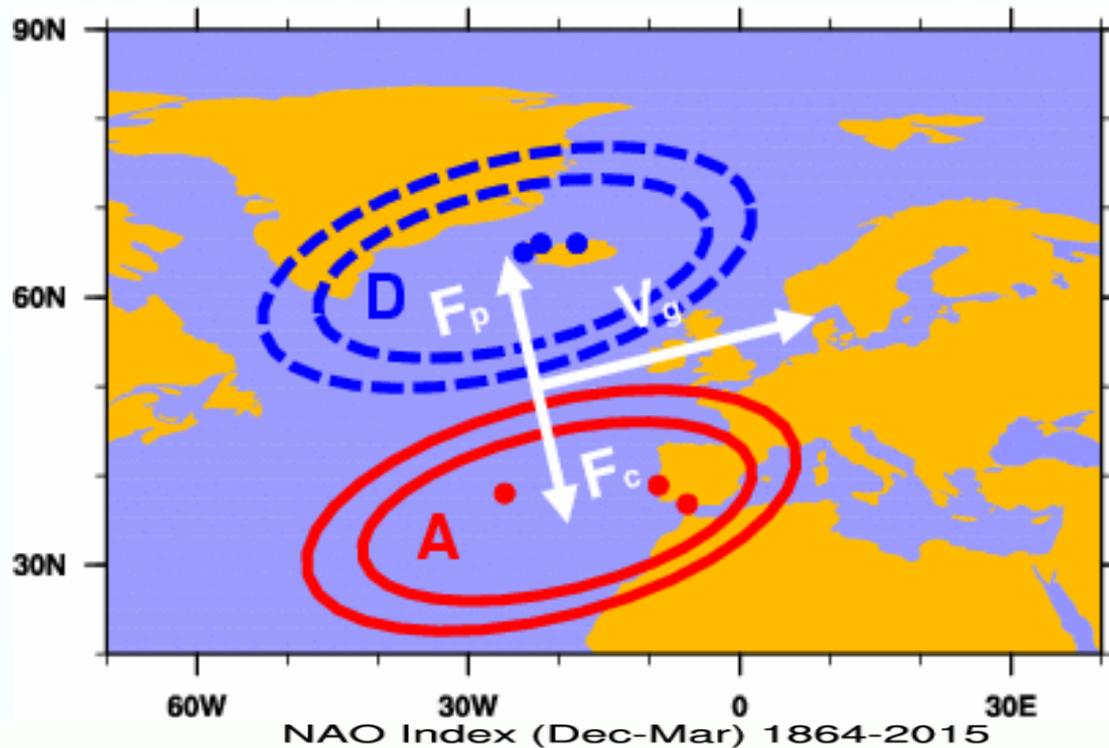
NAO-

19850131



Déferlement cyclonique

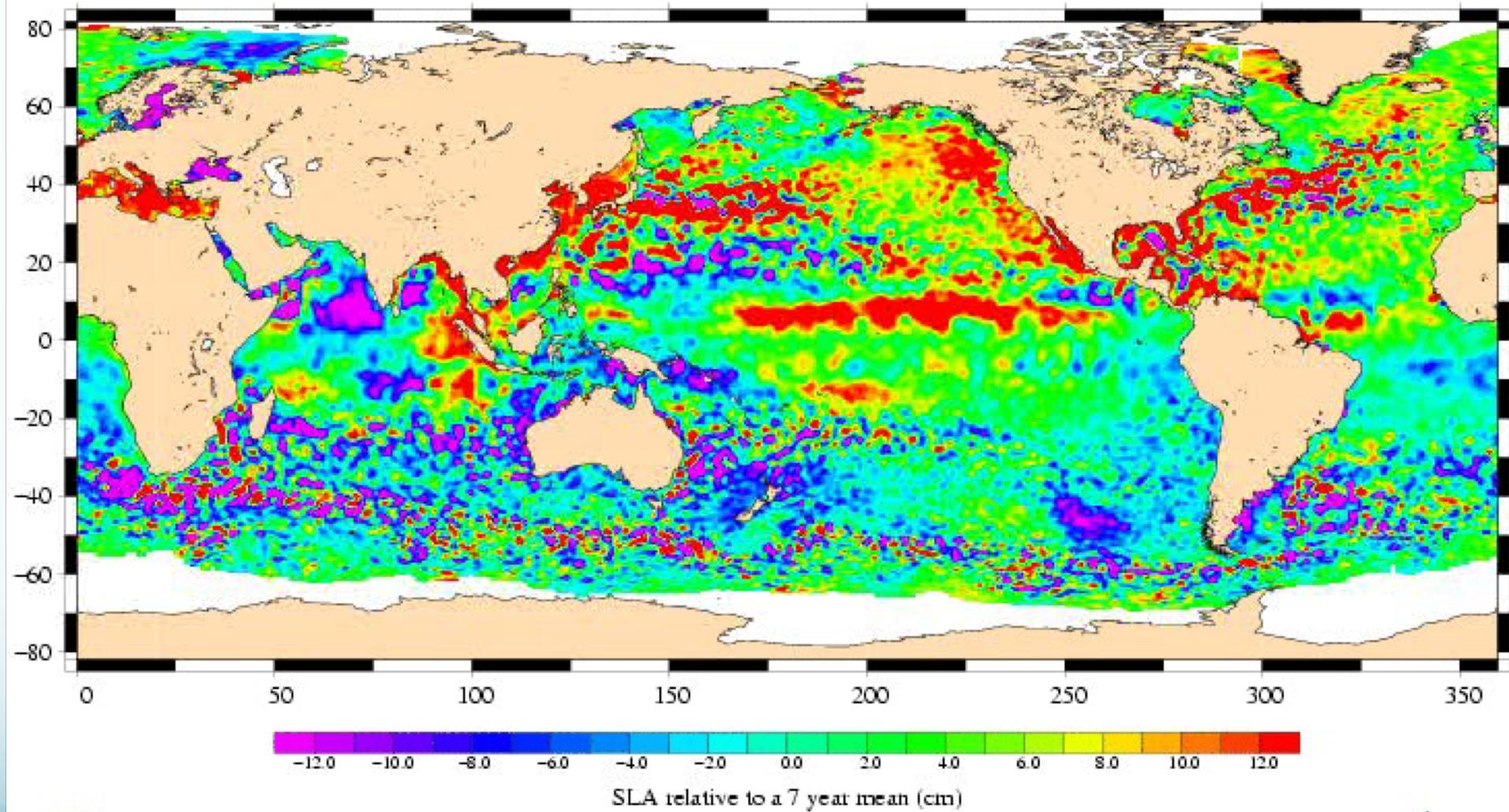
Explication physique de la NAO



Quelques grandes modes de variabilité climatique

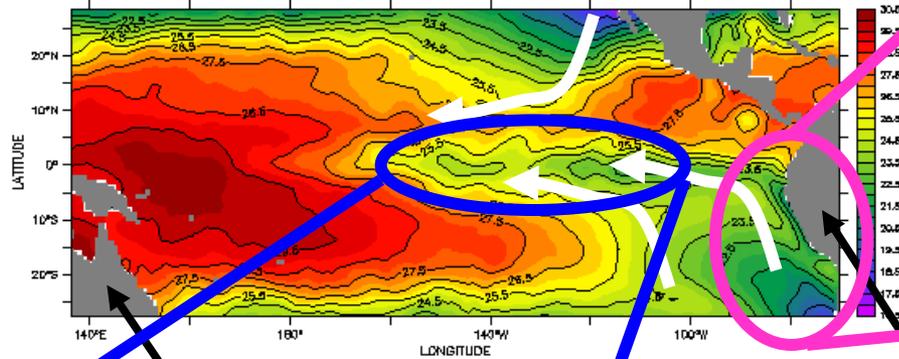
- Oscillation Nord Atlantique : NAO
- Oscillation El Nino : ENSO
- Variabilité multi-décennale atlantique : AMV
- Oscillation décennale Pacifique : PDO

1992/10/14



Conditions normales dans le Pacifique

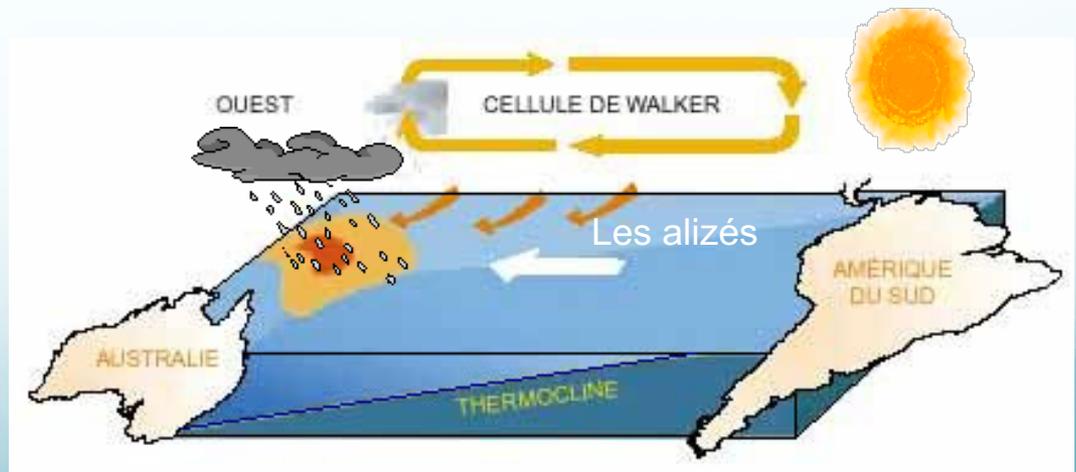
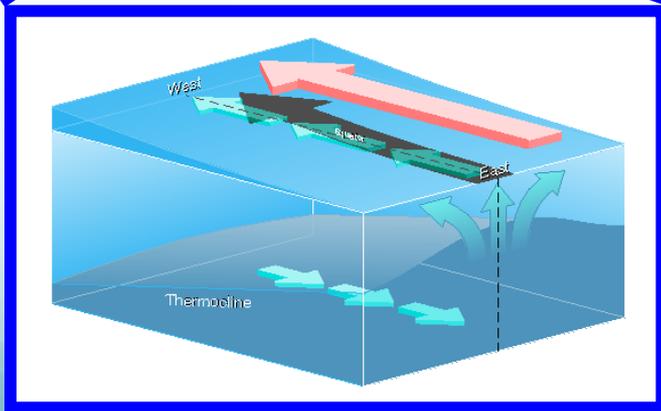
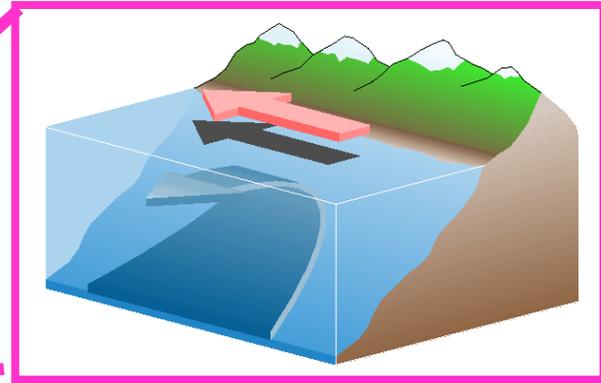
Température de surface



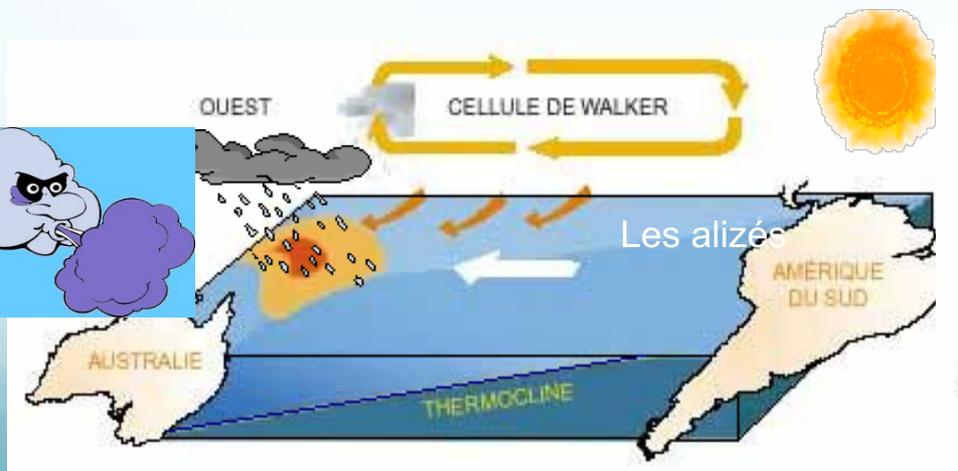
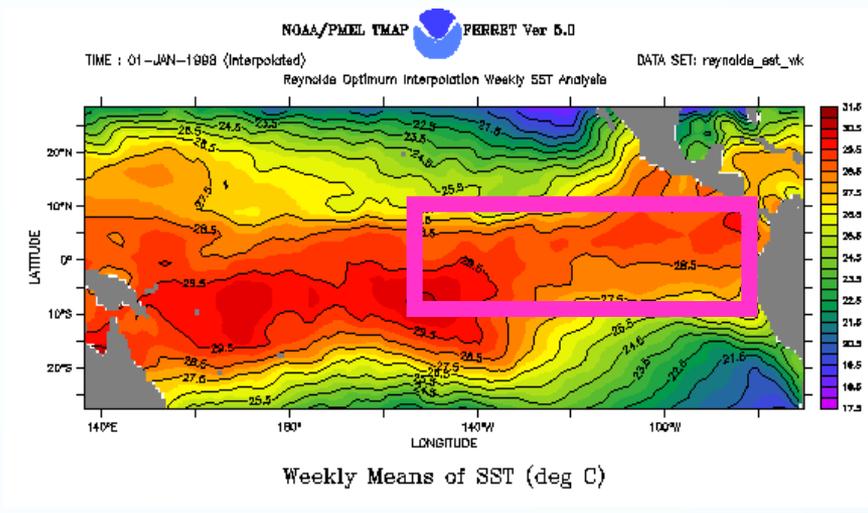
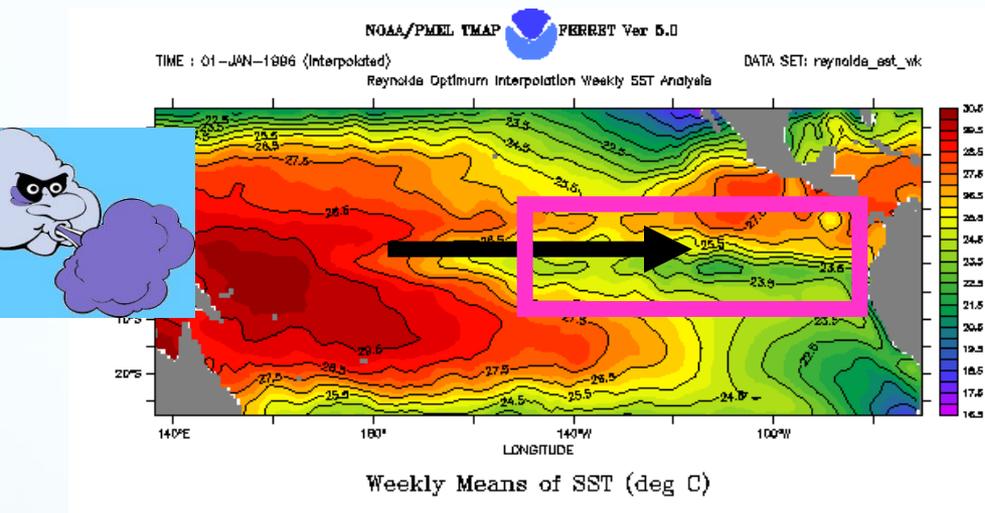
Weekly Means of SST (deg C)

Australie

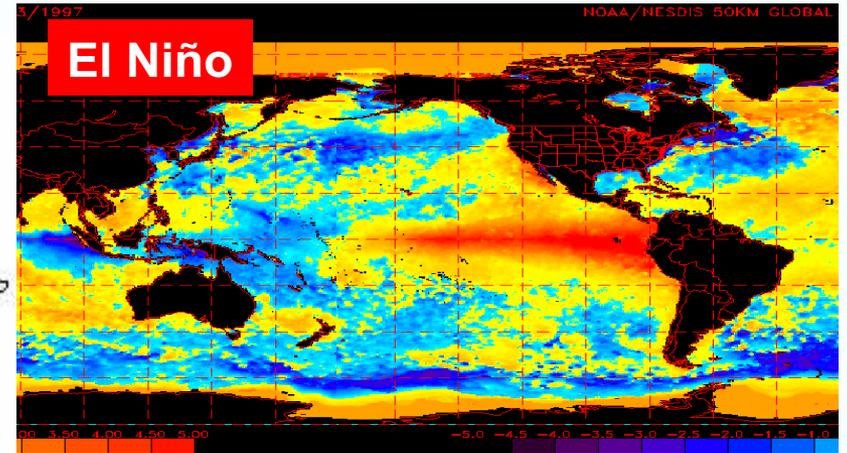
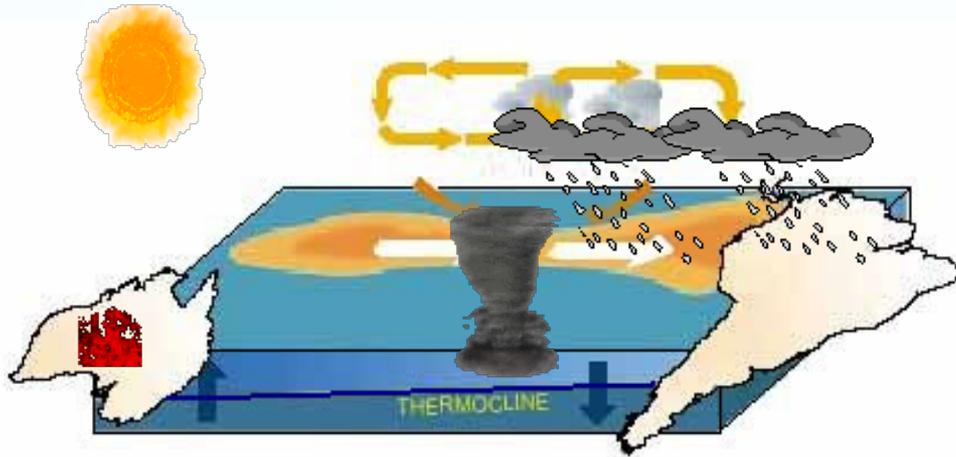
Amérique du Sud



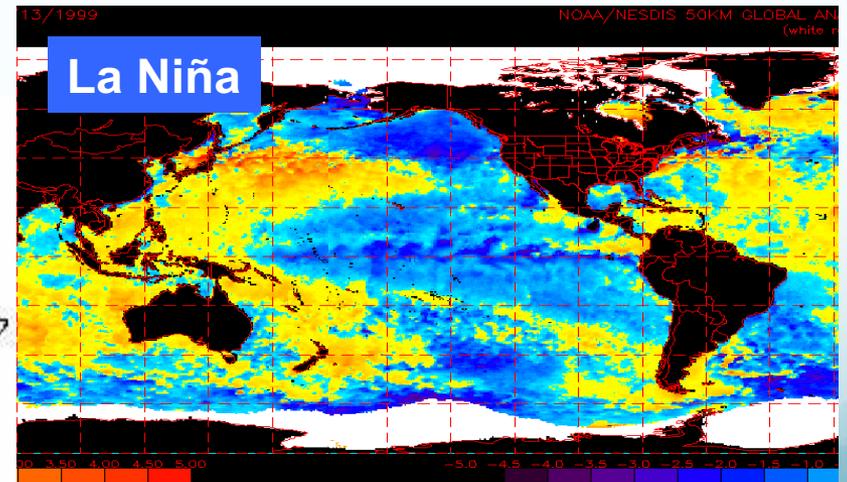
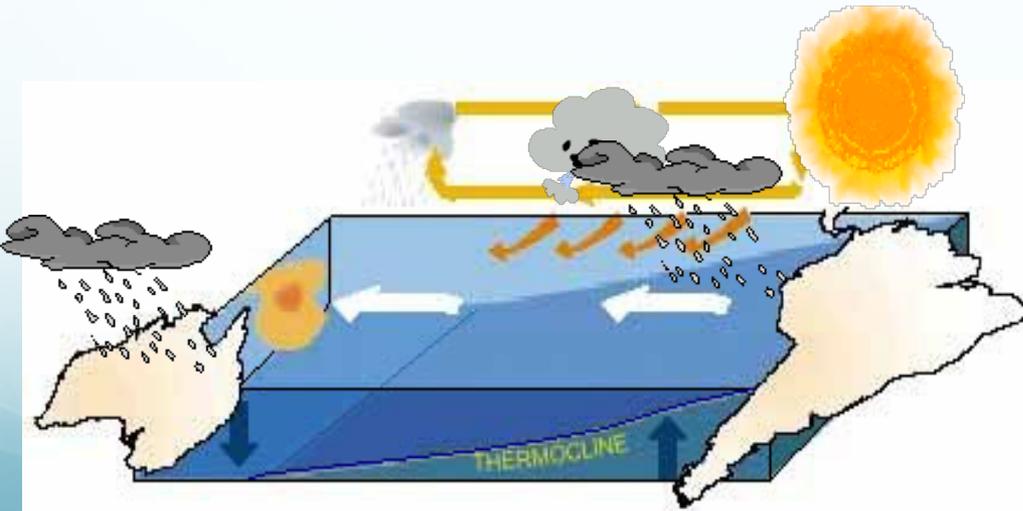
El Niño : Une oscillation couplée océan-atmosphère dans le Pacifique



