

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



ipcc

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON climate change





Plan du cours

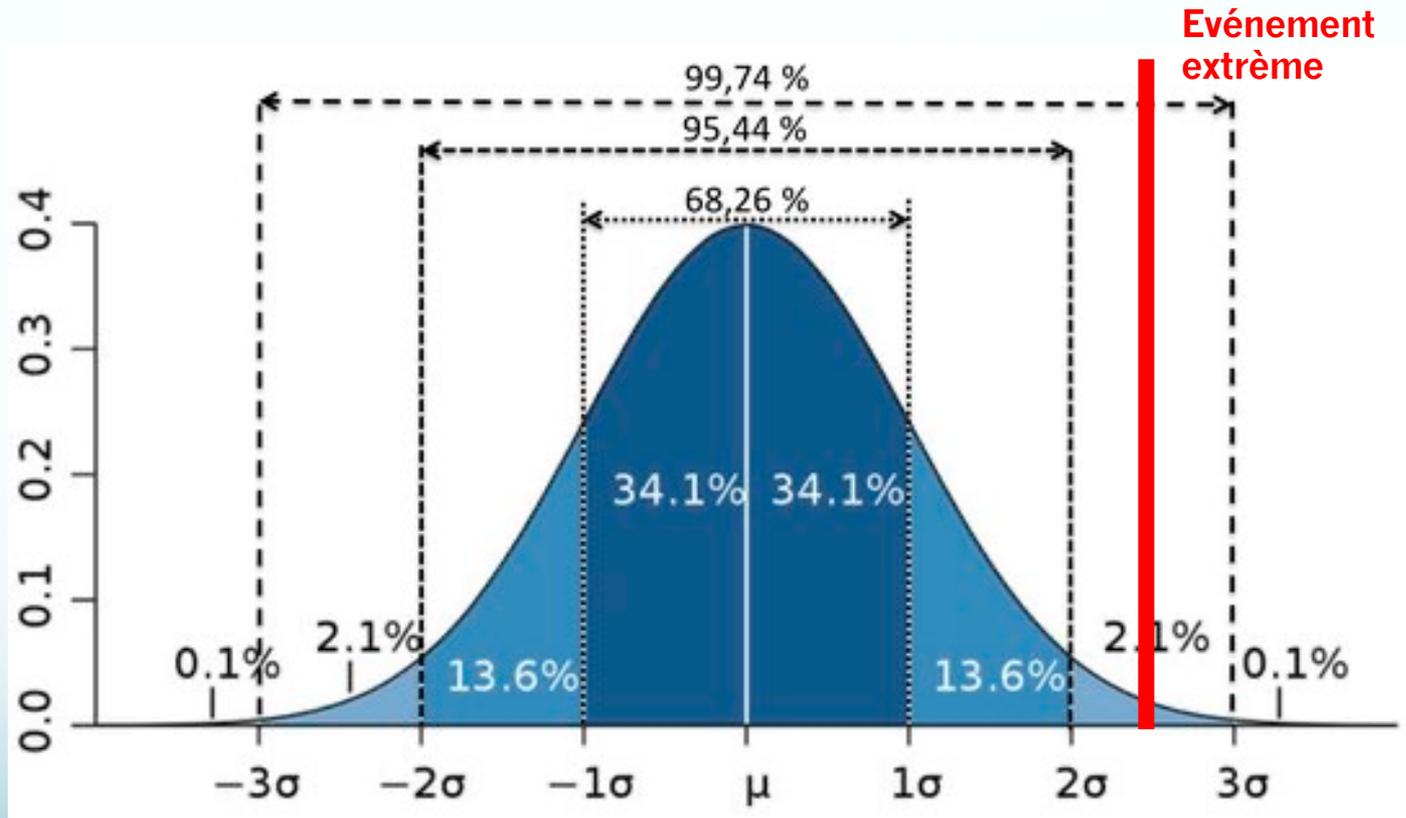
- ⇒ Objectif : comprendre les bases de la dynamique du climat et la façon dont on conçoit les futurs climatiques possibles
 - a. Notions de système Terre
 - b. Equilibre énergétique du système Terre
 - c. Principaux modes de la variabilité climatique
 - d. Qu'est-ce qu'un modèle de climat
 - e. Evolution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

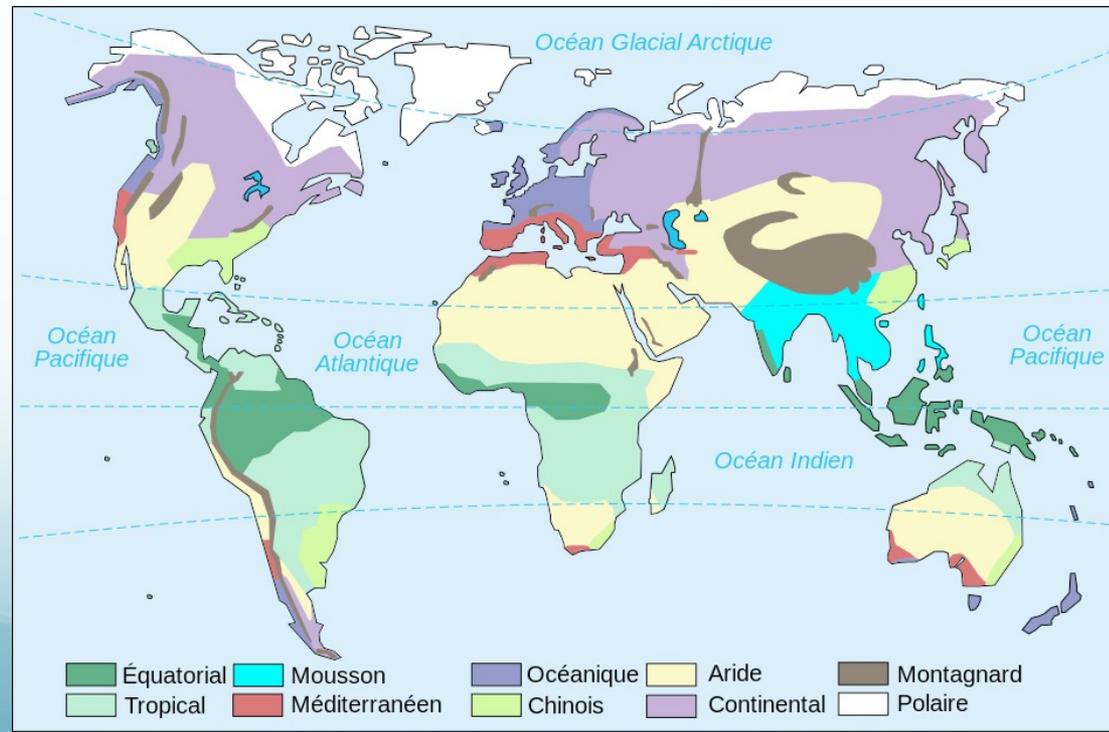


Définition du climat

- 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

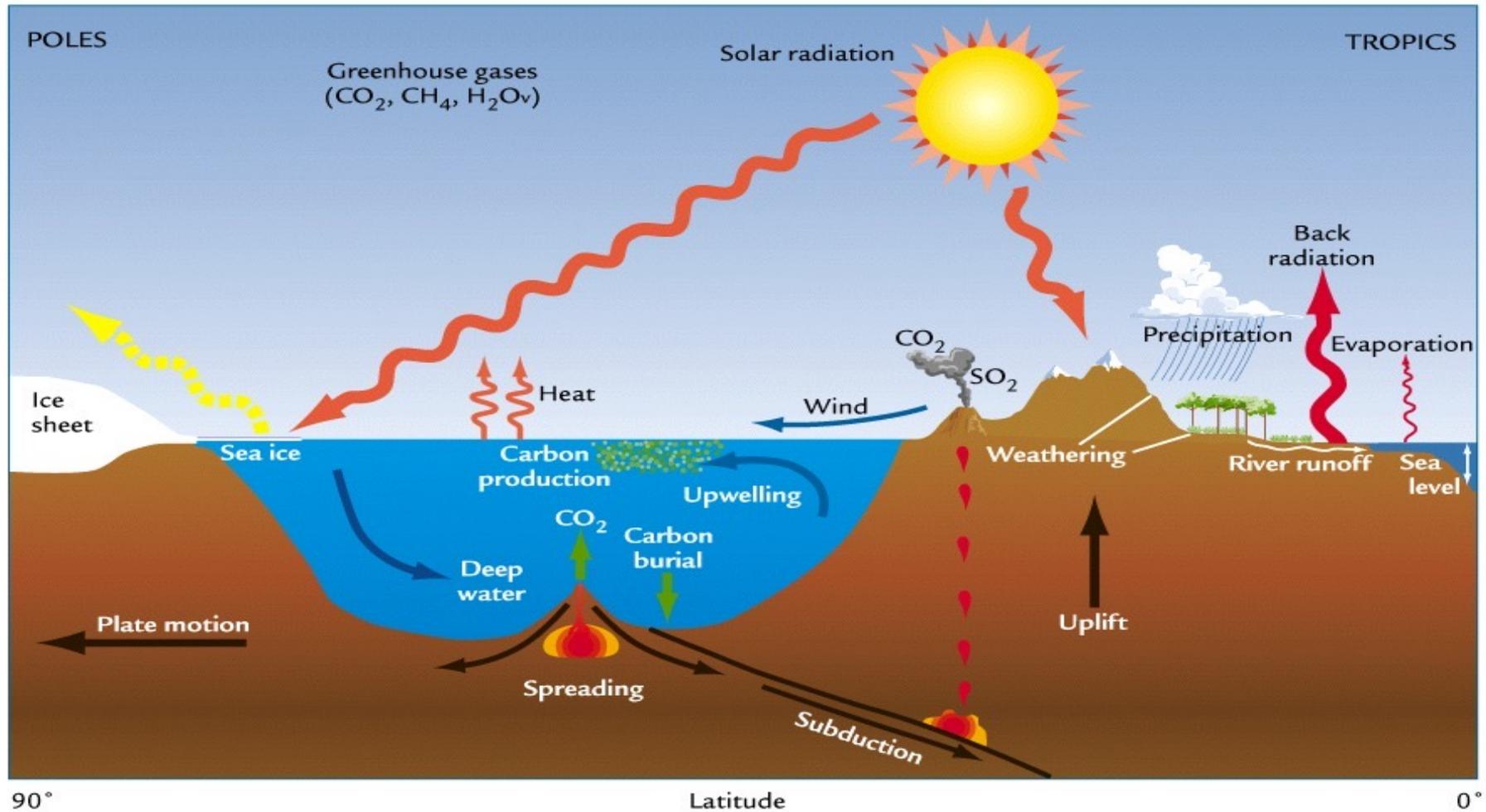


Définition du climat

- 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 !

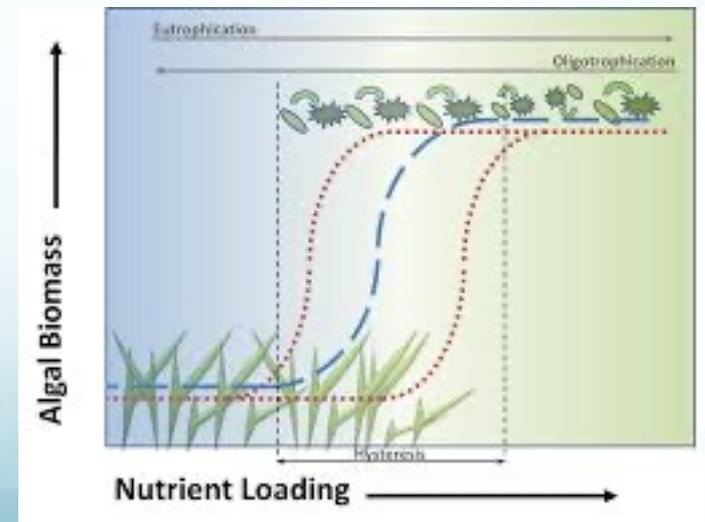


Notion de système climatique

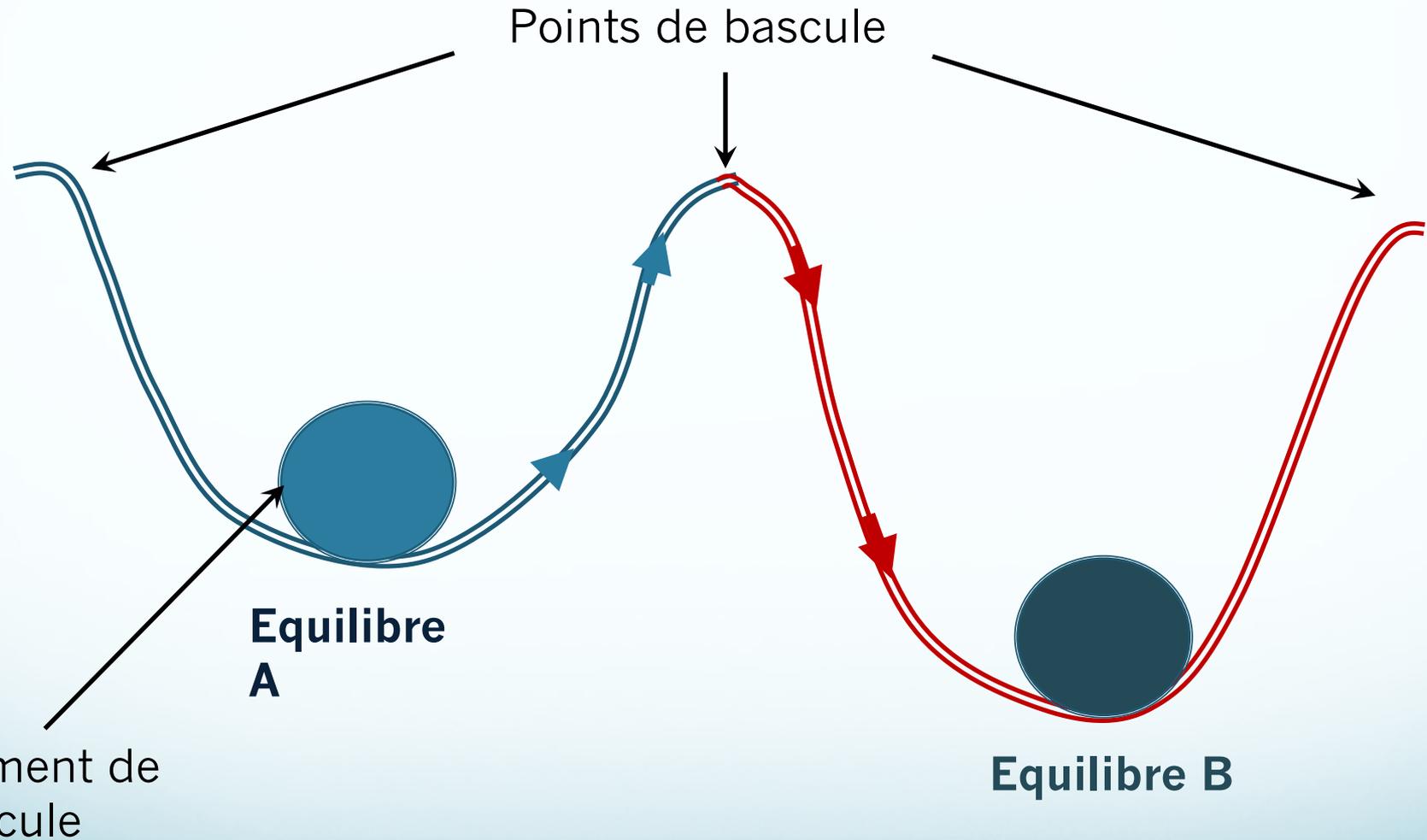
- Par analogie à un **système physique**, on définit le **système climatique** comme constitué de plusieurs composantes (atmosphère, l'océan, banquise, surfaces continentales, végétation, calottes glaciaires...) et leurs interactions.
- Il s'agit d'un **système ouvert**, qui échange en permanence de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



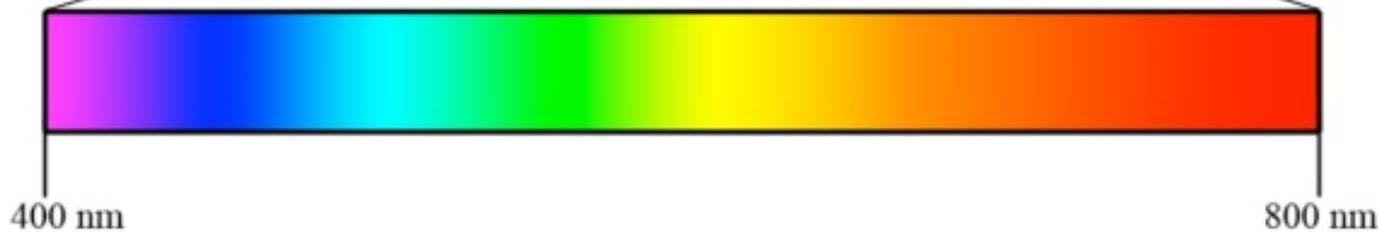
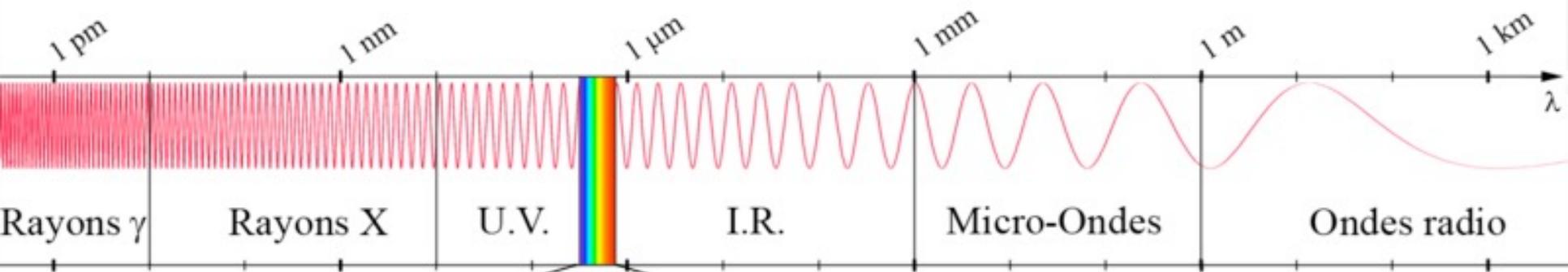
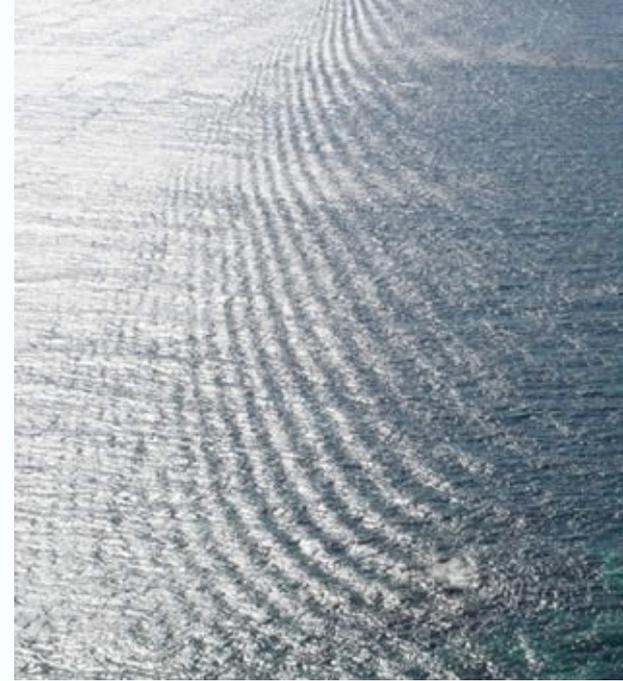
Lenton et al. (2008) : Le terme “**point de bascule**” se réfère à un seuil critique au delà duquel une petite perturbation peut modifier qualitativement l'état d'un système.

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

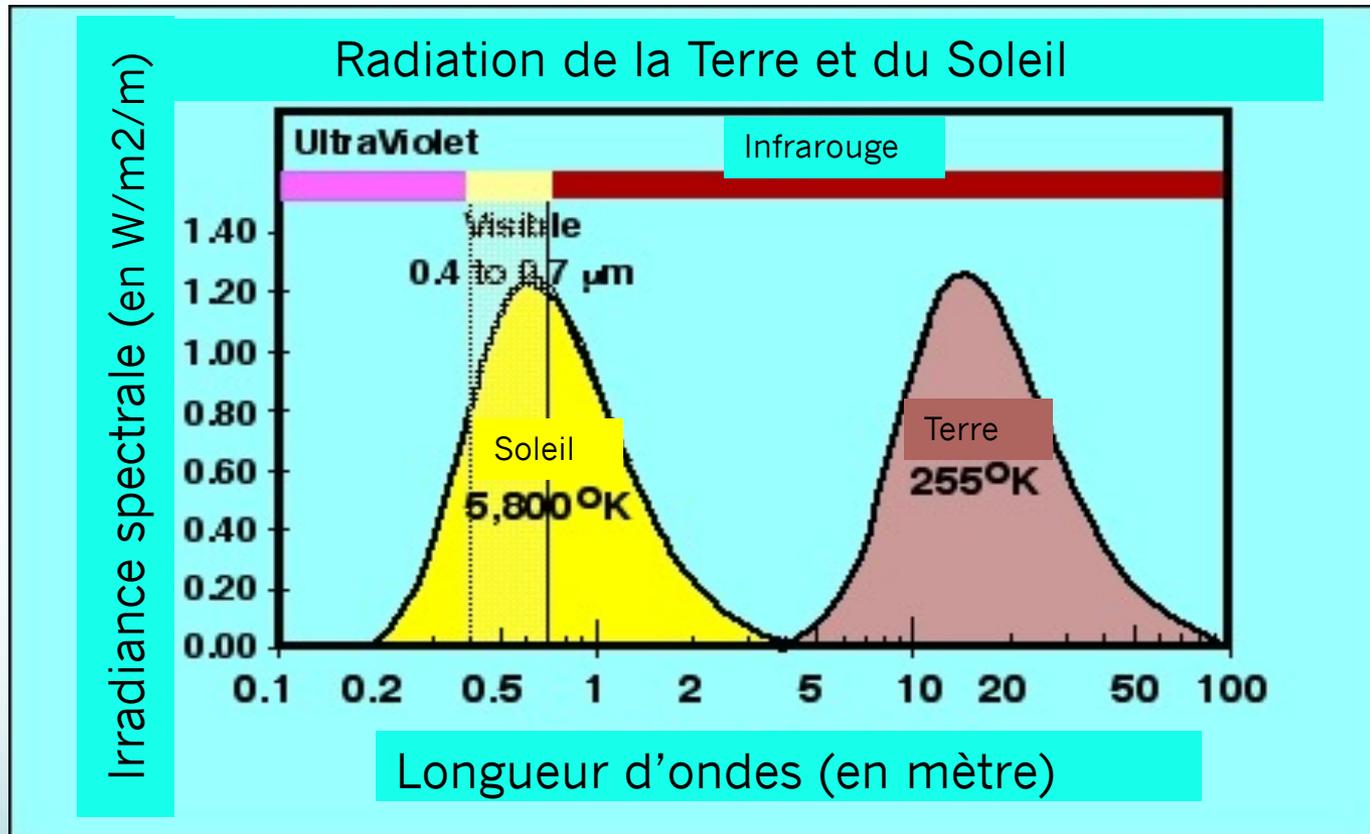
Ondes et rayonnement électromagnétique

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



Equilibre radiatif de la Terre

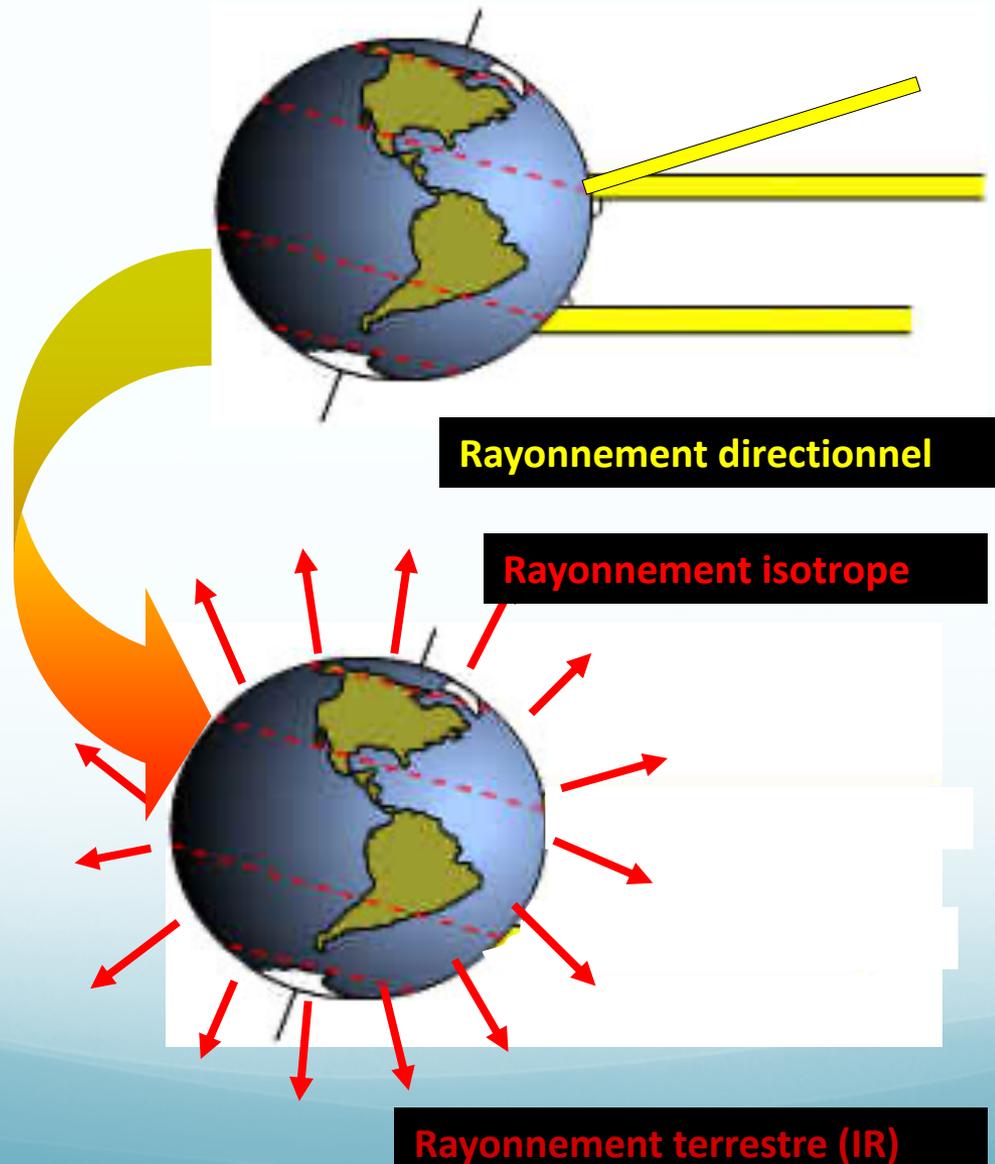
Loi de **Planck** stipule que la distribution de luminance énergétique spectrale du rayonnement thermique du corps noir est fonction de sa température



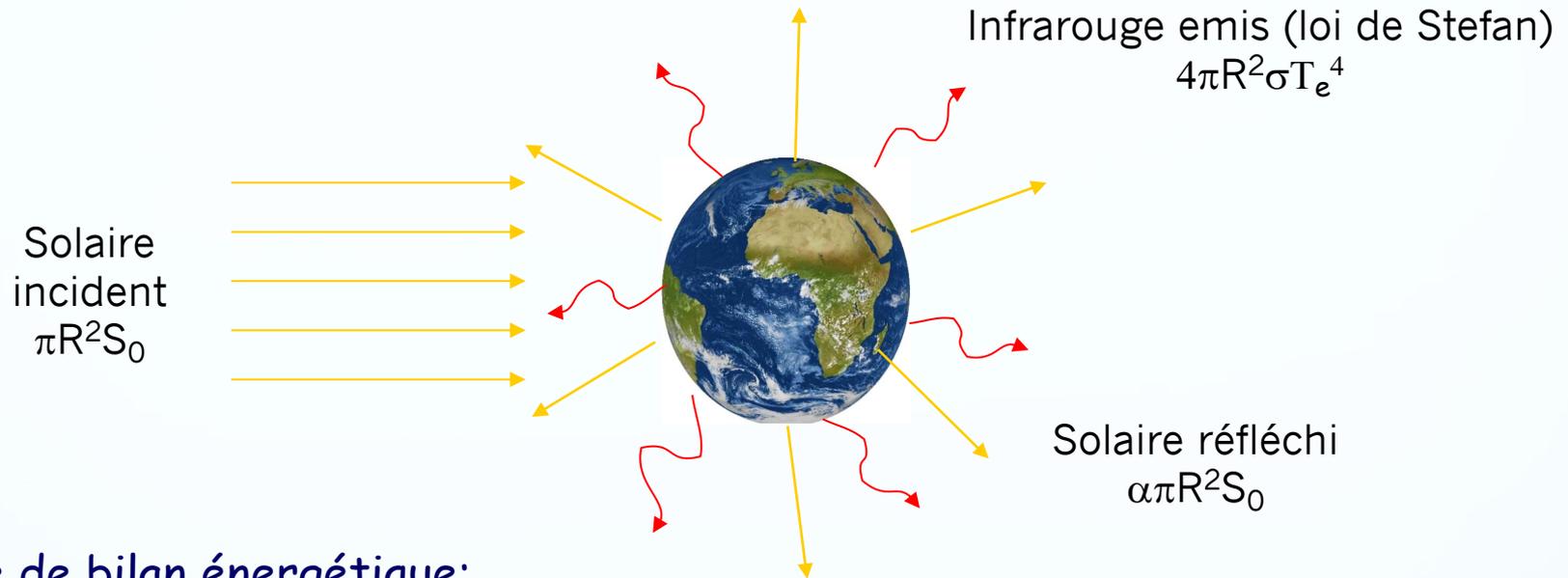
Loi de **Stefan-Boltzmann** stipule le flux d'énergie émis par un corps noir est lié à sa température à la puissance 4.

$$F = \sigma T^4$$

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:

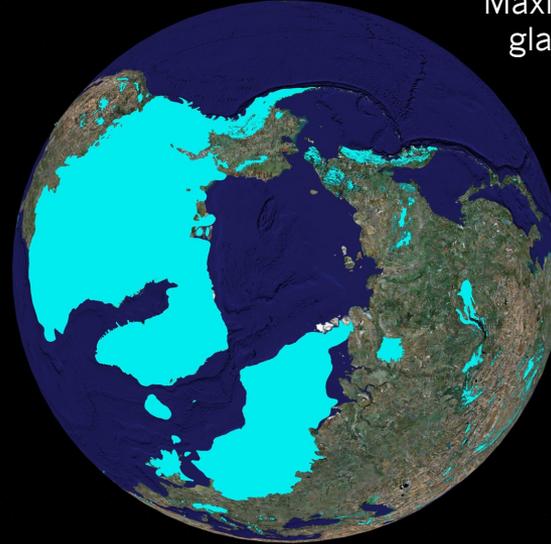
$T_s = 288\text{K}$

Plusieurs états stables du climat planétaire

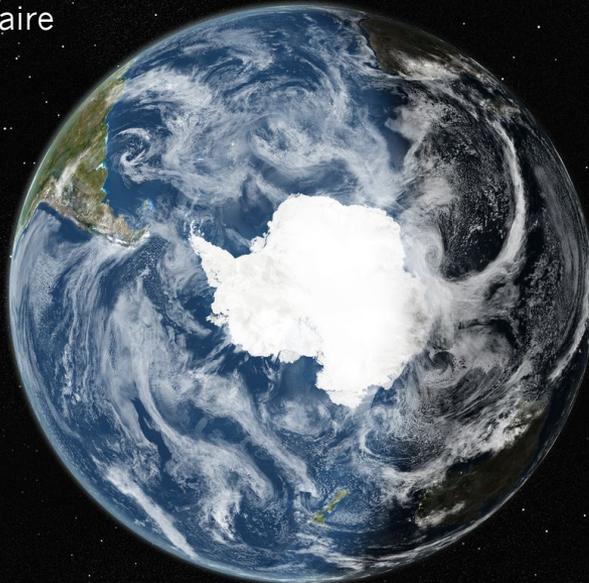
Boule de neige



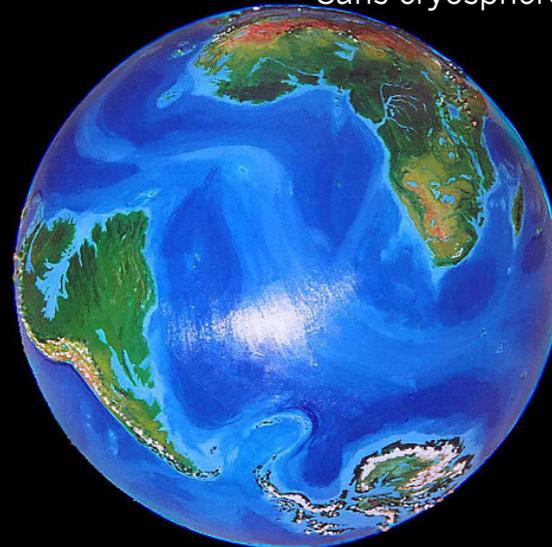
Maximum glaciaire



Interglaciaire



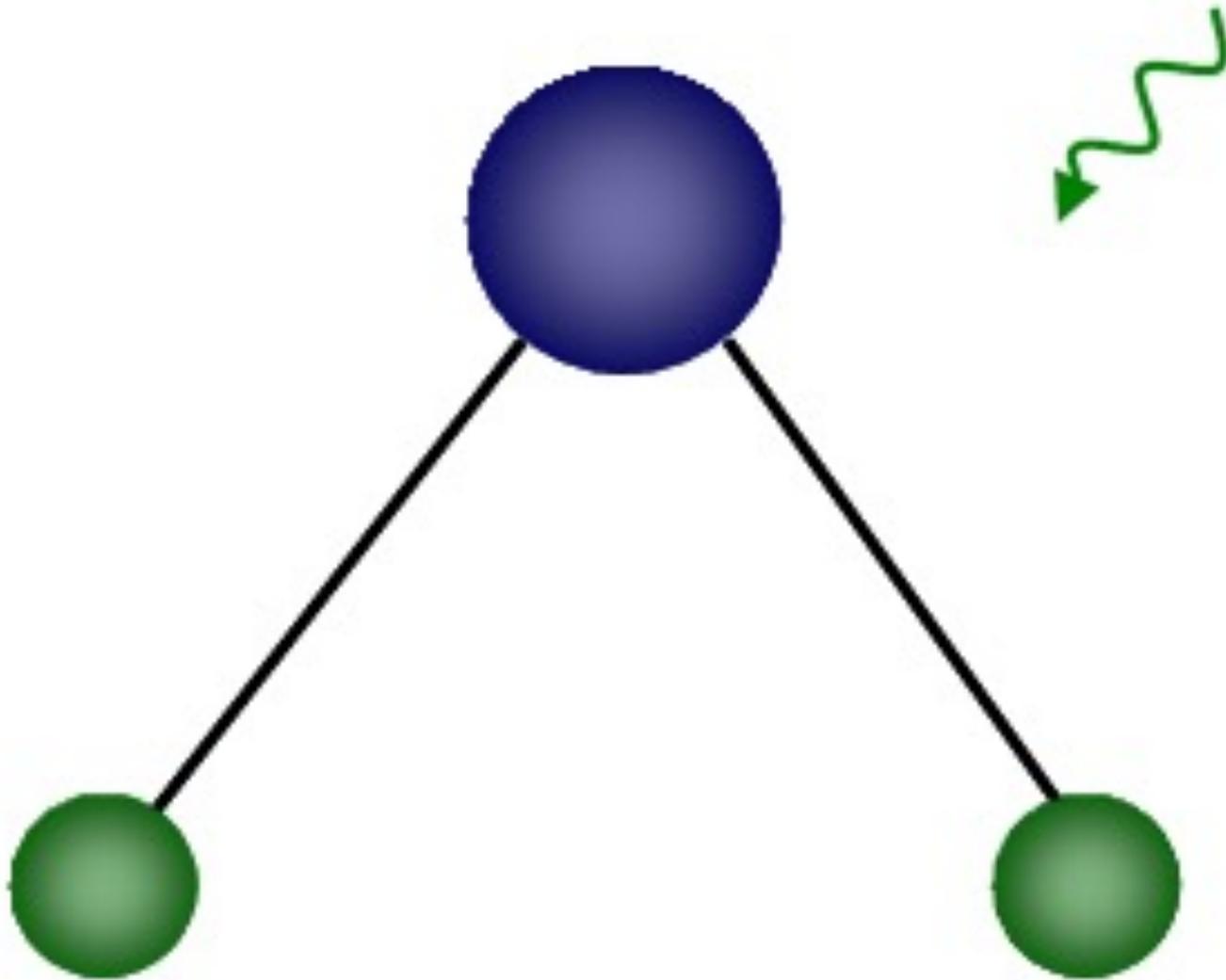
Sans cryosphère



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

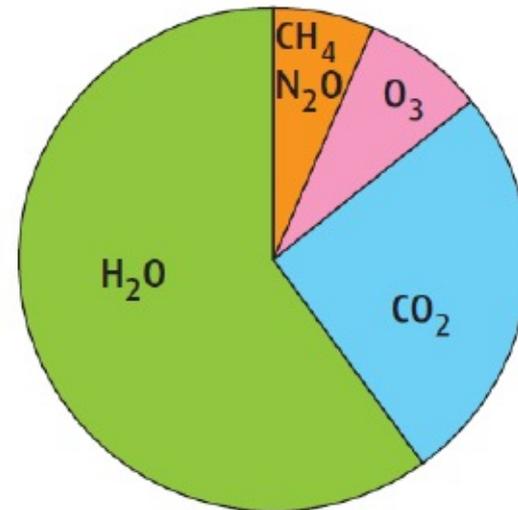
Principe de l'effet de serre



Principaux gaz à effet de serre

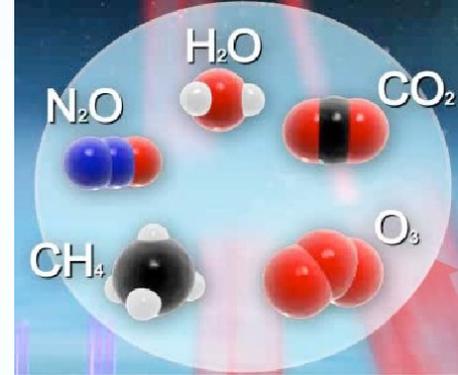
Effet de serre ciel clair

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

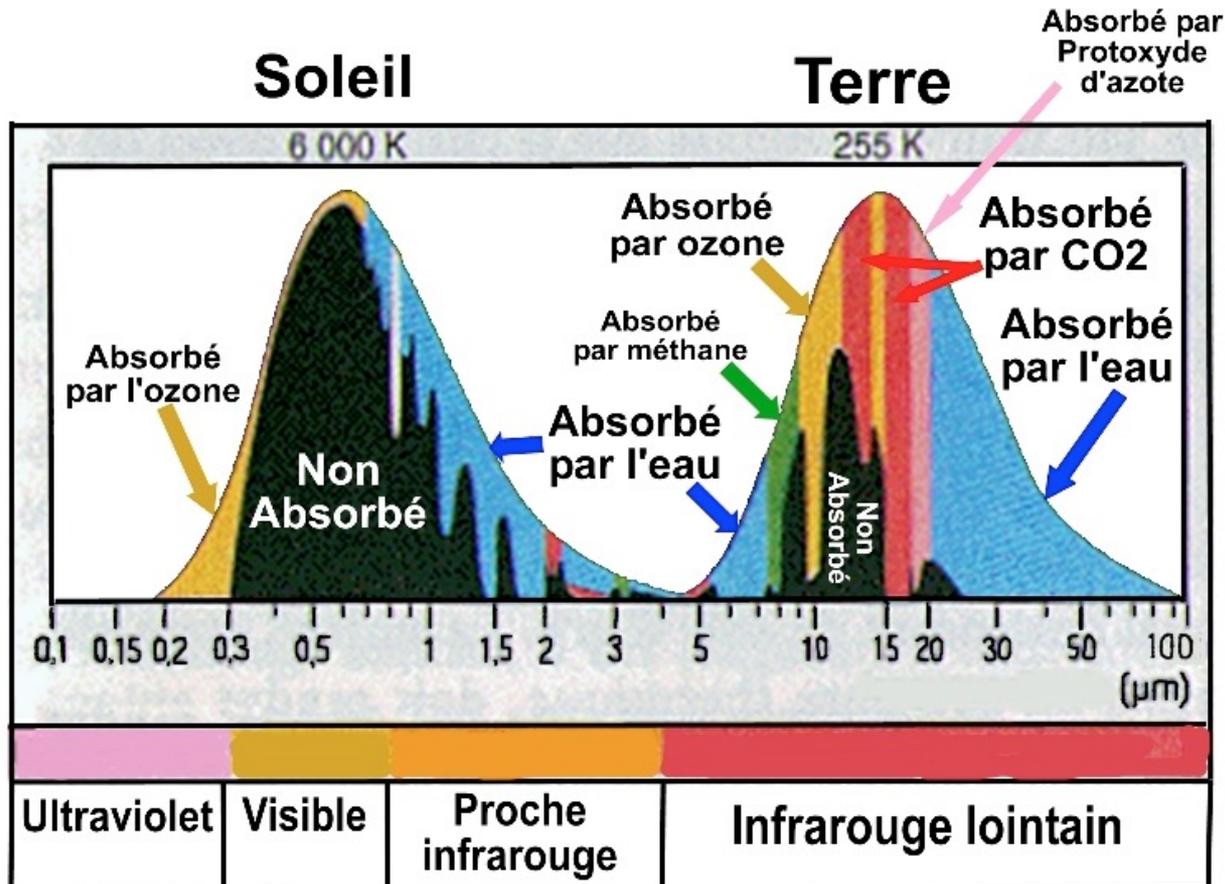


Dufresne et Treinier,
La Météorologie

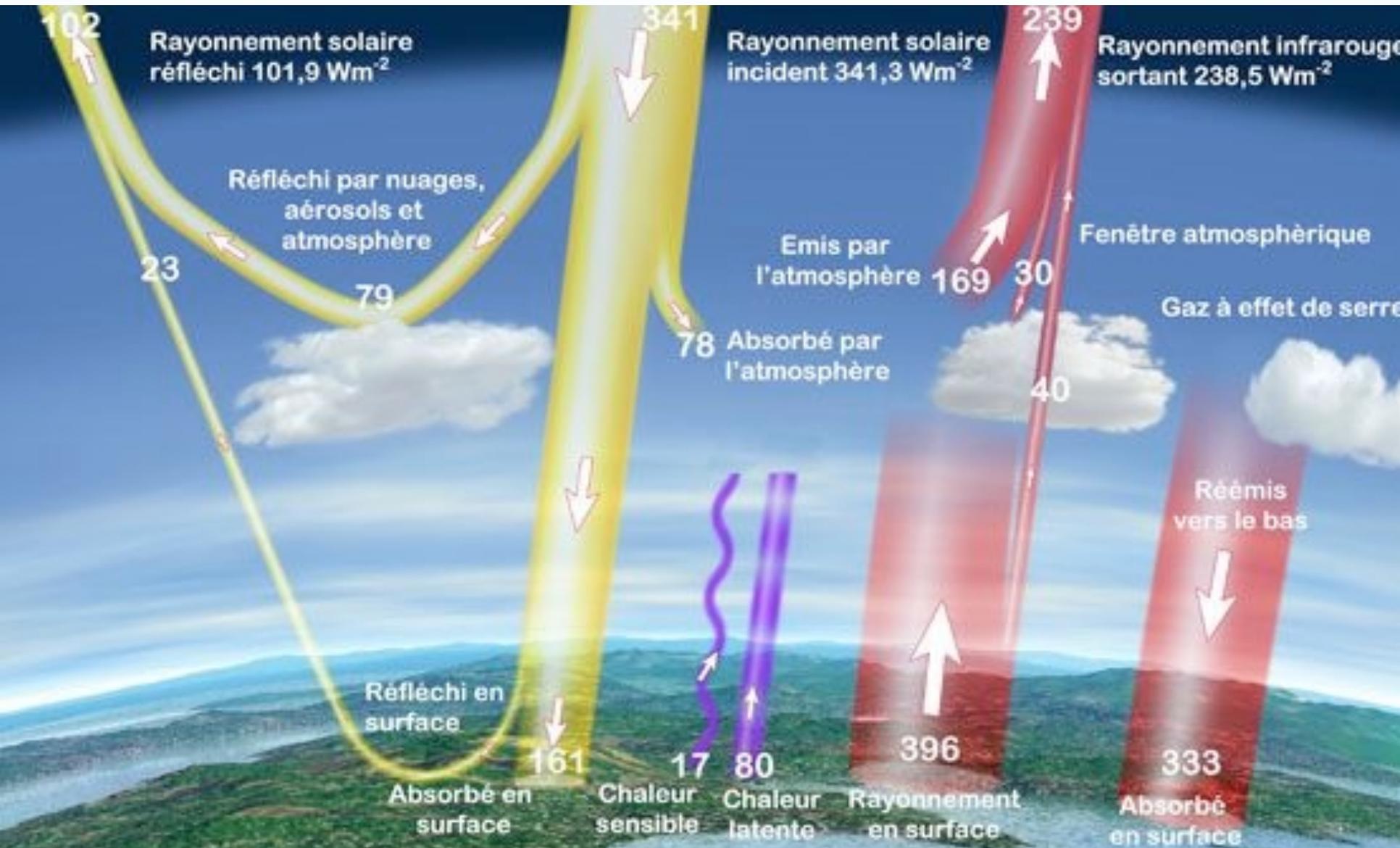
Gaz à effet de serre



Spectre d'absorption du rayonnement thermique

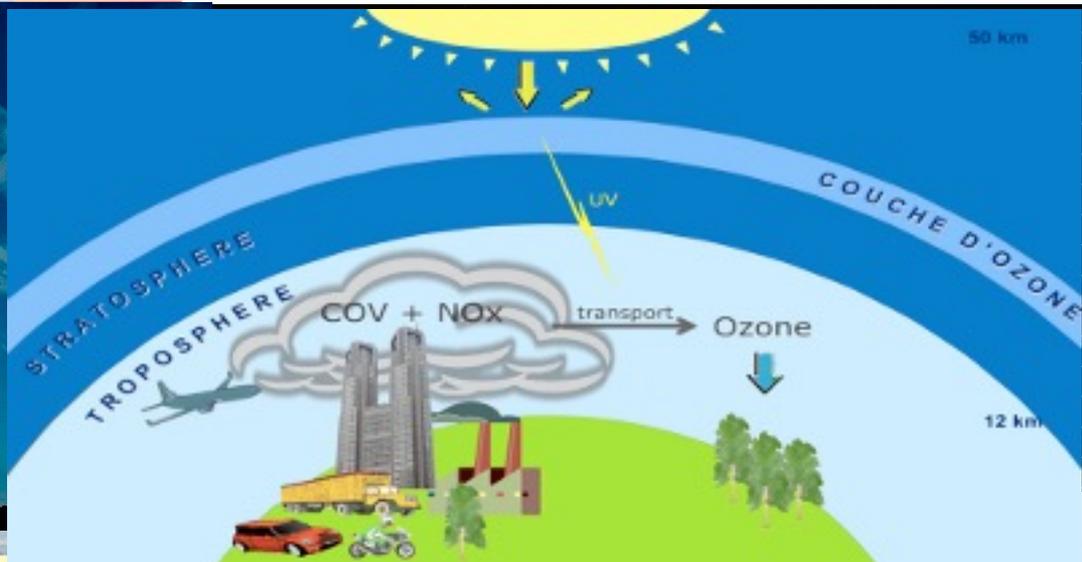


Bilan radiatif "réel"



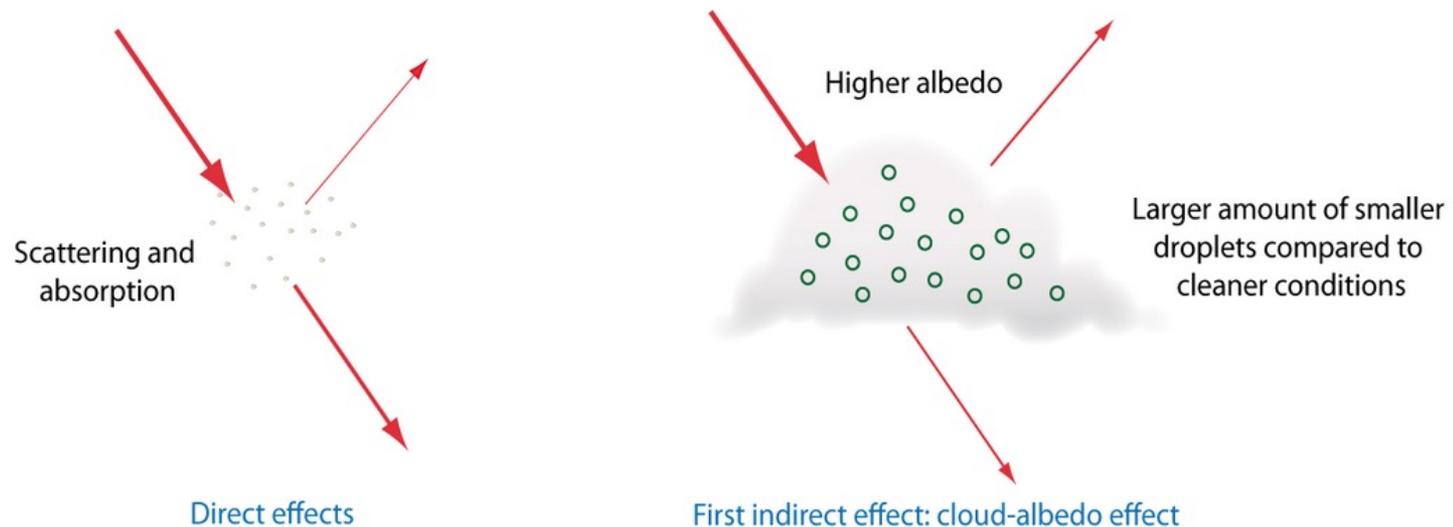
Différents forçages climatiques

Volcans,
aerosols,



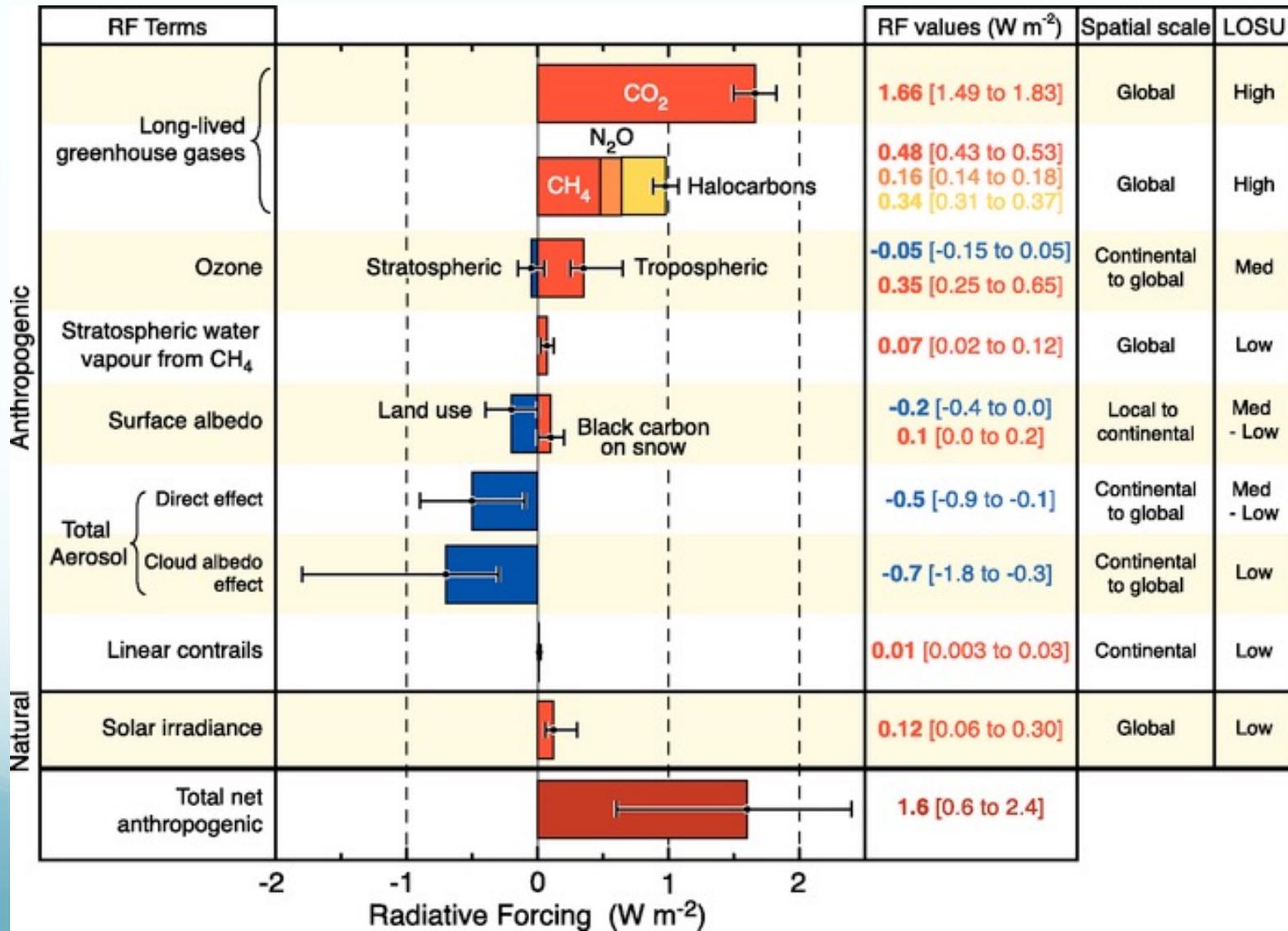
L'effet particulier des aérosols

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



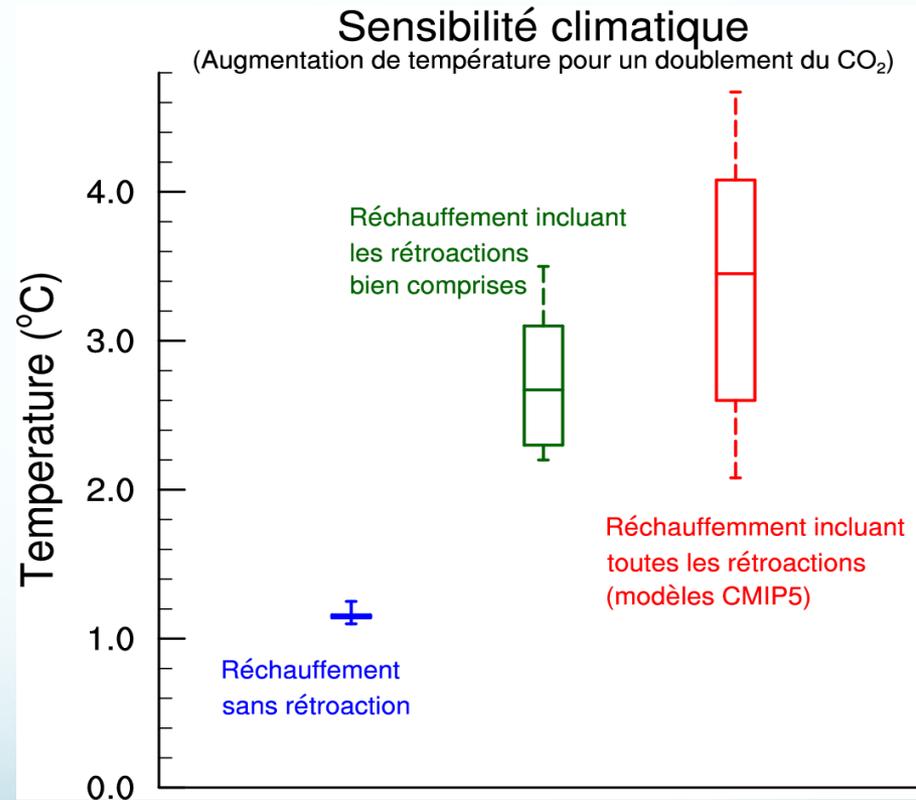
Source : Goosse et al. [online](#) textbook.

Changement de forçage externe (100 dernières années)



Notion de sensibilité climatique

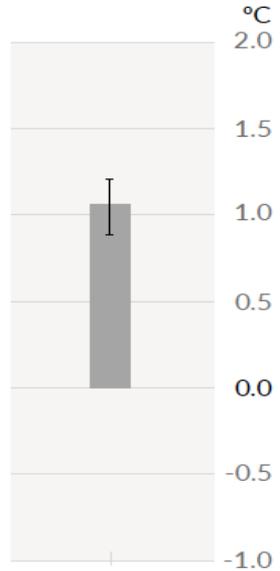
- Augmentation de température pour un doublement de CO_2 (de 280 à 560 ppm par ex.)
- Evaluation des rétroactions robustes :
 - Albedo
 - Vapeur d'eau
 - Nuages



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

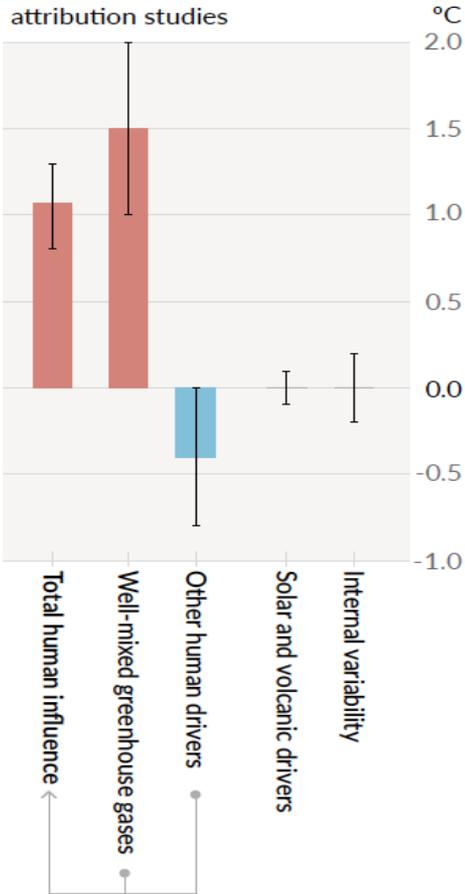
Observed warming

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

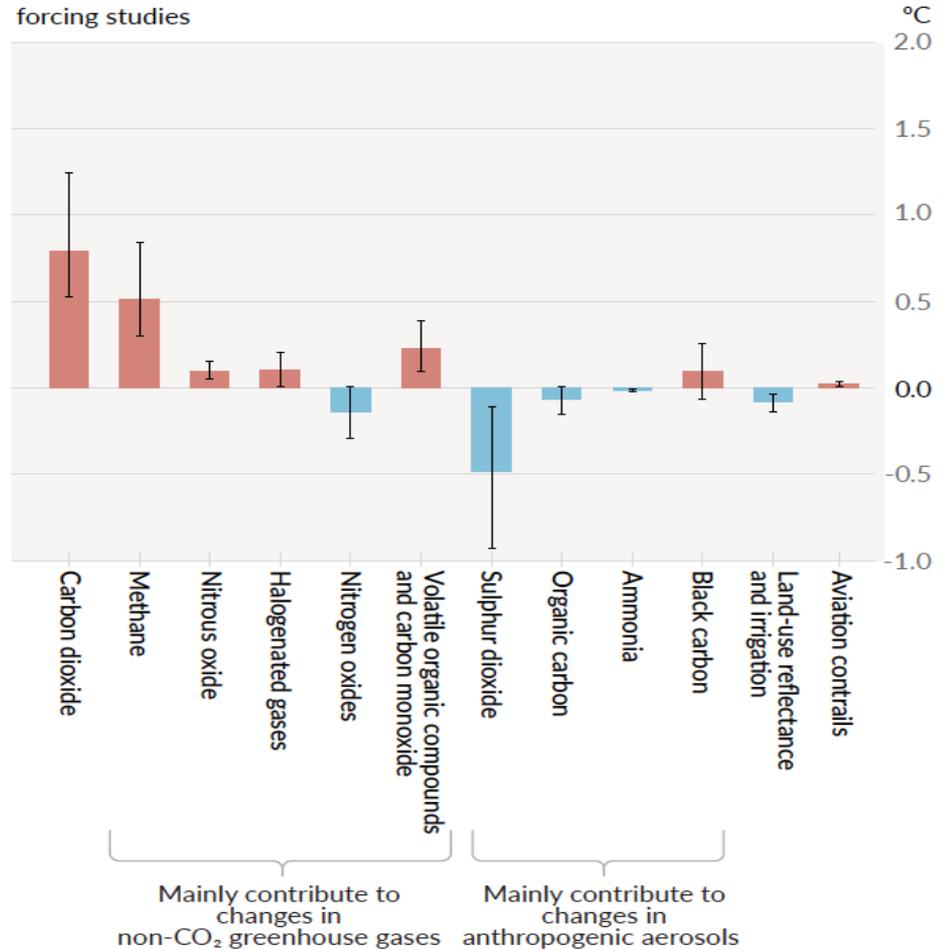


Contributions to warming based on two complementary approaches

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

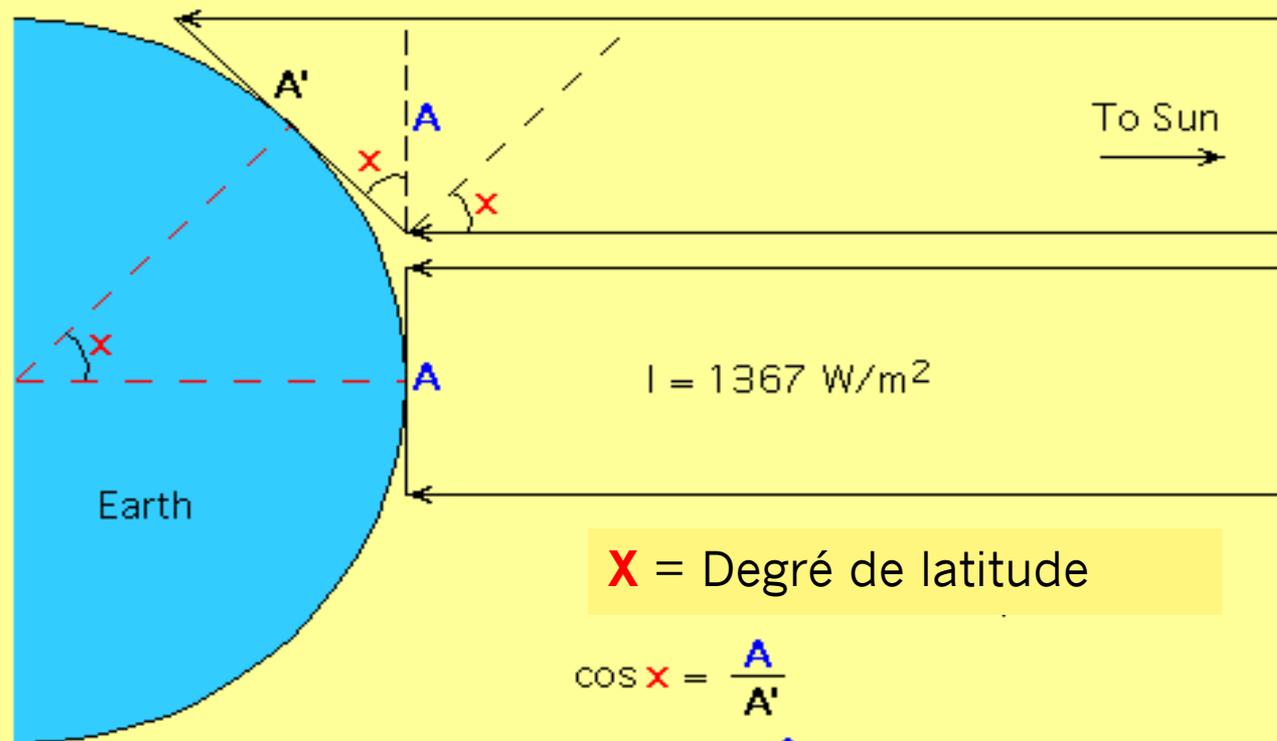


c) Contributions to 2010-2019 warming relative to 1850-1900, assessed from radiative forcing studies



Pour sortir de l'approche à une dimension !