La petite sœur : La Niña

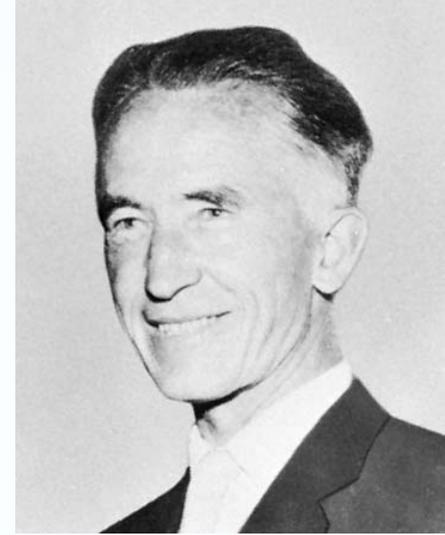


Anomalies de température du 13 Nov. 1997

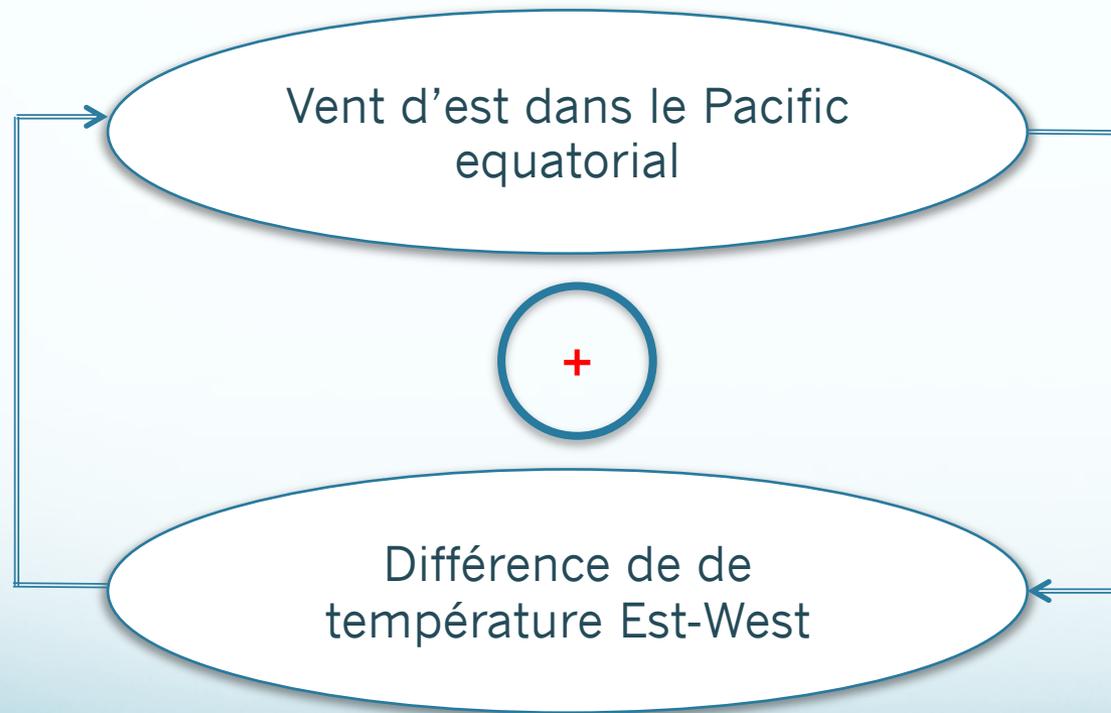


Anomalies de température du 11 Nov. 1998

Rétroaction positive de Bjerknnes



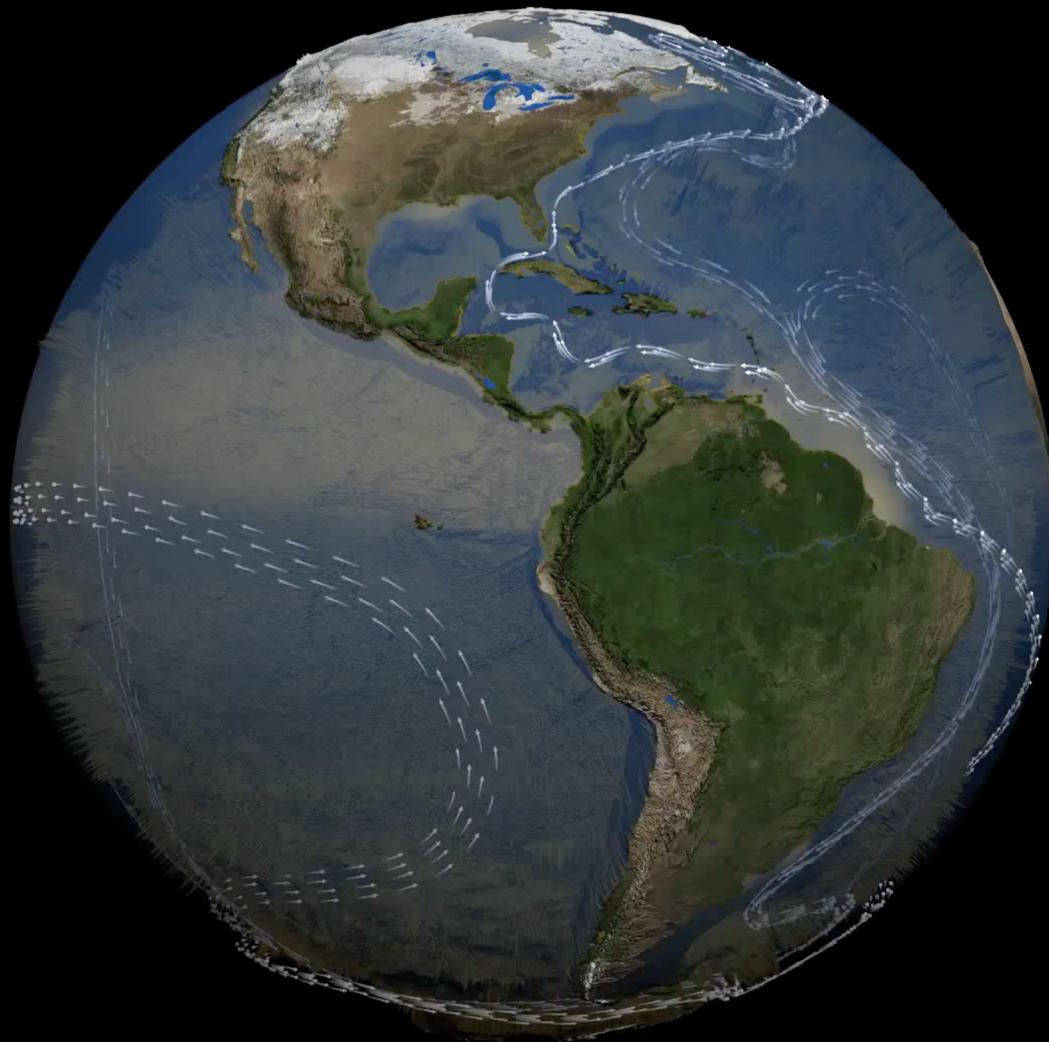
Jacob Bjerknes (1897-1975)



Quelques grands modes de variabilité climatique

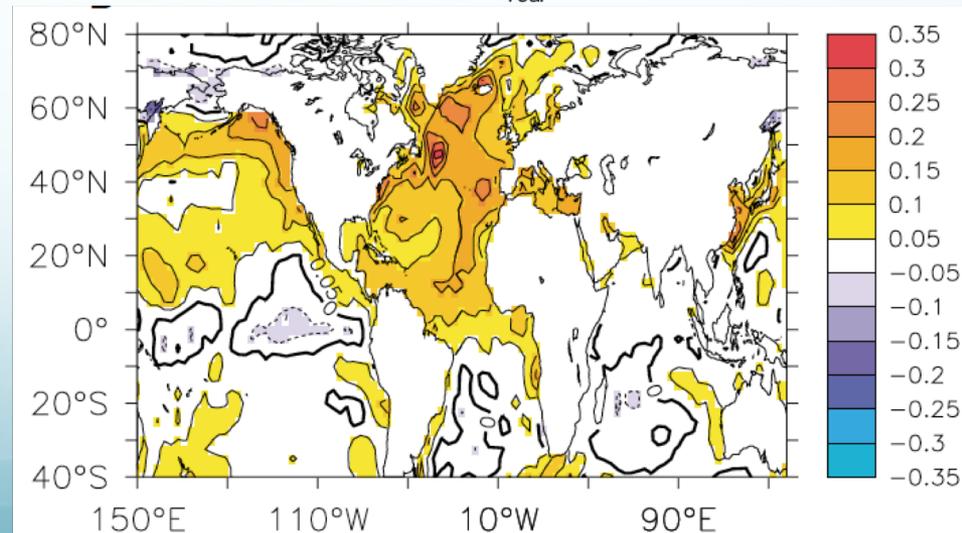
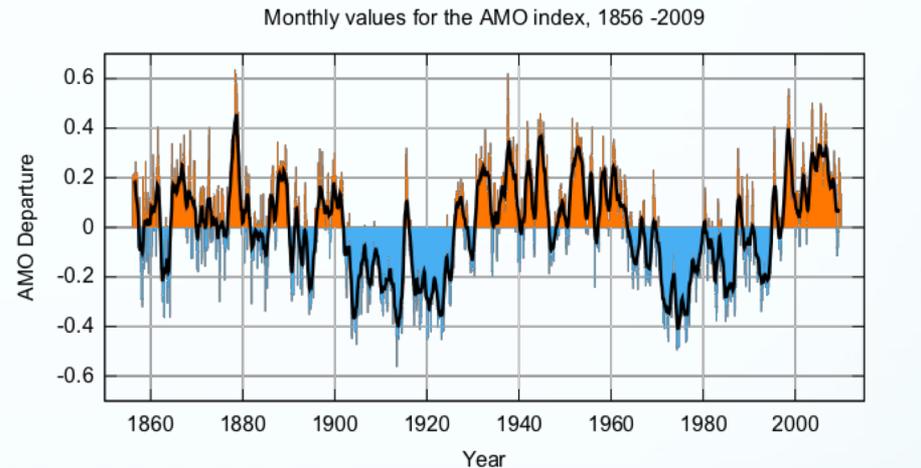
- Oscillation Nord Atlantique : NAO
- Oscillation El Nino : ENSO
- Variabilité multi-décennale atlantique : AMV
- Oscillation décennale Pacifique : PDO

Circulation thermohaline

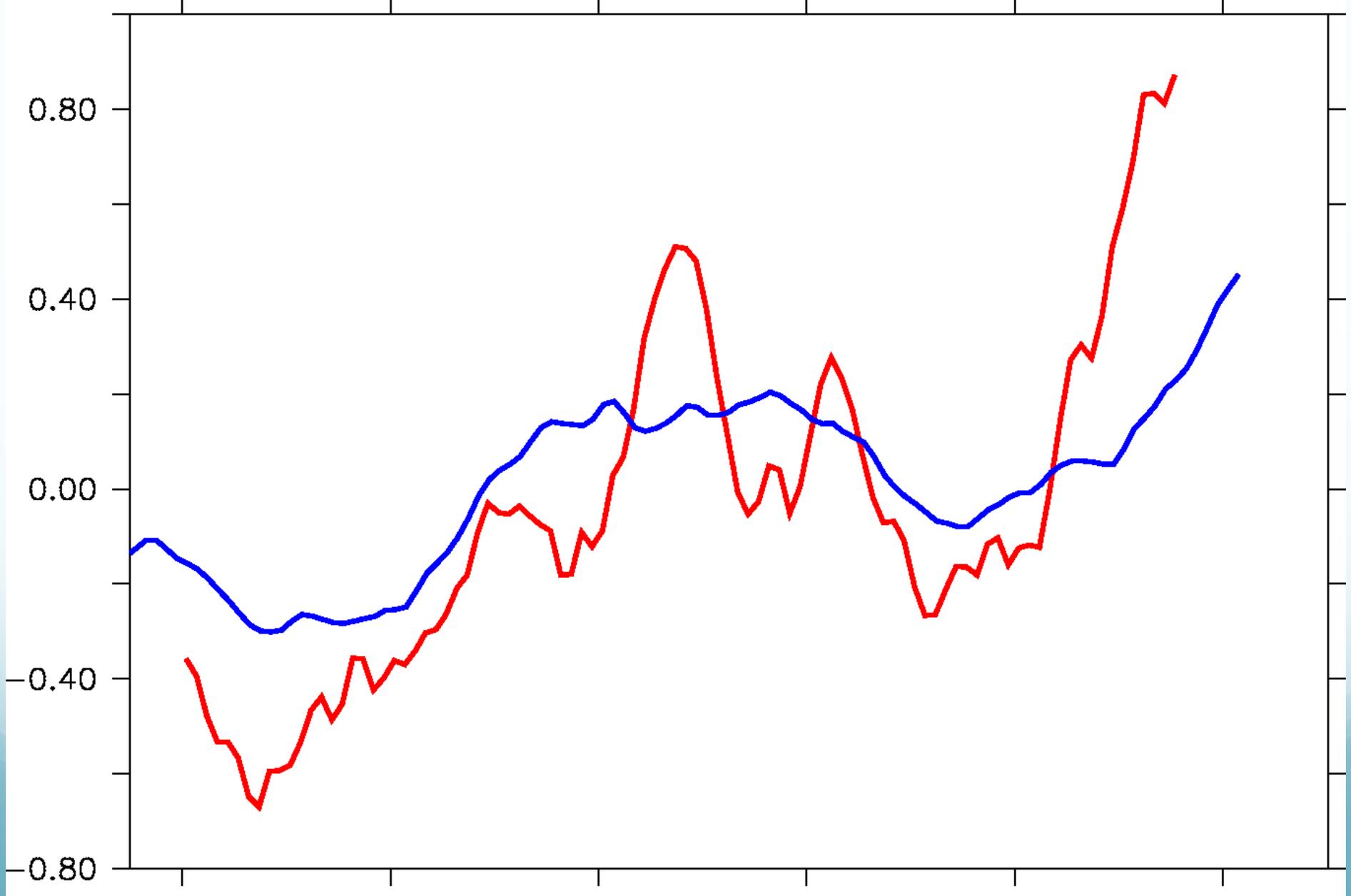


Variabilité multi-décennale atlantique

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



— Atlantic ocean
— Tmin Arcachon

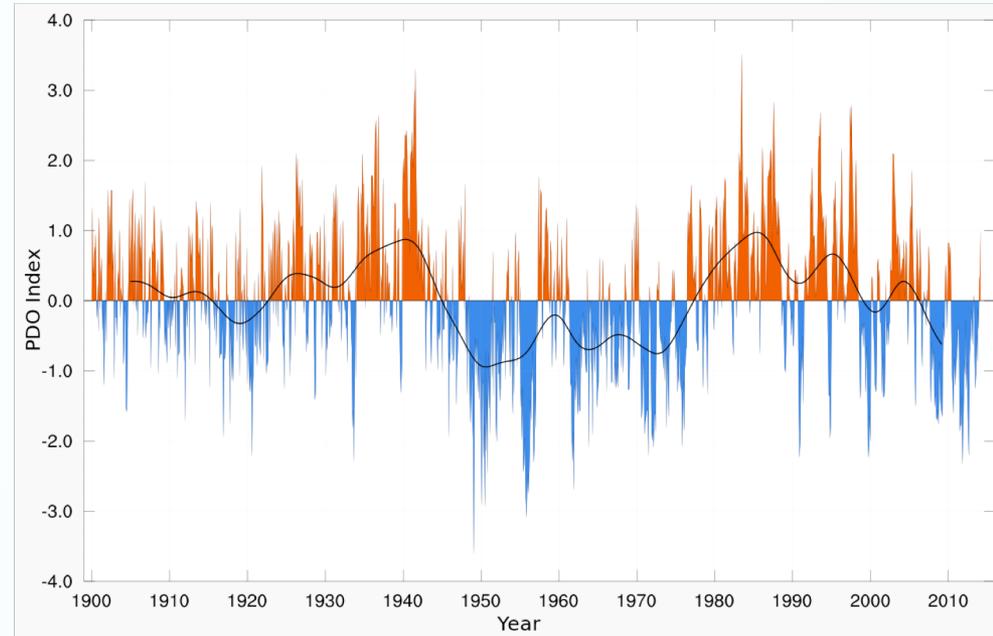


Quelques grands modes de variabilité climatique

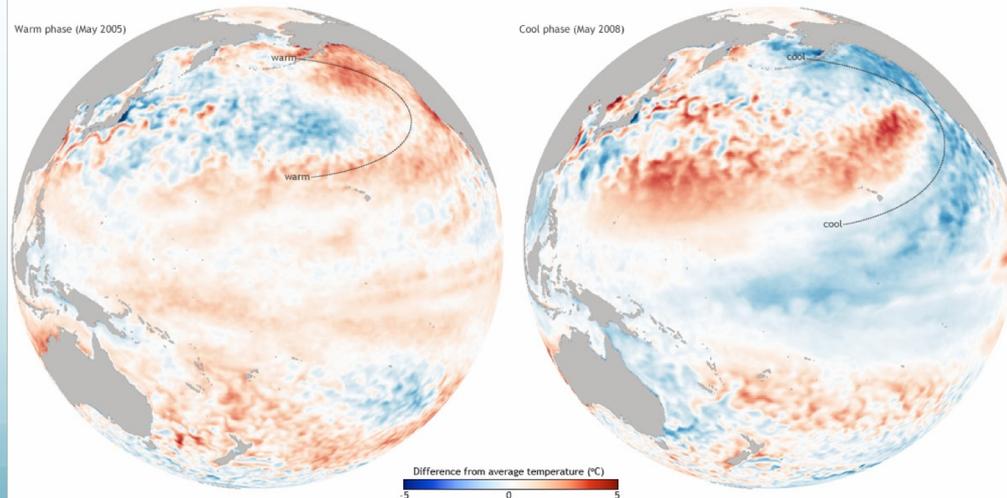
- Oscillation Nord Atlantique : NAO
- Oscillation El Nino : ENSO
- Variabilité multi-décennale atlantique : AMV
- Oscillation décennale Pacifique : PDO

Oscillation décennal pacifique

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

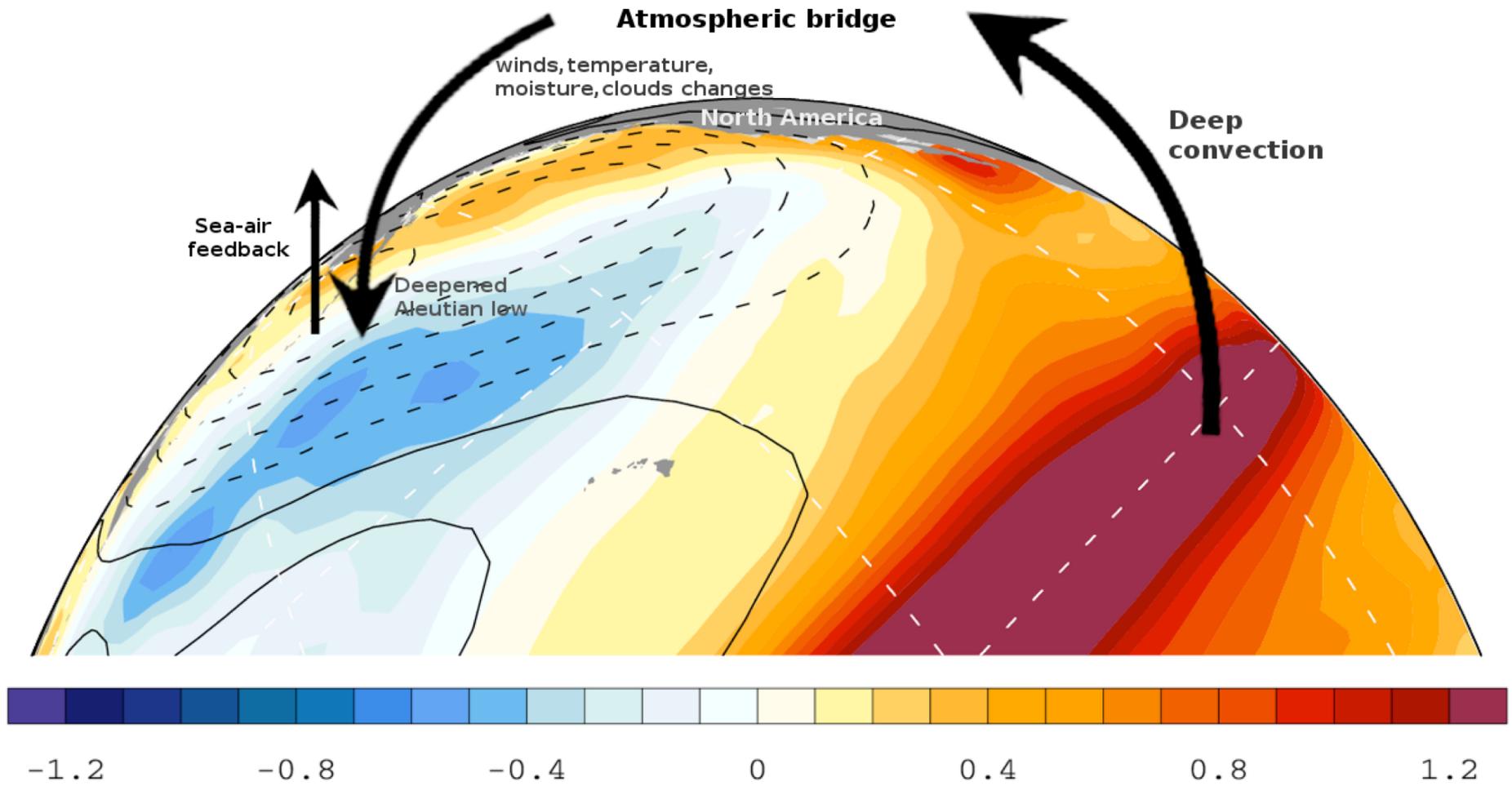


Pacific Decadal Oscillation



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

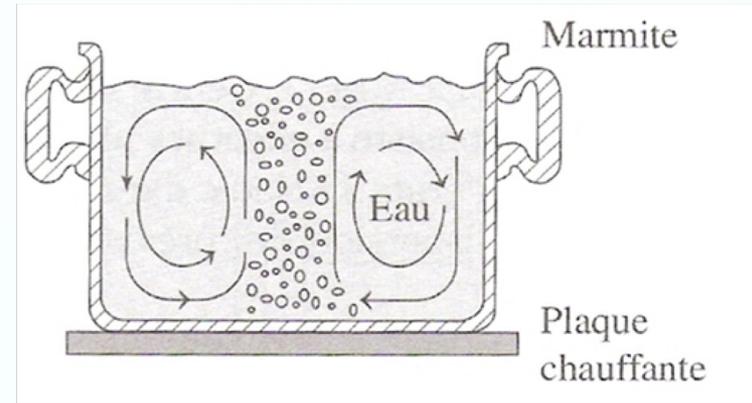
Newton: $m\vec{a} = \sum \vec{F}$

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



Modèle de Lorenz

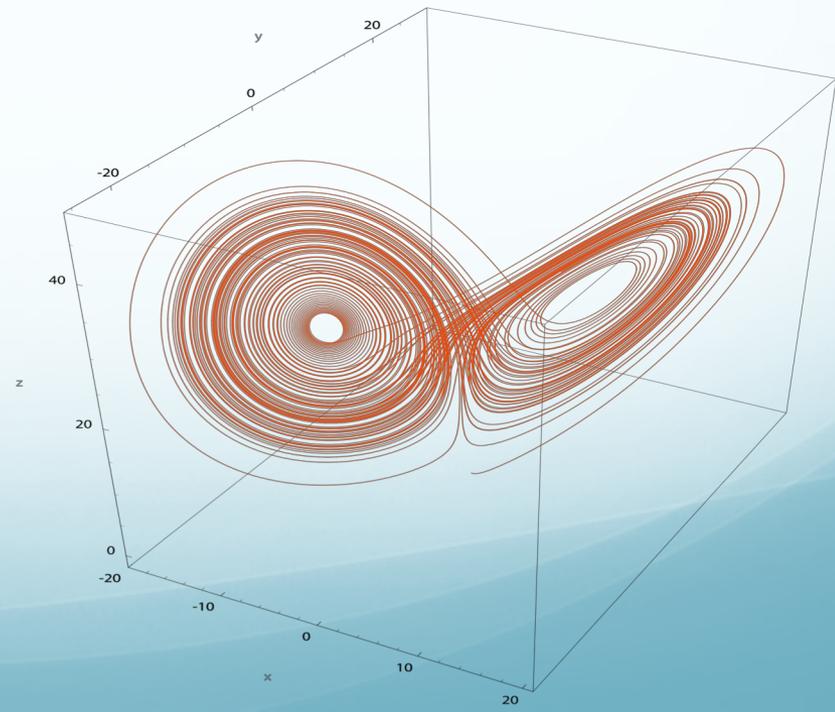
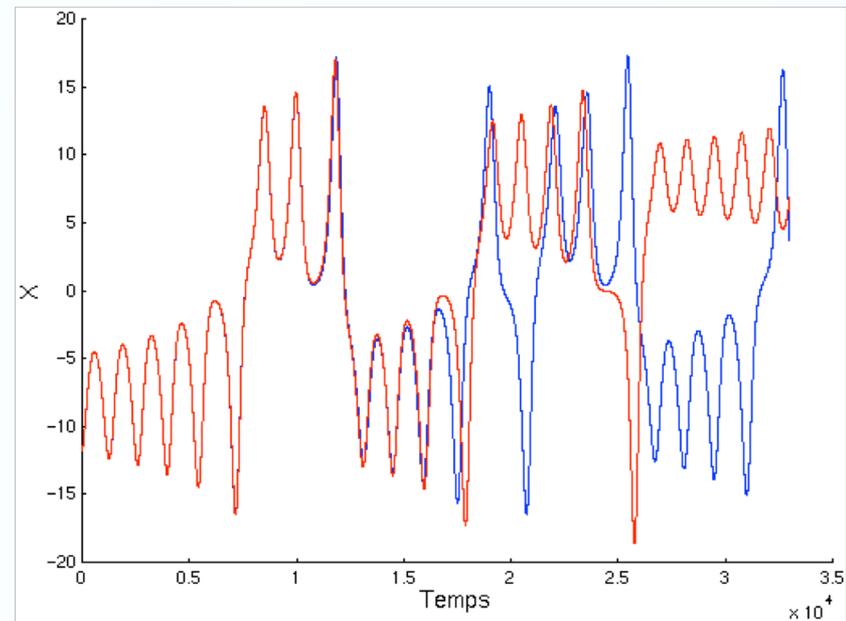
- Modèle simplifié de l'équation Navier Stokes appliqué au phénomène de convection (dite de Rayleigh-Bernard)
 - X est la vitesse de montée
 - Y le gradient de T horizontal
 - Z est le gradient de T vertical
- Système non linéaire
- Simplification de la réalité !



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

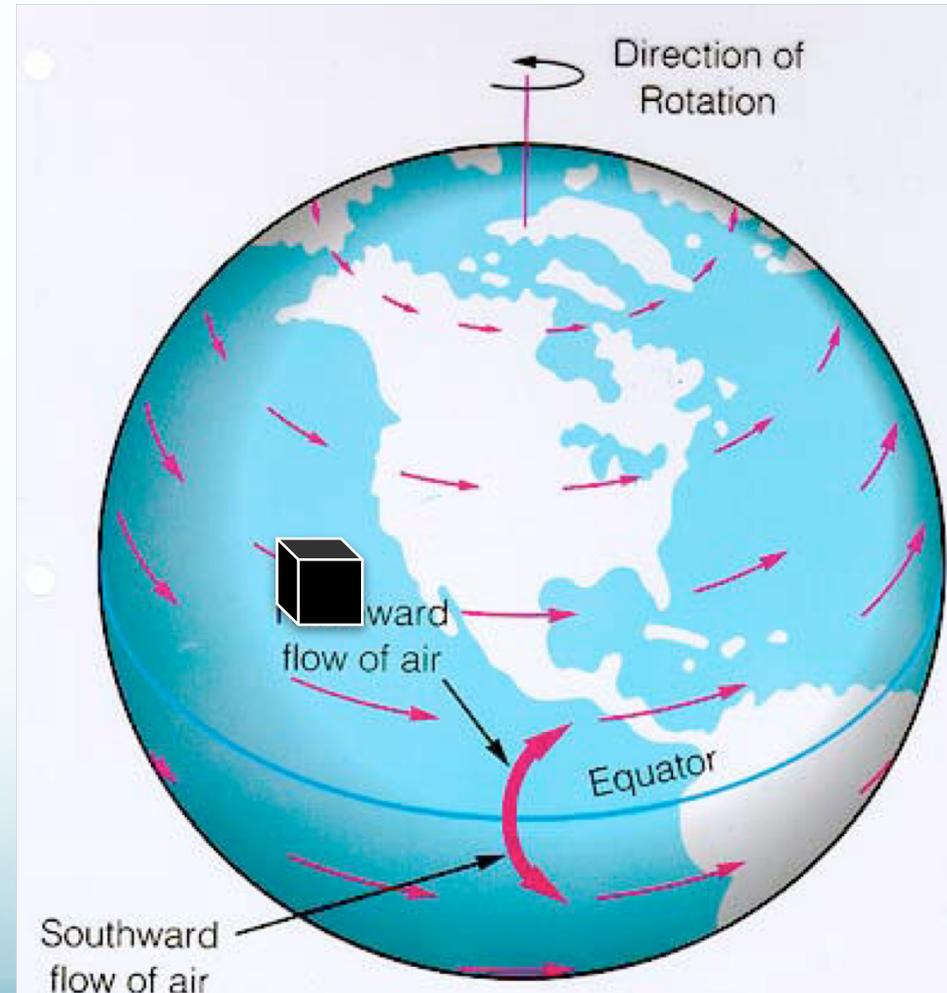
Modèle de Lorenz

- 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

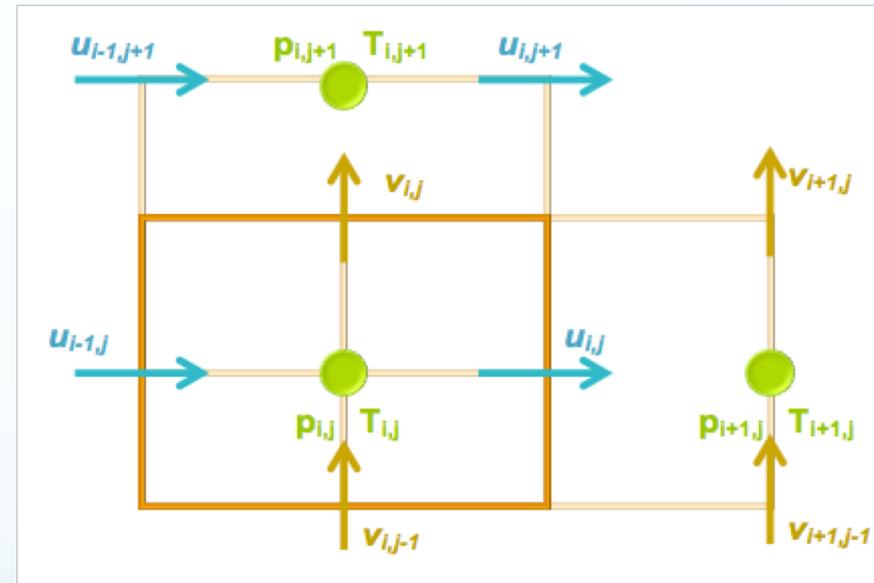
Pression, vitesse dépend de i, j, k (espace) et du temps discret p

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

Δt est le pas de temps de résolution

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

Δx est la résolution spatiale en espace



Le rêve de Richardson

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

Grille du “modèle”

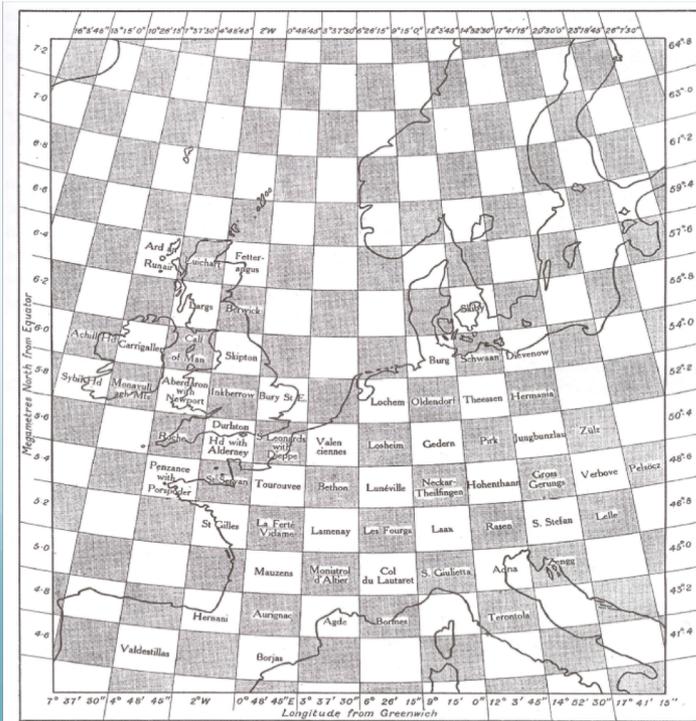
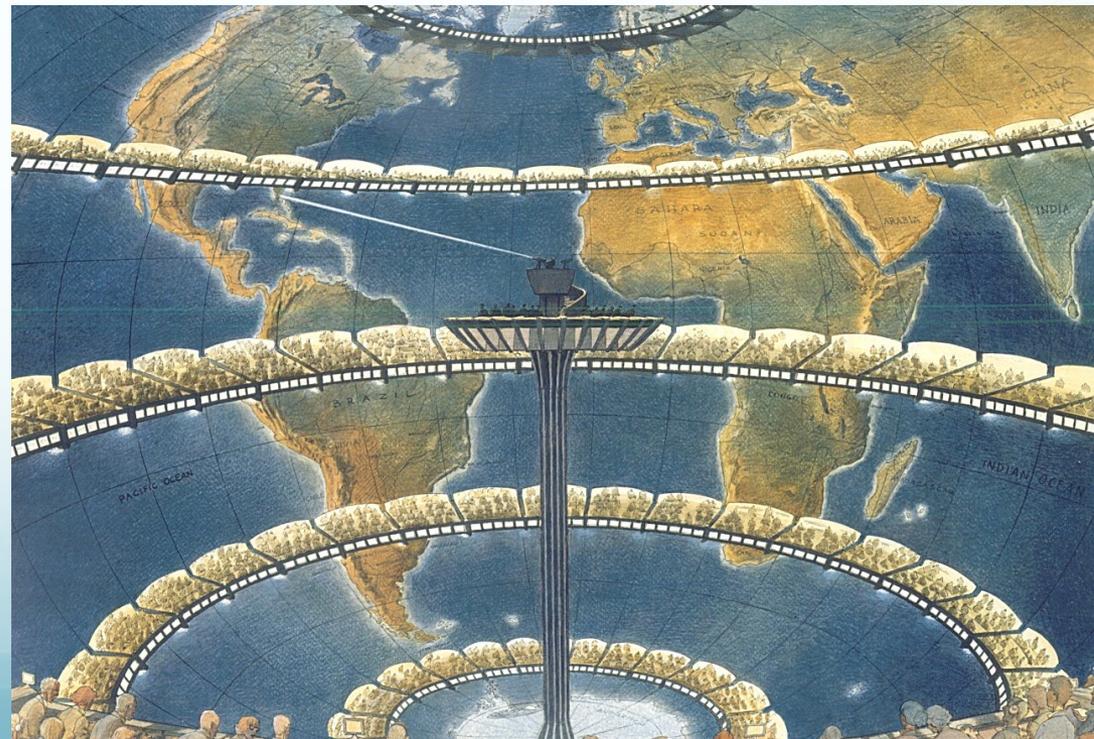
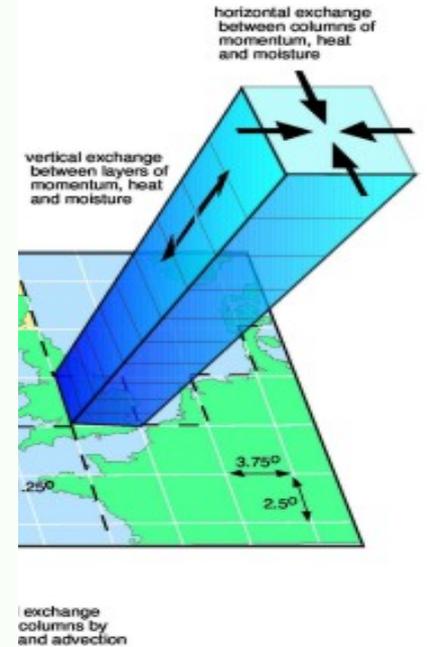
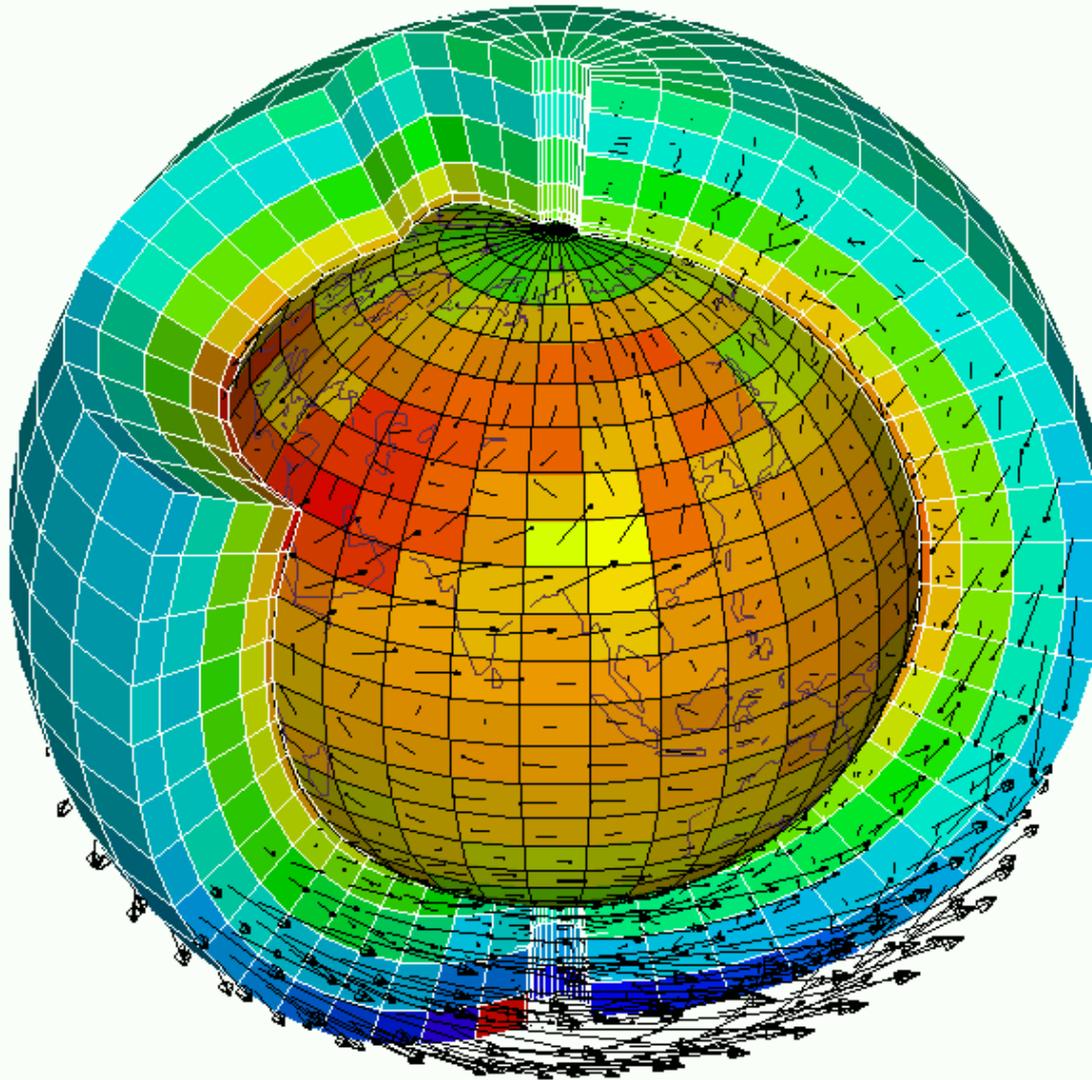


Figure 1.6 Richardson's idealised computational grid. (Frontispiece of WPNP)