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

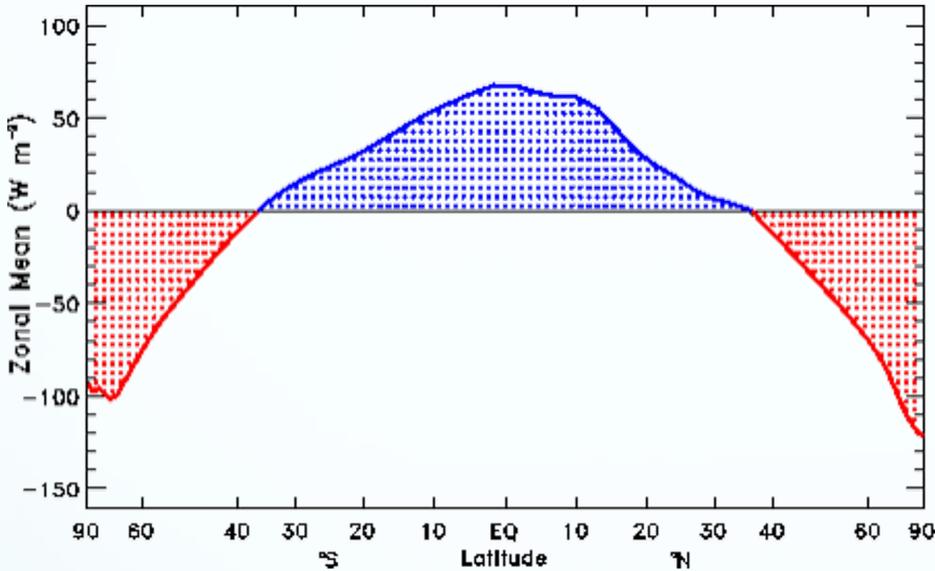


X = Degré de latitude

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

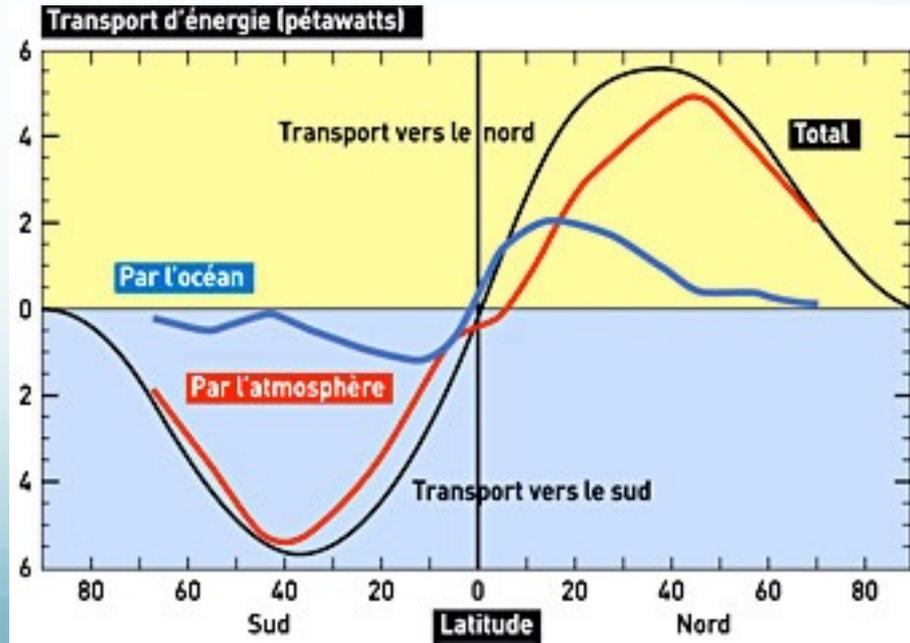
$$A' = \frac{A}{\cos X}$$

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

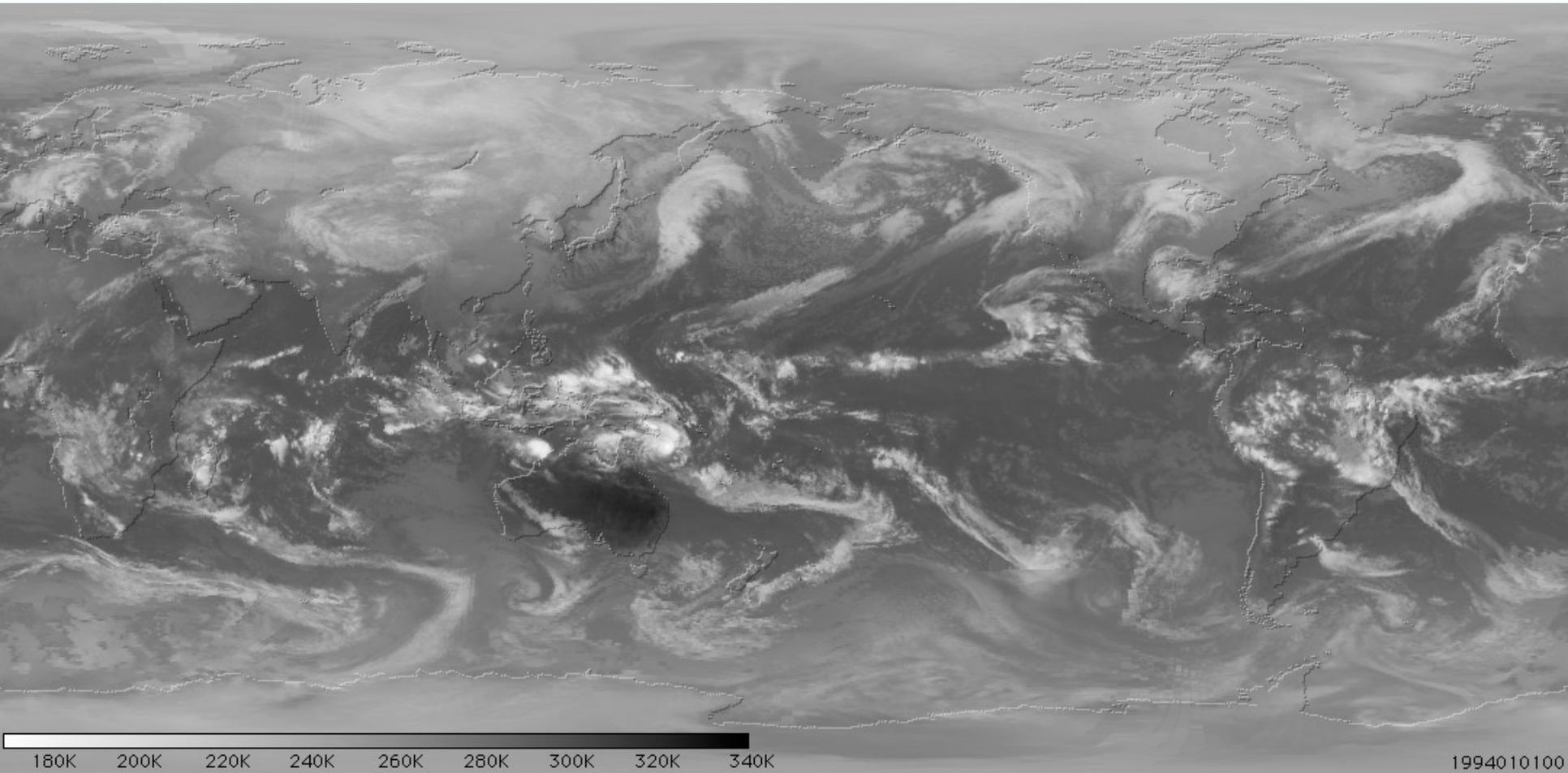


Transport vers le Nord par l'atmosphère et par l'océan (PW)

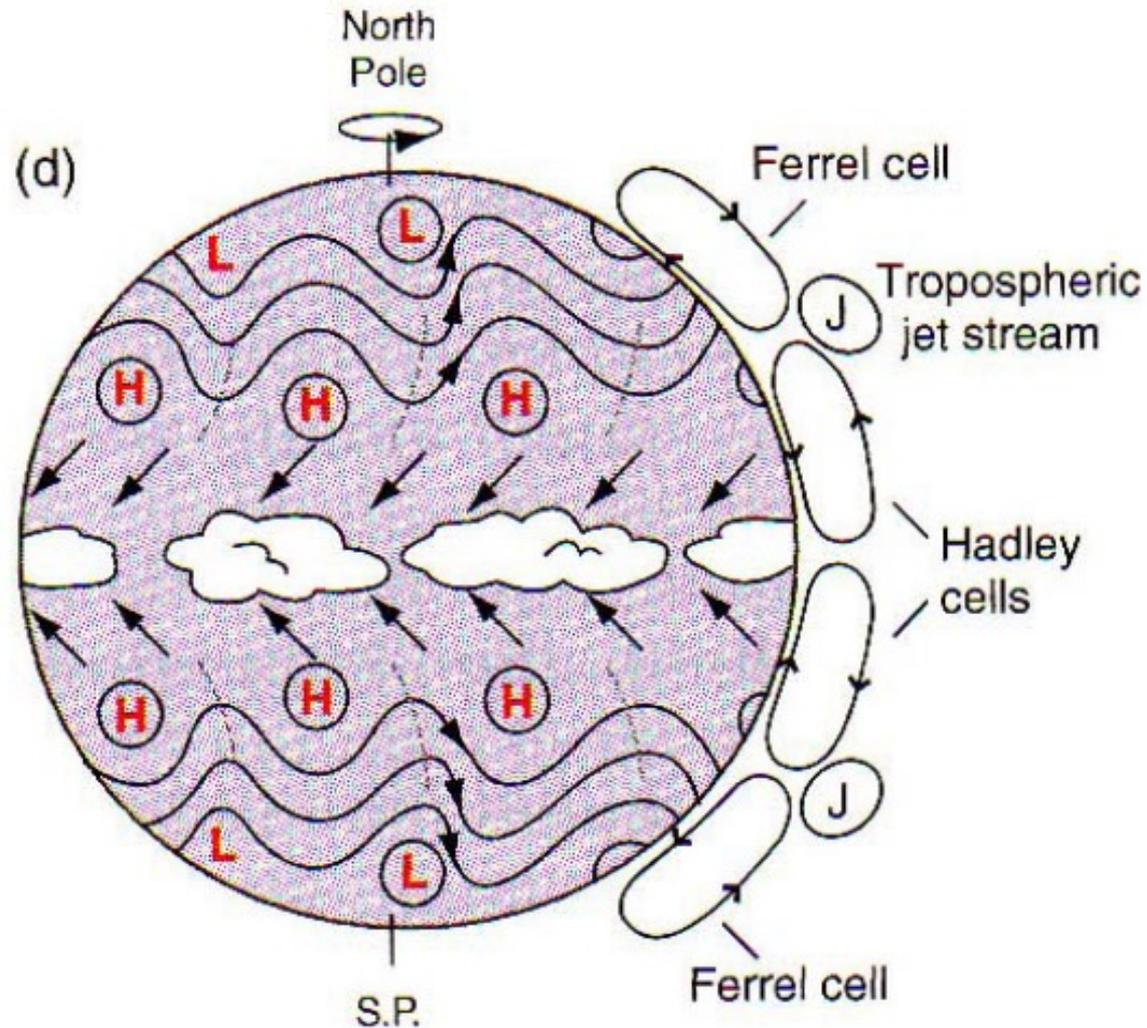
Bilan énergétique au sommet de l'atmosphère (moyenne zonale)



Circulation atmosphérique

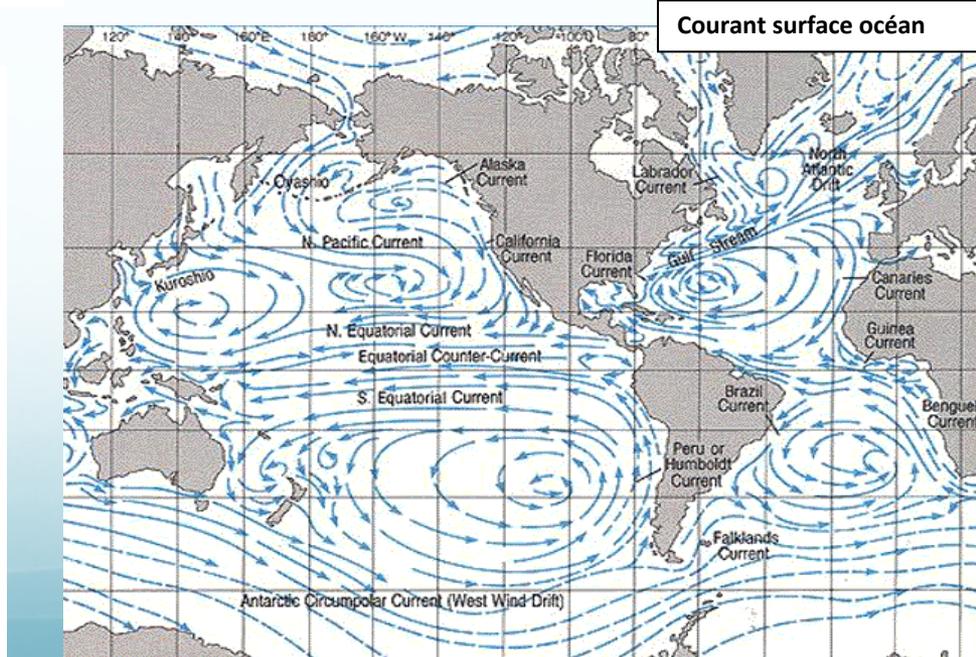
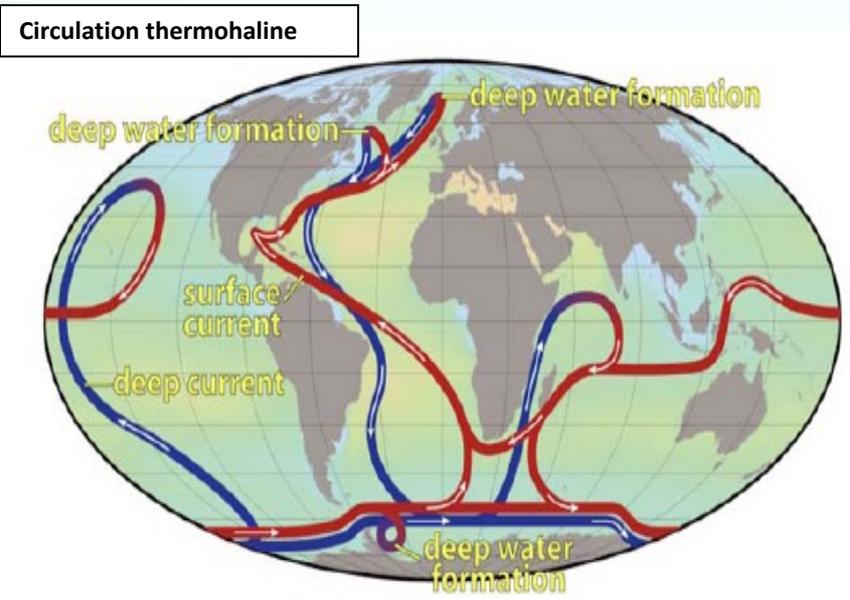
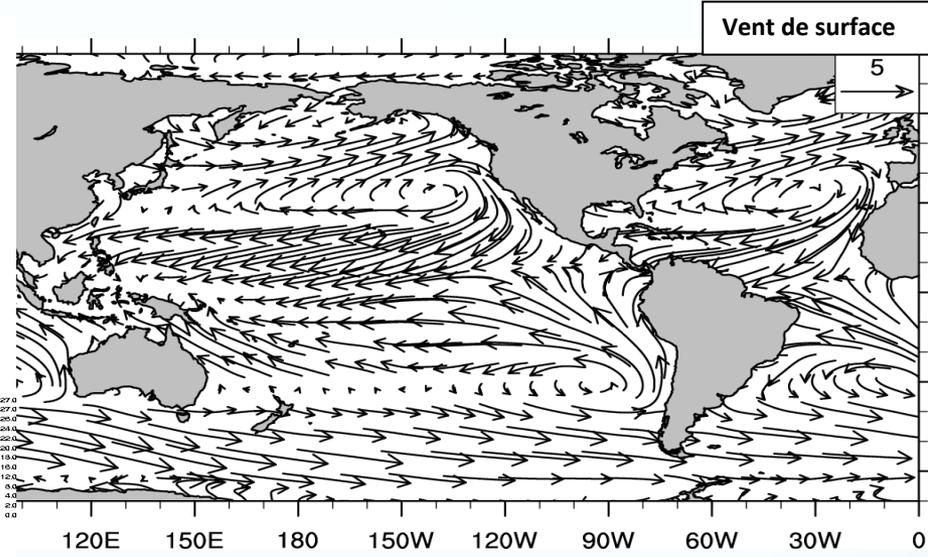
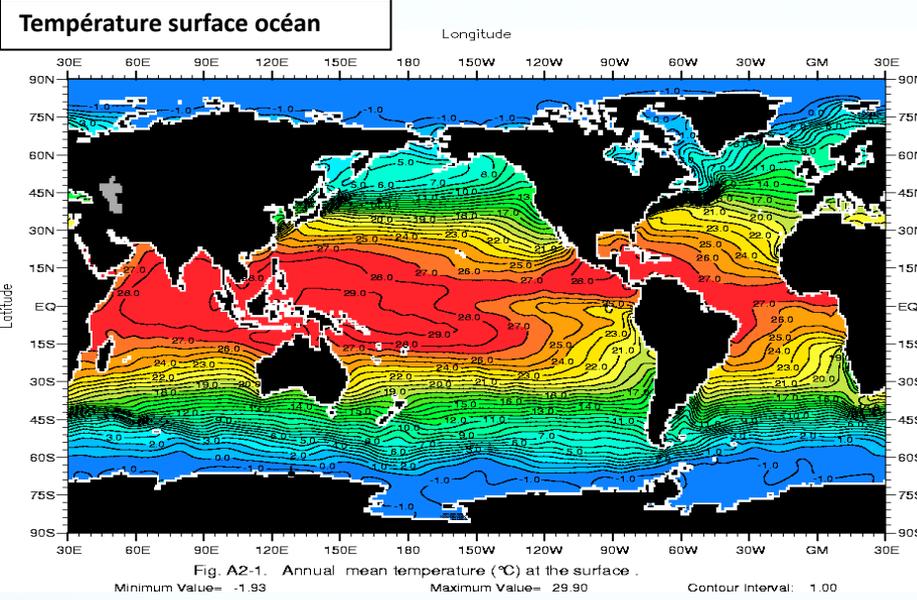


Circulation atmosphérique

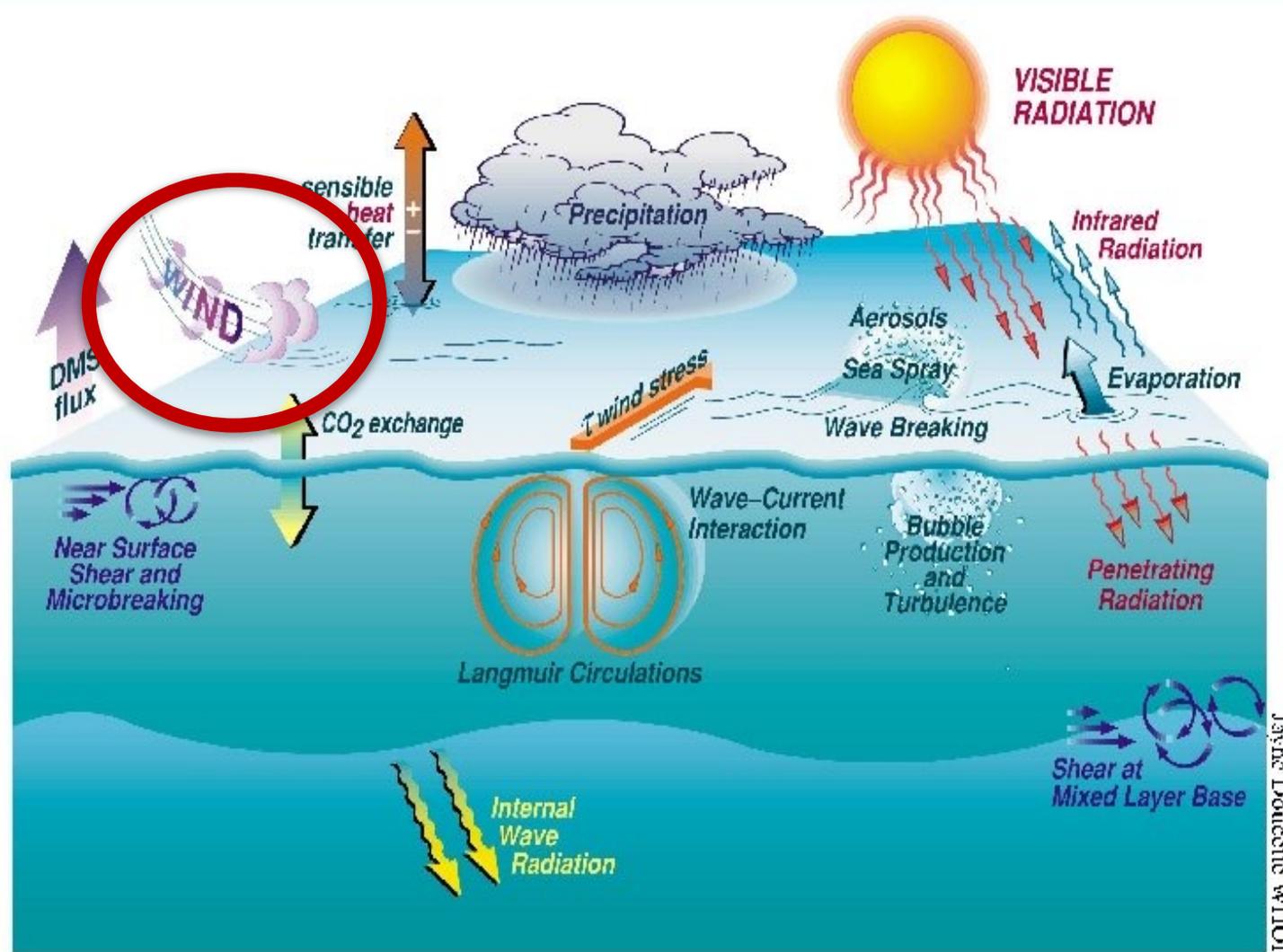


Circulation océanique

Circulation océanique

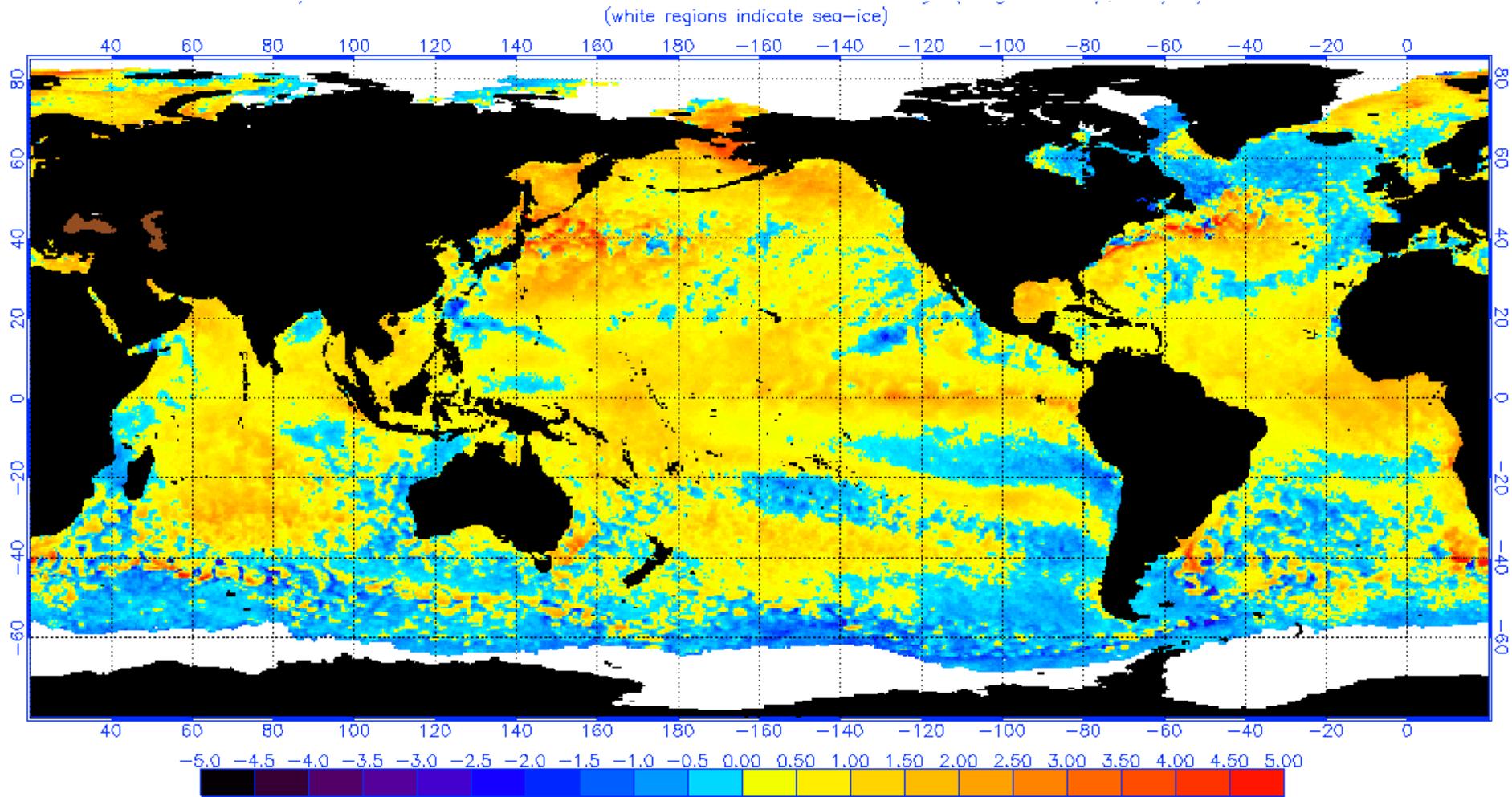


Interactions océan-atmosphère



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

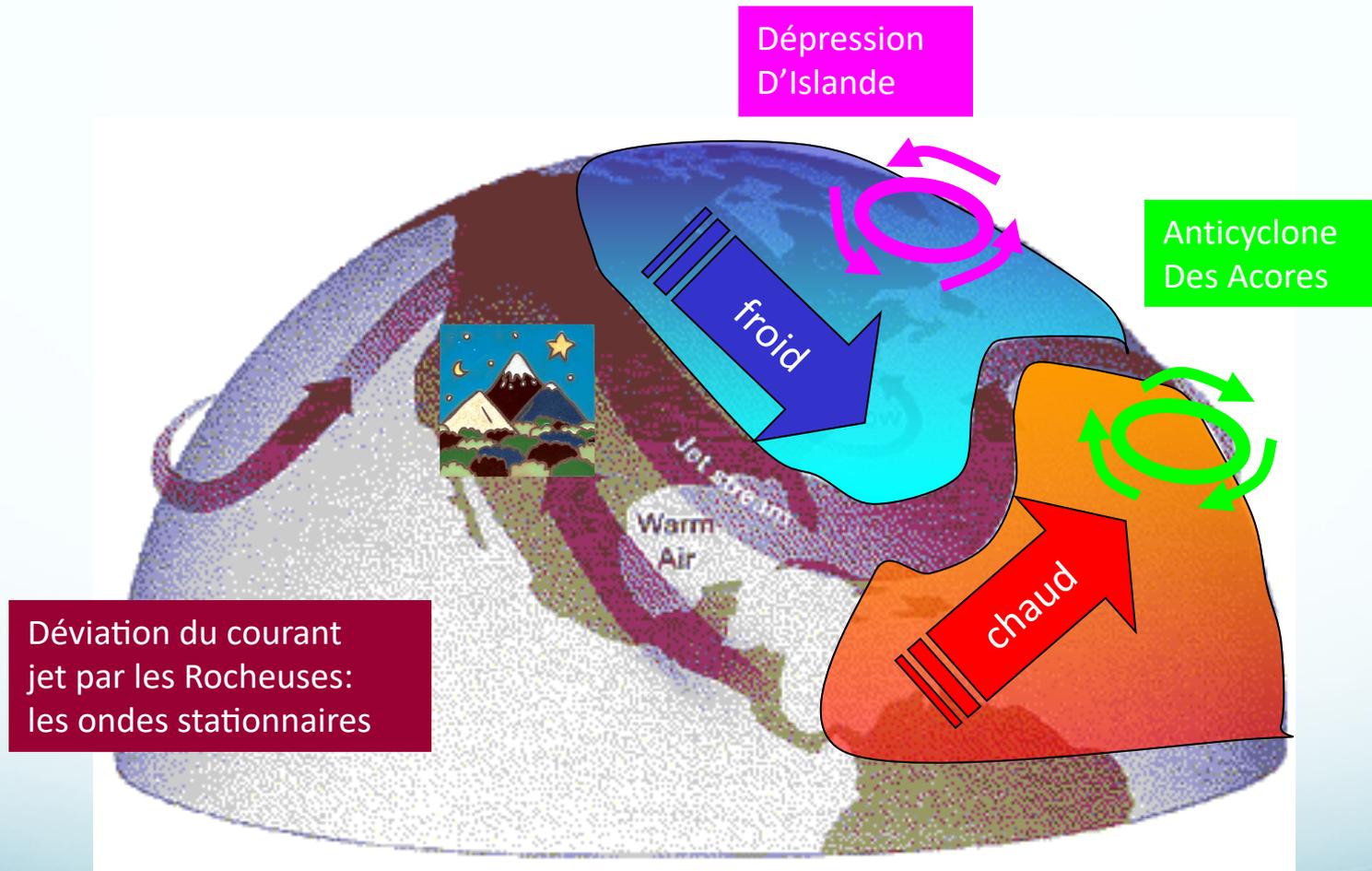
Quelques grands modes de variabilité climatique

- 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

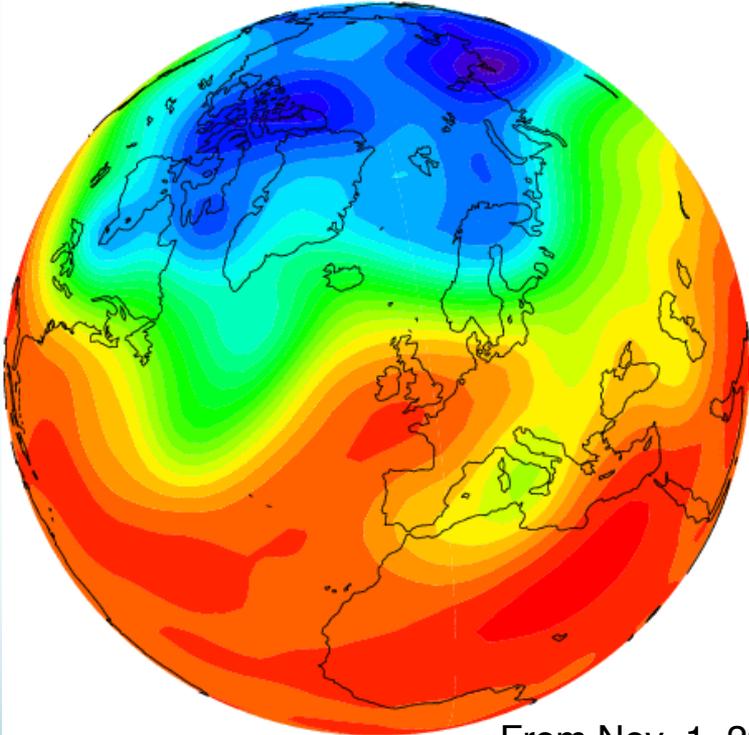


Les ondes stationnaires associées à la présence de massifs montagneux expliquent en grande partie l'asymétrie zonale entre les bords Ouest et Est du bassin Atlantique.