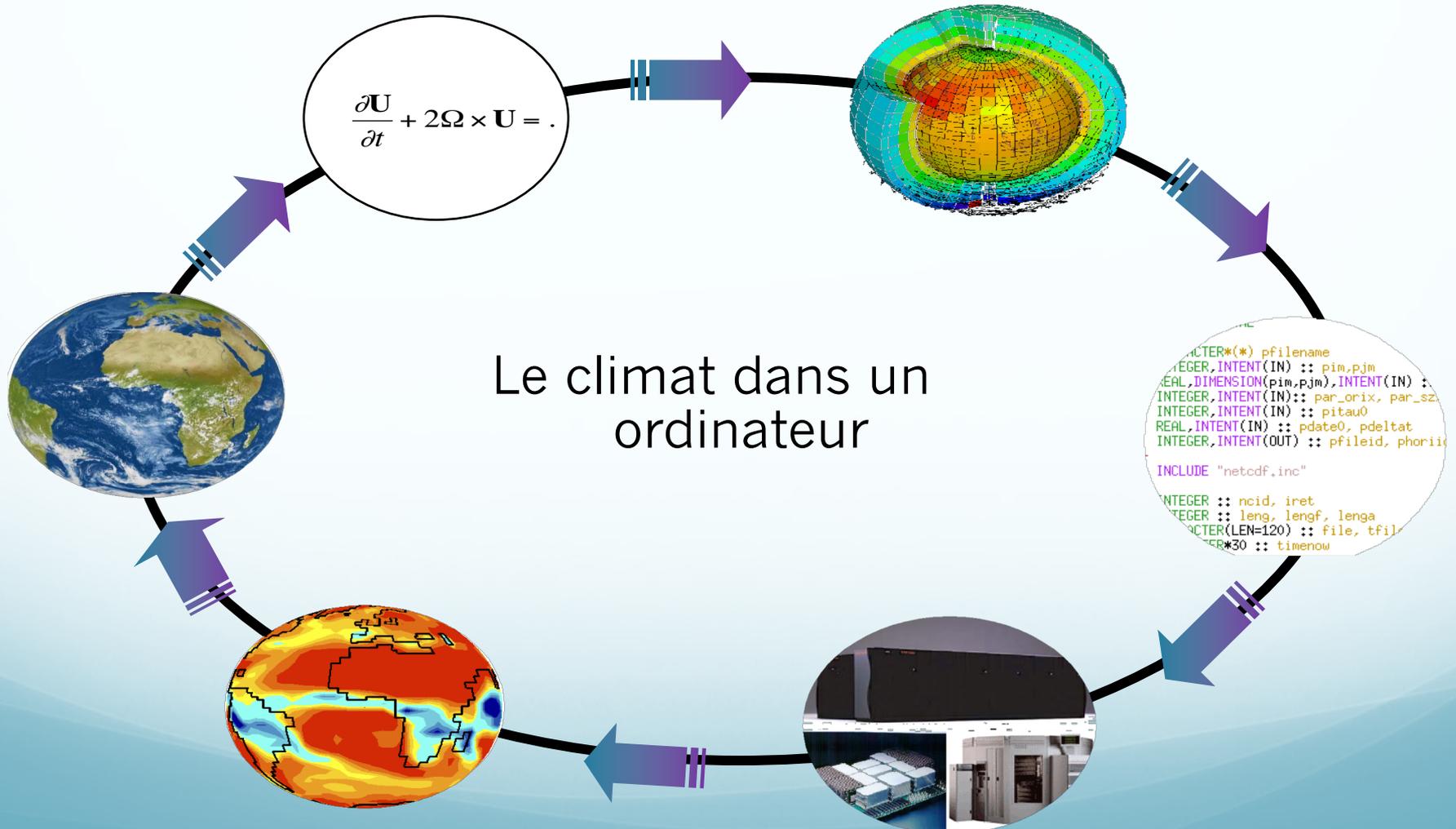
Les calculateurs



Le maillage de la Terre dans un modèle

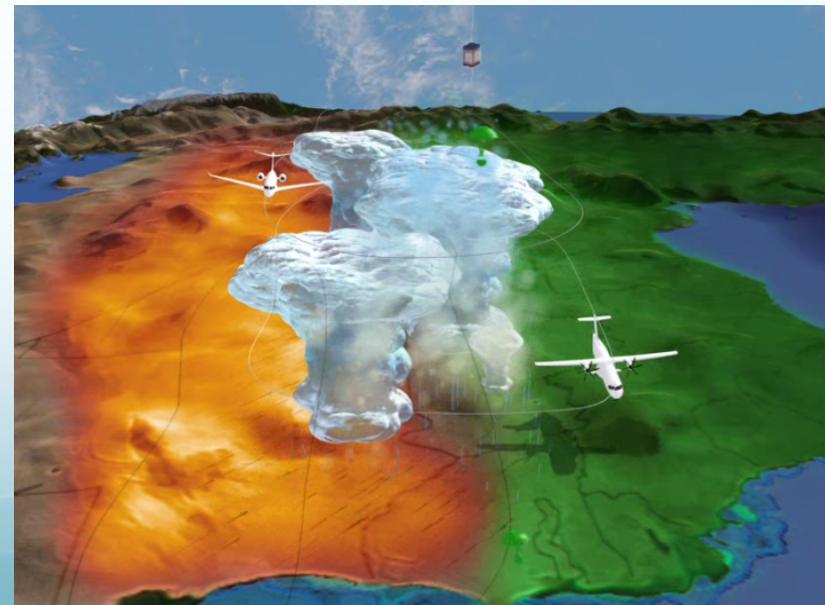
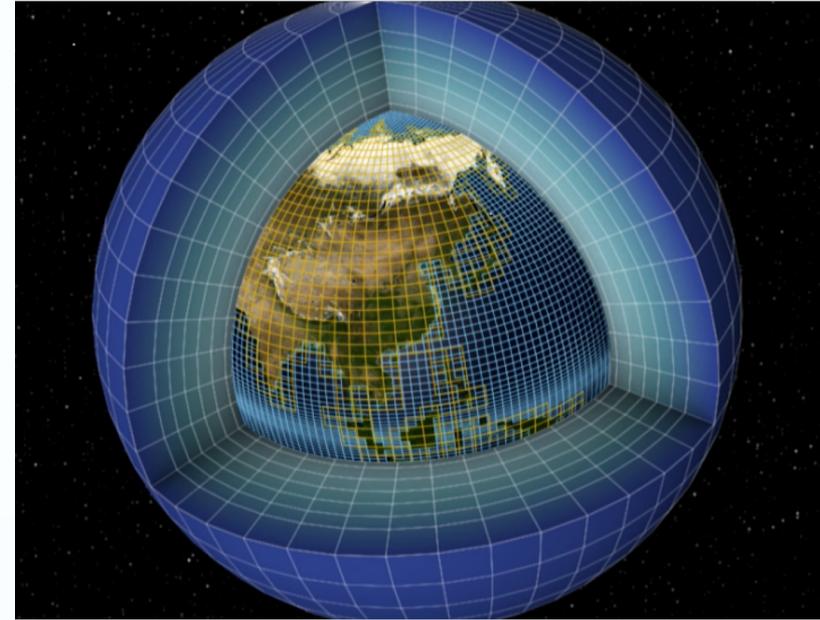


Principe de la modélisation du climat



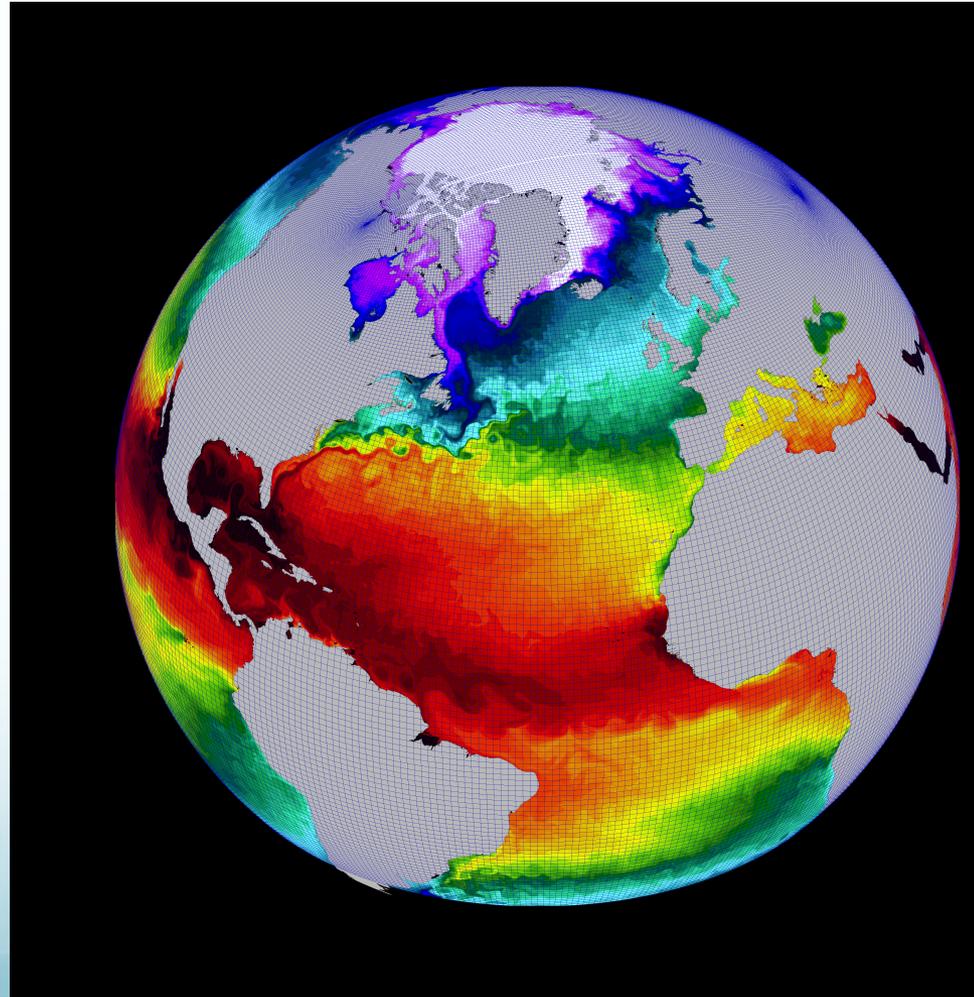
Modèle d'atmosphère

- 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

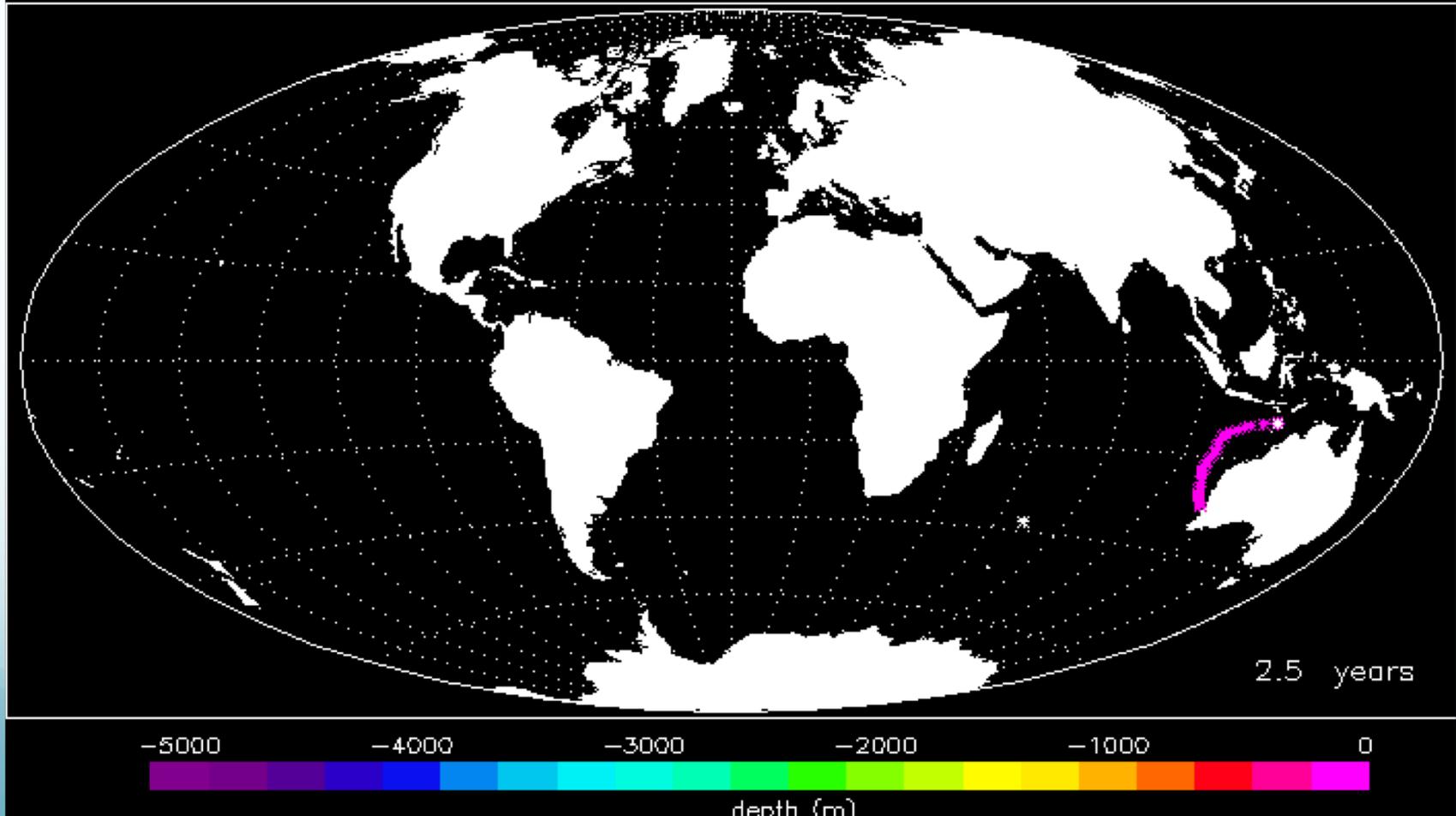
- Modèles plus récents par rapport atmosphère
- Problématiques spécifiques (tourbillon plus petit, salinité, chauffé par le dessus...)



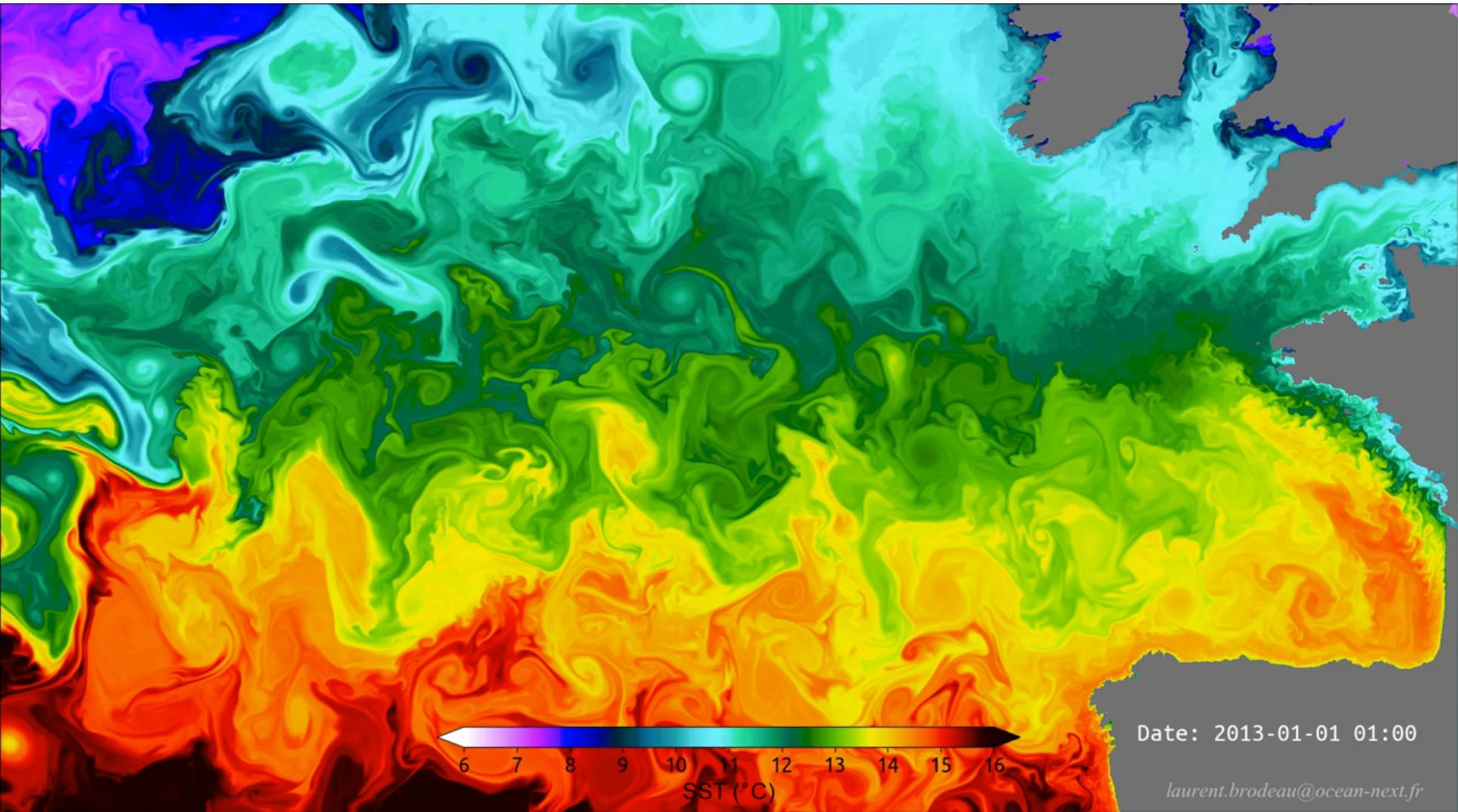
Trajectoire lagrangienne dans un modèle d'océan

"Global" trajectory in the OPA model

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

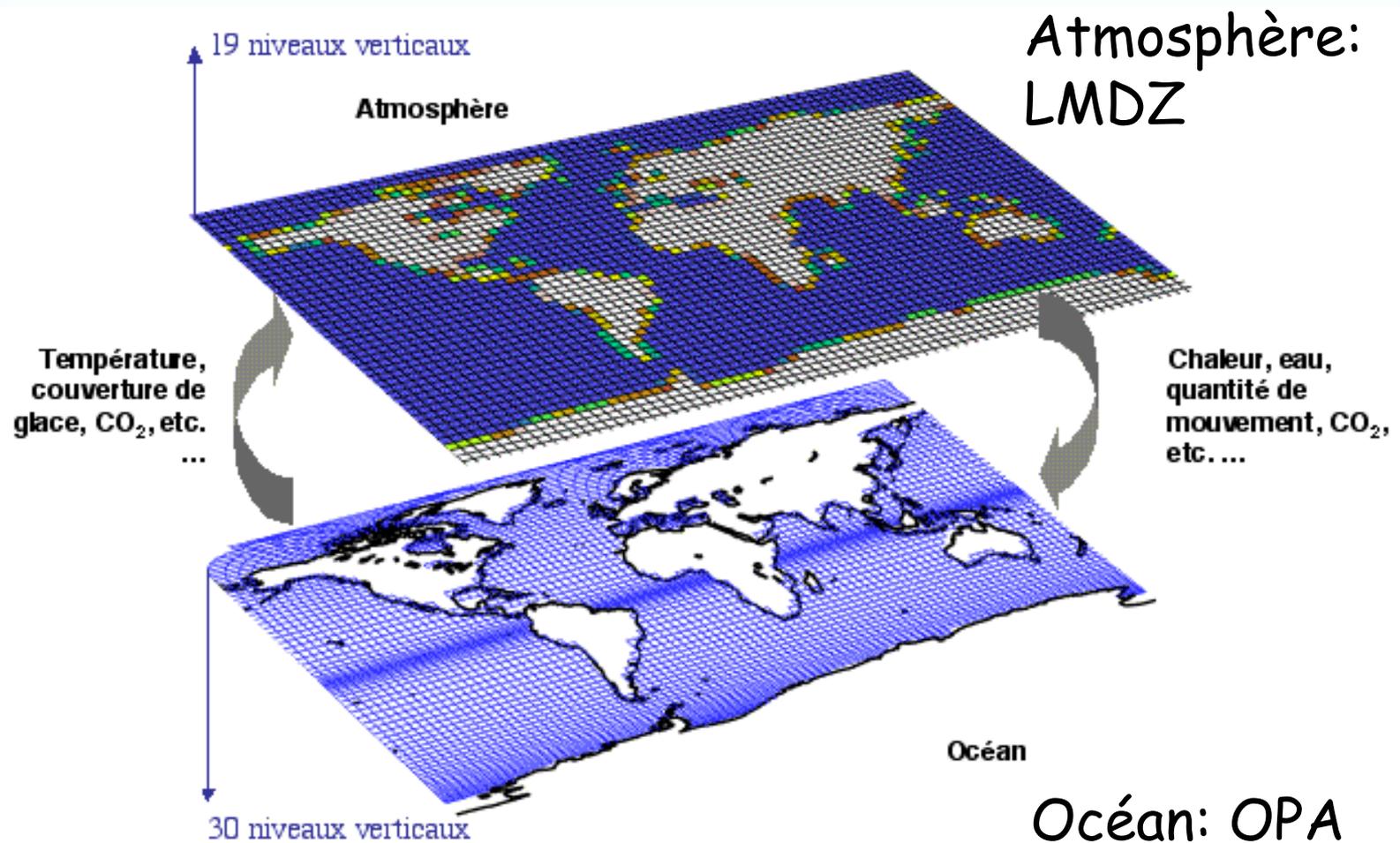


Océan, un monde fascinant



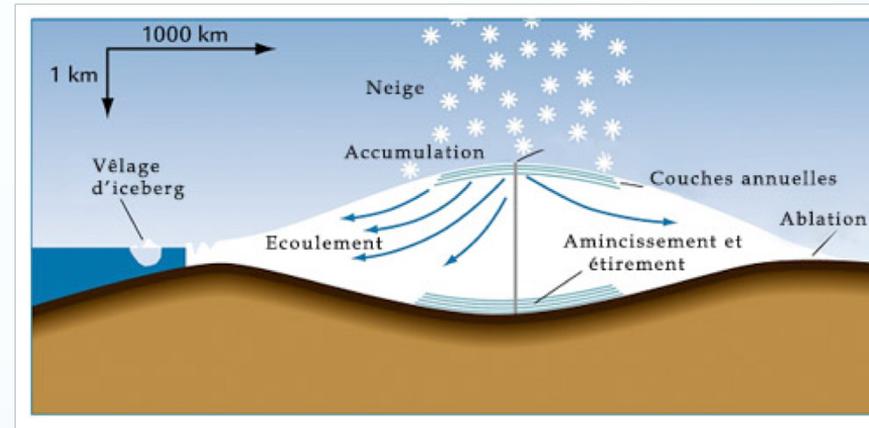
Modèles couplés océan-atmosphère

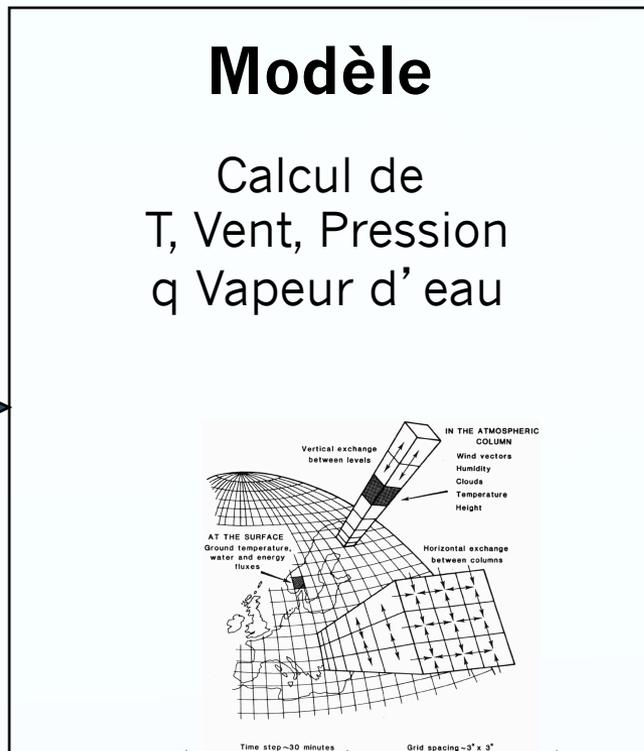
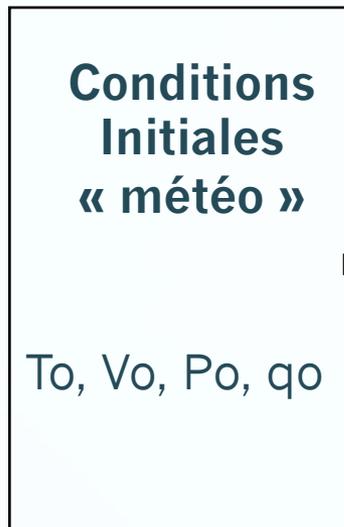
Exemple du modèle de l'IPSL



Autres composantes...