Variations de pression en Atlantique

Geopotentiel à 500 millibars

20071101



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

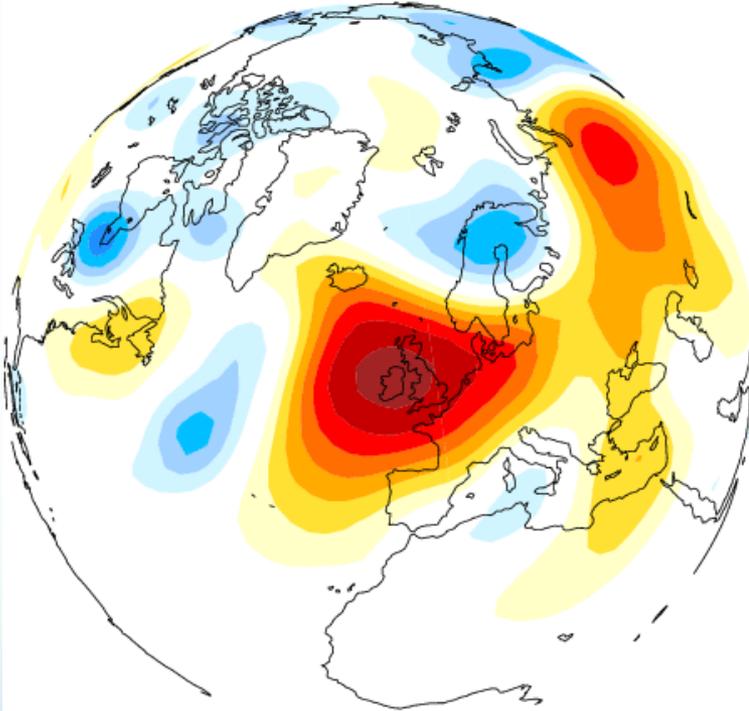
Meter



4850 4970 5090 5210 5330 5450 5570 5690 5810 5930

Anomalies de Geopotentiel

20071101



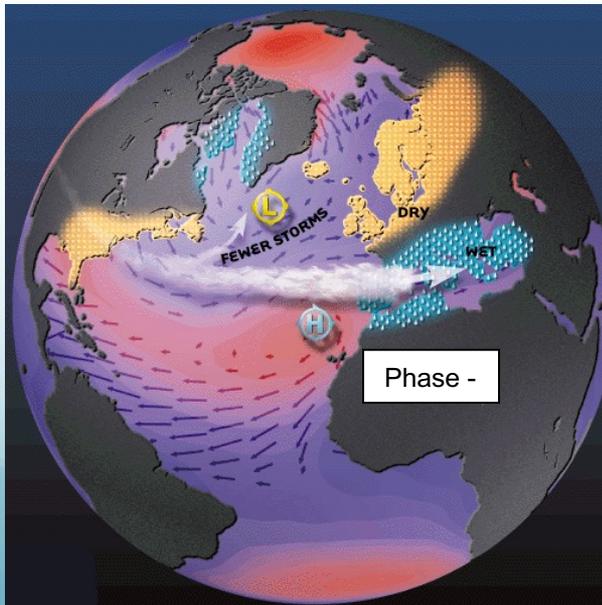
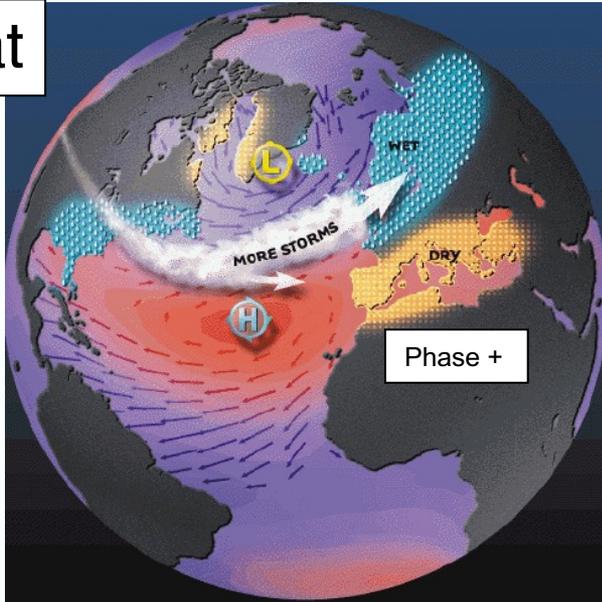
Meter



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

L'oscillation Nord Atlantique (NAO)

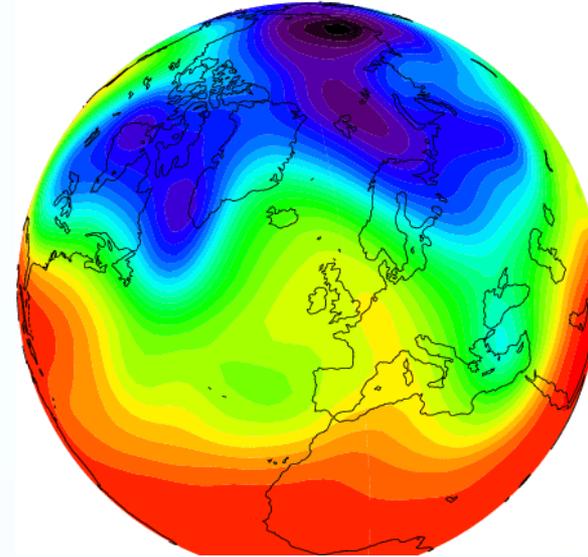
Climat



Blocking

20080218

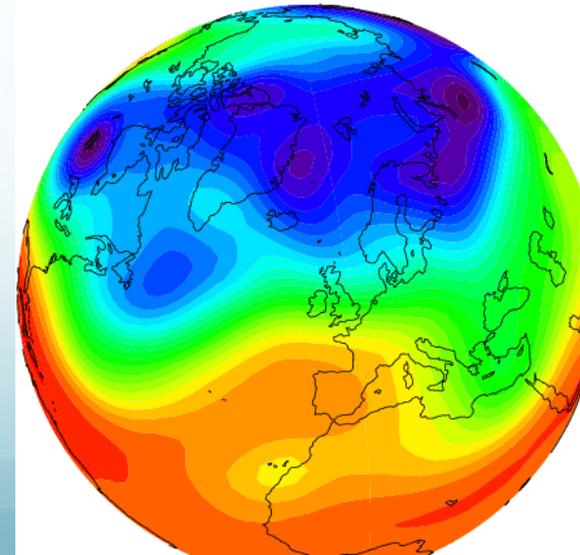
Météo



Déferlement anticyclonique

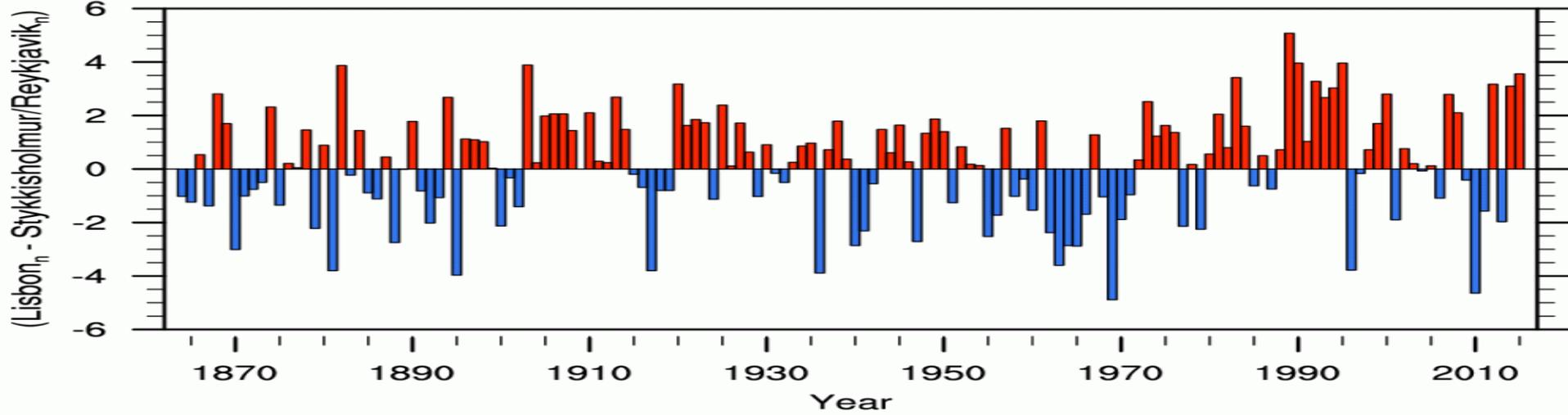
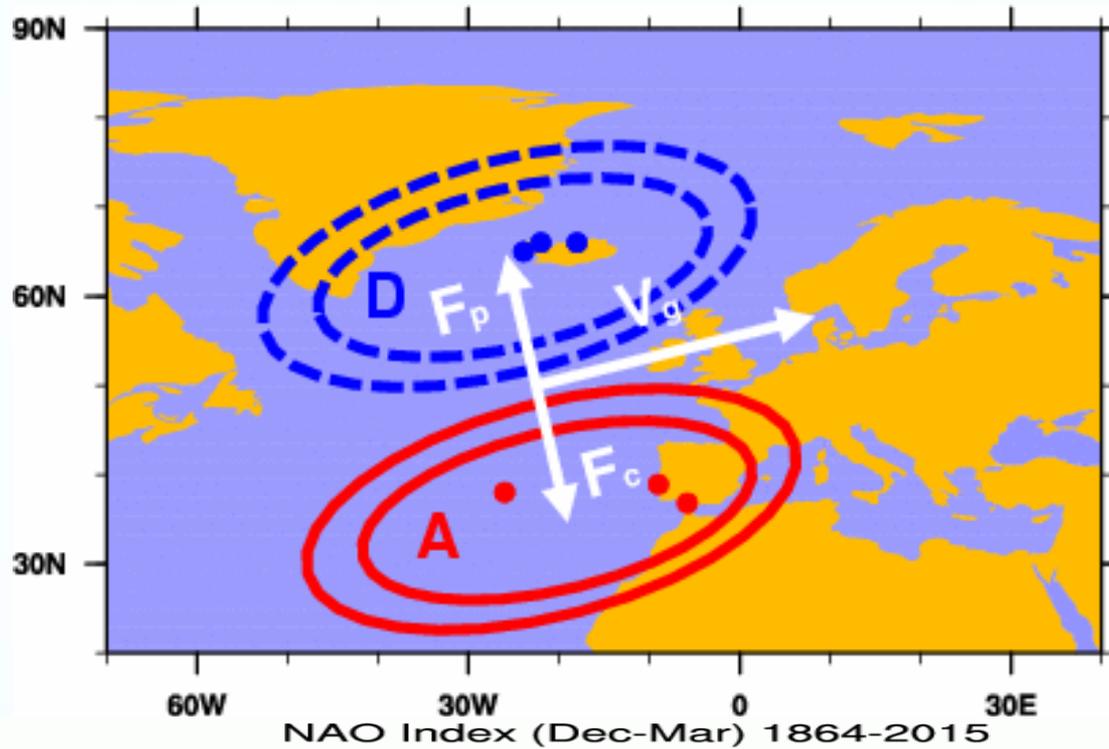
NAO-

19850131



Déferlement cyclonique

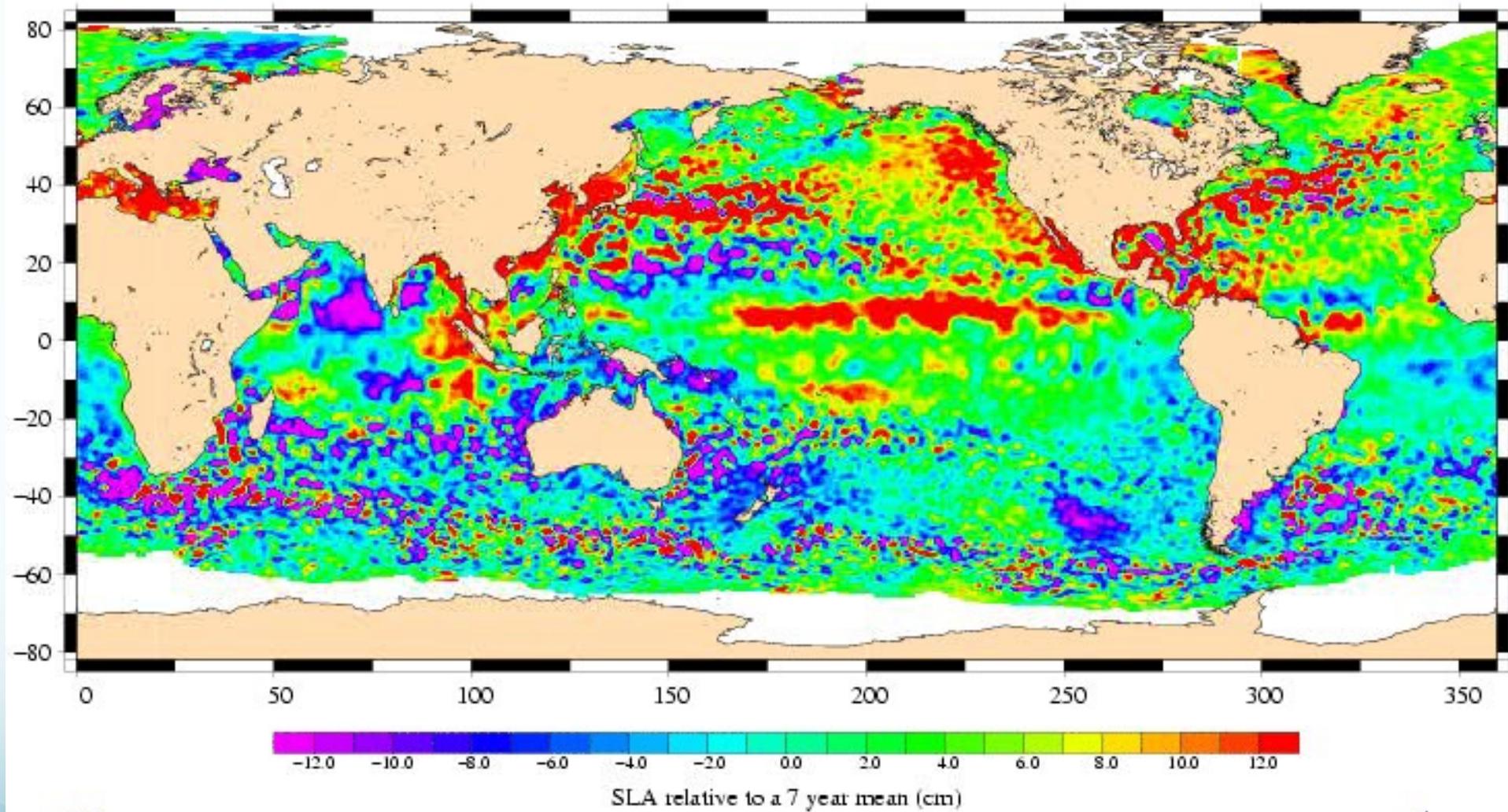
Explication physique de la NAO



Quelques grandes modes de variabilité climatique

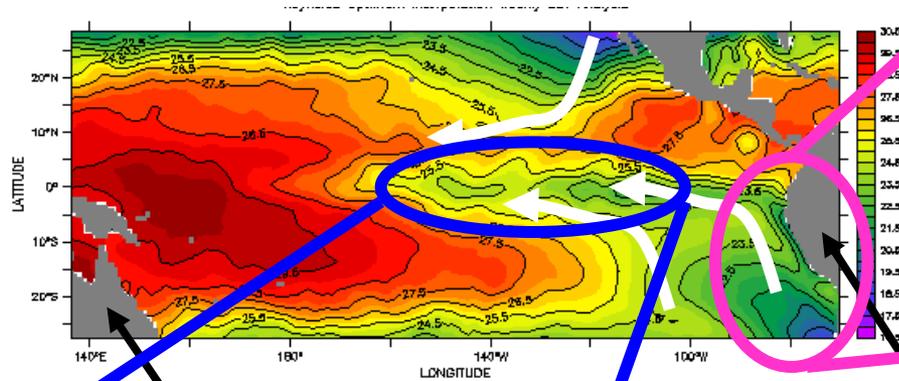
- Oscillation Nord Atlantique : NAO
- Oscillation El Nino : ENSO
- Variabilité multi-décennale atlantique : AMV
- Oscillation décennale Pacifique : PDO

1992/10/14



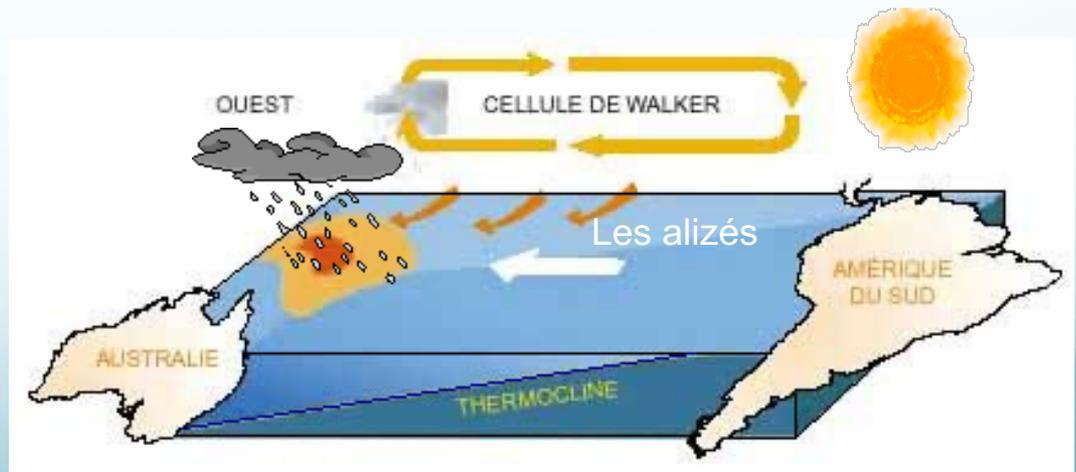
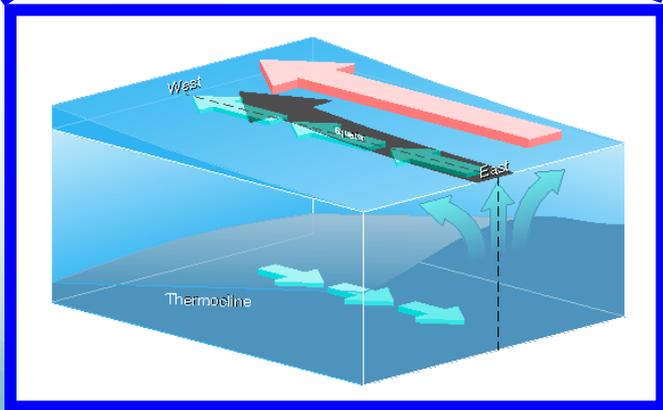
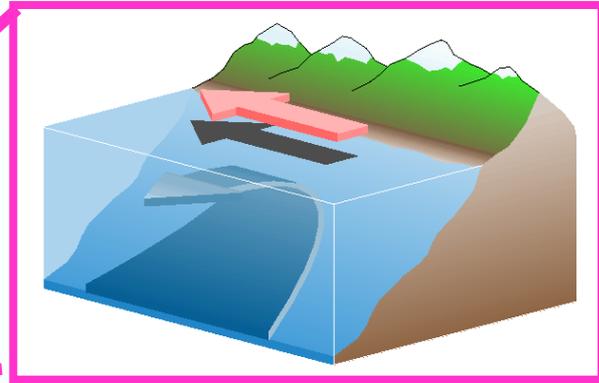
Conditions normales dans le Pacifique

Température de surface

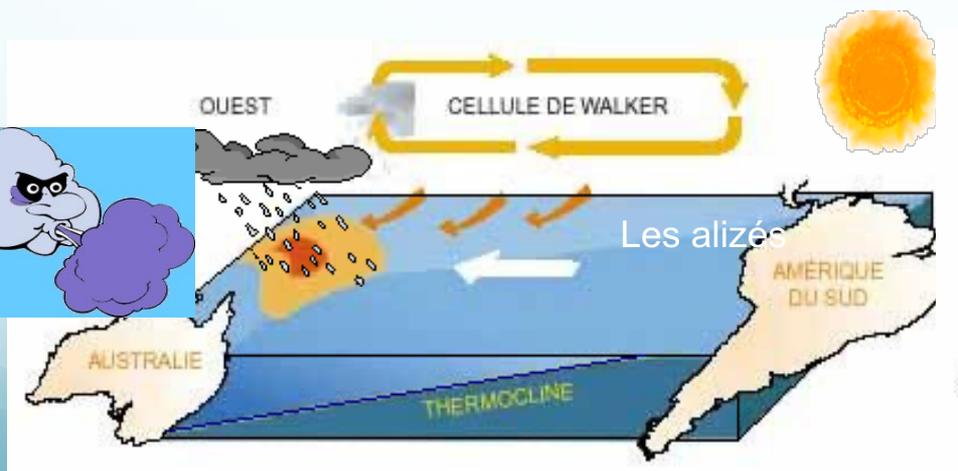
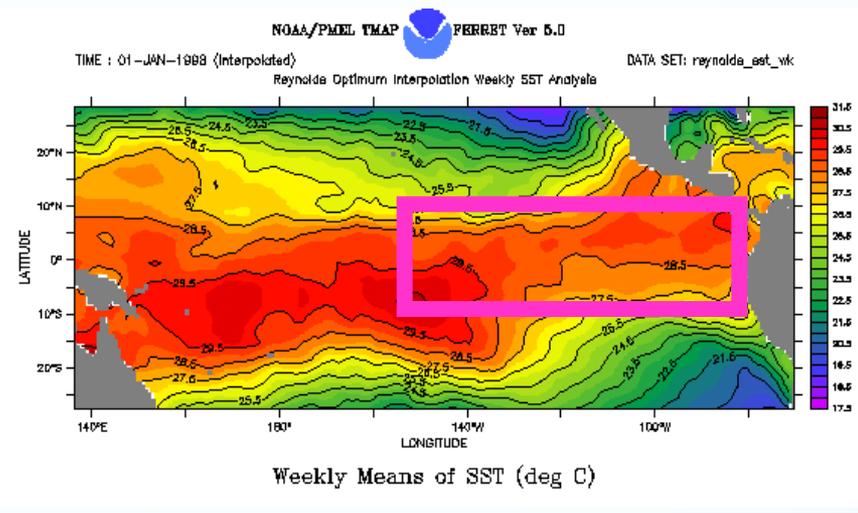
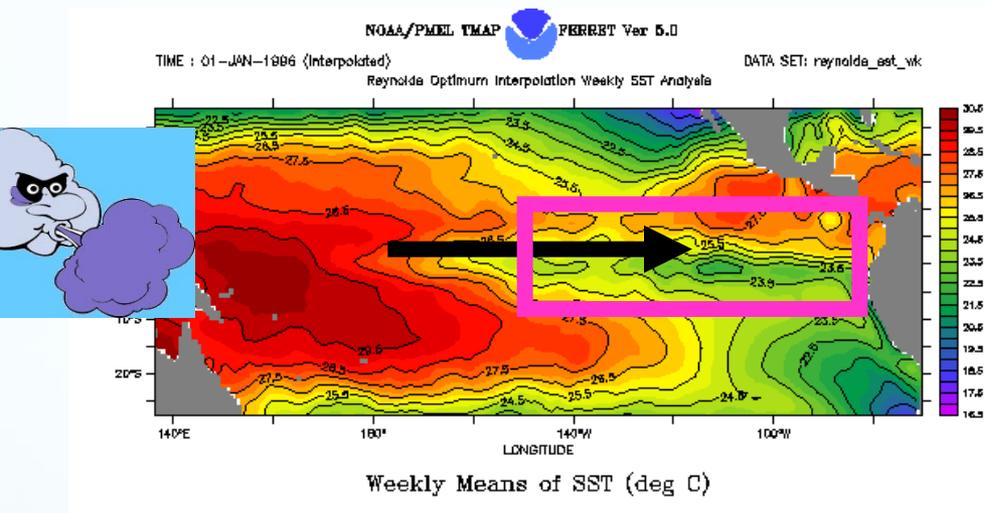


Weekly Means of SST (deg C)
Australie

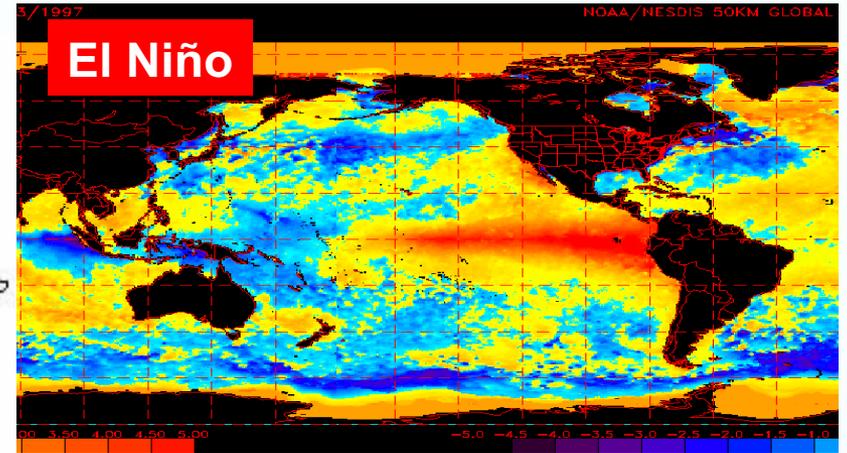
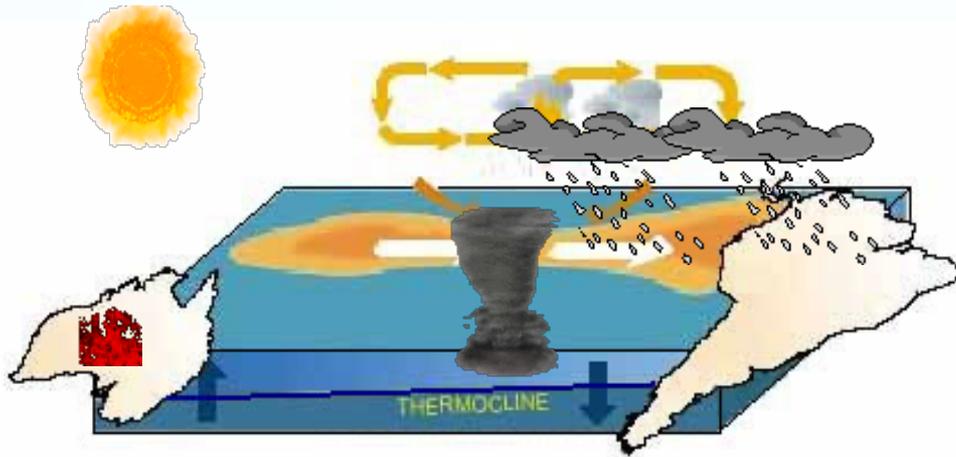
Amérique du Sud



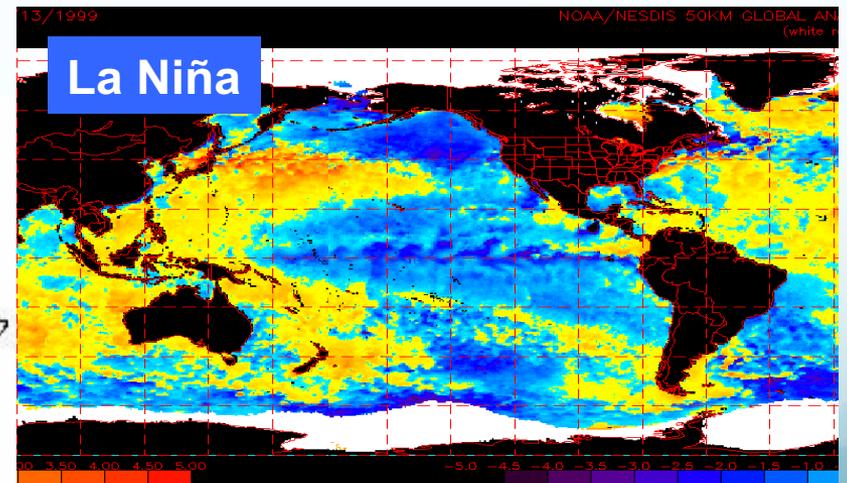
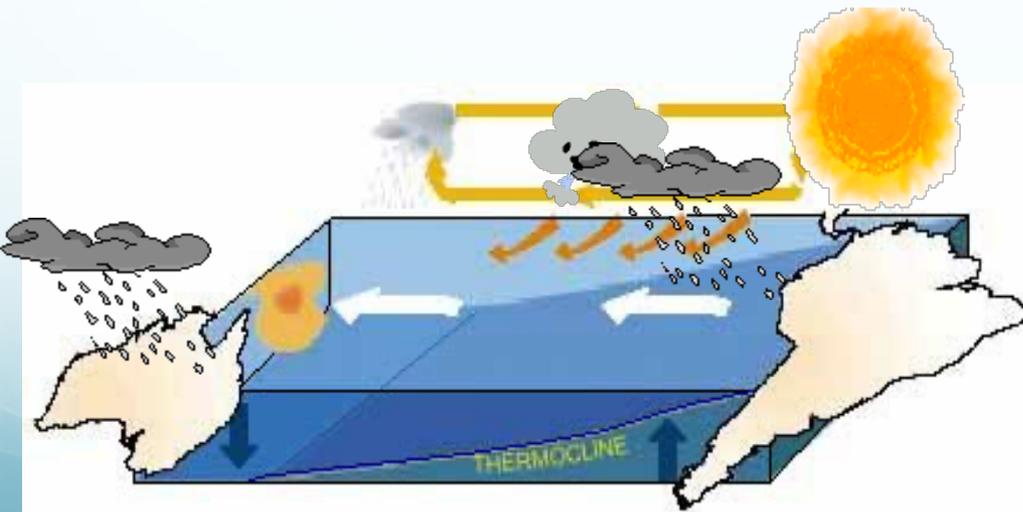
El Niño : Une oscillation couplée océan-atmosphère dans le Pacifique



La petite sœur : La Niña

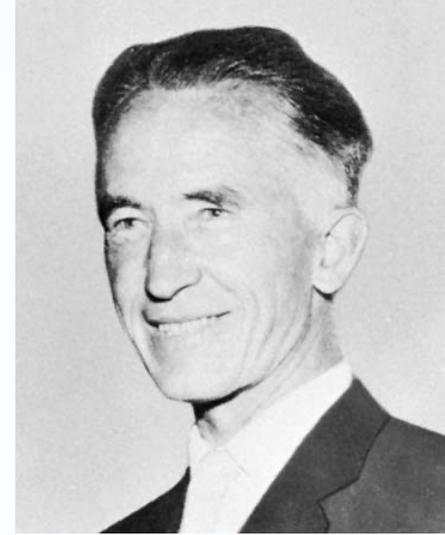


Anomalies de température du 13 Nov. 1997

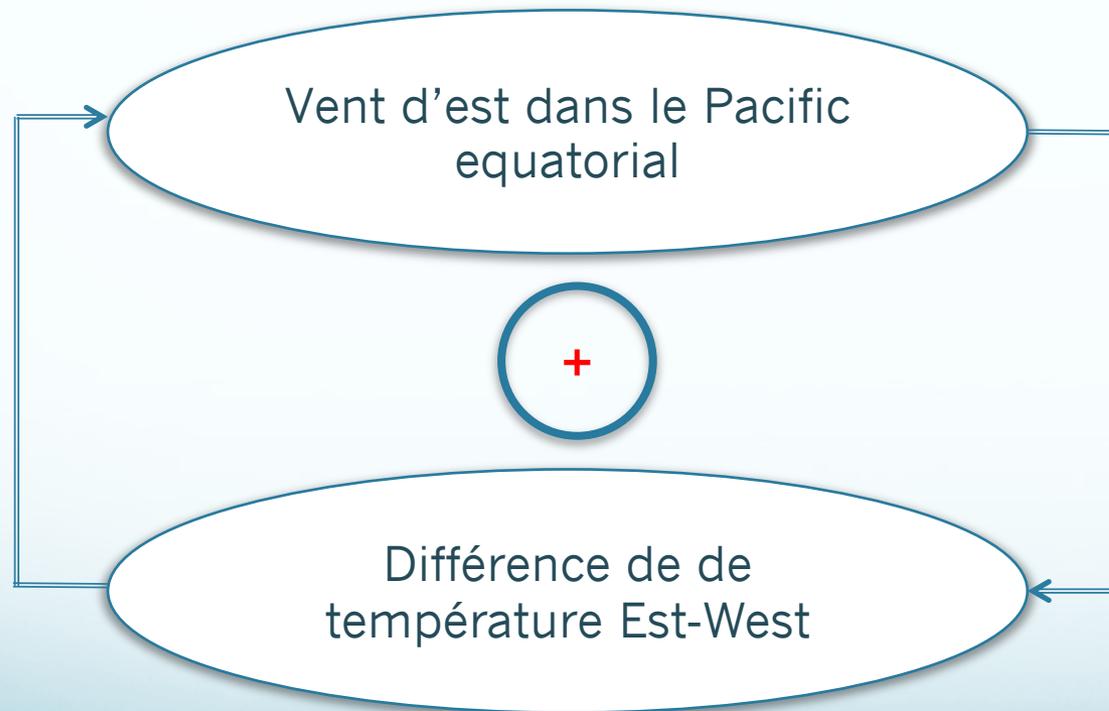


Anomalies de température du 11 Nov. 1998

Rétroaction positive de Bjercknes



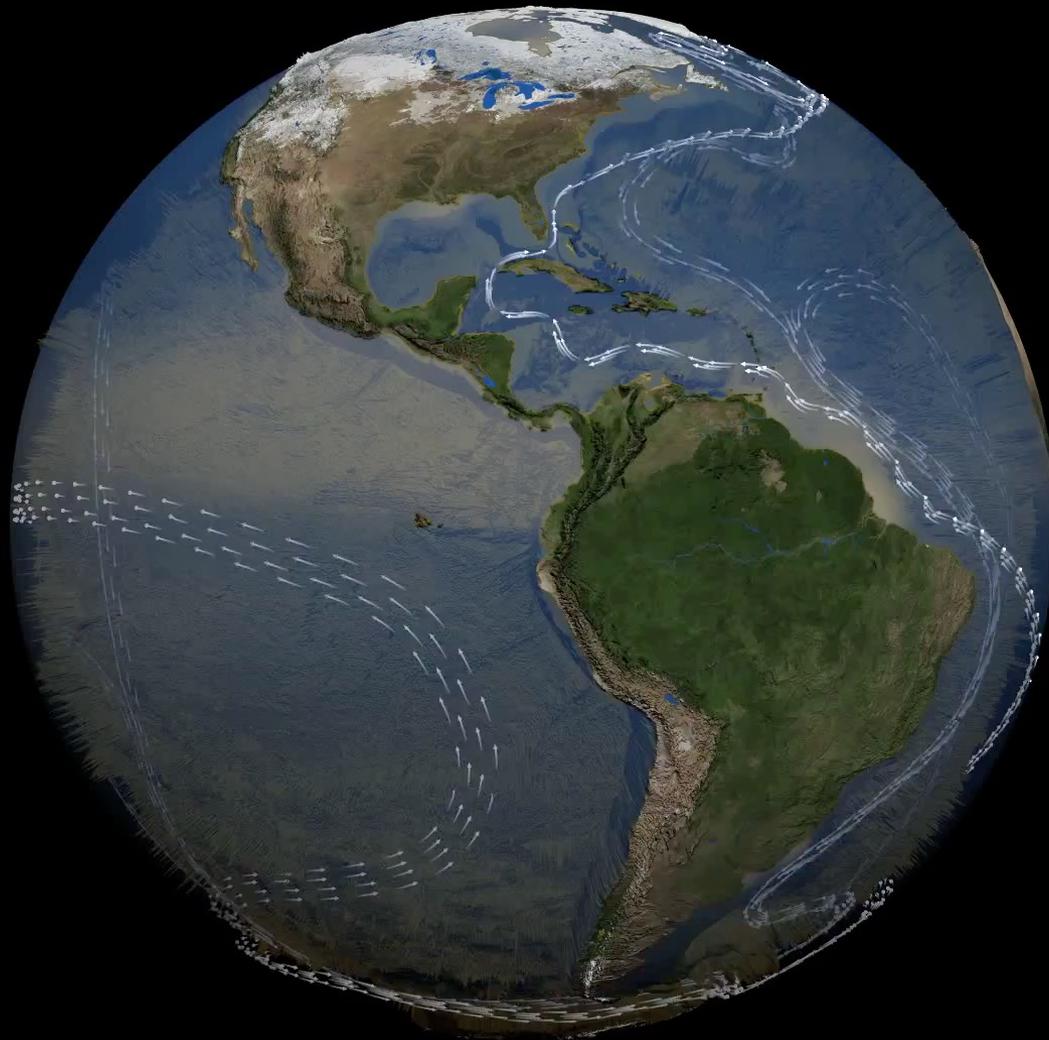
Jacob Bjerknes (1897-1975)