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





Statistiques
Mois/saisons



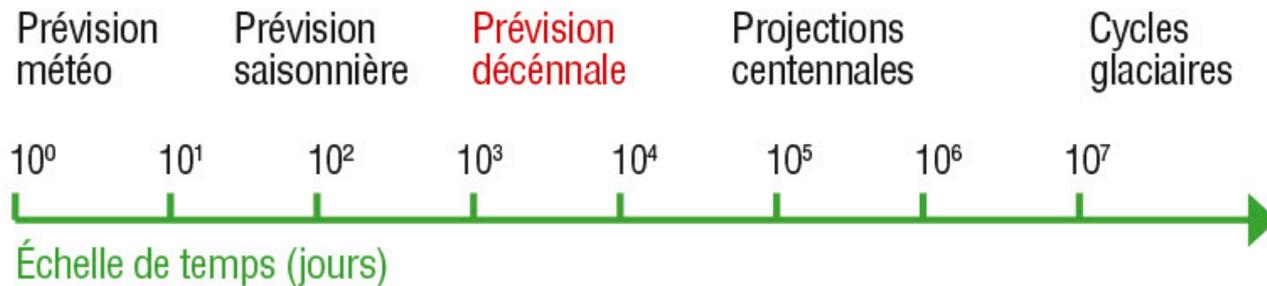
Prévision décennale

© D. Swingedouw

**Importance
conditions initiales**



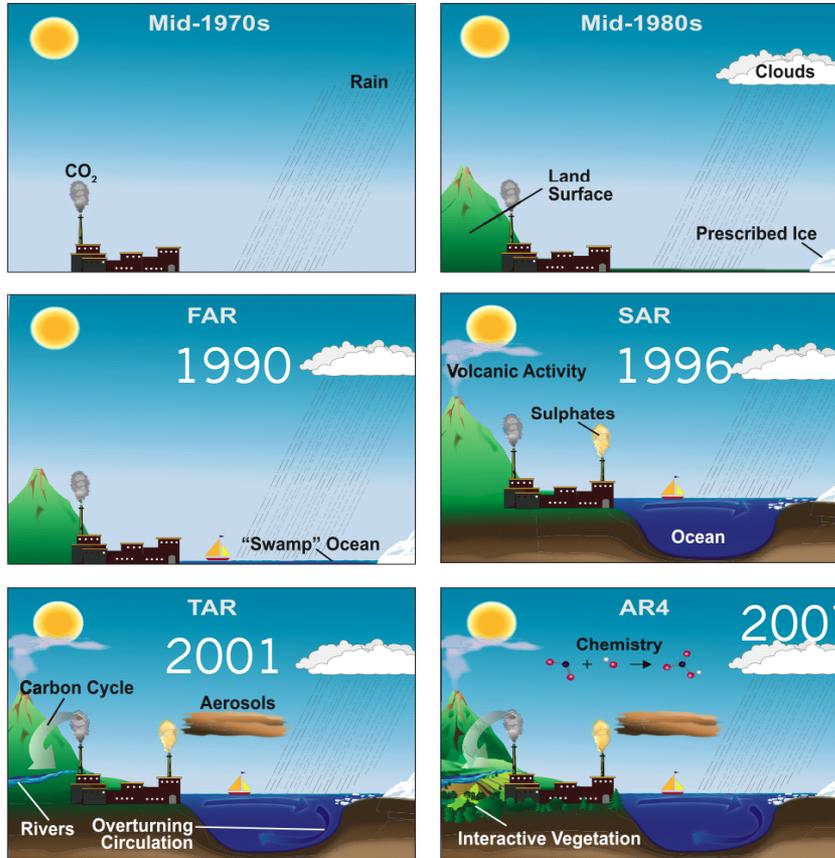
**Importance
conditions aux limites**



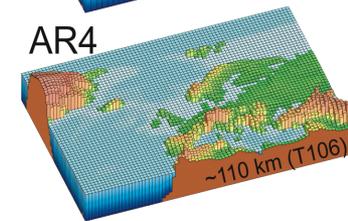
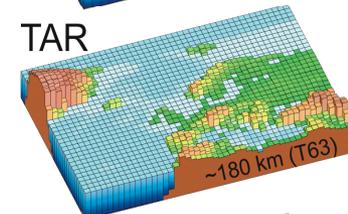
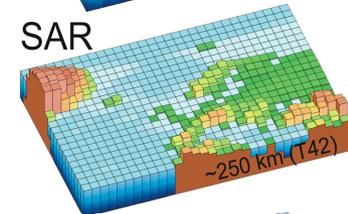
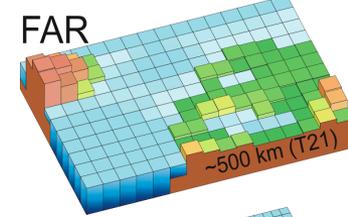
► Schéma montrant l'importance relative des conditions initiales et aux limites pour le climat selon les échelles de temps.

Evolution des modèles climatiques

composantes

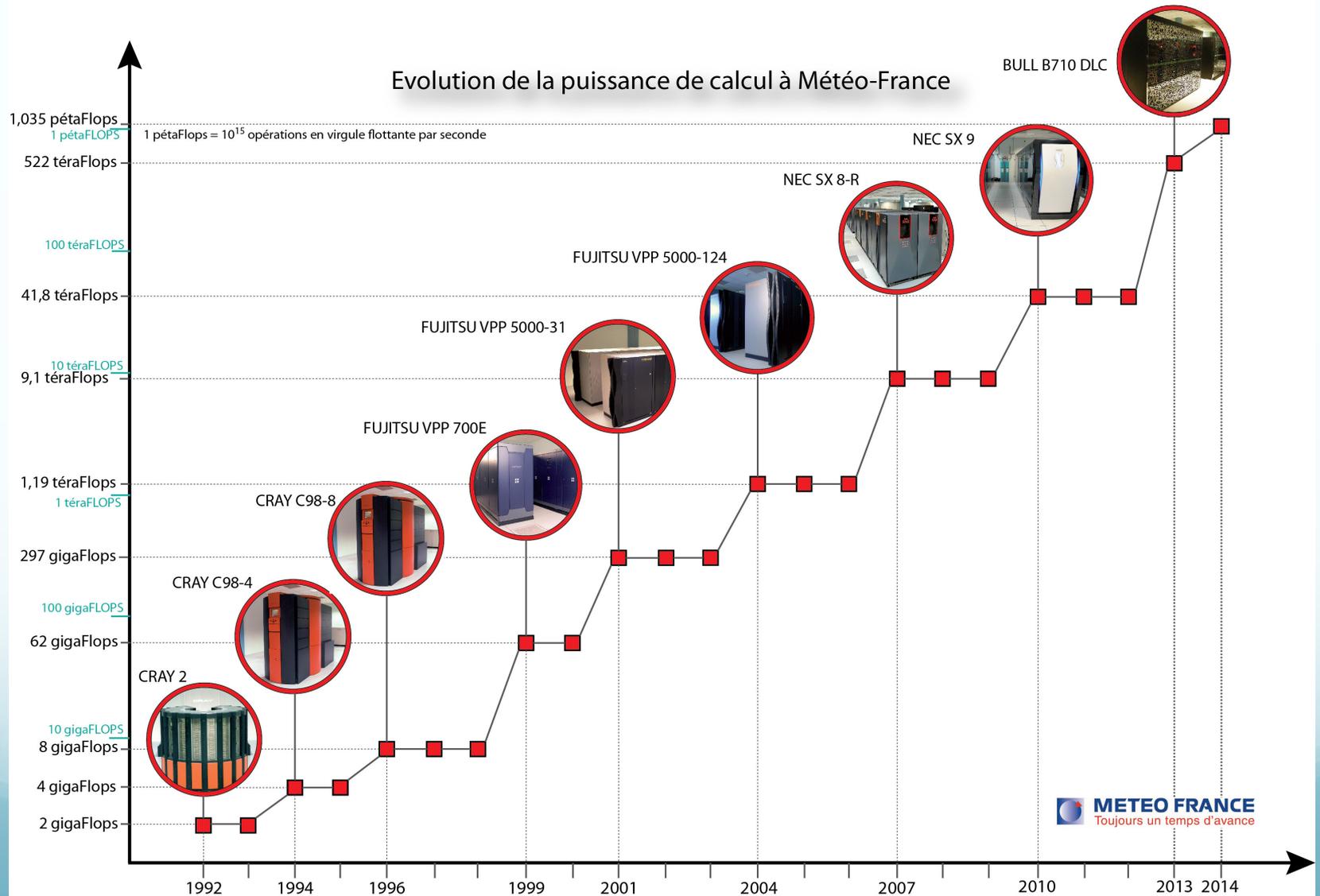


résolution



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

Moyens de calcul



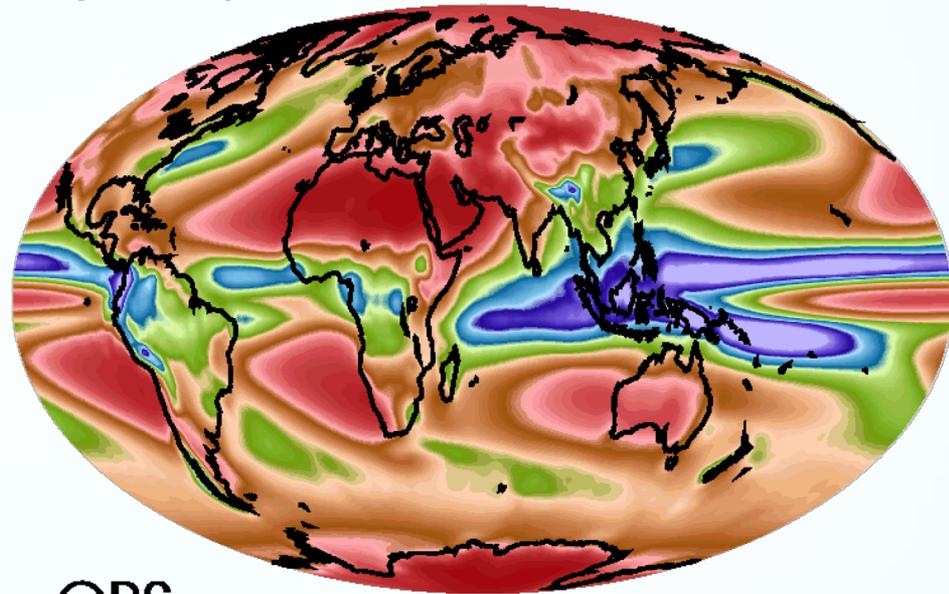
Tester les modèles

Des moyens de mesures inédits:

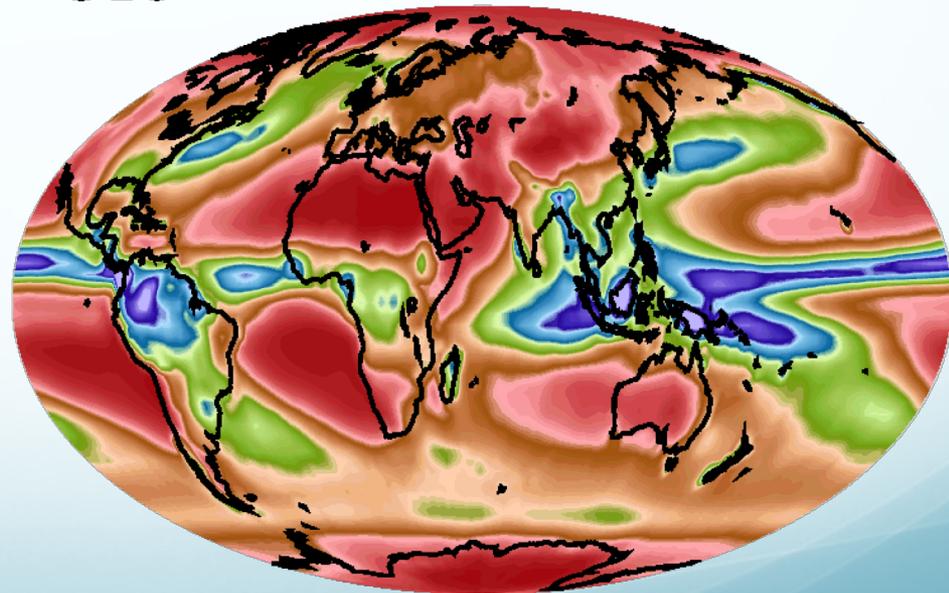
- Satellites
- Balises ARGO



CMIP5

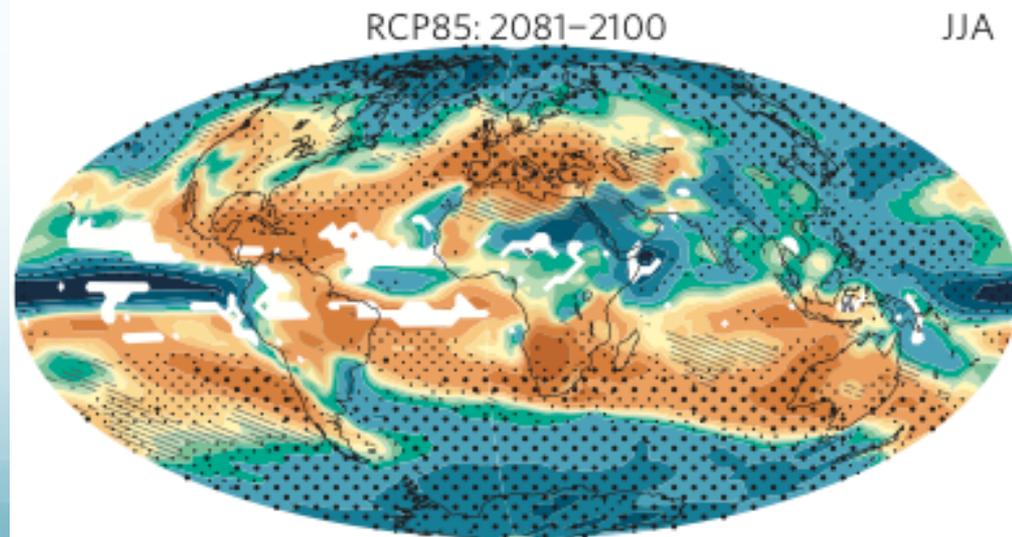
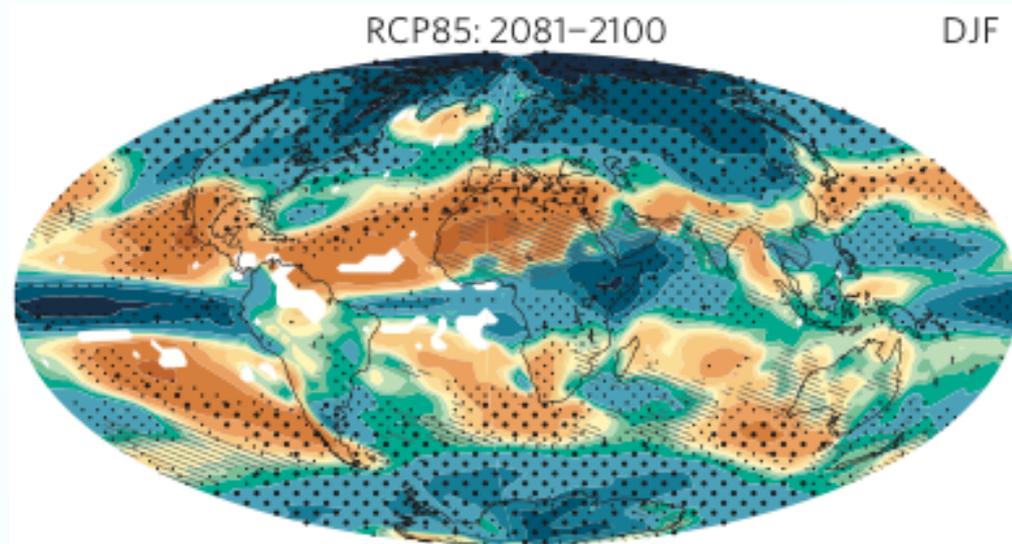


OBS

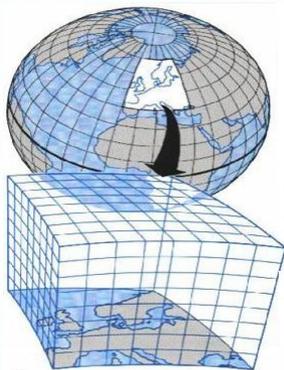


Projection de précipitations

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

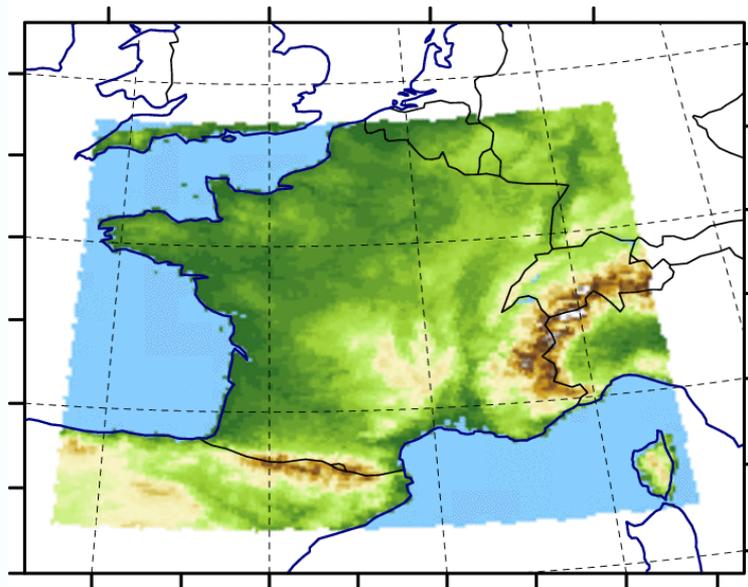


Regionalisation

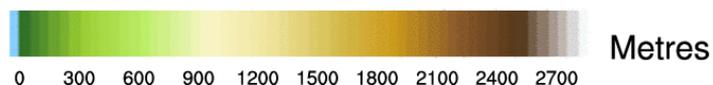
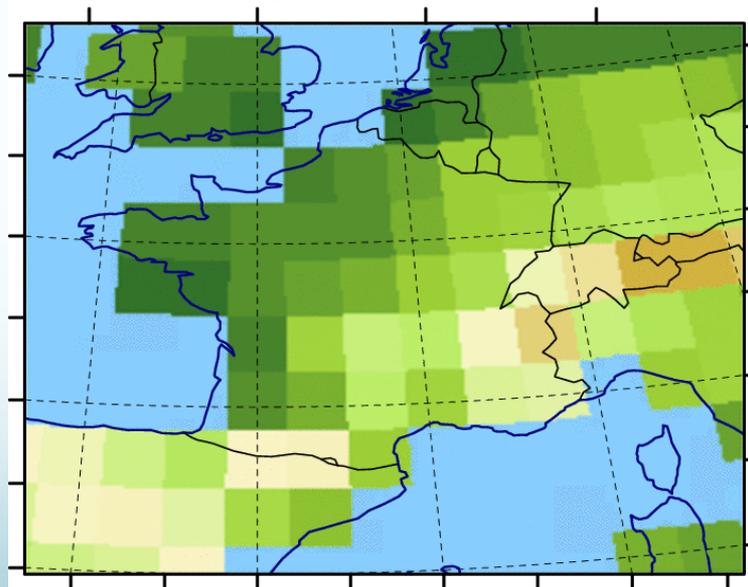


- Possibilité d'imbriquer les modèles les uns dans les autres
- Meilleure résolution du climat local (vent vallée du Rhone, événement cévenols, orages...)