Quelques grands modes de variabilité climatique

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

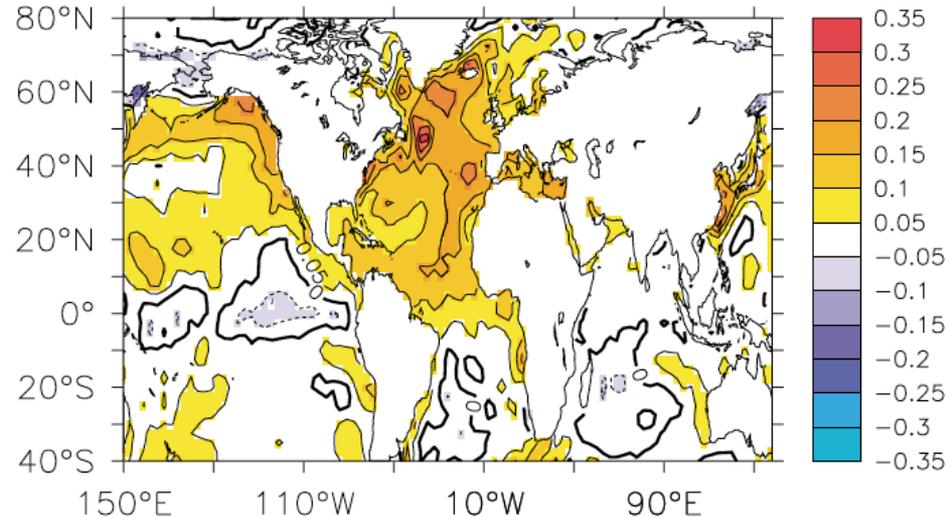
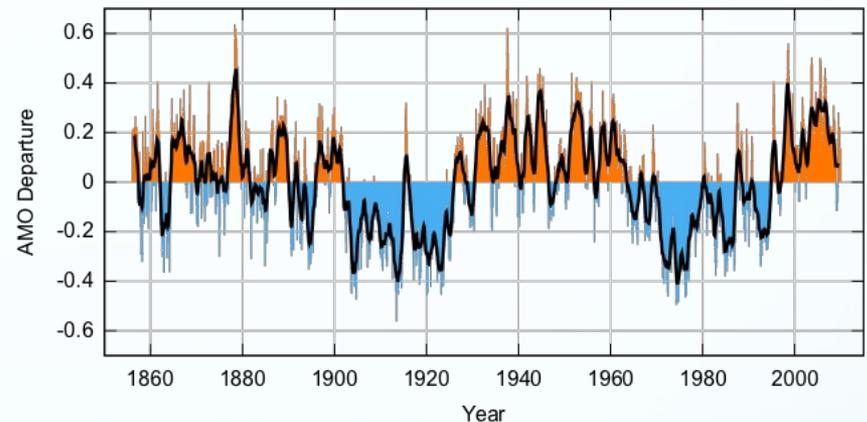
Circulation thermohaline



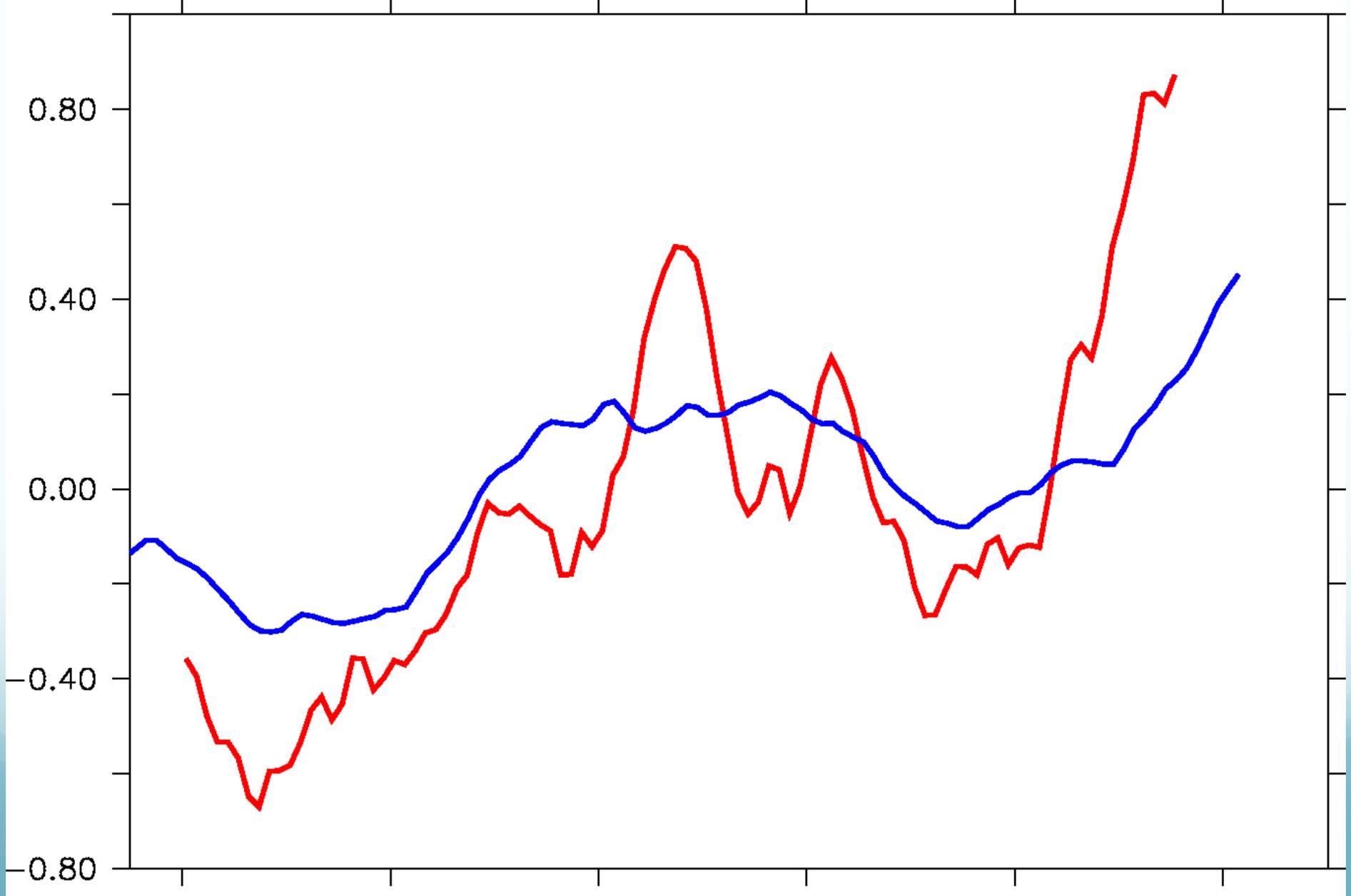
Variabilité multi-décennale atlantique

- 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

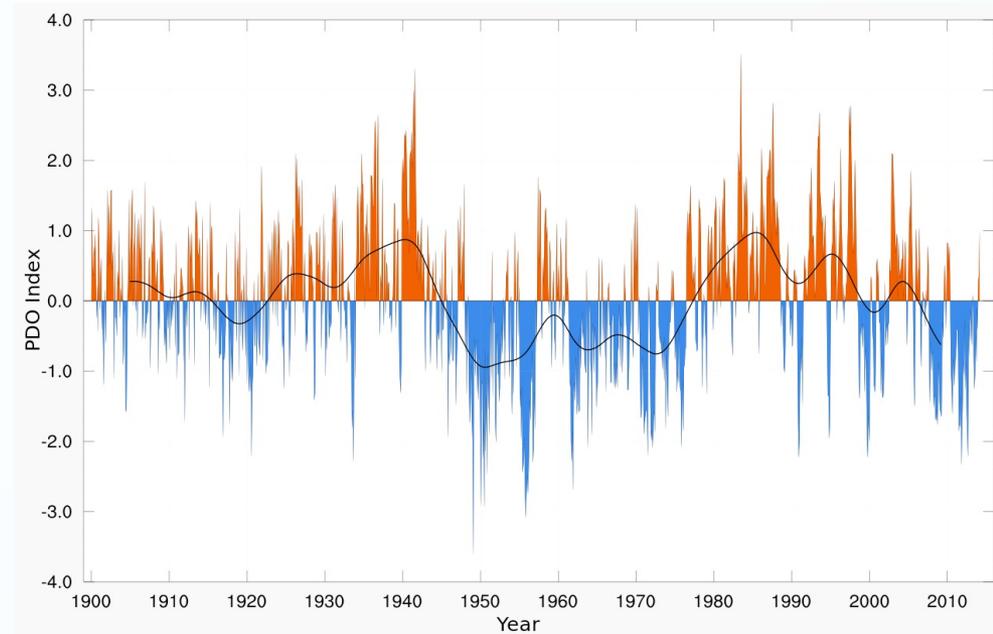


Quelques grands modes de variabilité climatique

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

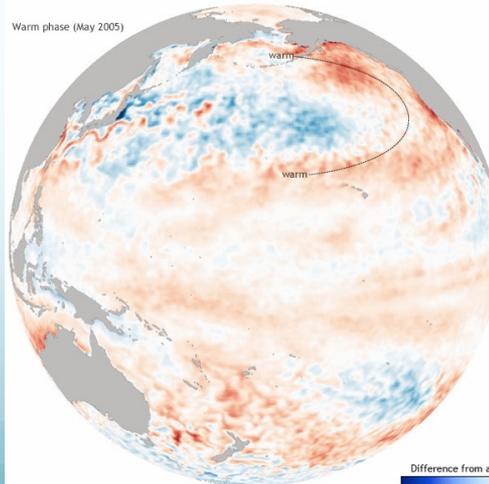
Oscillation décennal pacifique

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

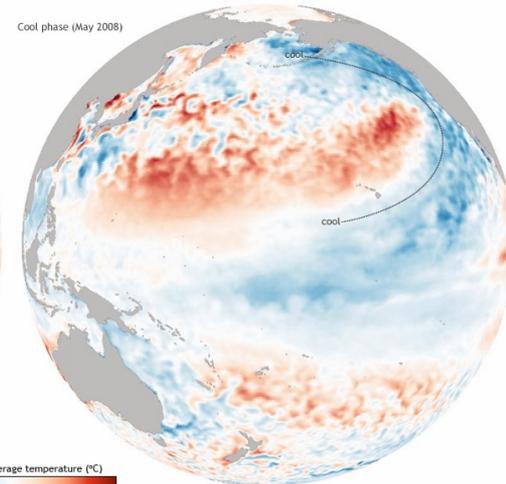


Pacific Decadal Oscillation

Warm phase (May 2005)

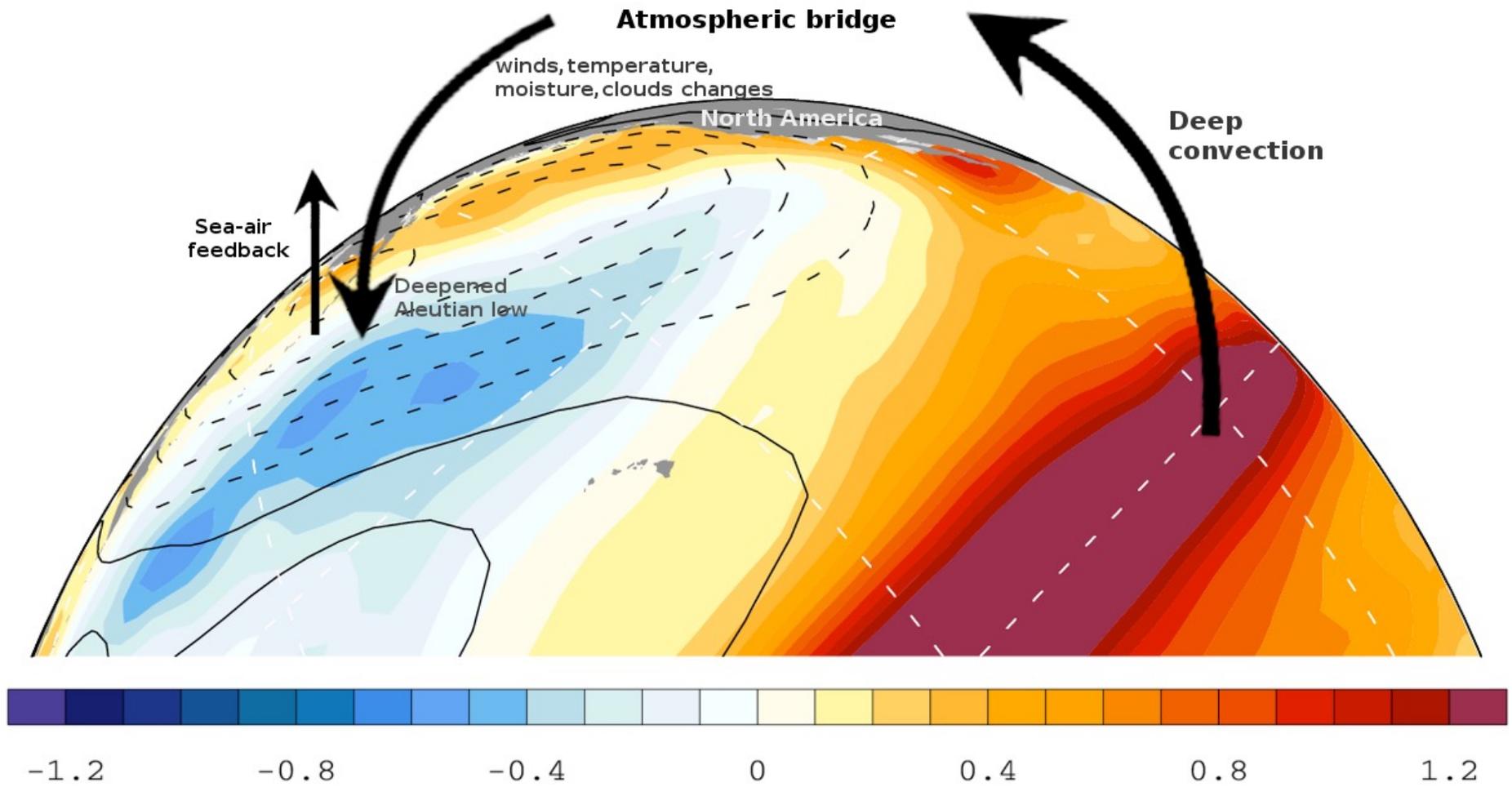


Cool phase (May 2008)



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

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

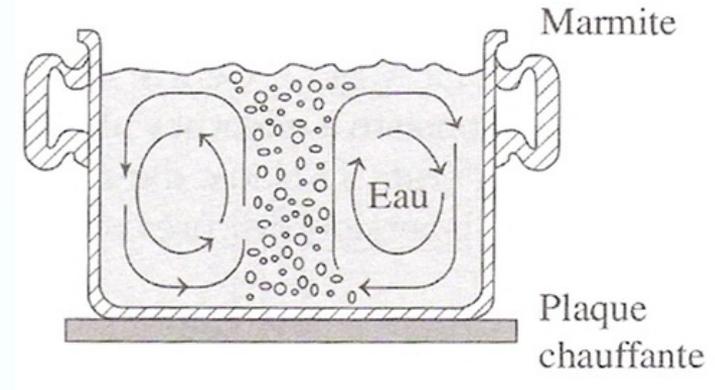


Autres lois incluses dans les modèles

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

Modèle de Lorenz

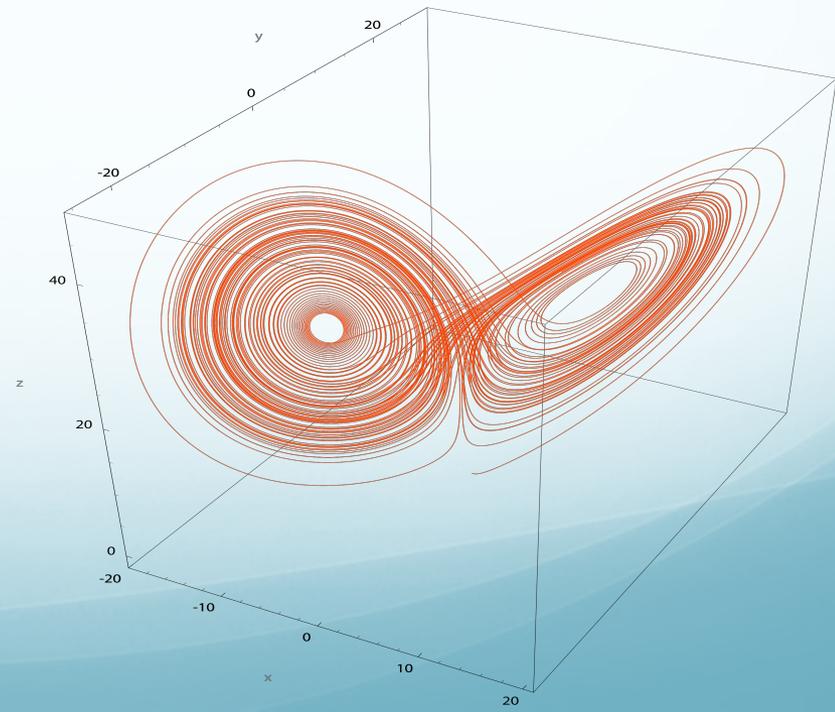
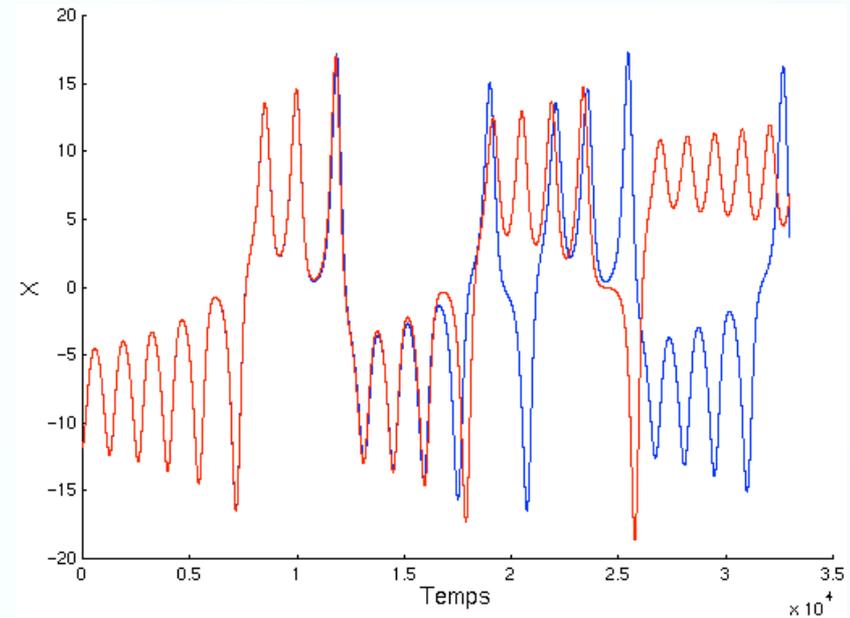
- Modèle simplifié de l'équation Navier Stokes appliqué au phénomène de convection (dite de Rayleigh-Bernard)
 - X est la vitesse de montée
 - Y le gradient de T horizontal
 - Z est le gradient de T vertical
- Système non linéaire
- Simplification de la réalité !



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

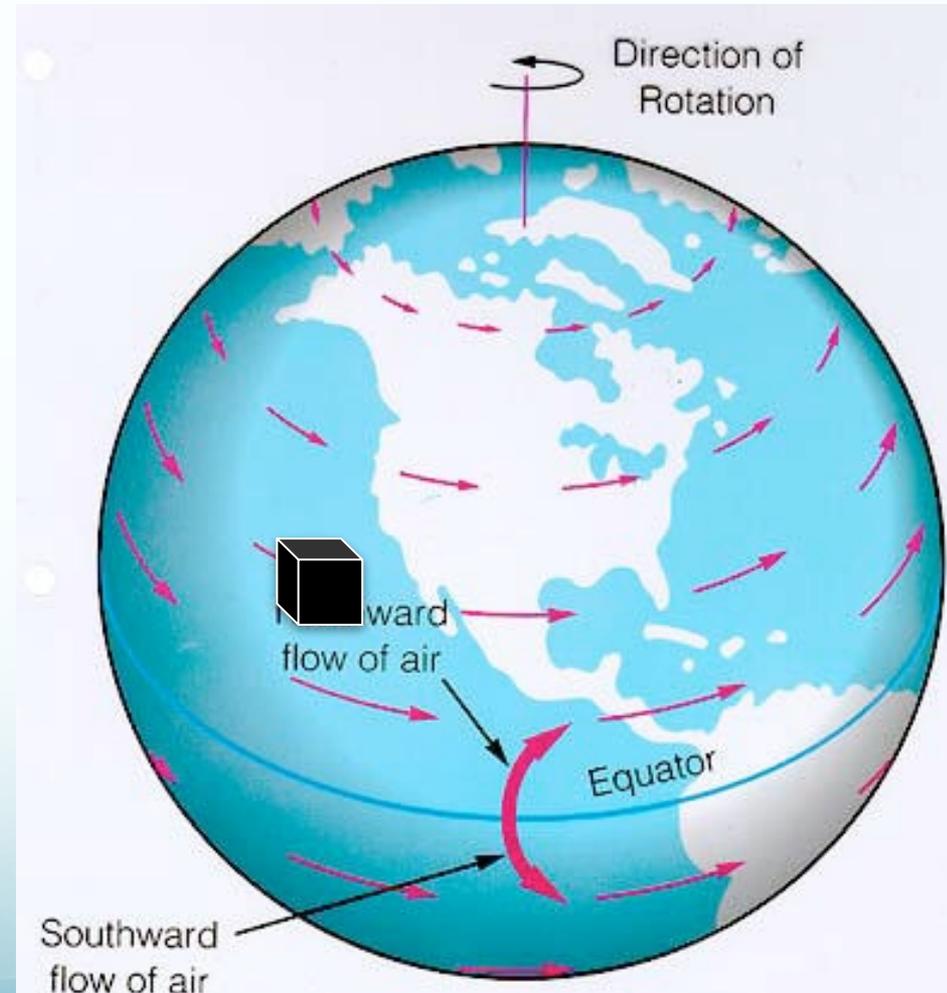
Modèle de Lorenz

- 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

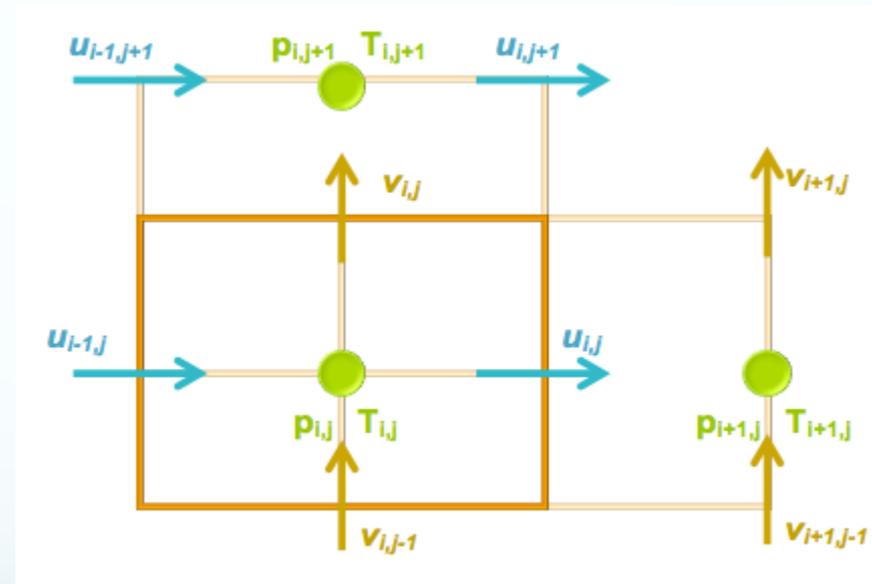
Pression, vitesse dépend de i, j, k (espace) et du temps discret p

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

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”

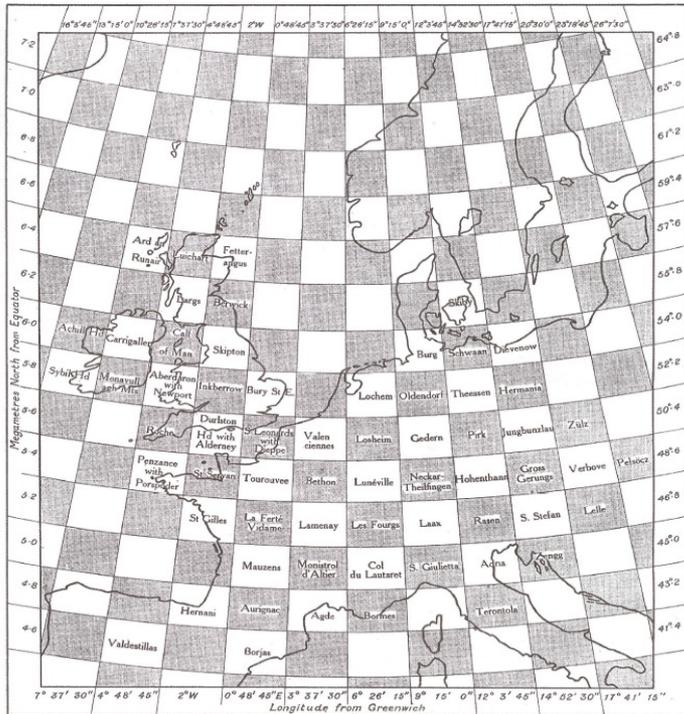
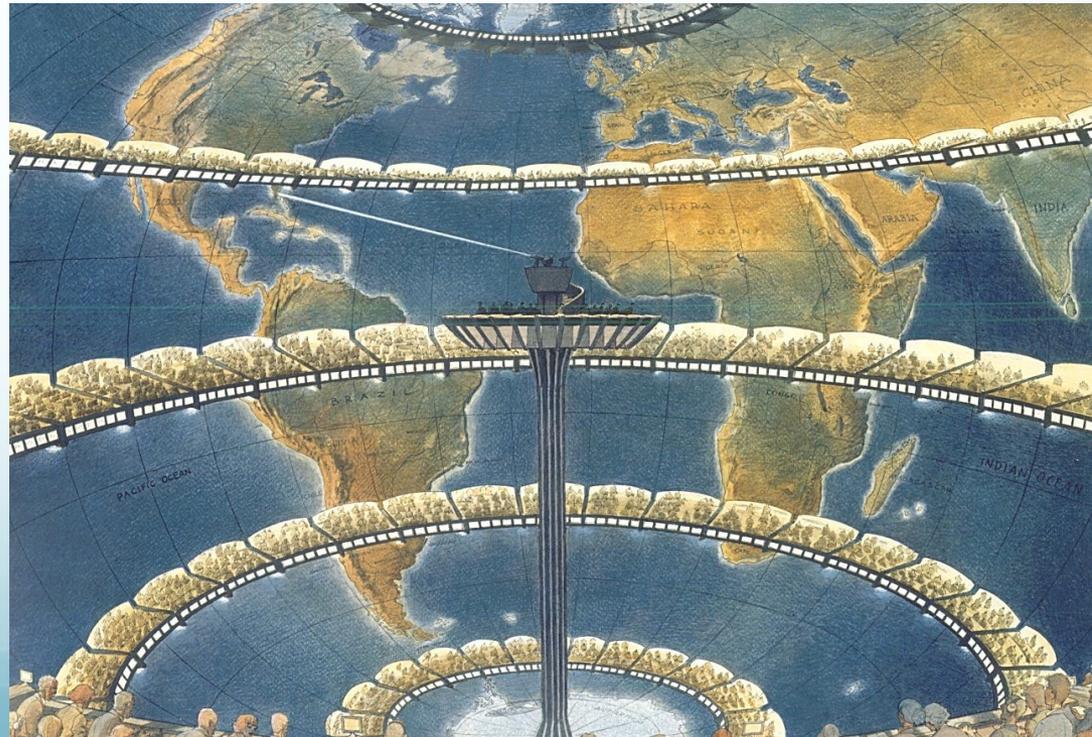
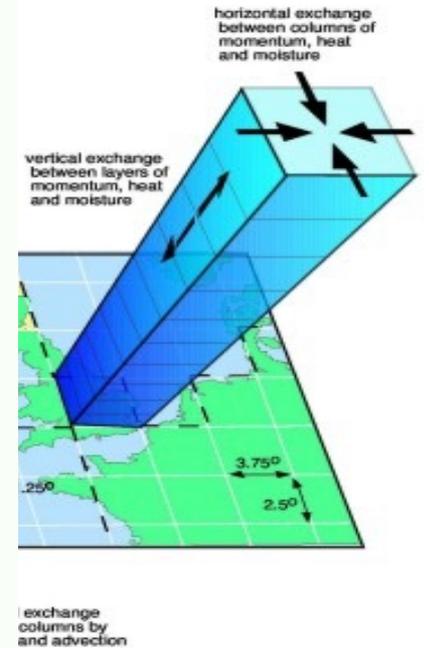
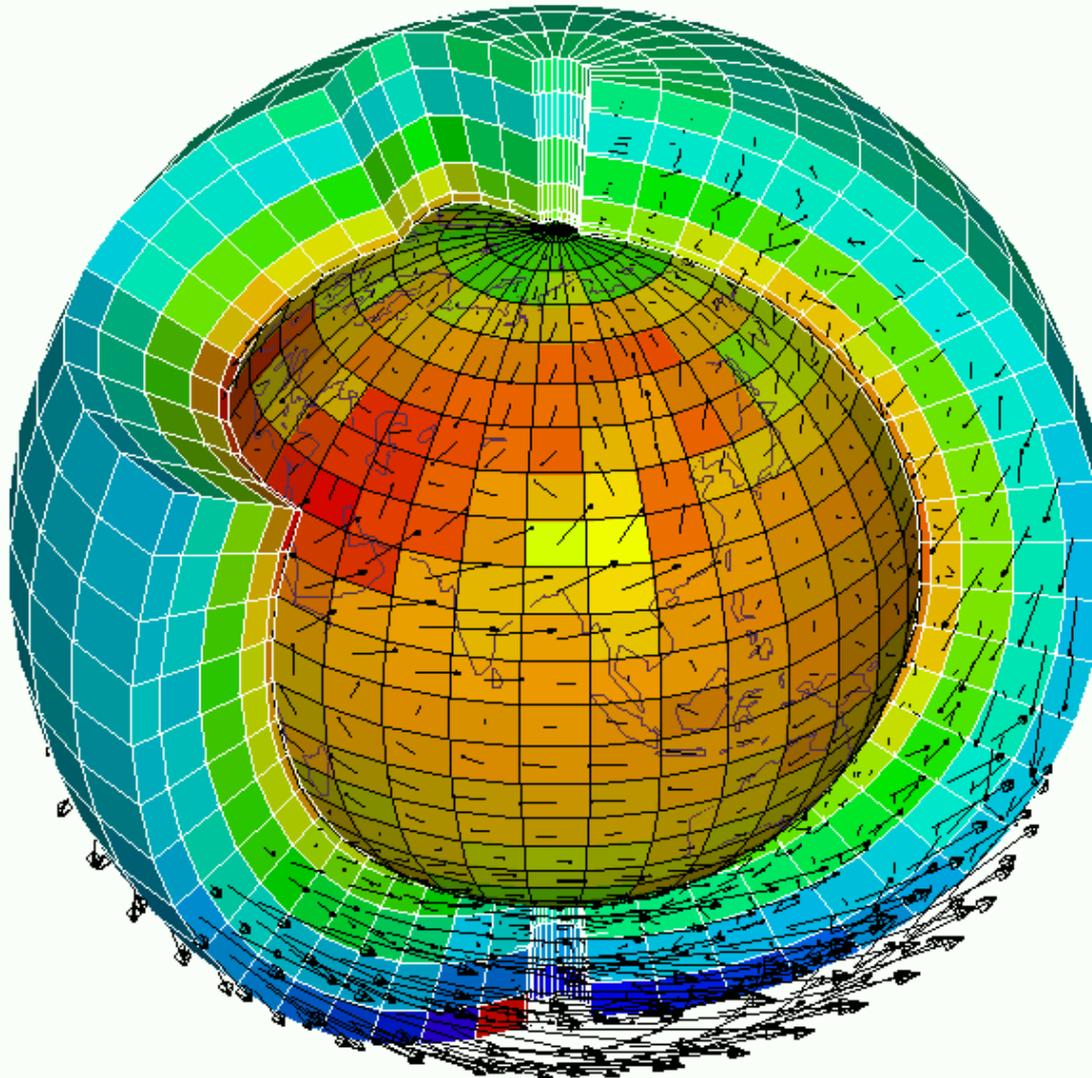


Figure 1.6 Richardson's idealised computational grid. (Frontispiece of WPNP)

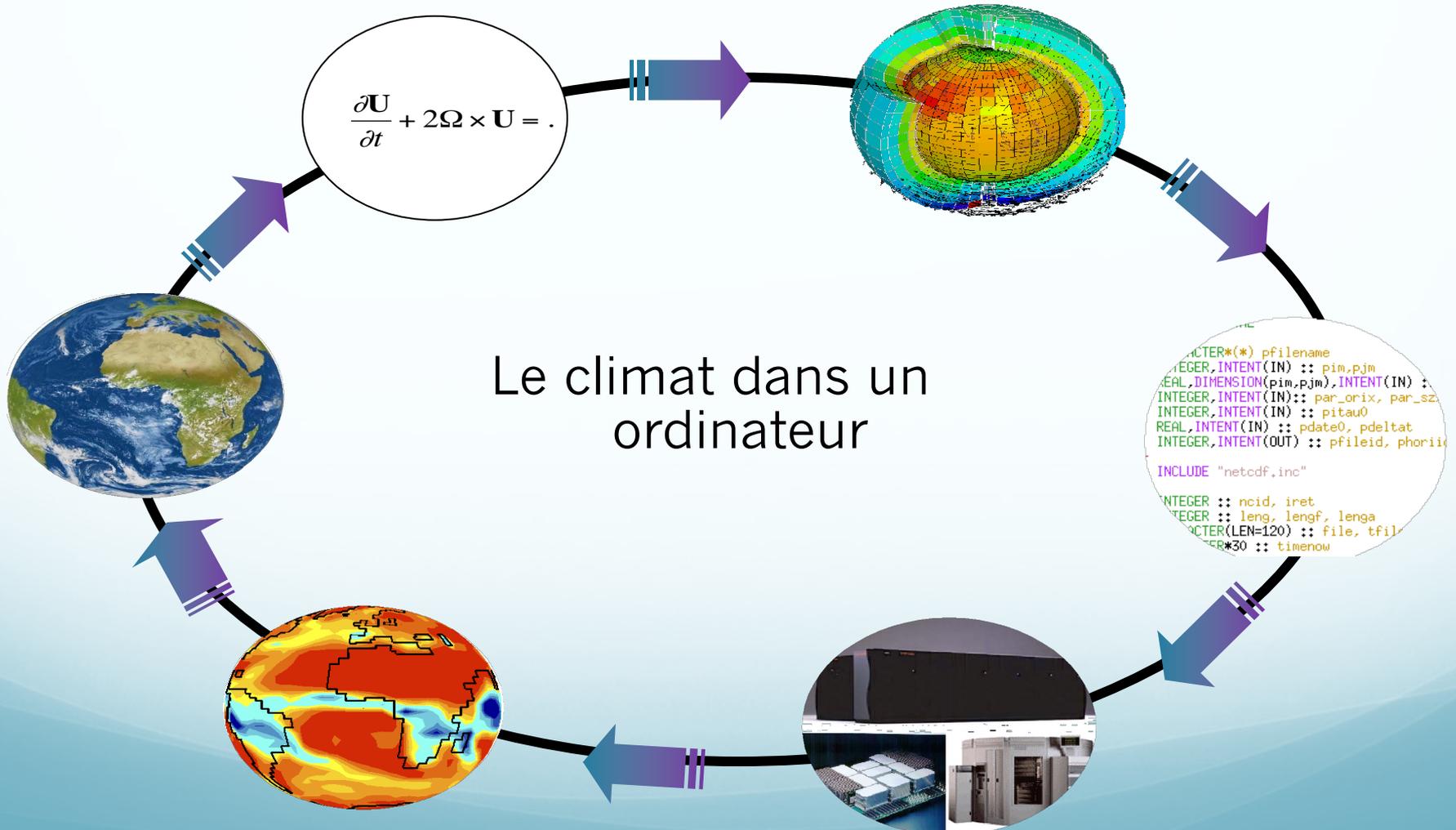
Les calculateurs



Le maillage de la Terre dans un modèle

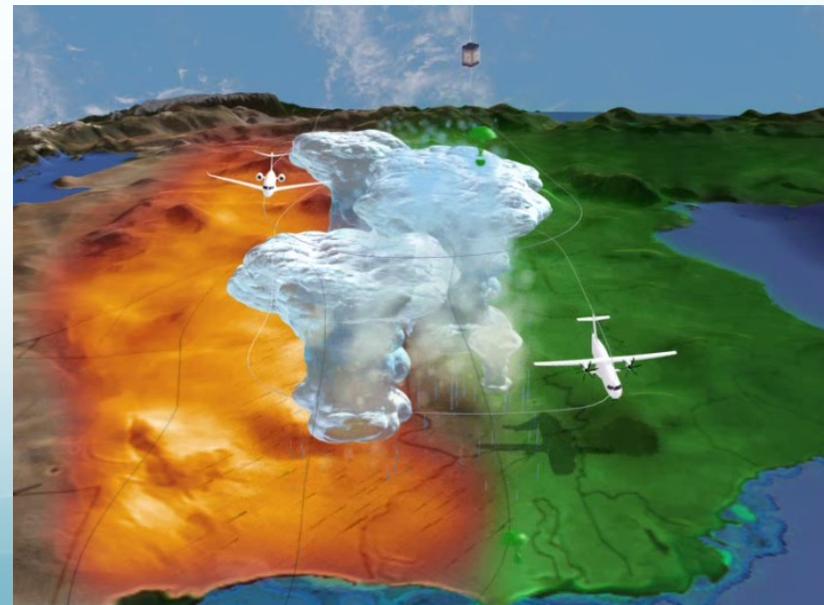
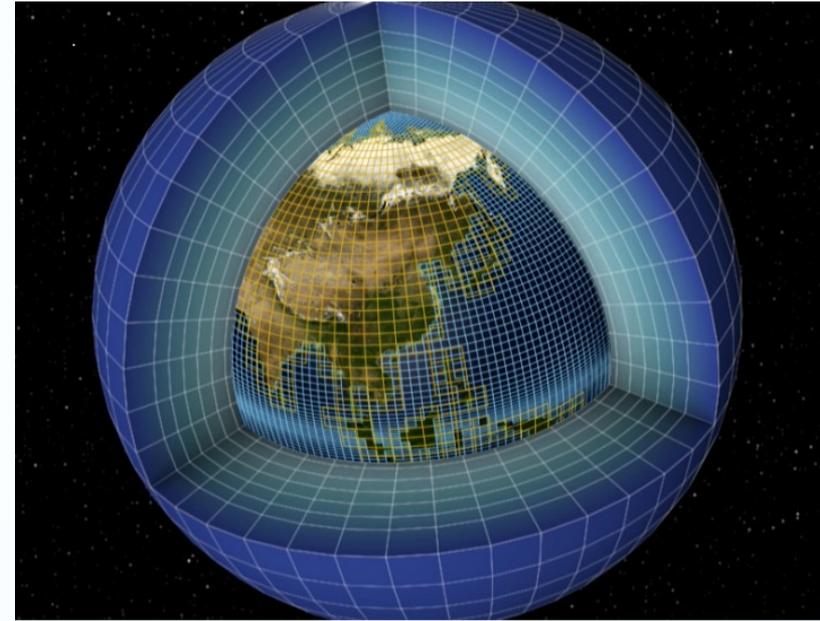


Principe de la modélisation du climat



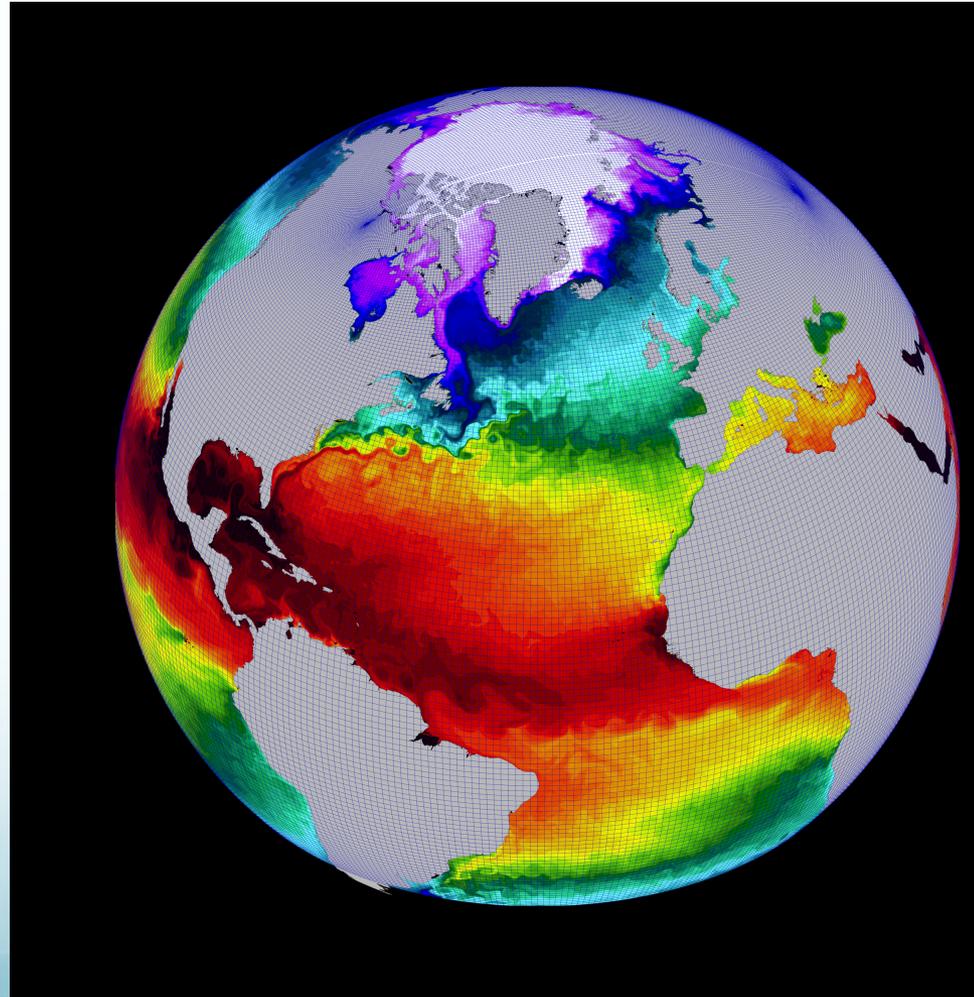
Modèle d'atmosphère

- 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

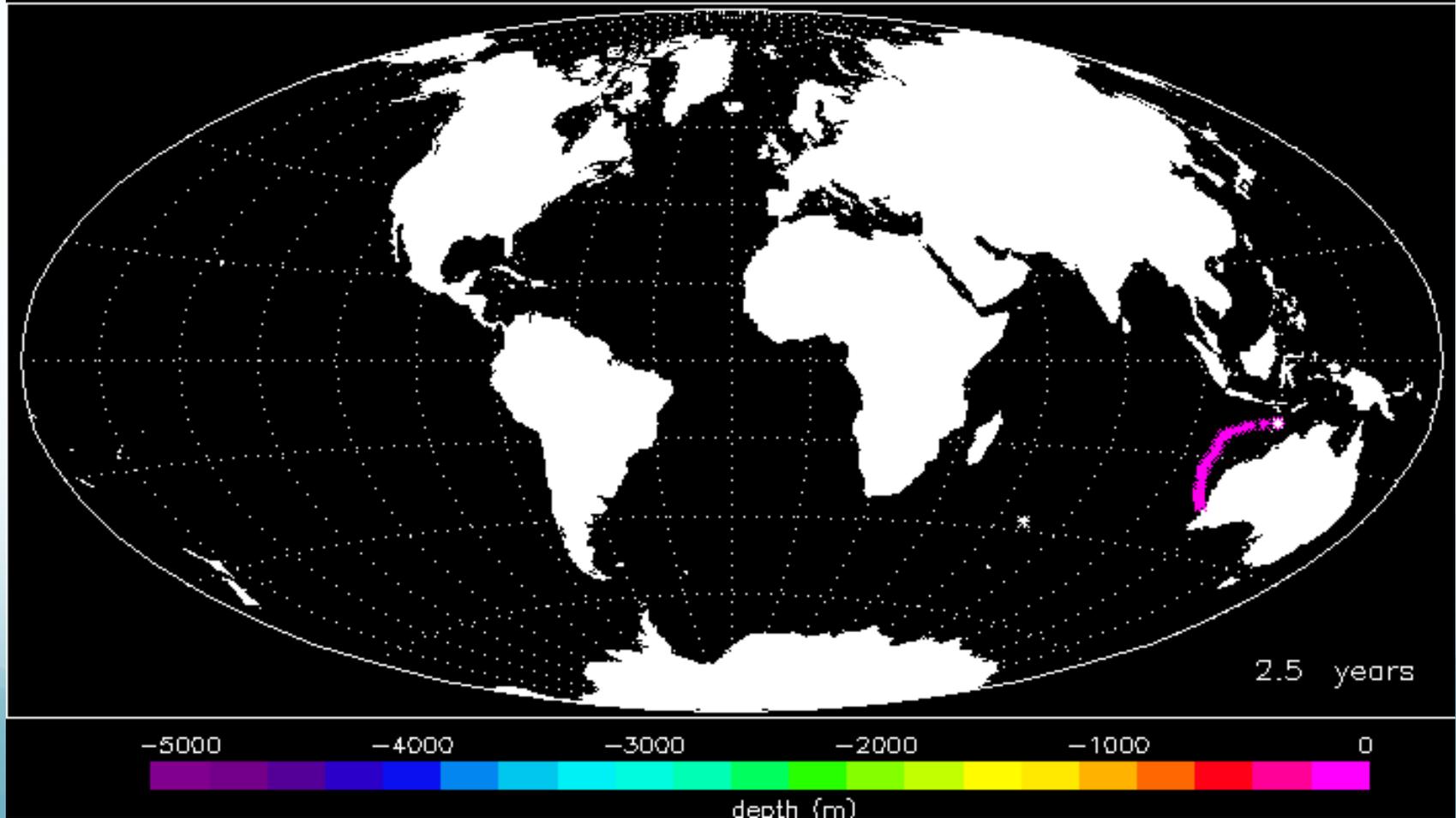
- Modèles plus récents par rapport atmosphère
- Problématiques spécifiques (tourbillon plus petit, salinité, chauffé par le dessus...)



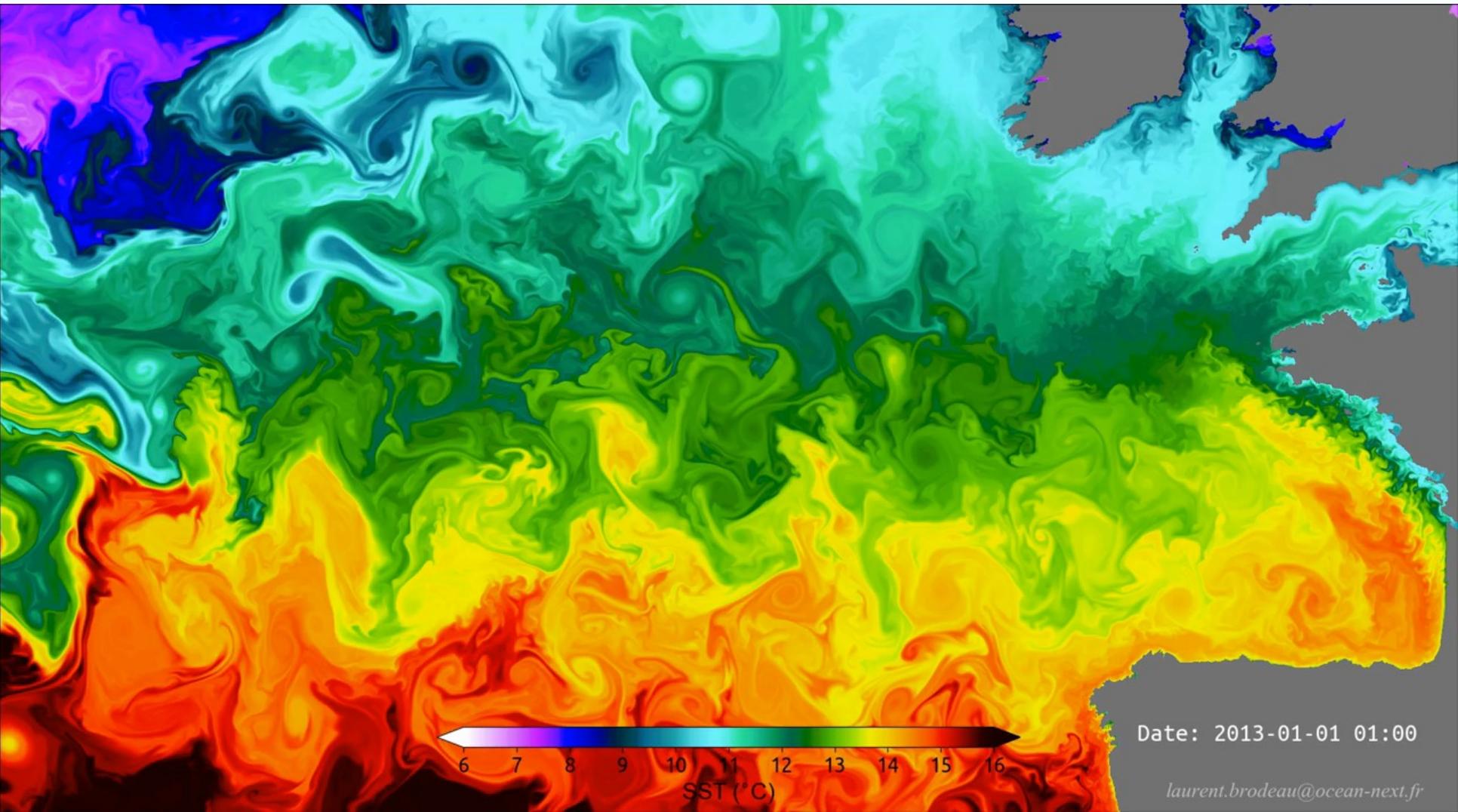
Trajectoire lagrangienne dans un modèle d'océan

"Global" trajectory in the OPA model

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

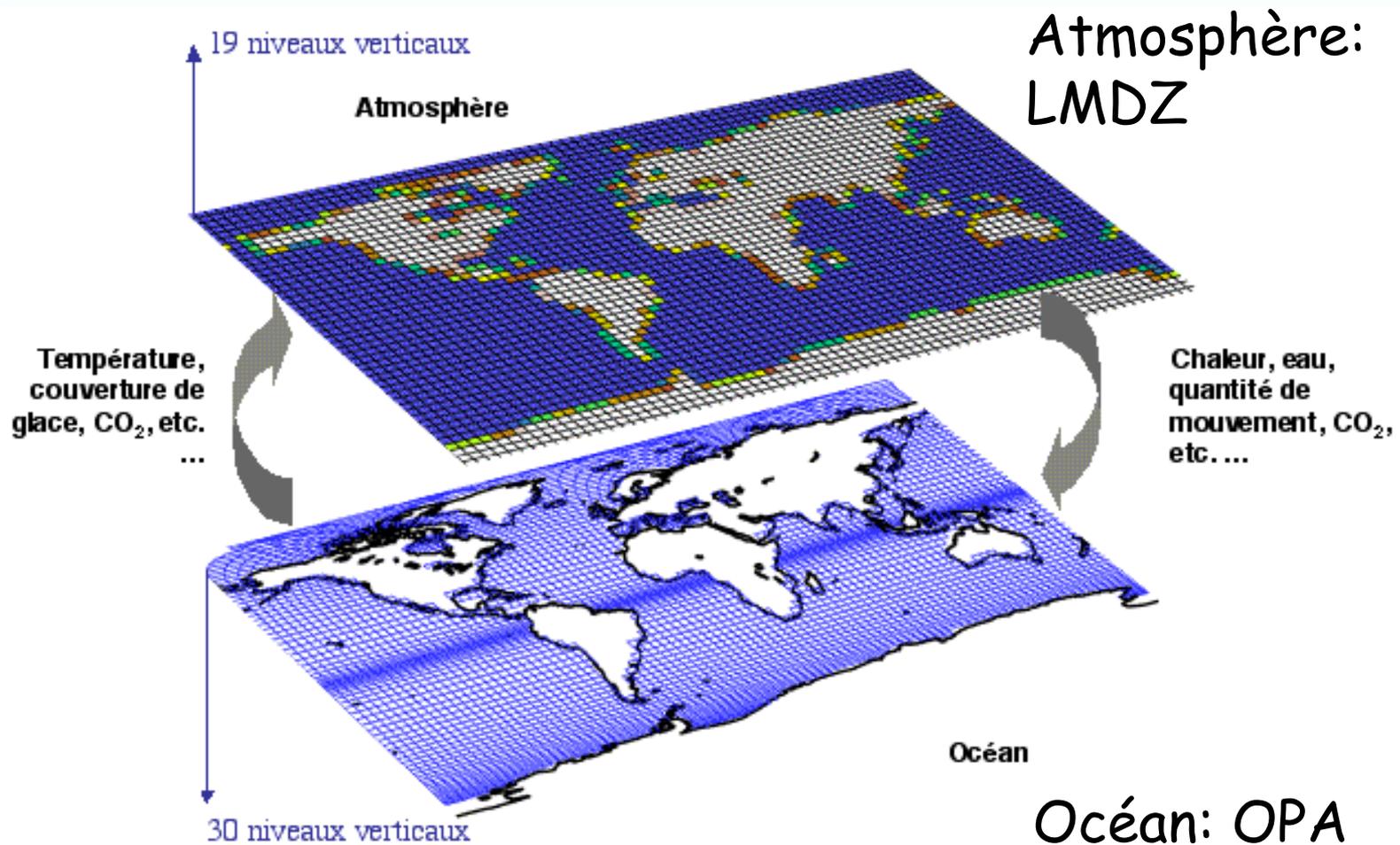


Océan, un monde fascinant



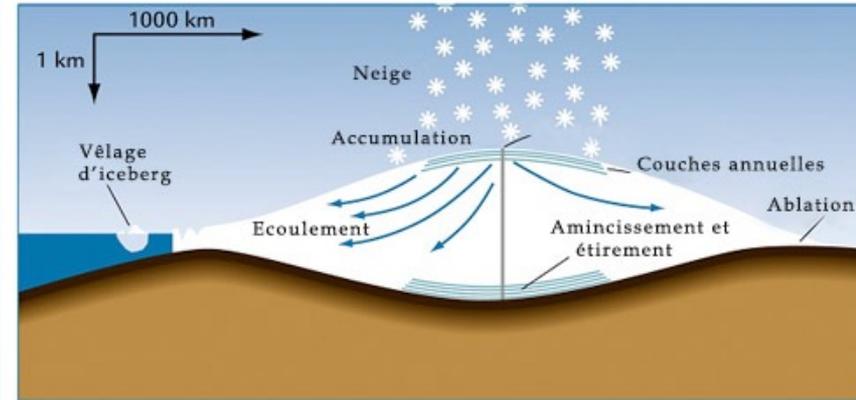
Modèles couplés océan-atmosphère

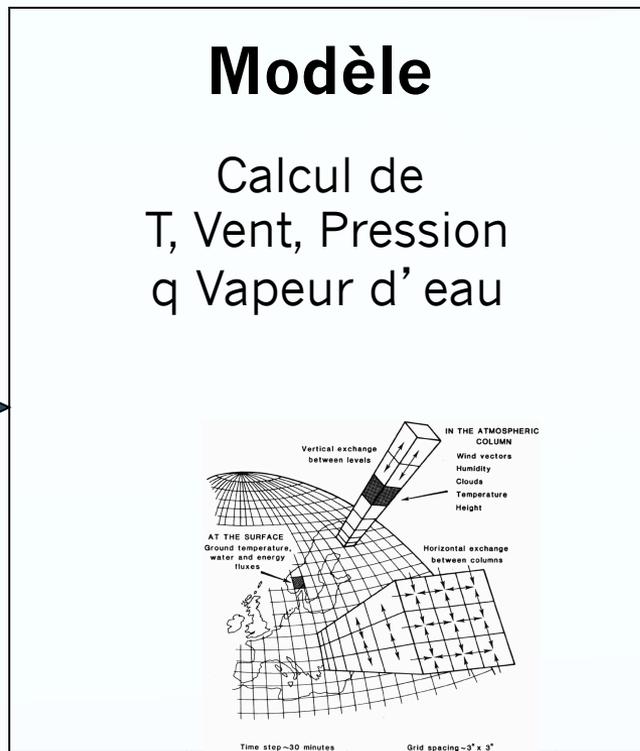
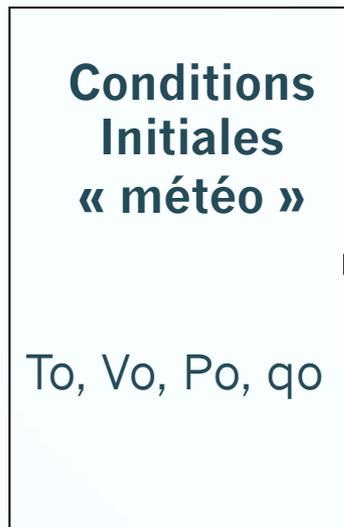
Exemple du modèle de l'IPSL



Autres composantes...

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



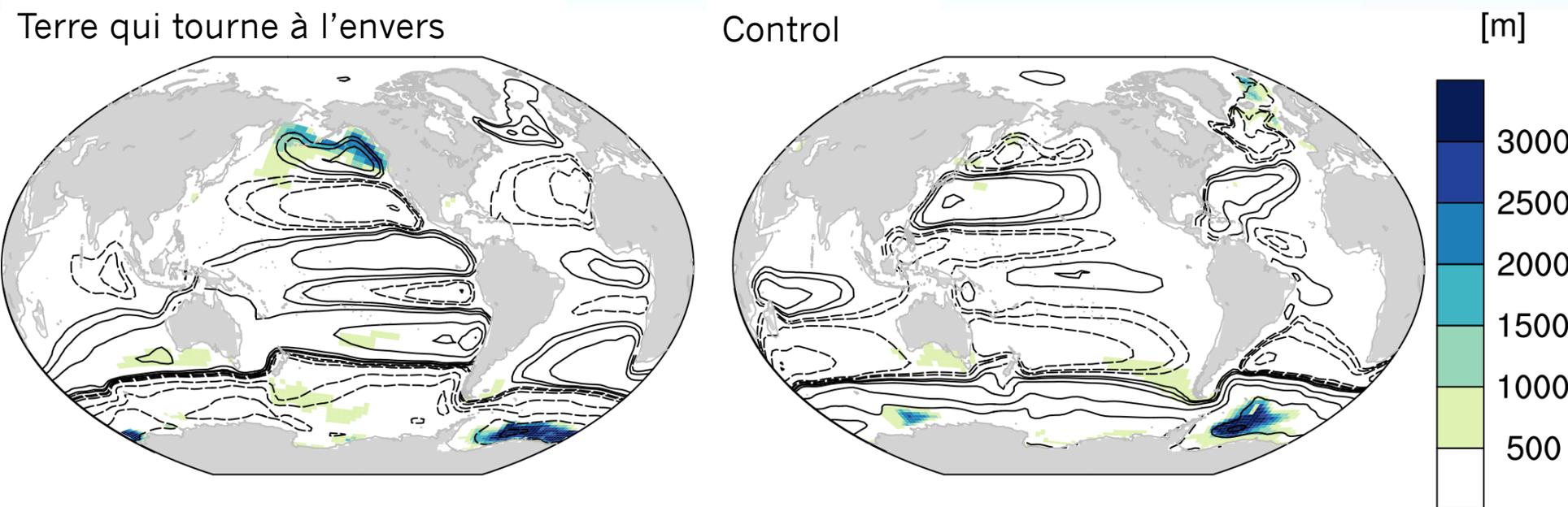


Statistiques
Mois/saisons



Terre qui tourne à l'envers

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



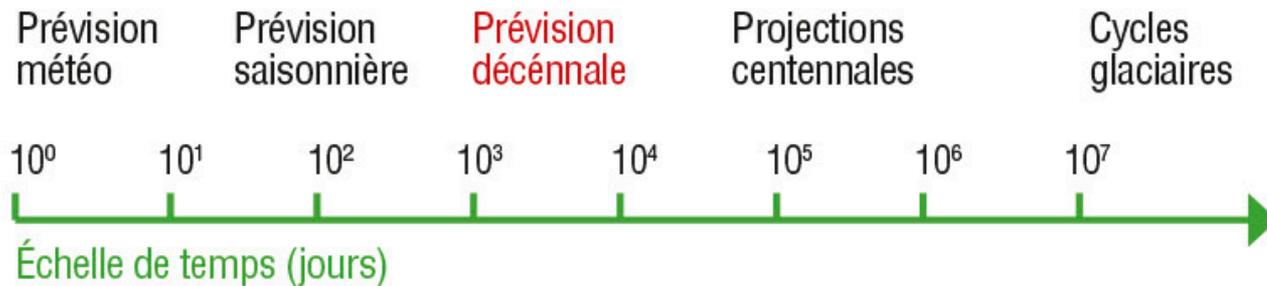
Prévision décennale

© D. Swingedouw

**Importance
conditions initiales**



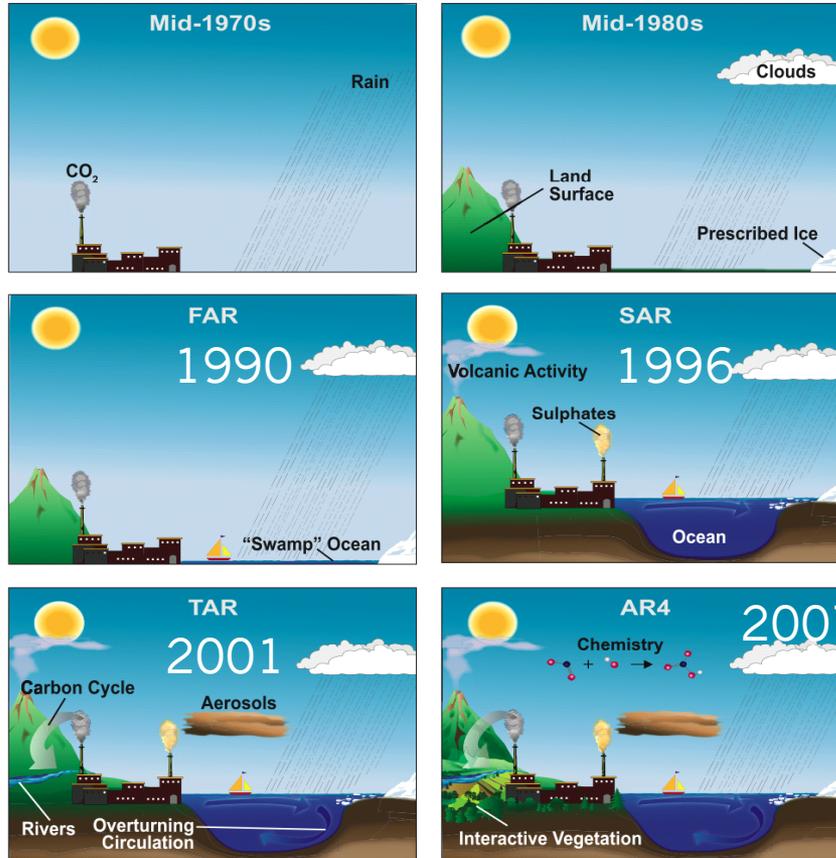
**Importance
conditions aux limites**



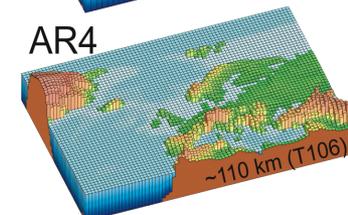
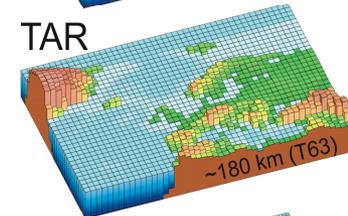
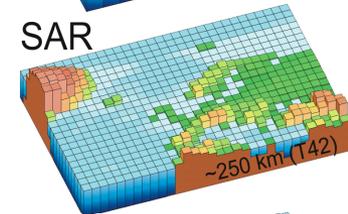
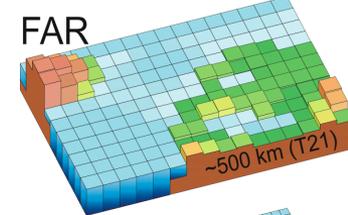
► Schéma montrant l'importance relative des conditions initiales et aux limites pour le climat selon les échelles de temps.