CORDEX - ALADIN 12km

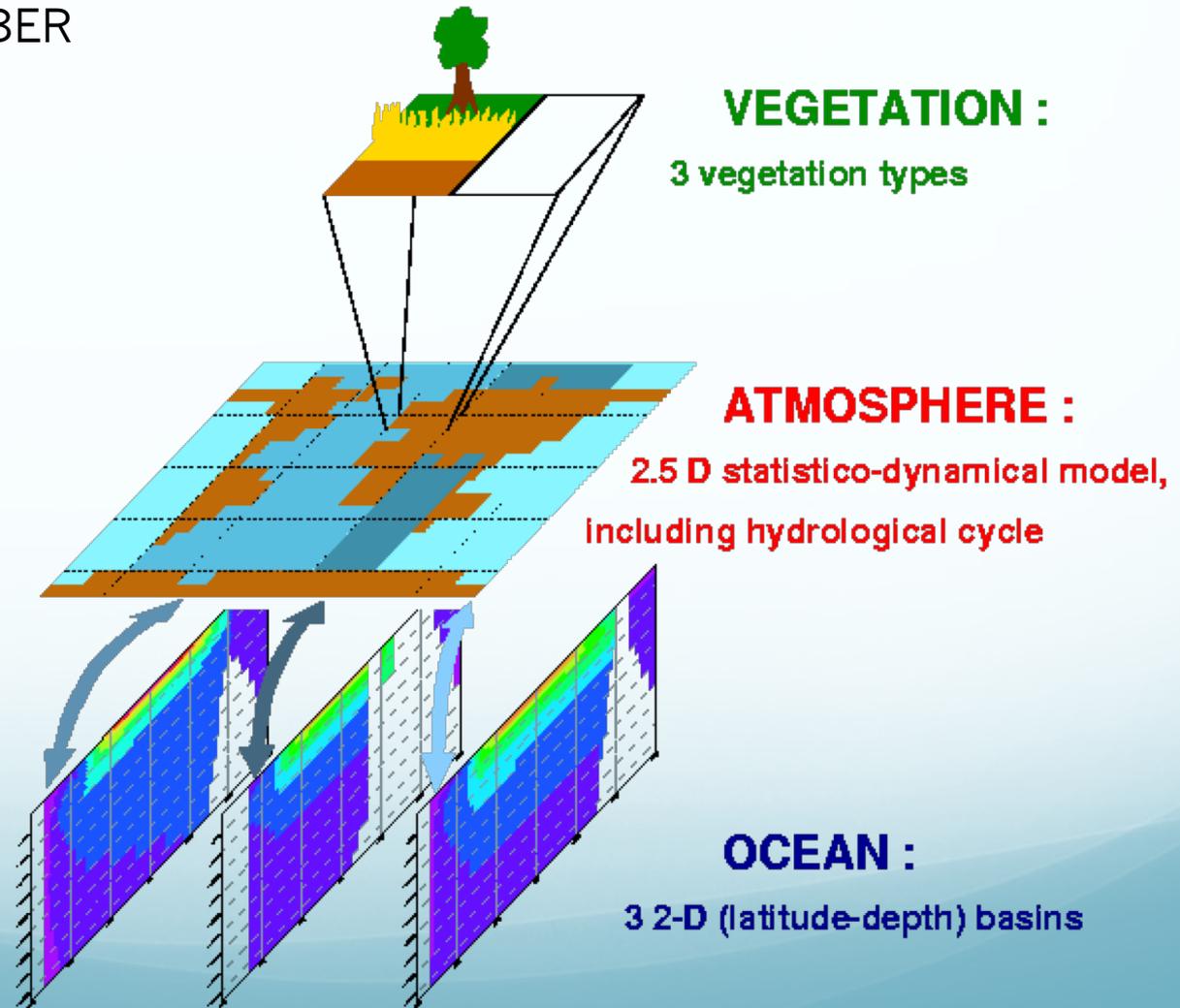


CMIP5 - ARPEGE 120km



Modèle de complexité intermédiaire (EMIC)

Exemple : modèle CLIMBER



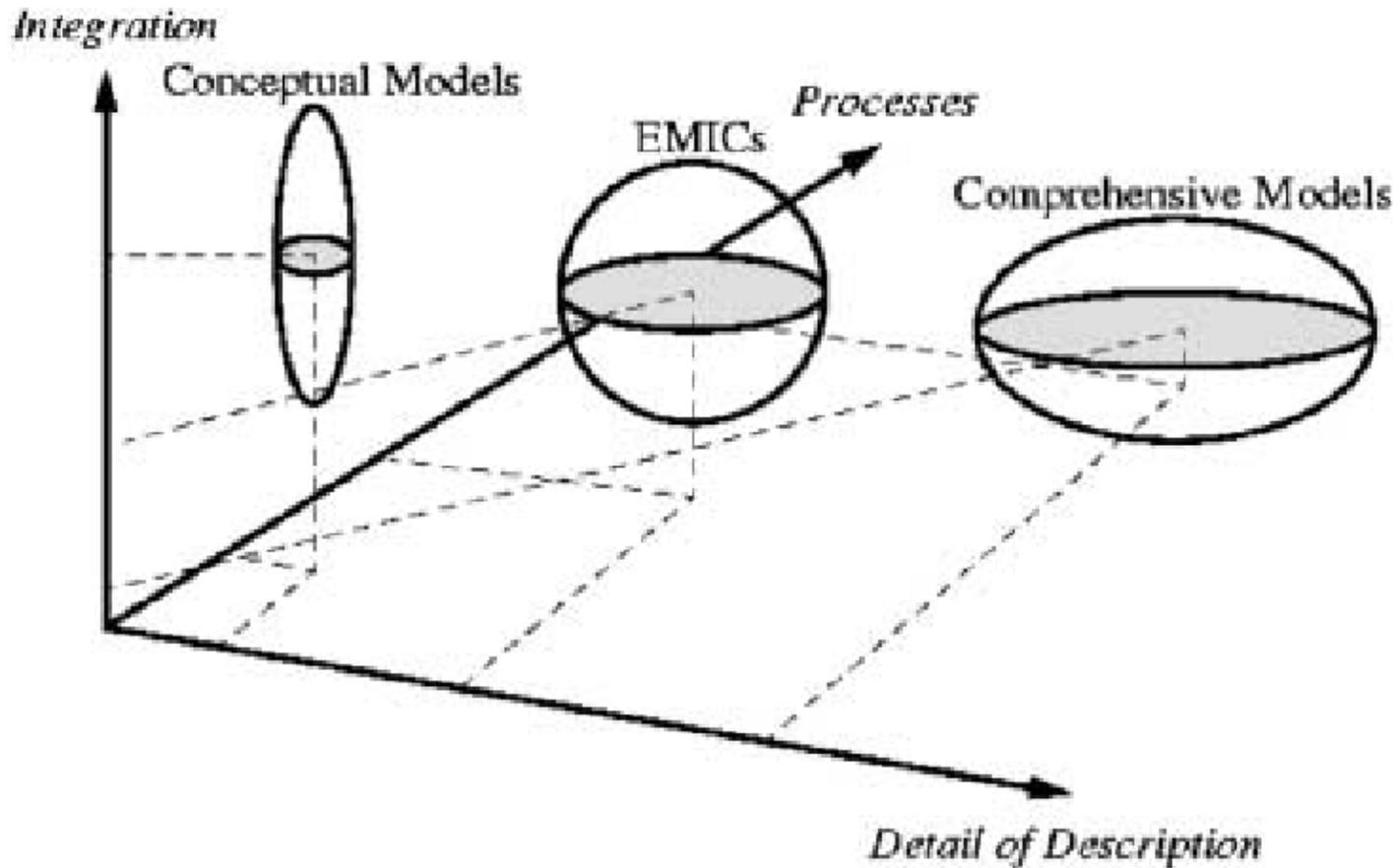


Les grandes familles de modèles

- Modèles de circulation générale (pour l'atmosphère et l'océan)
Les plus détaillés dans la description de ces composantes, et donc les plus coûteux en temps de calcul → au maximum 1000 ans de simulation
- Modèles de complexité intermédiaire
Une représentation simplifiée des composantes rapides (atmosphère, océan aussi, parfois) pour pouvoir représenter d'autres composantes (végétation, calottes glaciaires) et l'évolution du système climatique sur de longues périodes de temps
- Modèles conceptuels:
peu de variables prises en compte,
mise en évidence de certains mécanismes



Les grandes familles de modèles... en image



(Claussen et al, 2002)

Plan du cours

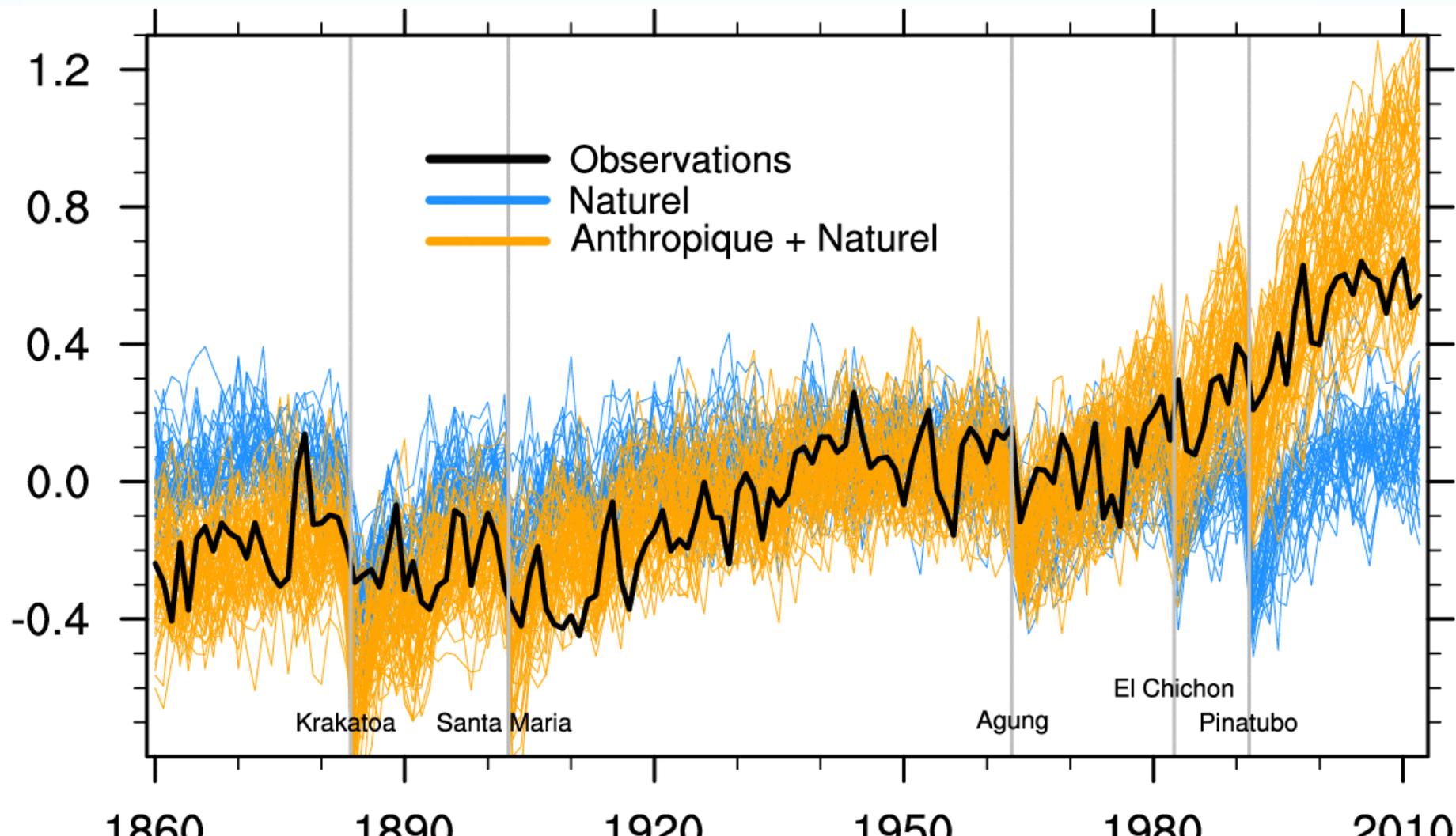
- Définition du climat
- Equilibre énergétique du système Terre
- Principaux modes de la variabilité climatique
- Qu'est ce qu'un modèle de climat ?
- Utilité des modèles de climat : quelques applications

La preuve du réchauffement climatique



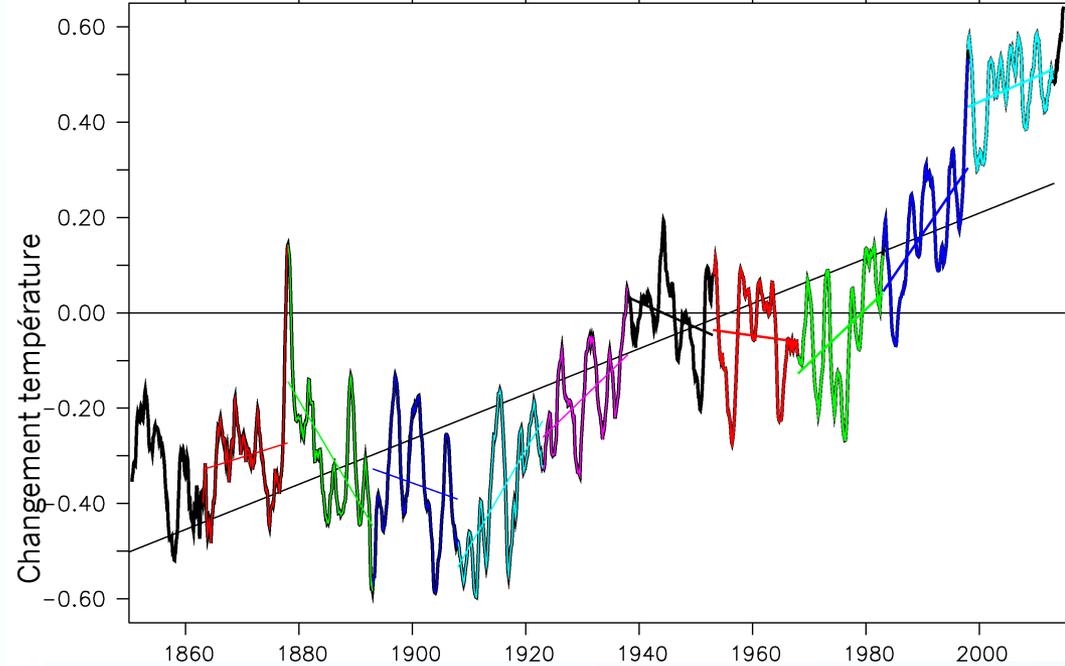
Une saturation possible du réchauffement climatique ?

Détection-attribution du changement climatique

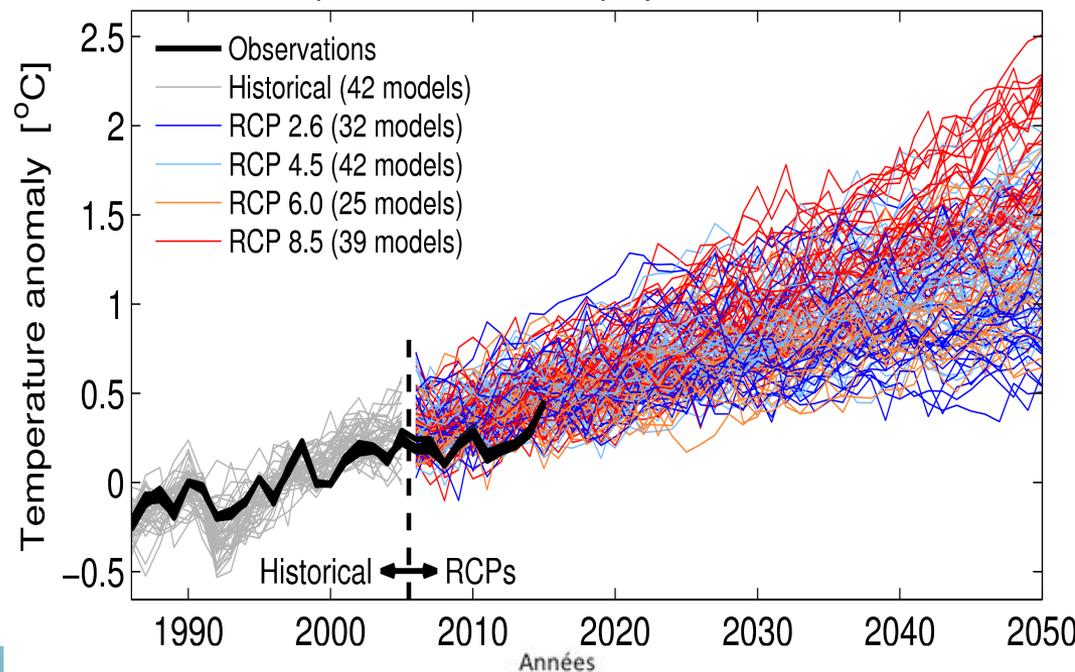


Un plateau de température ?

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



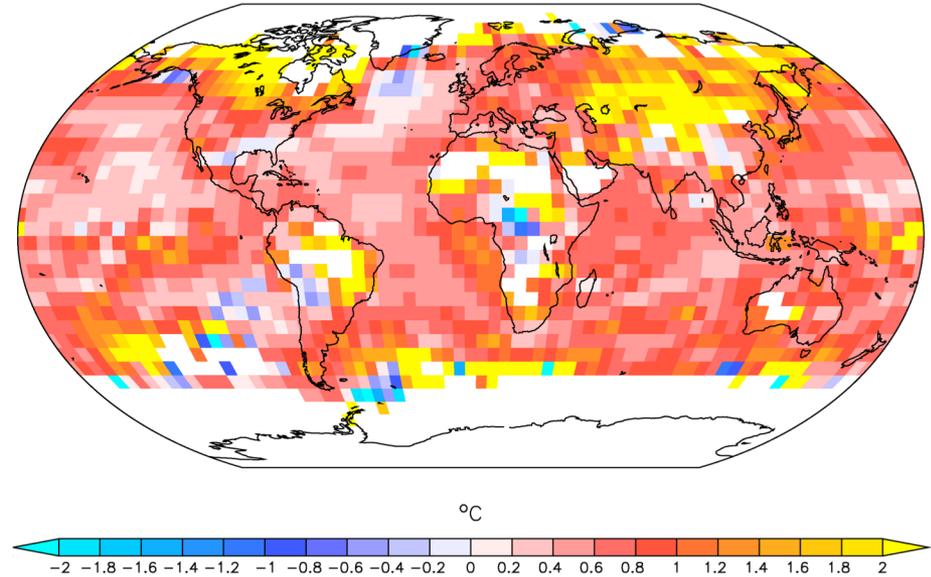
Global mean temperature near-term projections relative to 1986–2005



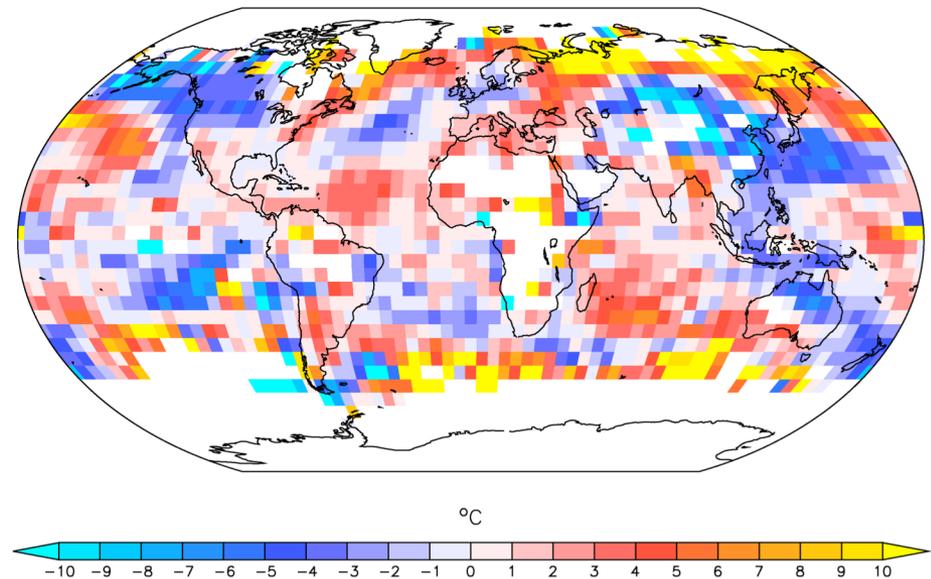
Un plateau de température ?

- 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

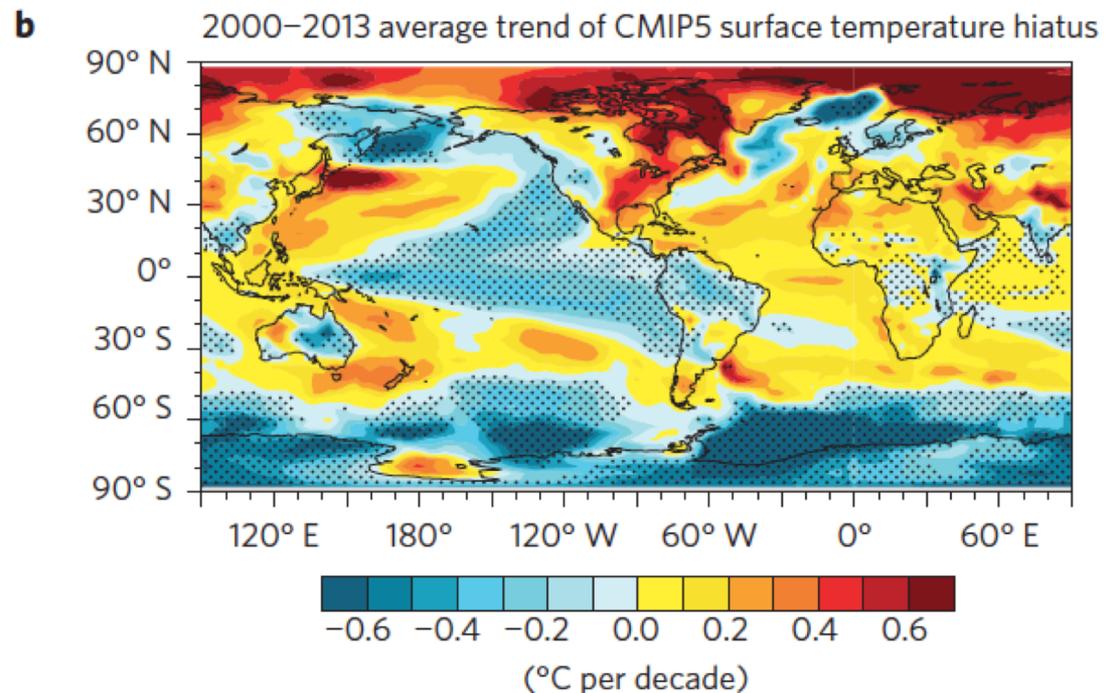
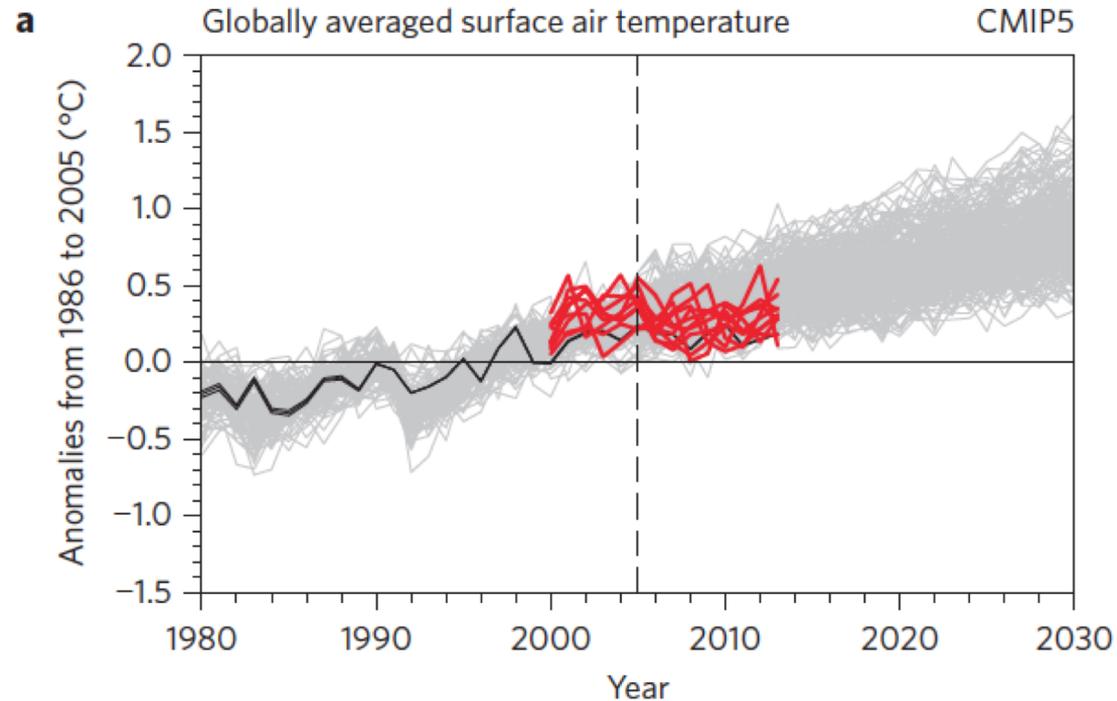