Evolution des modèles climatiques

composantes

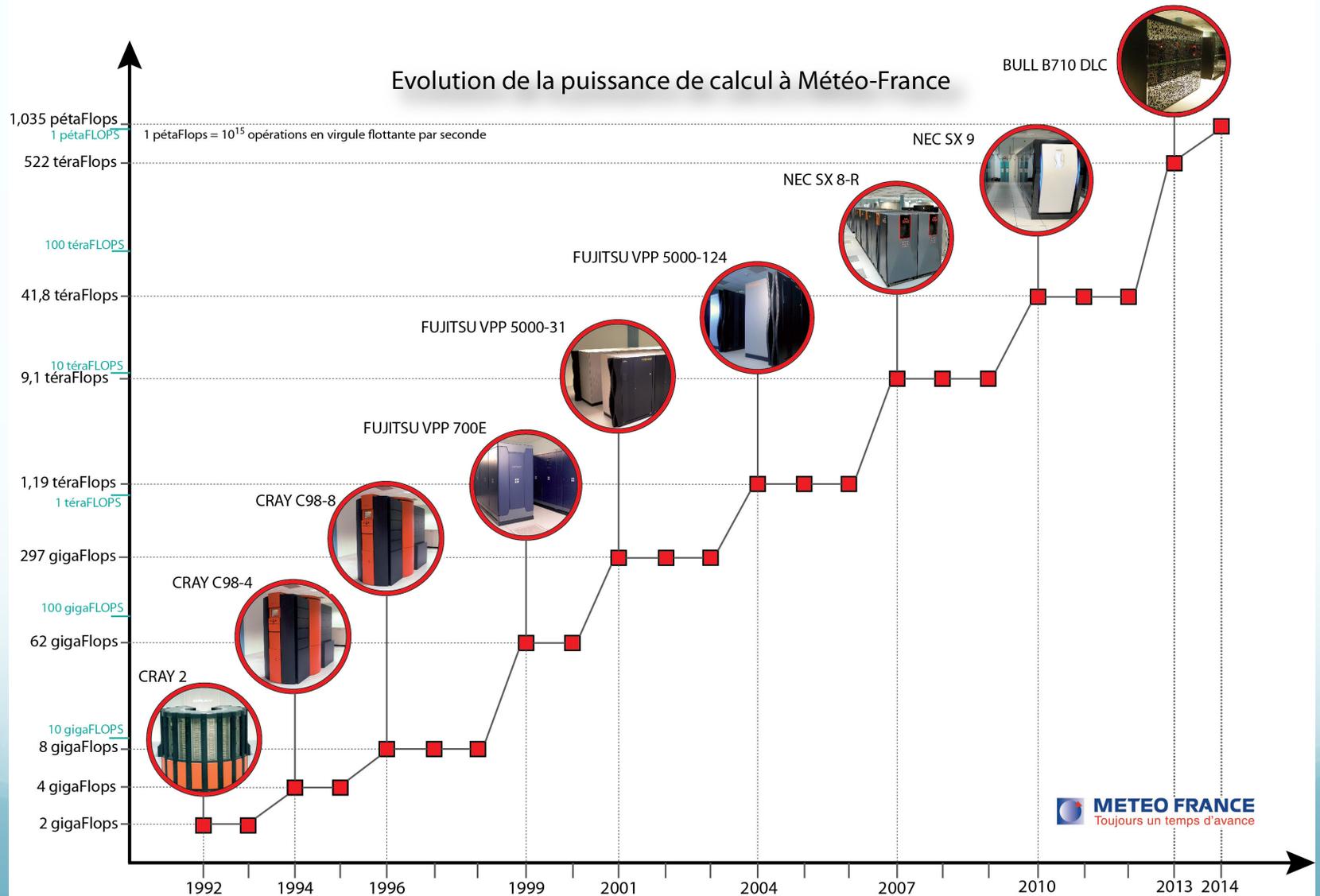


résolution



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

Moyens de calcul



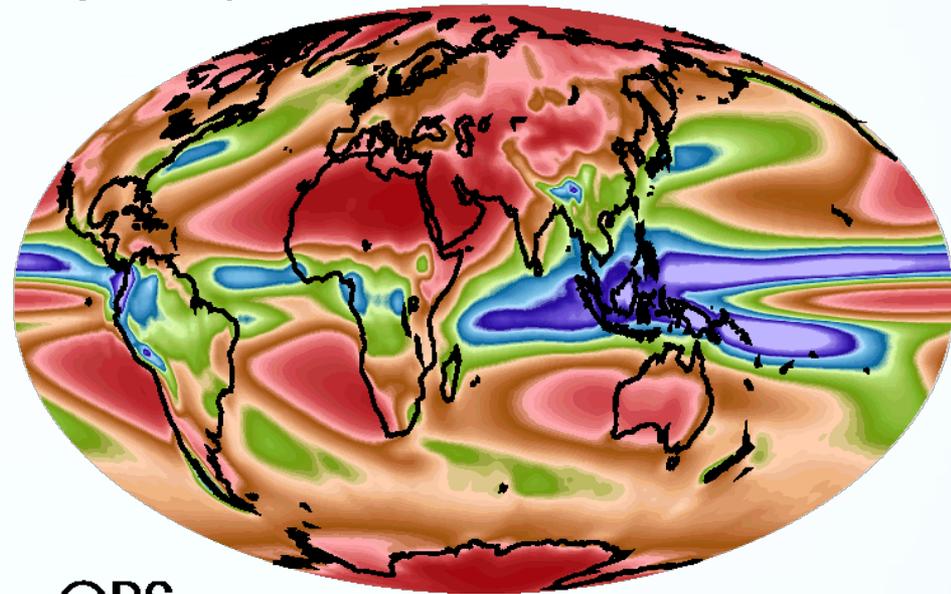
Tester les modèles

Des moyens de mesures inédits:

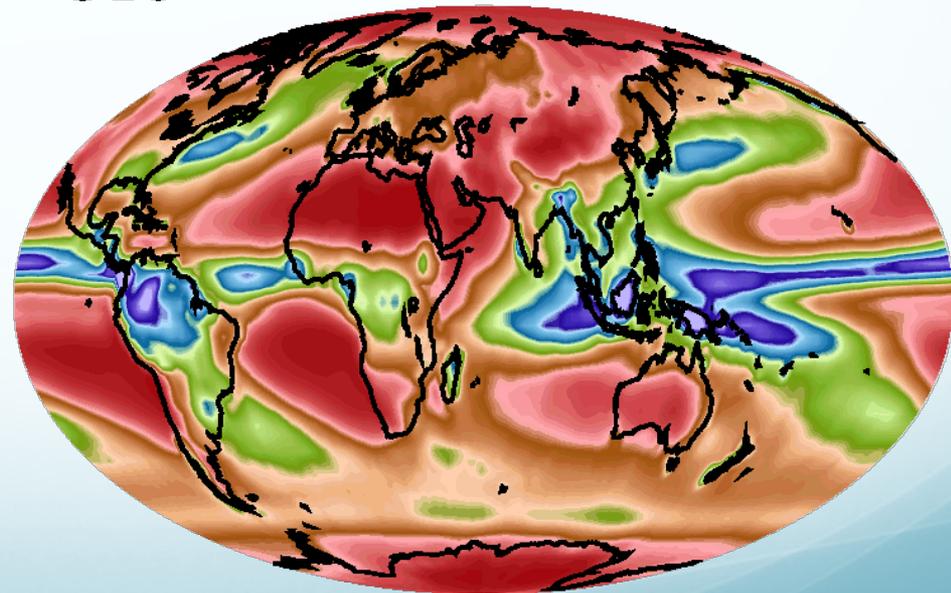
- Satellites
- Balises ARGO



CMIP5

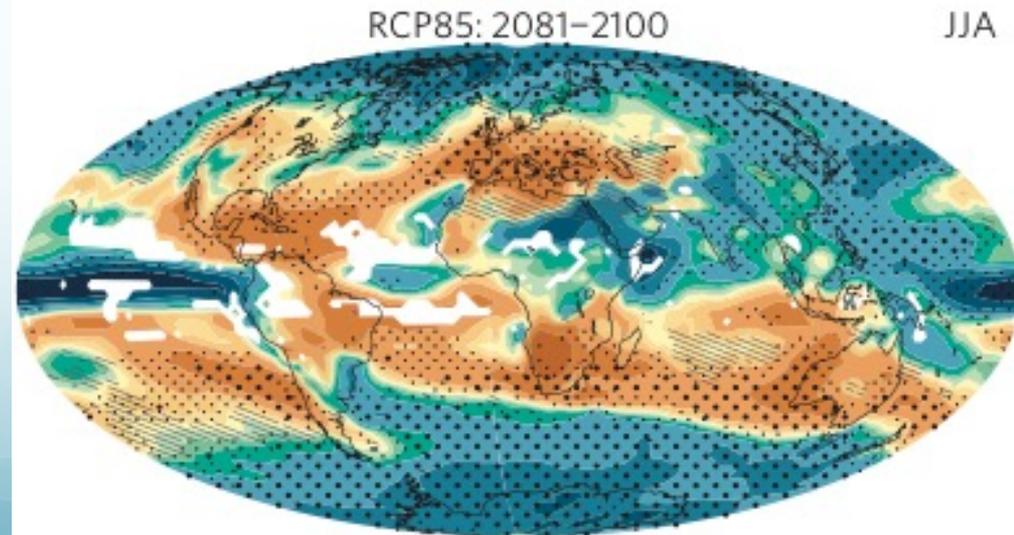
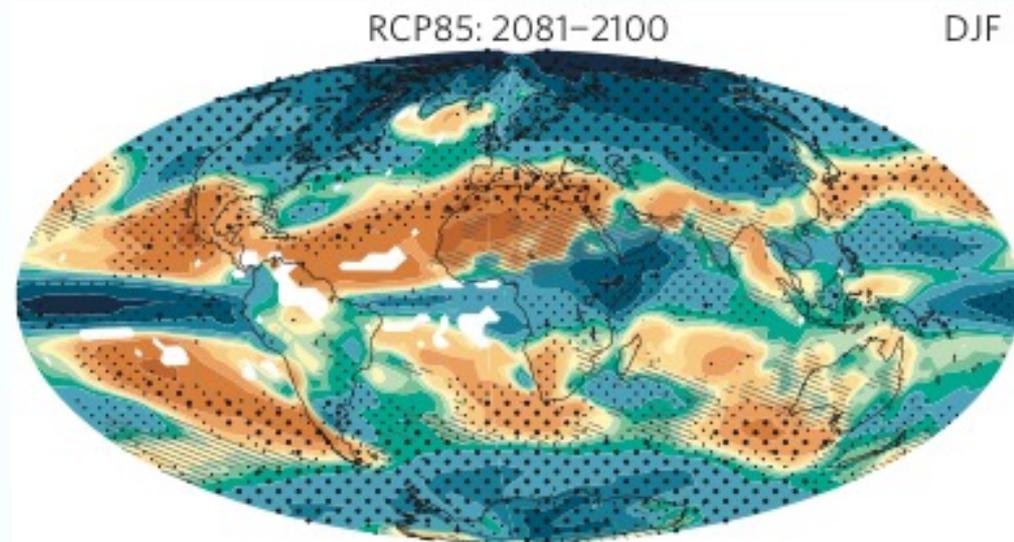


OBS

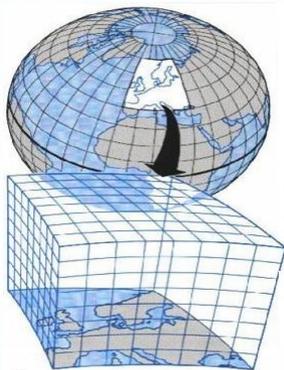


Projection de précipitations

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

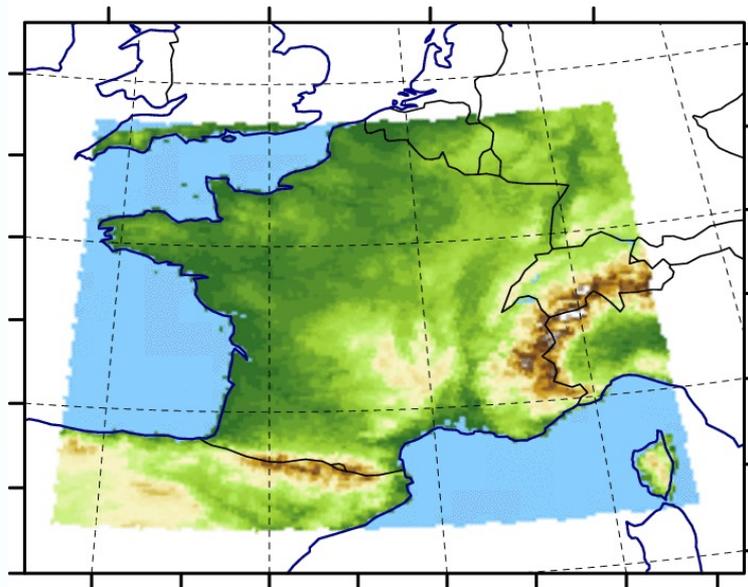


Regionalisation

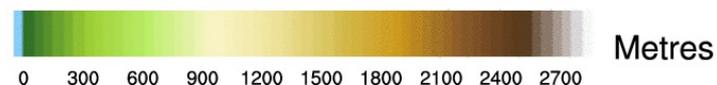
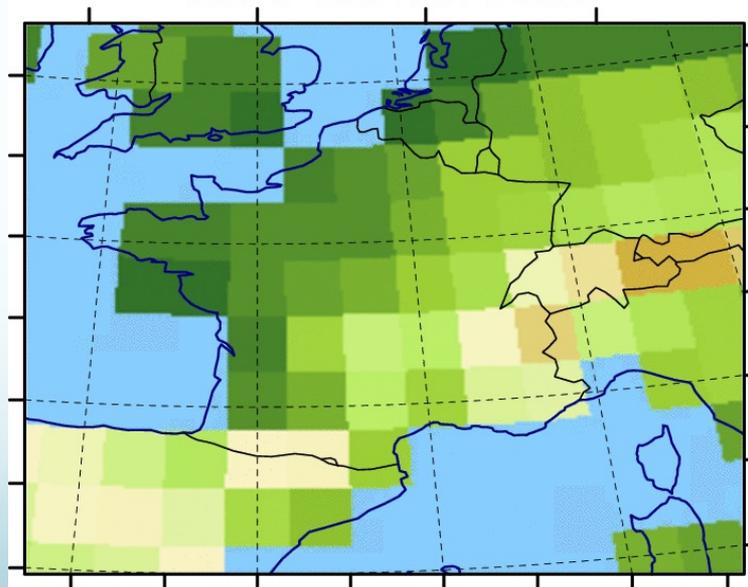


- Possibilité d'imbriquer les modèles les uns dans les autres
- Meilleure résolution du climat local (vent vallée du Rhone, événement cévenols, orages...)

CORDEX - ALADIN 12km



CMIP5 - ARPEGE 120km



Plan du cours

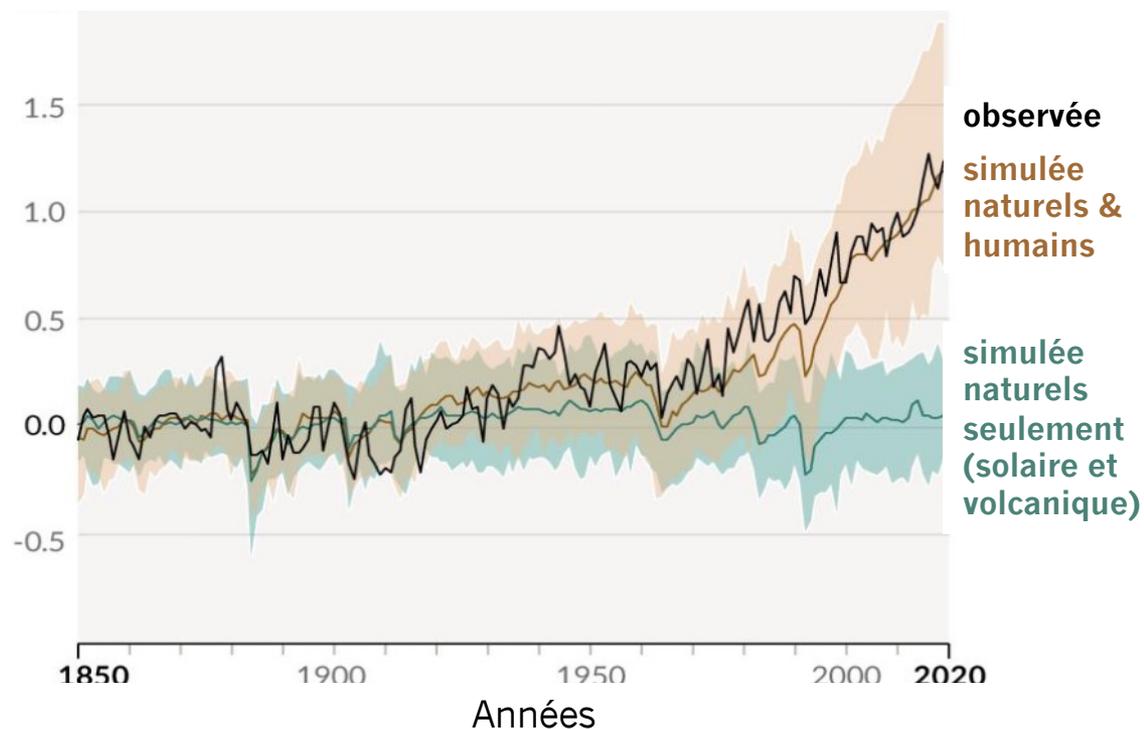
- Définition du climat
- Equilibre énergétique du système Terre
- Principaux modes de la variabilité climatique
- Qu'est ce qu'un modèle de climat ?
- Utilité des modèles de climat : quelques applications

Détection-attribution du changement climatique

Un réchauffement indiscutablement anthropique

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

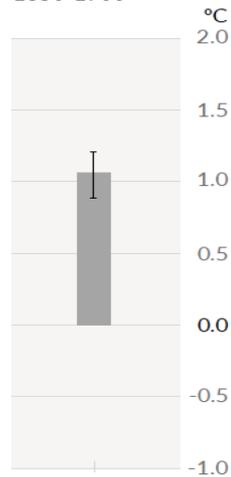
Changement de température globale observée et simulée avec les forçages **naturels & humains** ou **seulement naturels**



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

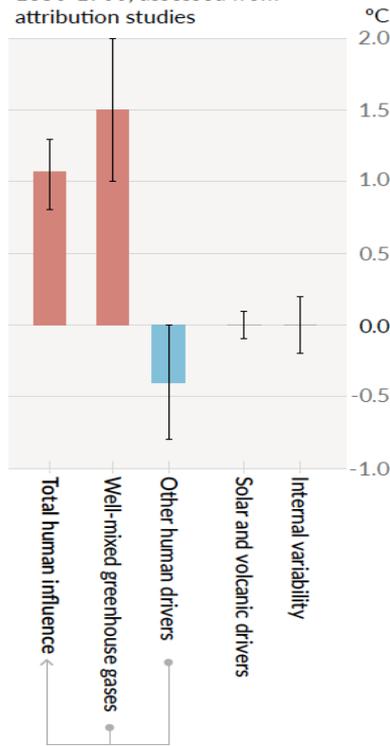
Observed warming

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

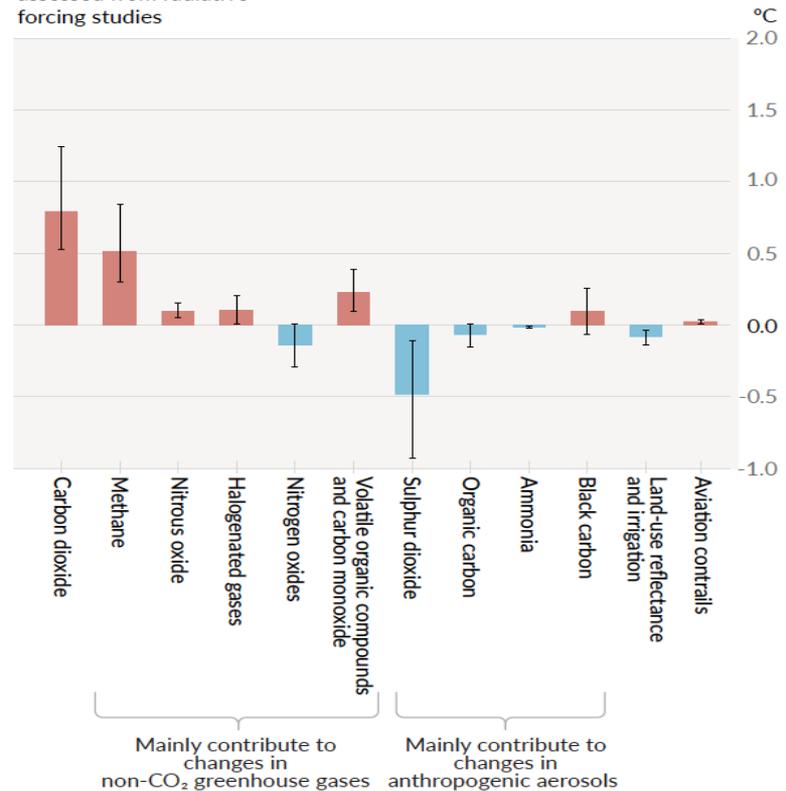


Contributions to warming based on two complementary approaches

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

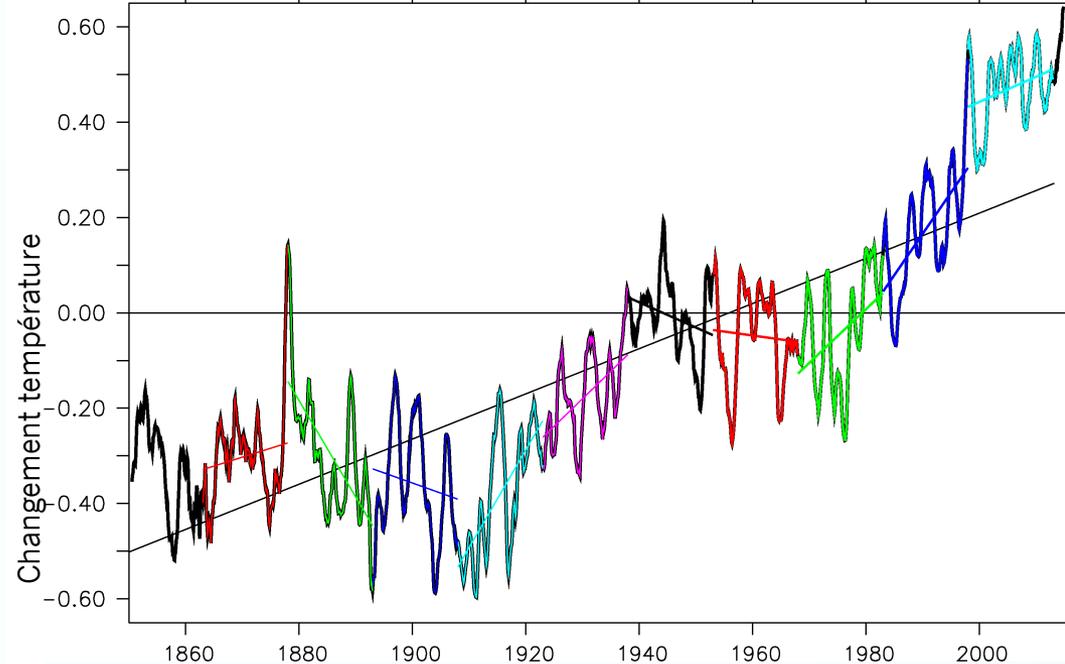


Un plateau de température ?

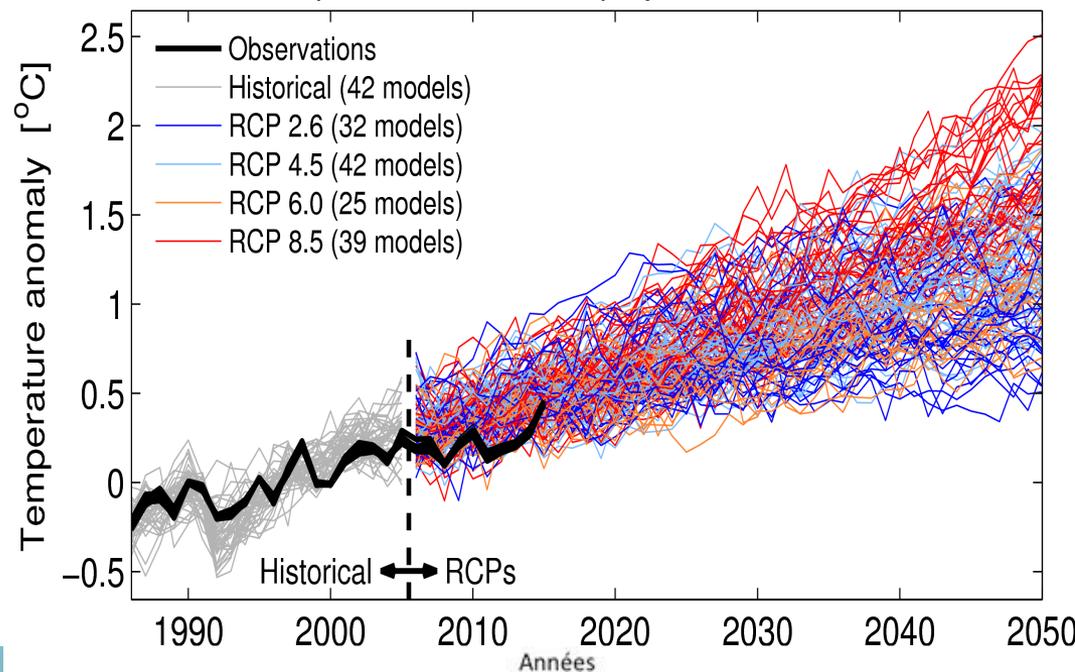
- Un réchauffement moindre pendant 15 ans
- Les modèles semblent presque sur-estimer le réchauffement:
 - Un passage transitoire ?
 - Une erreur dans la sensibilité climatique modèle ?



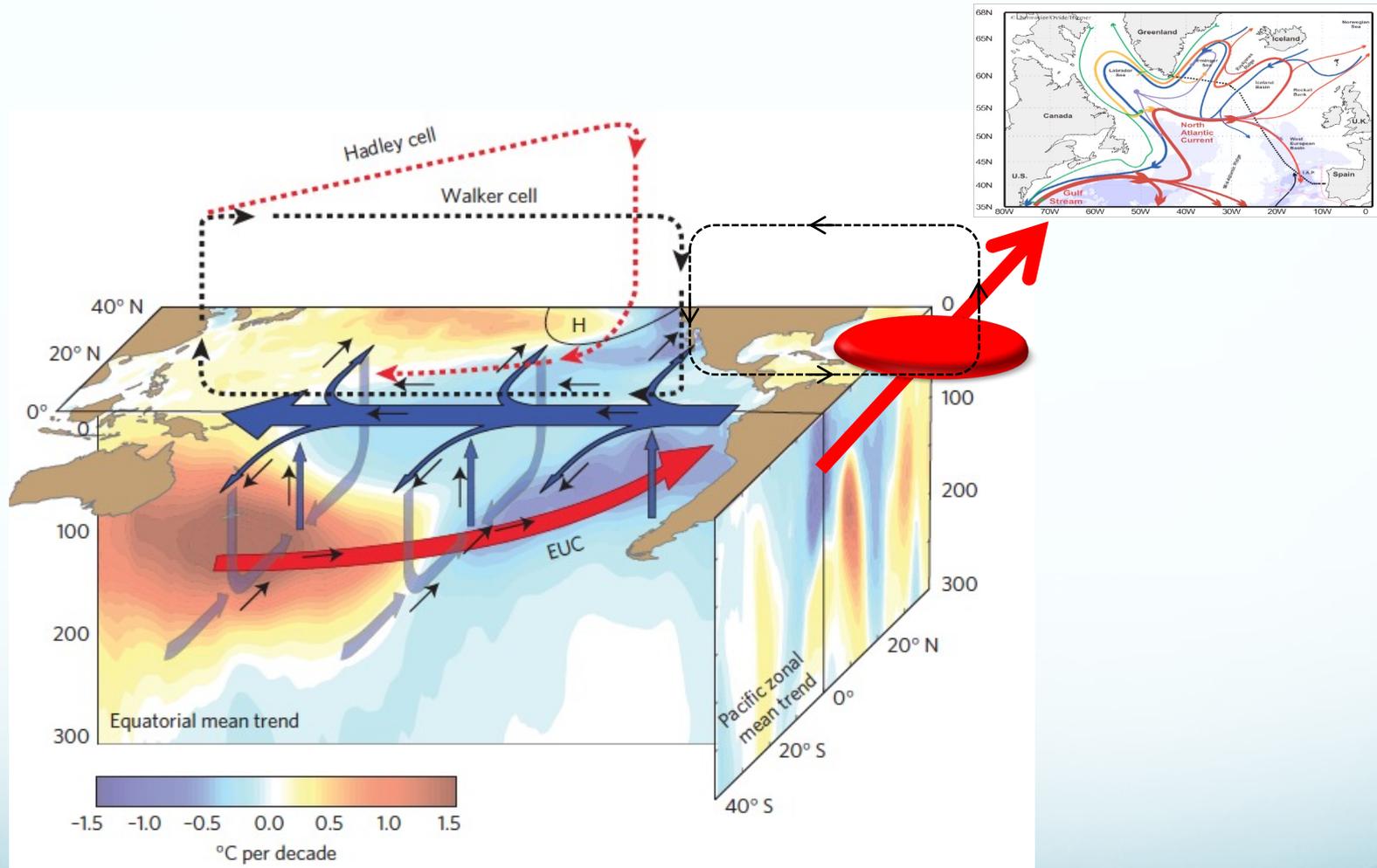
**Le climat
a cessé de
se
réchauffer**



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



Explication du hiatus? Qui mène la danse



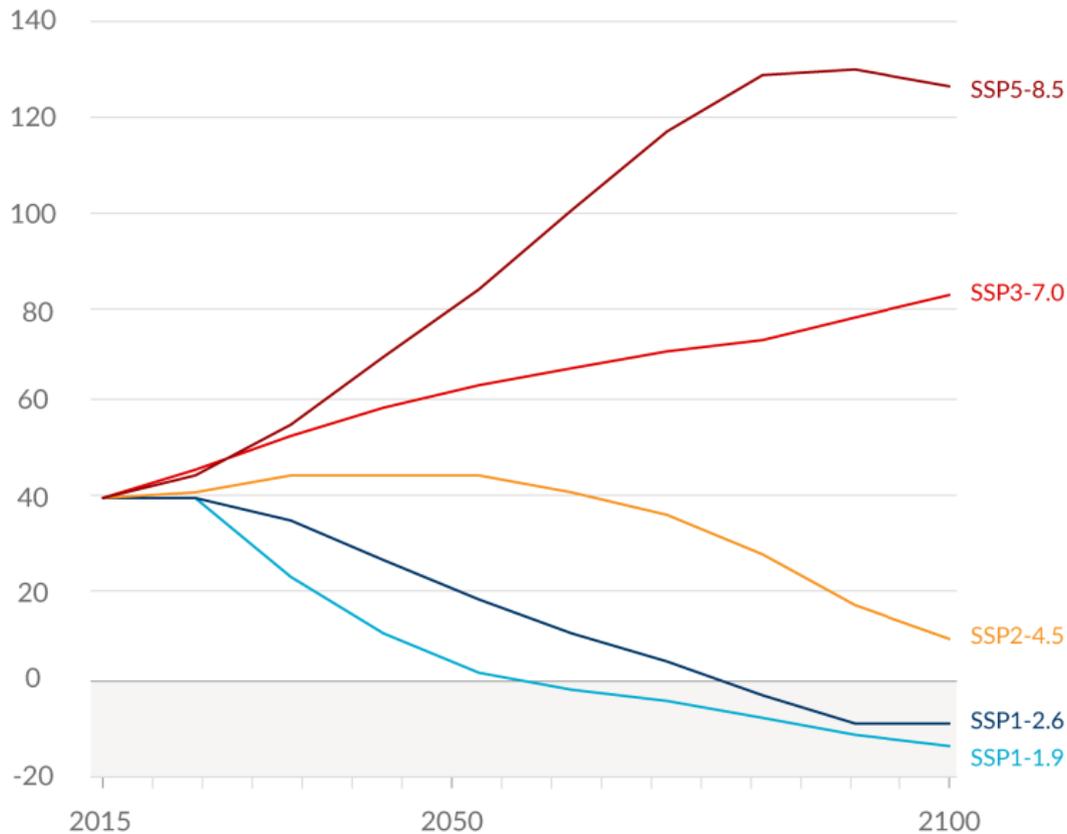
Projections climatiques

Des narratifs socio-économiques systémiques

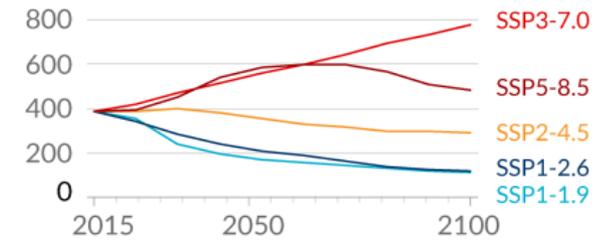
Scenarior	Narratif
SSP1 Développement durable	Fort coopération internationale, priorité donnée au développement durable, amélioration des conditions de vie et préférences des consommateurs pour des biens et services respectueux de l'environnement, peu intensifs en ressources et en énergie. basses
SSP2 Poursuite des tendances	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.
SSP3 Rivalités régionales	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.
SSP5 Développement conventionnel	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 CO₂ et autres gaz clefs