Tendance 1998-2012



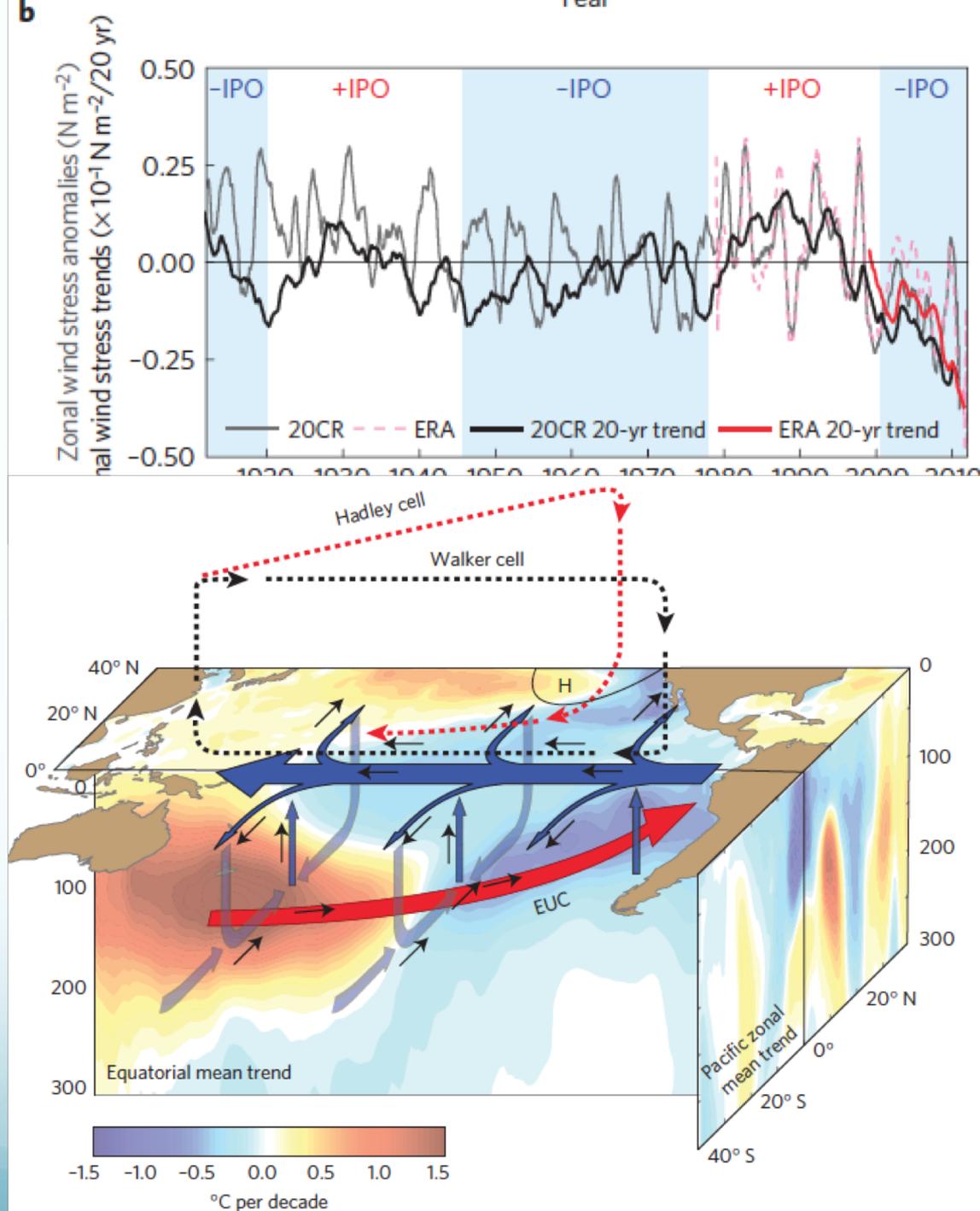
Hiatus & Modèles

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

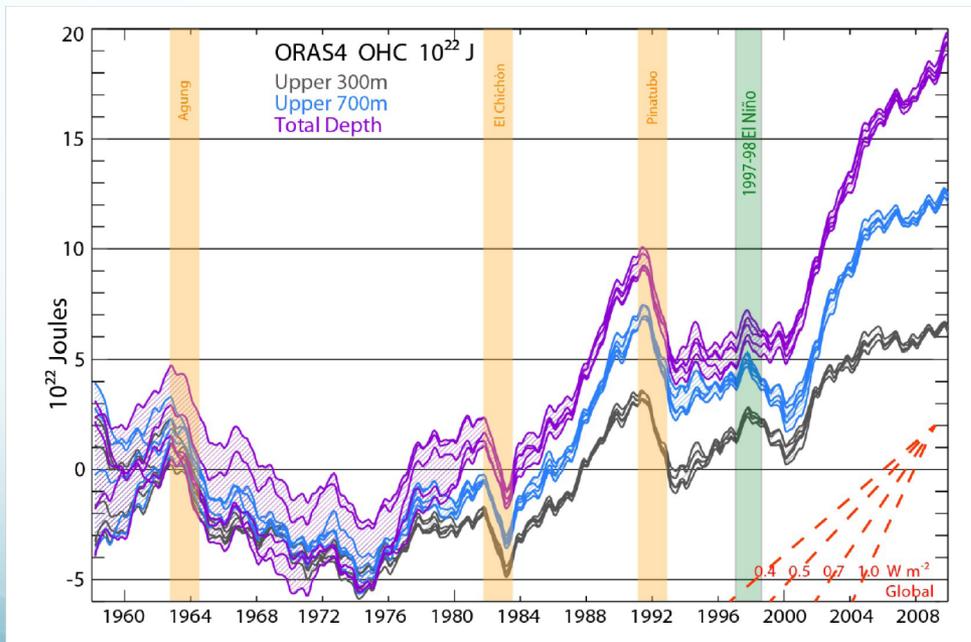


Explication du hiatus?

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

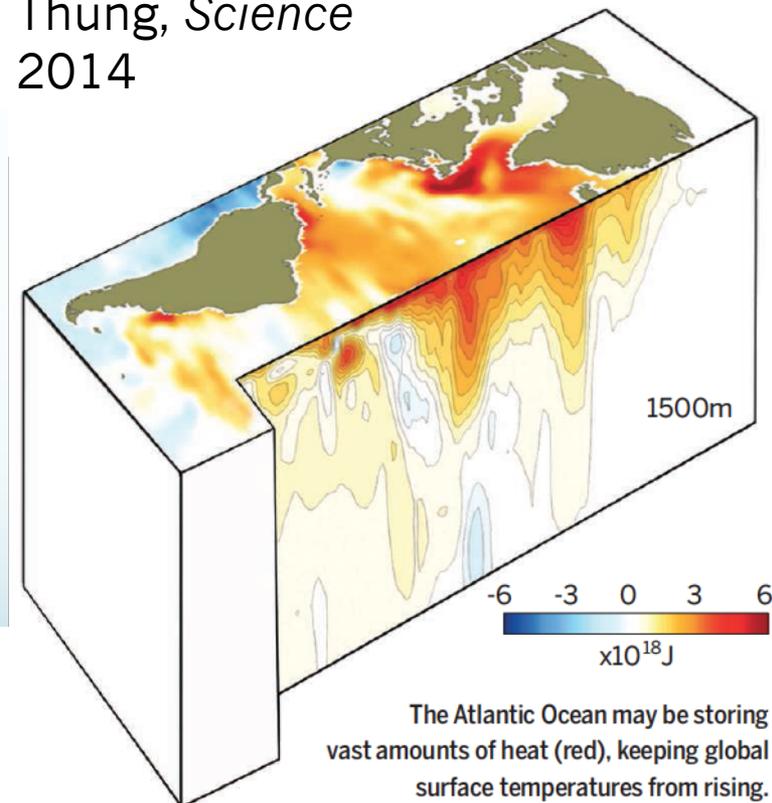


Explication du hiatus : Ou est passée la chaleur?



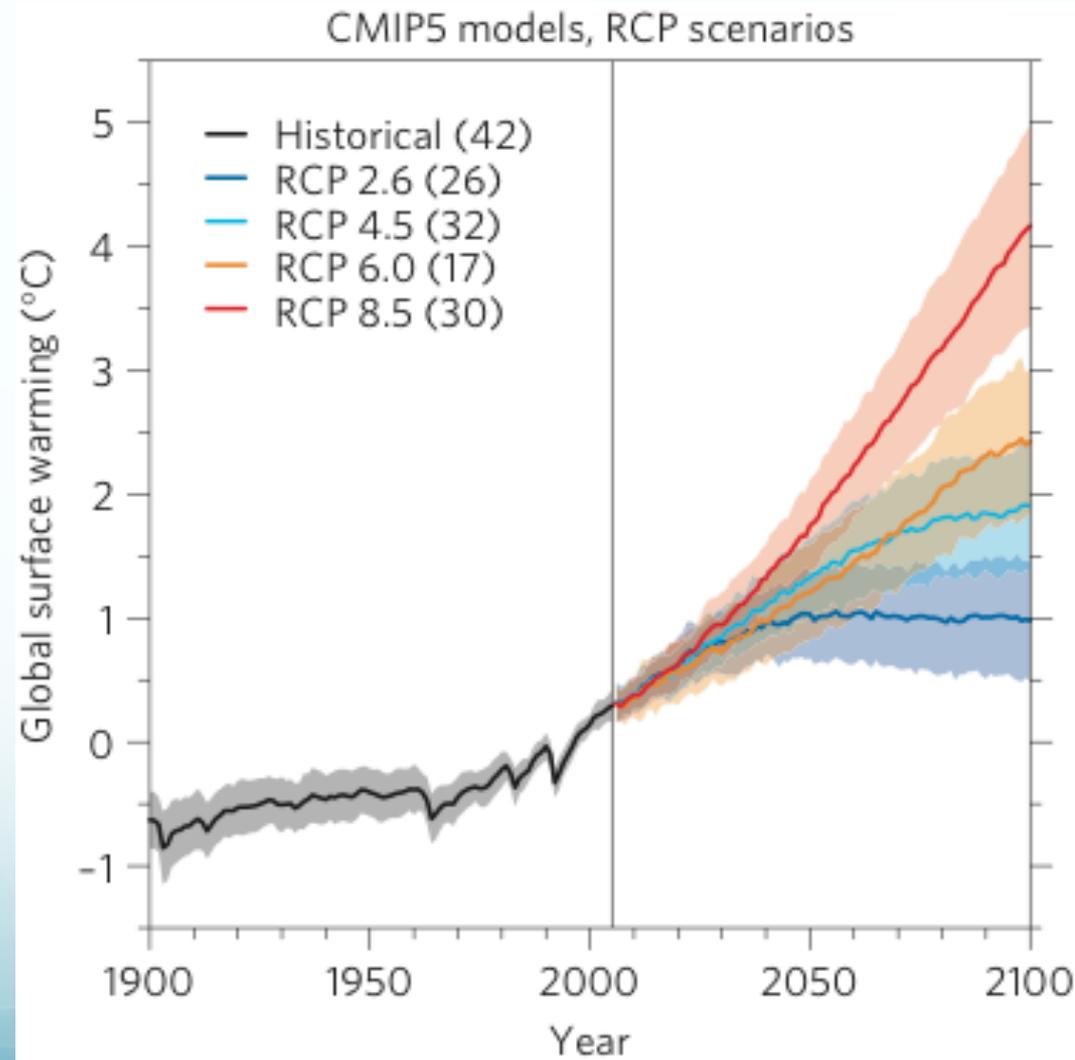
Balmaseda et al. 2013

Cheng &
Thung, *Science*
2014

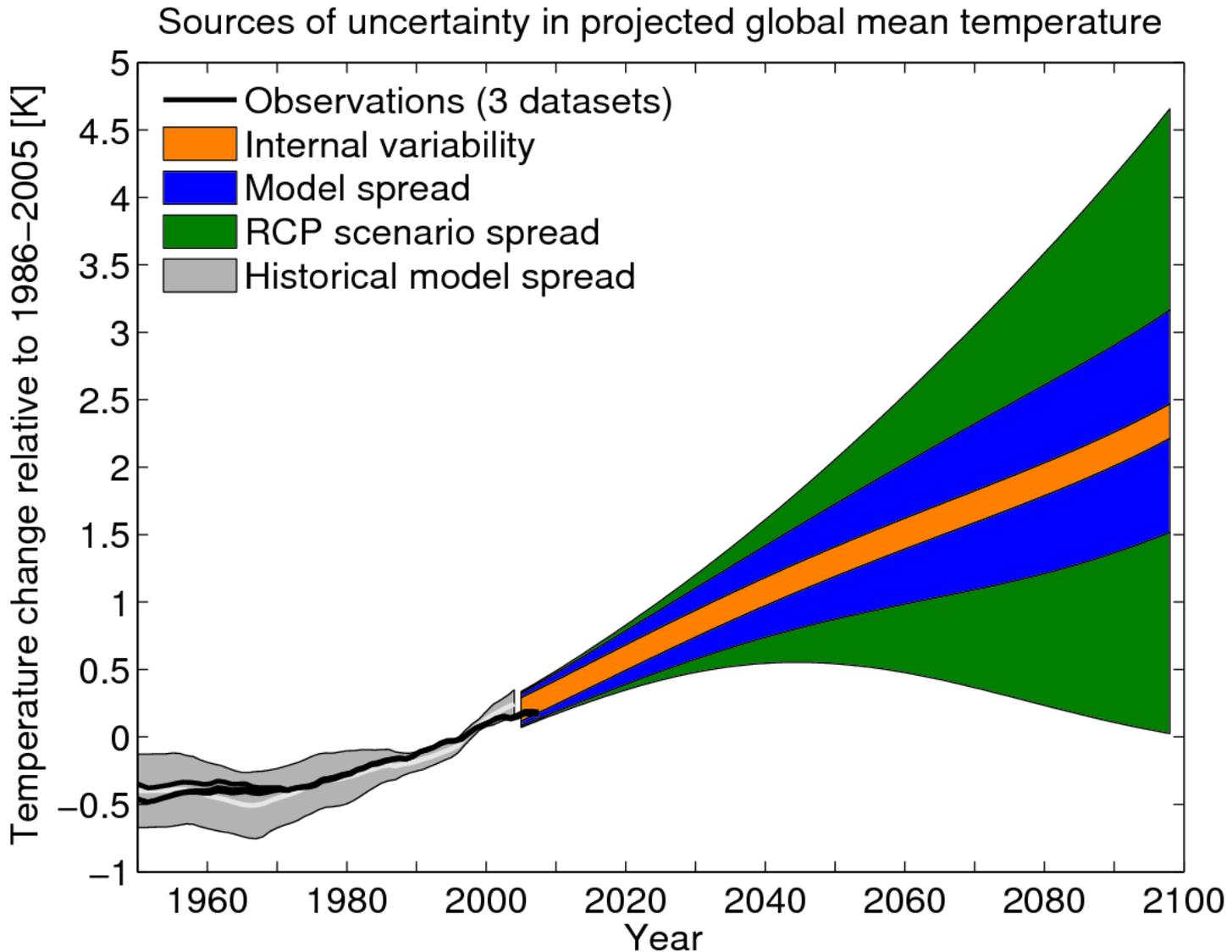


Projections climatiques

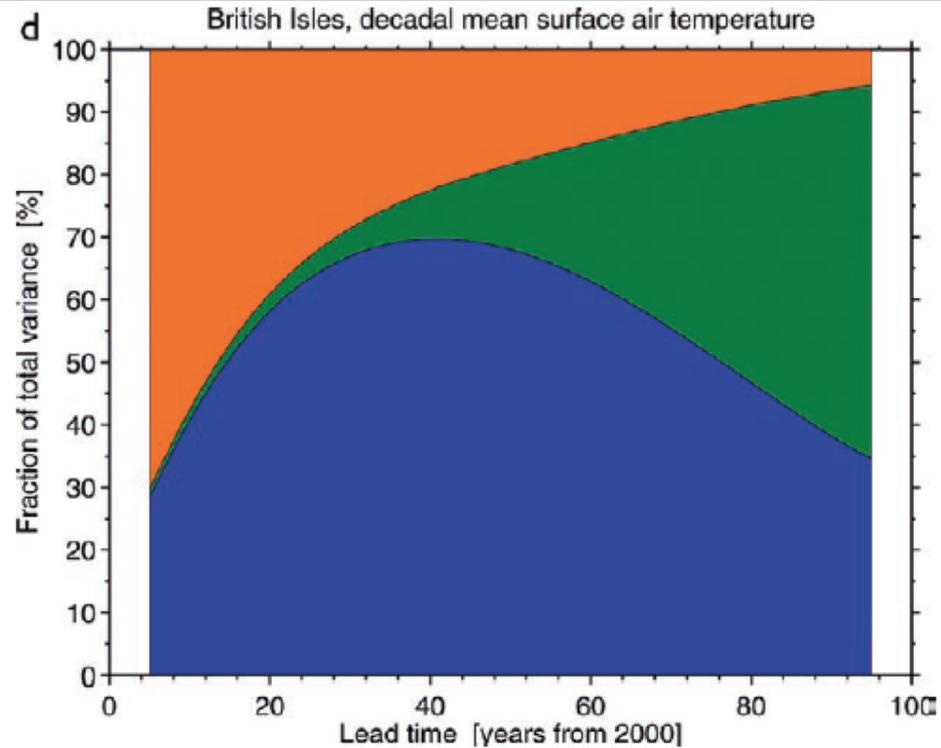
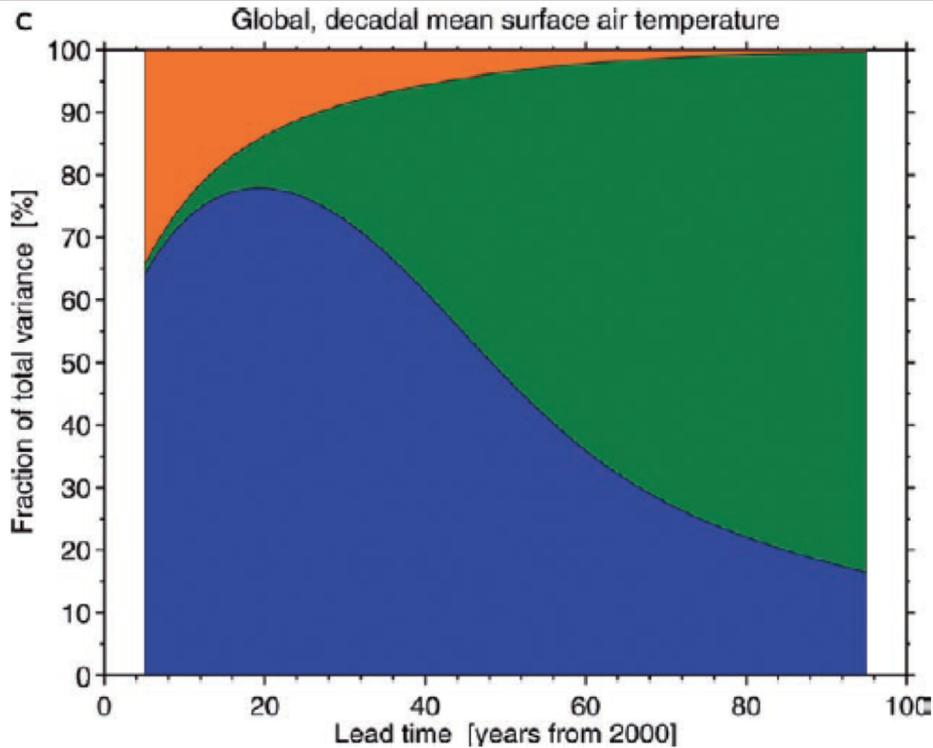
- Des dizaines de modèles développés de par le monde
- Deux en France (Paris et Toulouse)
- Projettent un réchauffement entre 1 et 4°C en 2100 selon nos émissions



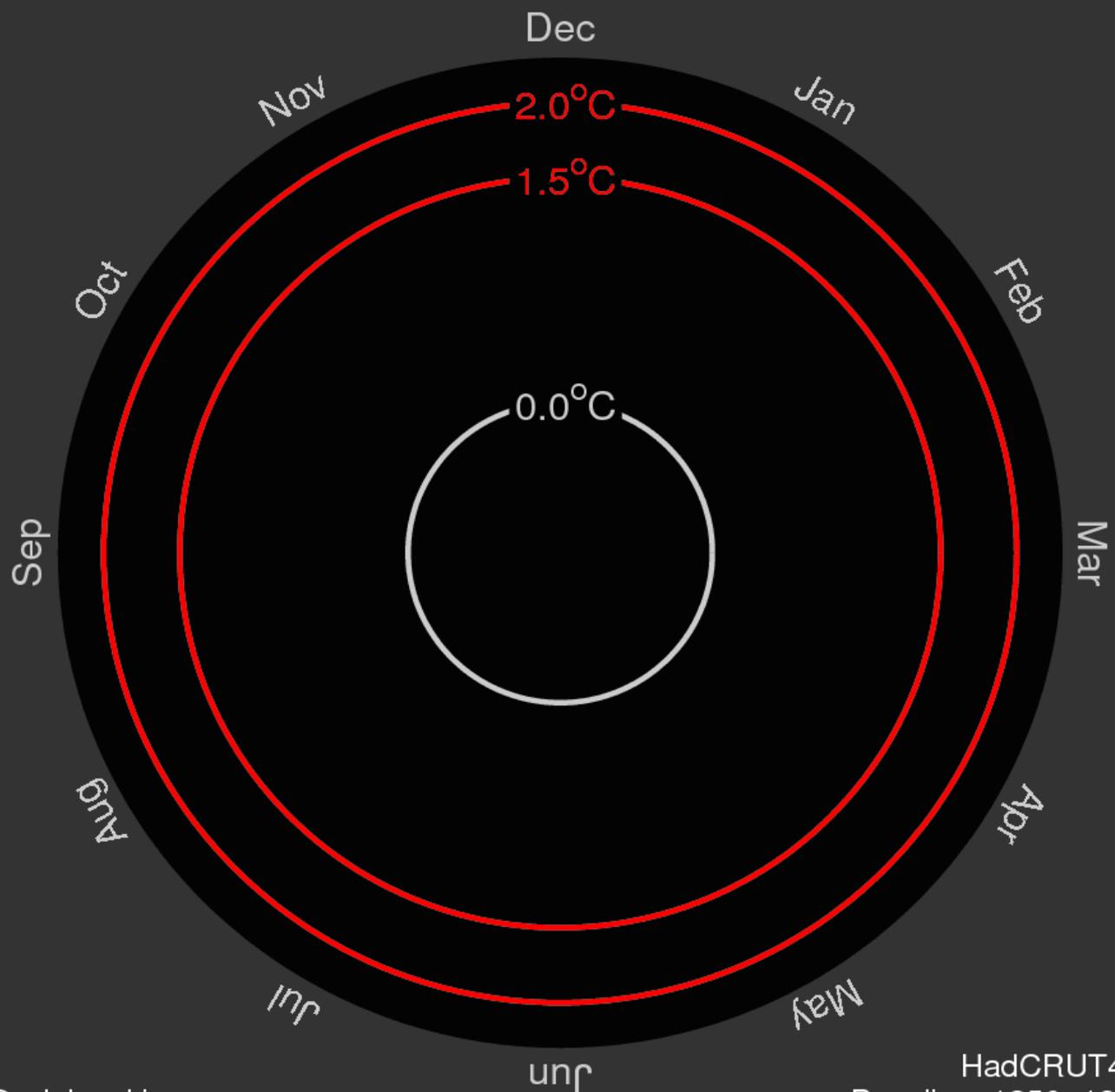
Notion d'incertitude



Incertitudes



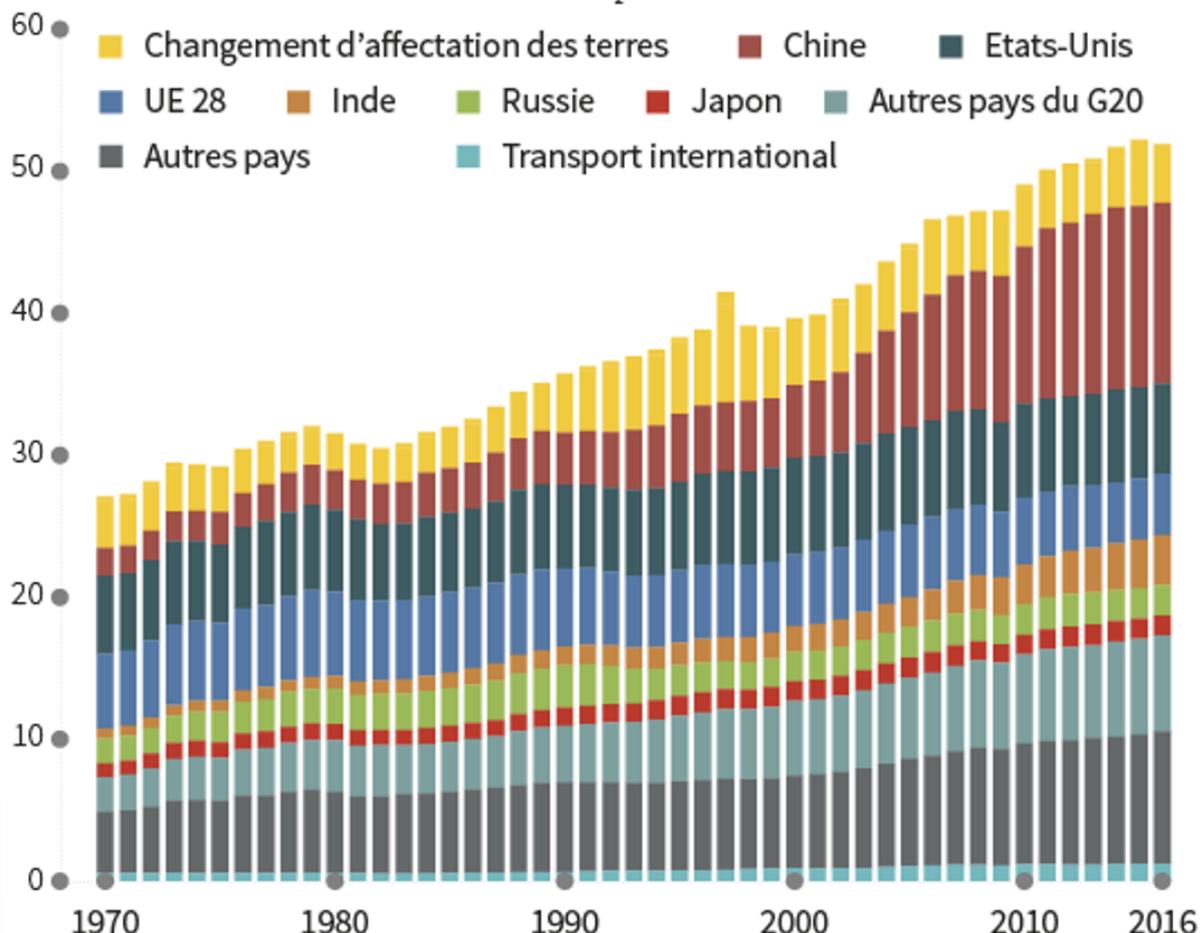
Global temperature change (1850–2016)



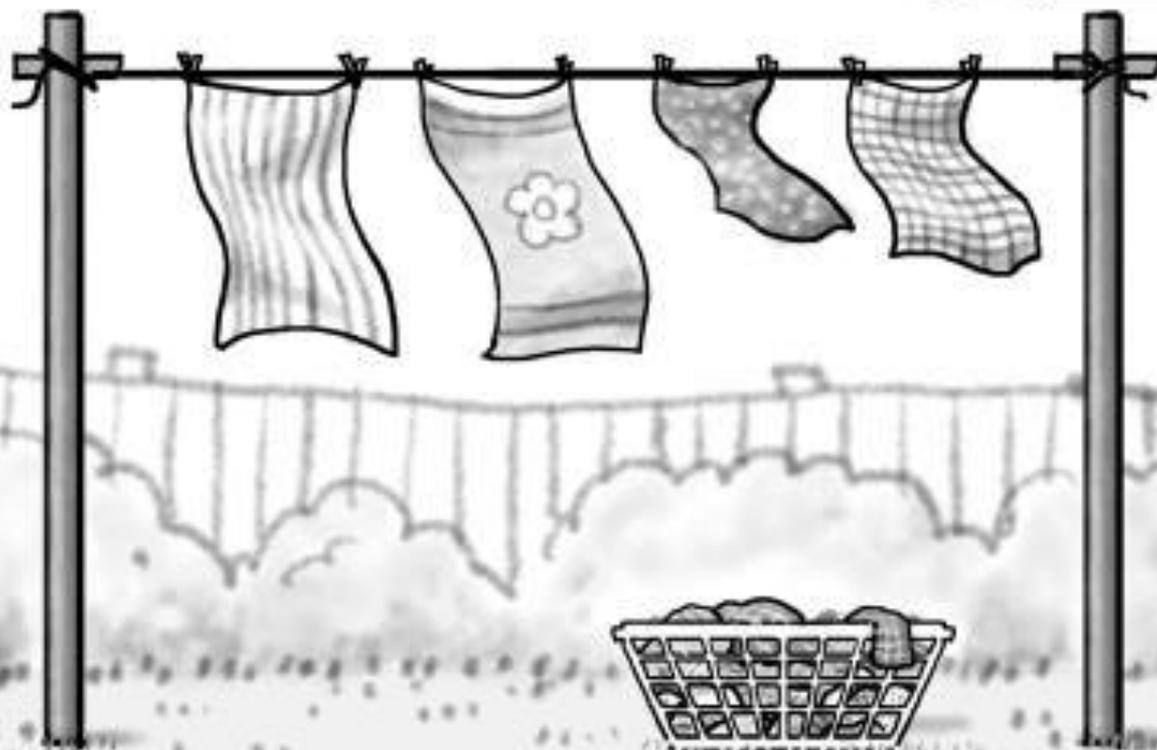
Consommation d'énergie

Une courbe d'émissions à inverser au plus vite

ÉMISSIONS MONDIALES DE GAZ À EFFET DE SERRE DE 1970 À 2016,
EN MILLIARDS DE TONNES ÉQUIVALENT CO₂



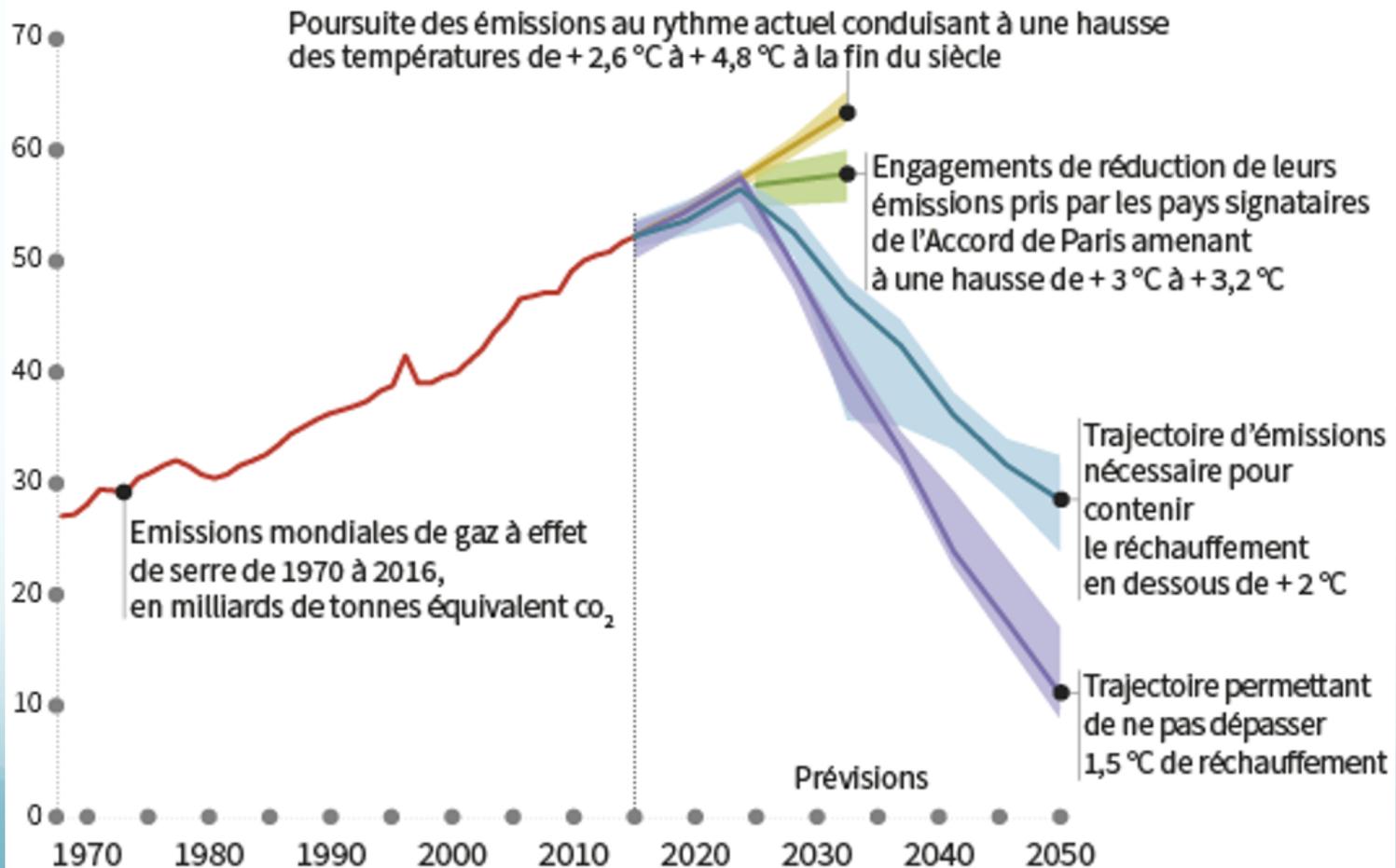
Ca sèche le linge en utilisant les dernières technologies – une combinaison de solaire et d'éolien



CHRIS
MADDEN

Accord Paris : une réduction drastique nécessaire maintenant !

HAUSSE PRÉVISIBLE DES TEMPÉRATURES EN FONCTION DES TRAJECTOIRES D'ÉMISSIONS



SOURCE : EDGAR V4.3.2 FT2016 (OLIVIER ET AL., 2017)

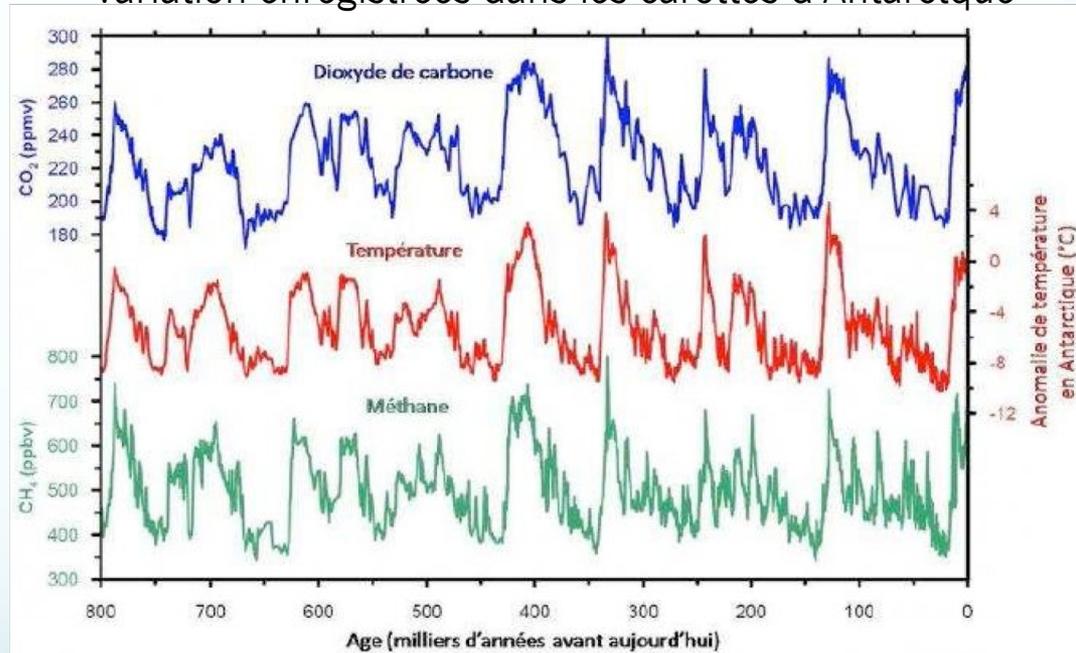
Conclusions

- 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 !

Les climats du passé : une boussole pour le futur ?

- Pas d'analogie strict au climat récent et à venir
- Modèles ont besoin d'être testés en conditions extrêmes
- Seule la reconstruction du passé le permet

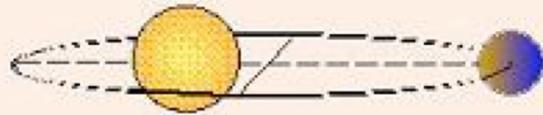
Variation enregistrées dans les carottes d'Antarctique



Théorie de Milankovitch



Variations de l'EXCENTRICITE de l'orbite terrestre



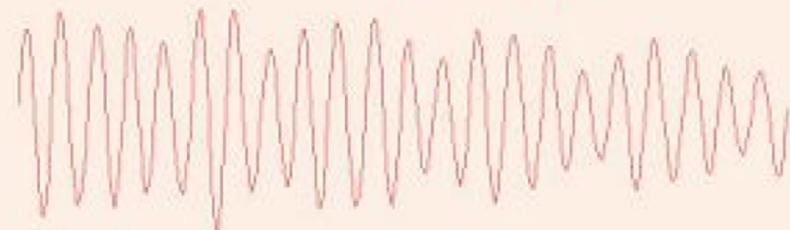
périodicités de 100 et 413 ka



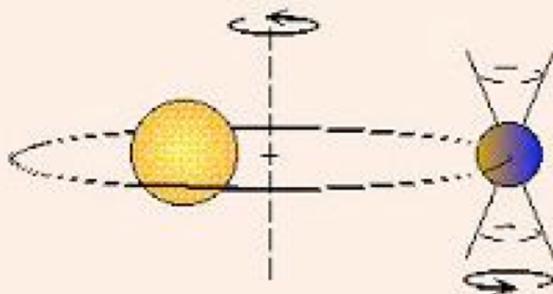
Variations de l'OBLIQUITE de l'axe de rotation



périodicité de 41 ka



PRECESSION de l'axe de rotation et ROTATION de l'orbite terrestre

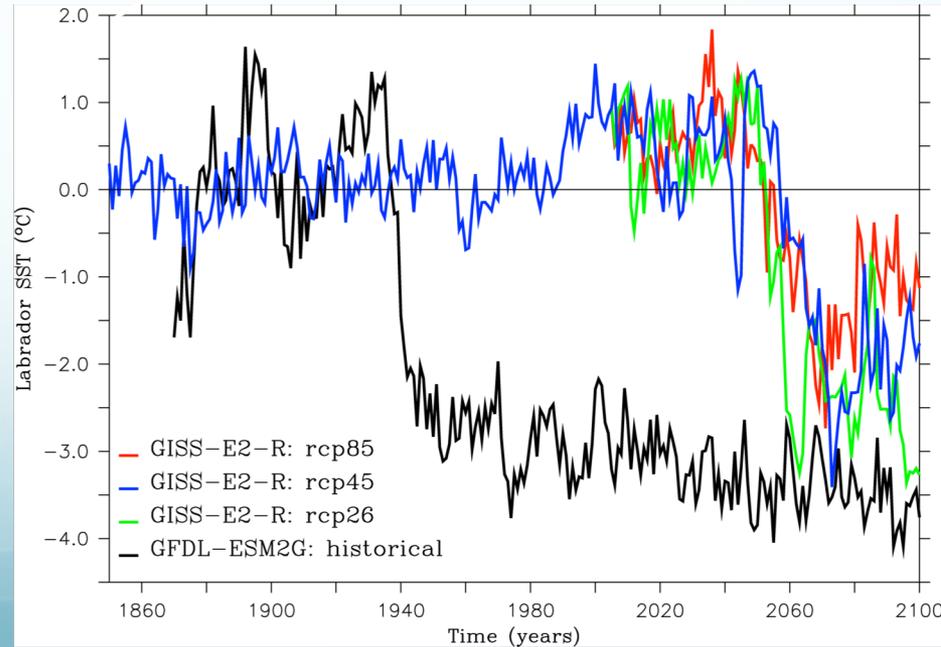
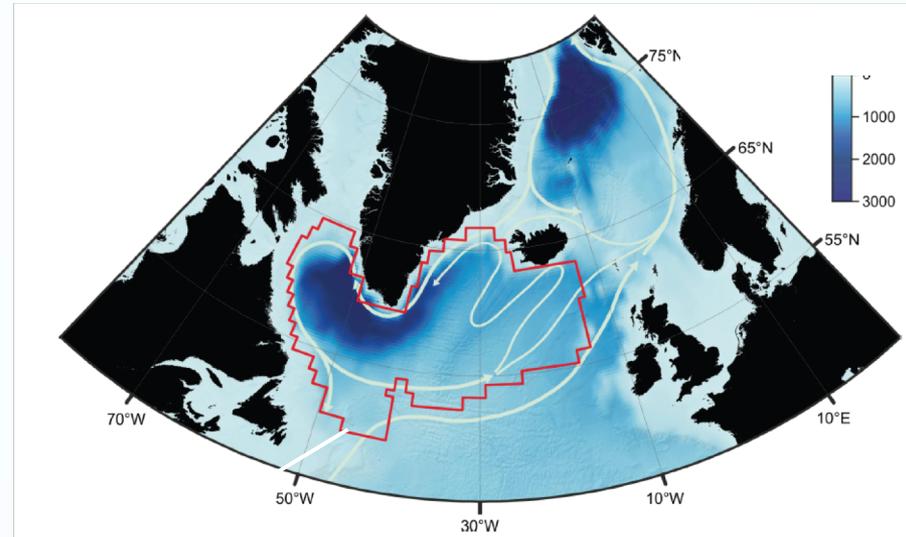


périodicités de 23 et 19 ka



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^e siècle (2015-2100).