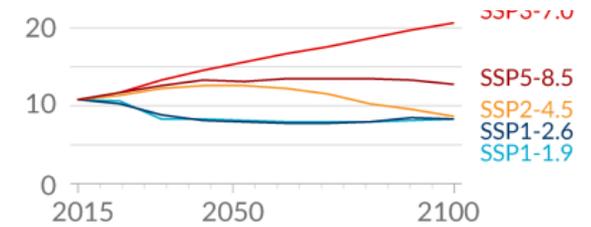
c: Dioxyde de carbone (GtCO₂/an)



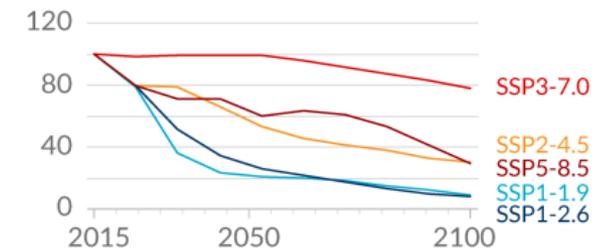
Méthane (GtCH₄/an)



Protoxyde d'azote (GtN₂O/an)

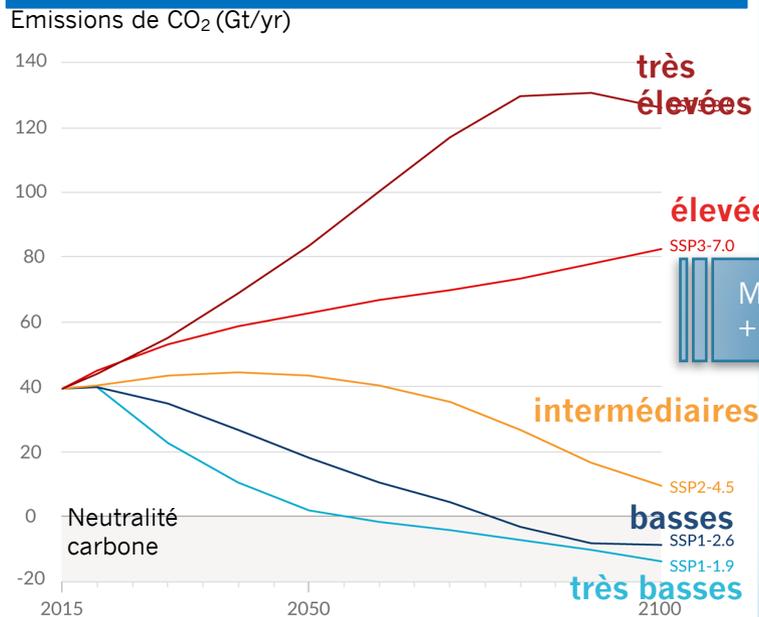


Pollution liée aux aérosols (MtSO₂/an)

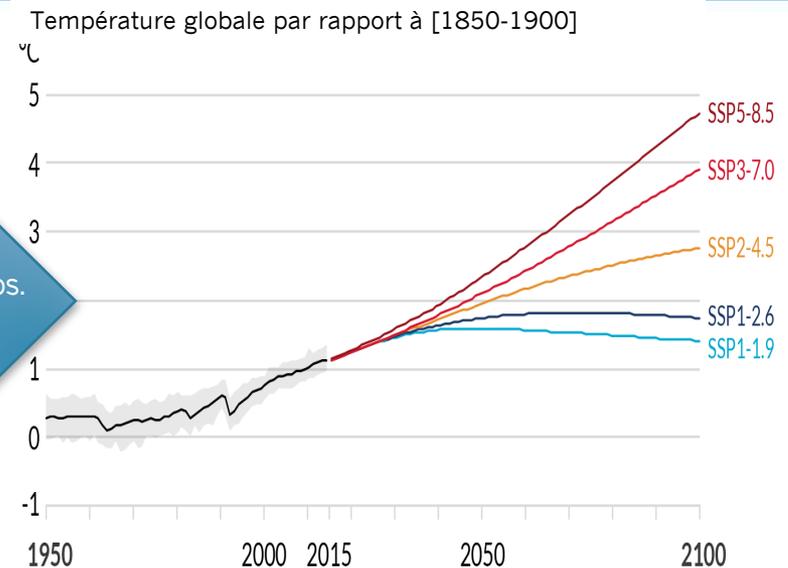


Des narratifs socio-économiques systemiques *traduits* (1) en émission de gaz à effet de serre & usage des sols puis (2) en projections climatiques

(1) Sélection de 5 scénarios illustratifs contrastés

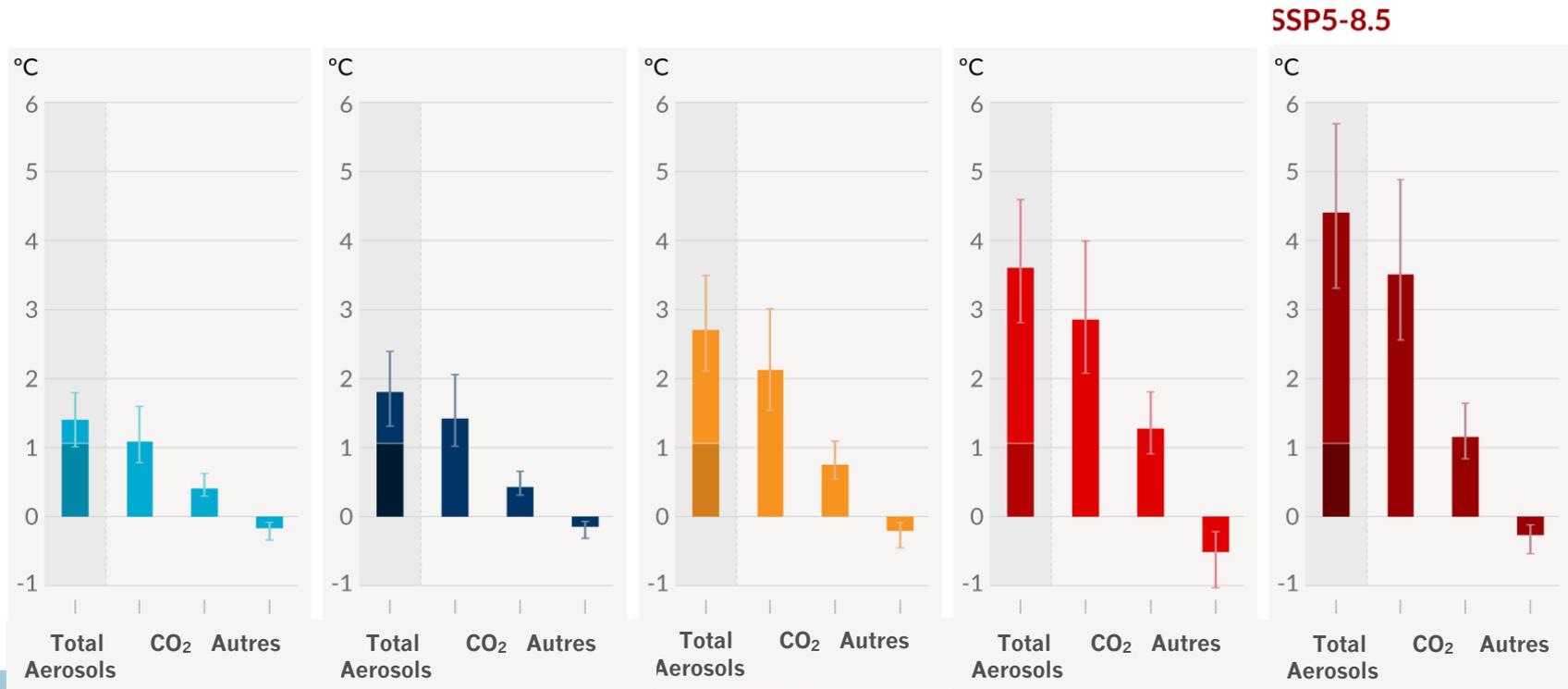


(2) Réchauffement global en fonction des 5 scénarios illustratifs



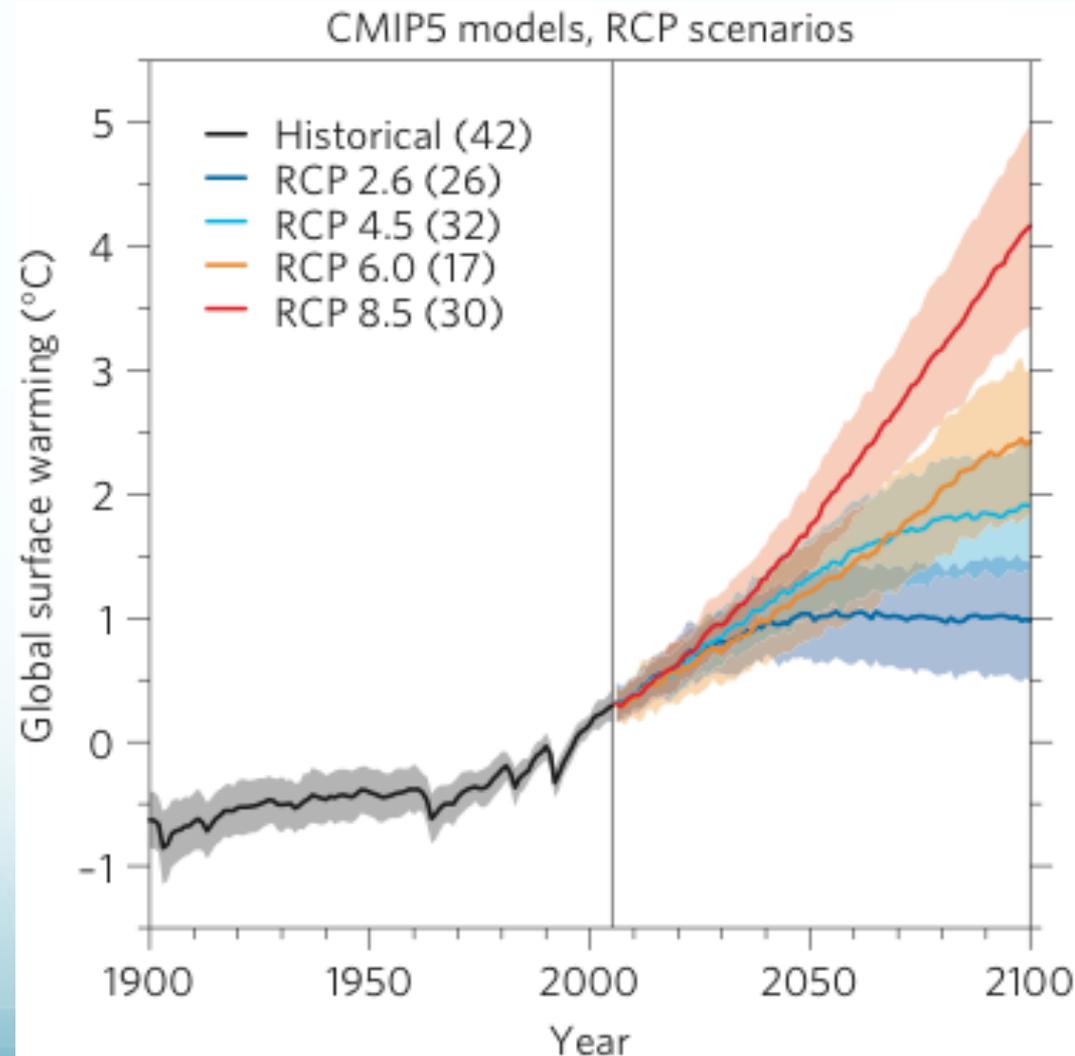
Les impacts des émissions futures sont dominés par le CO₂

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

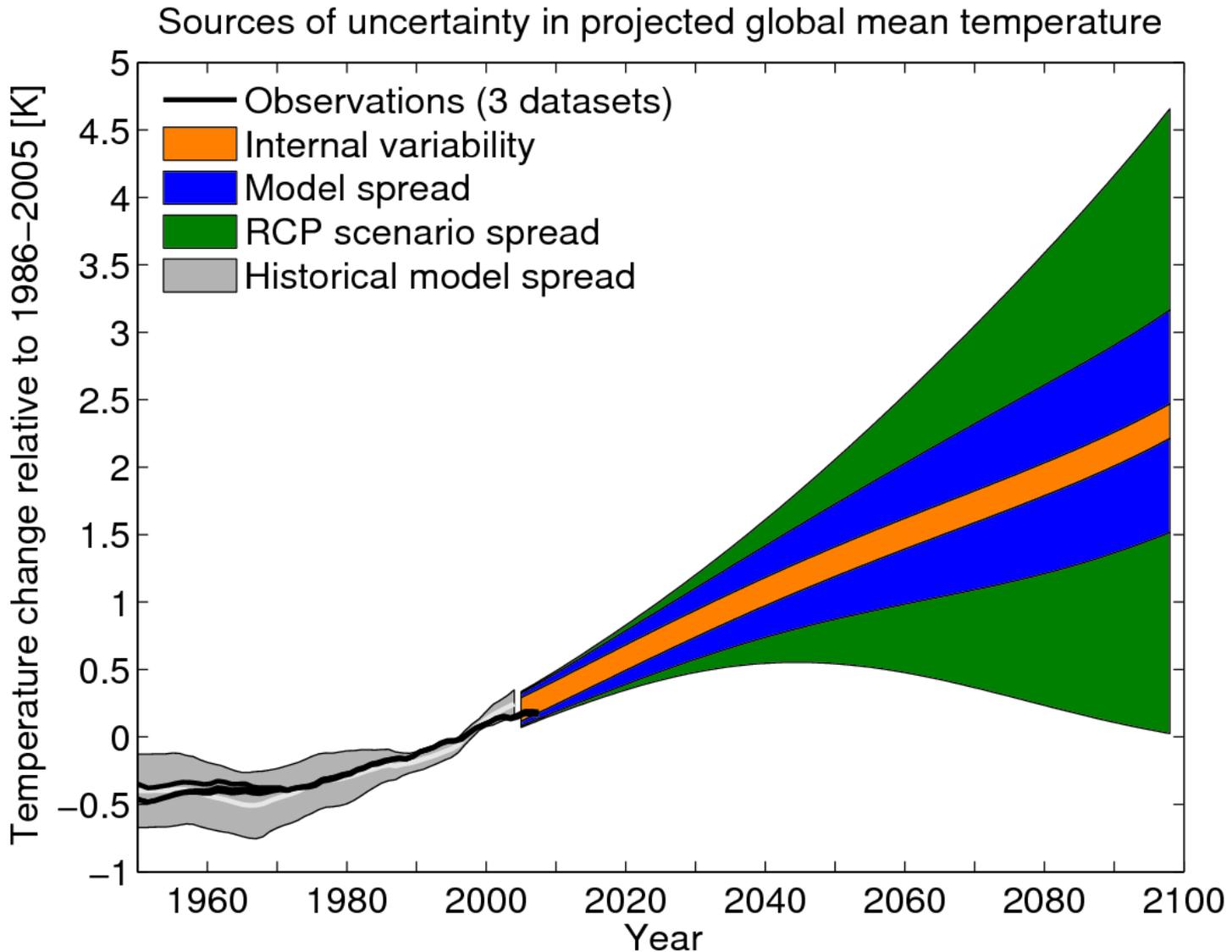


Projections climatiques

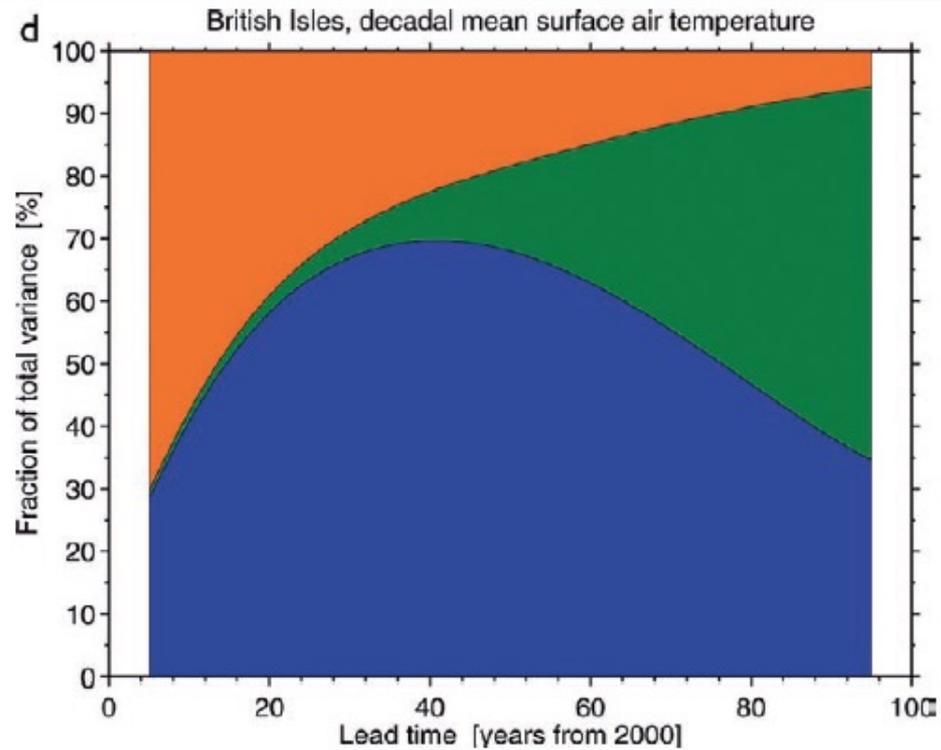
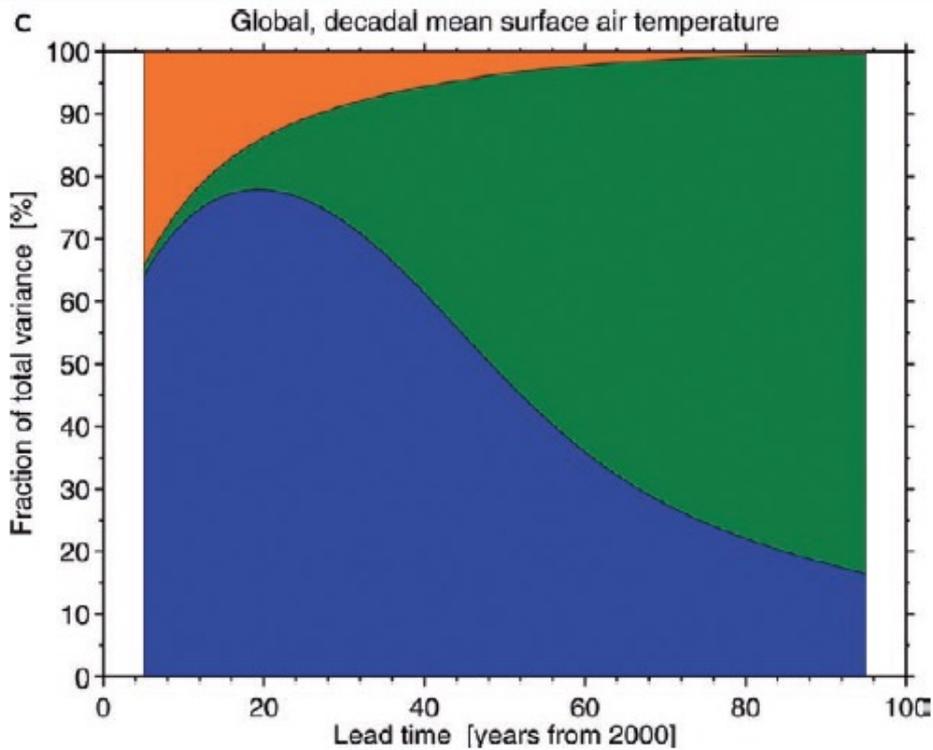
- Des dizaines de modèles développés de par le monde
- Deux en France (Paris et Toulouse)
- Projettent un réchauffement entre 1 et 4°C en 2100 selon nos émissions



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 !

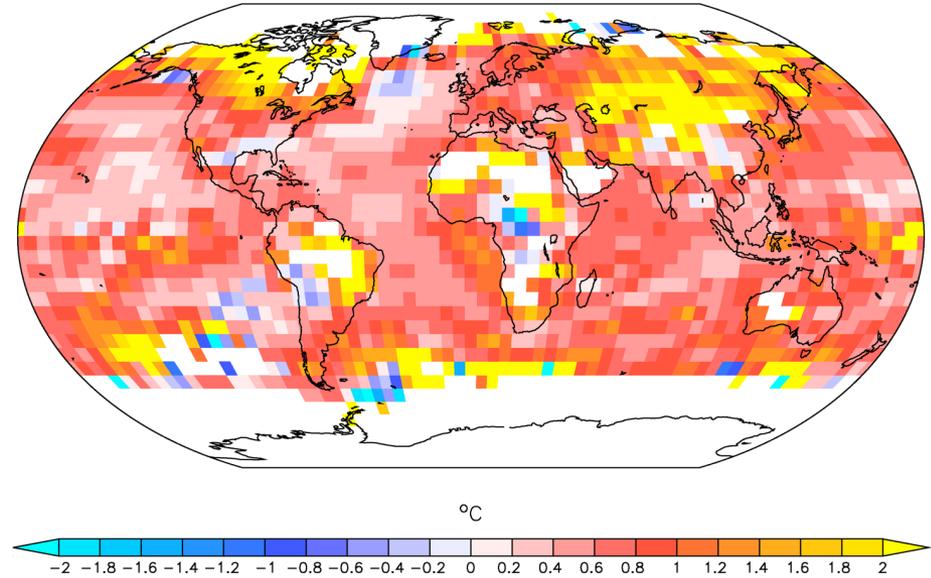
Merci !



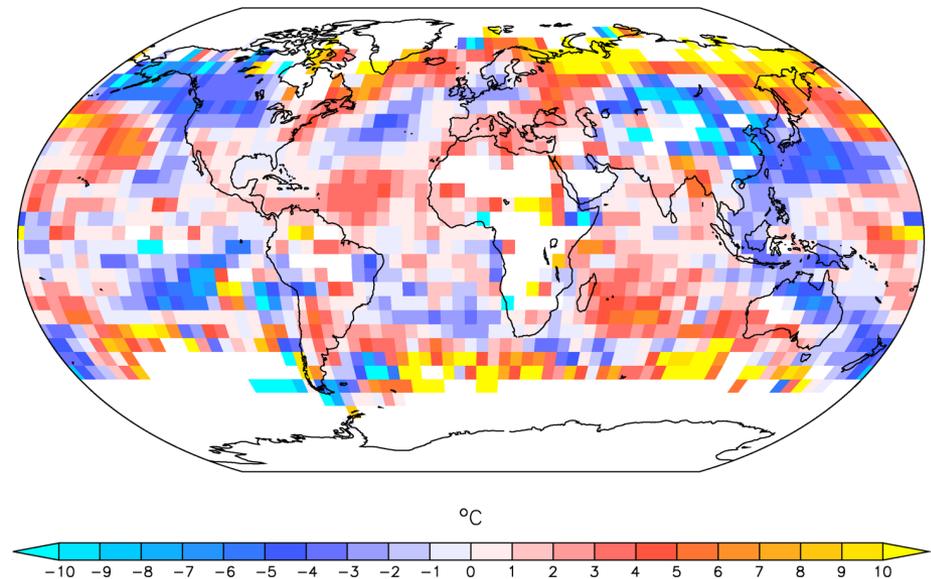
Un plateau de température ?

- 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

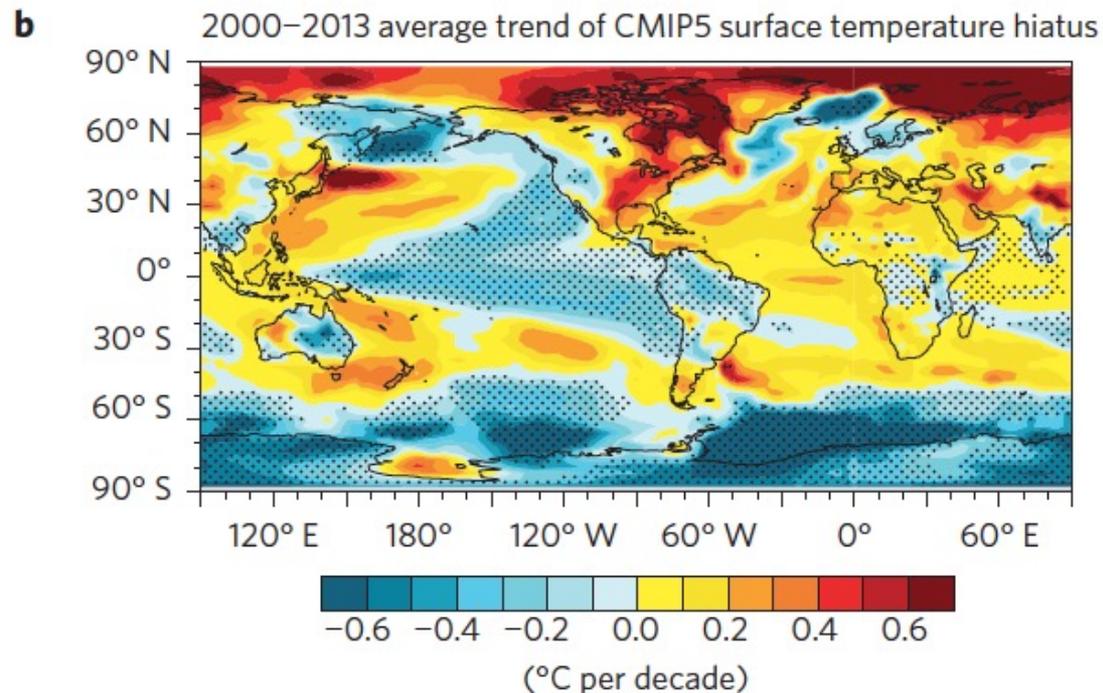
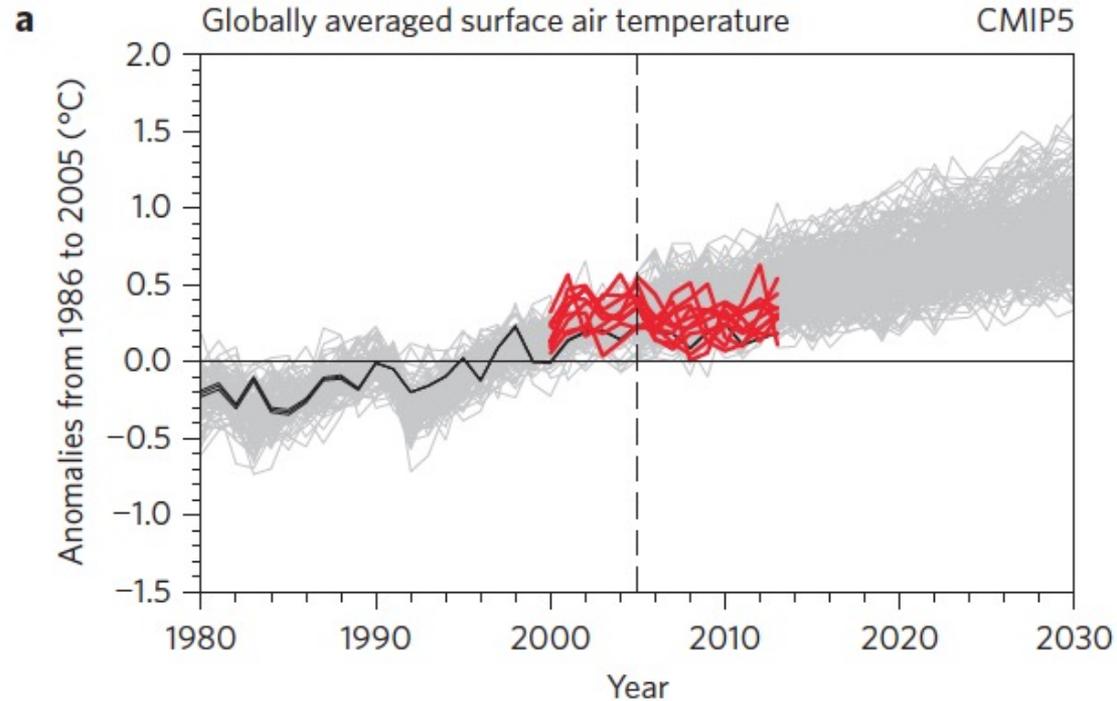


Tendance 1998-2012



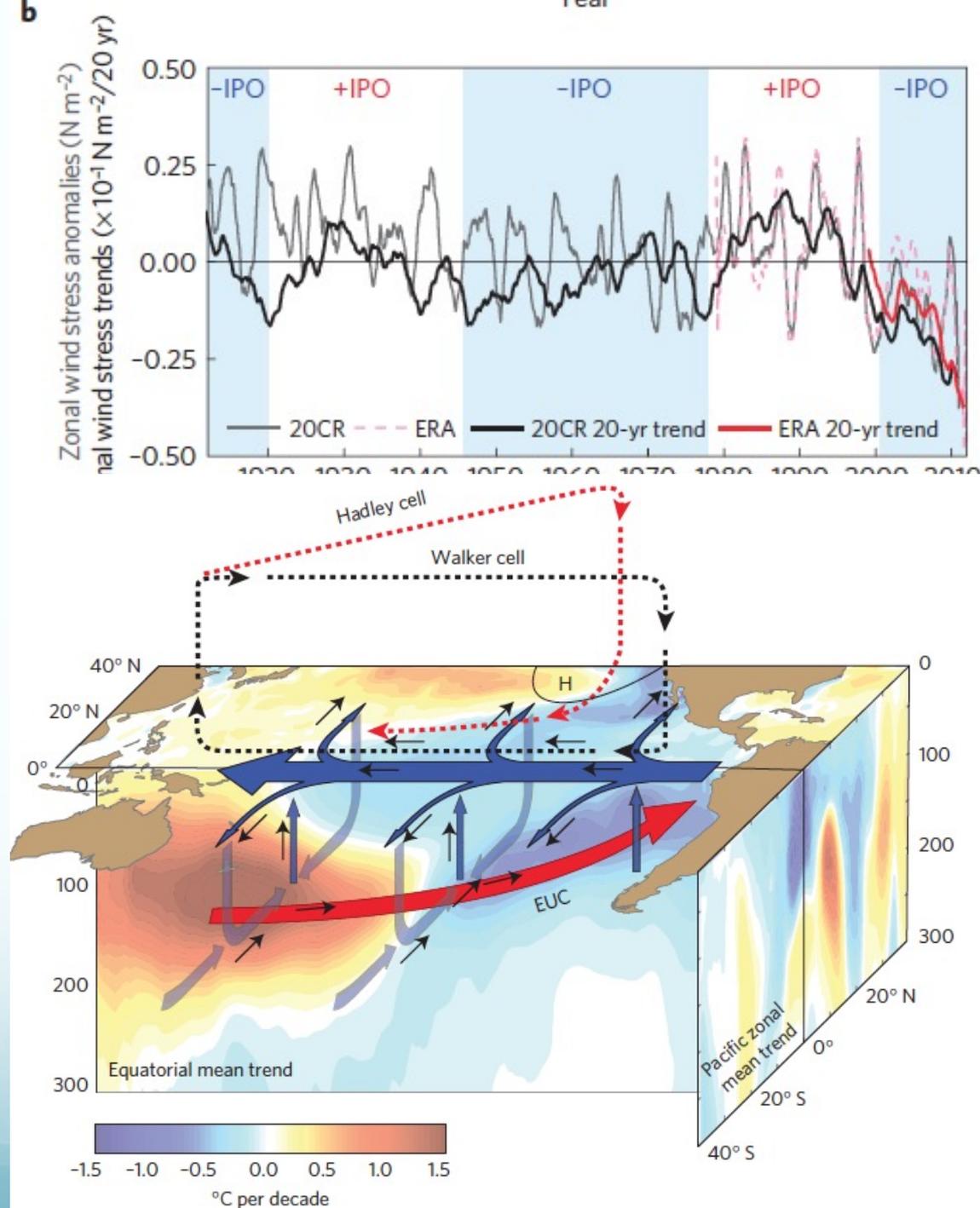
Hiatus & Modèles

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



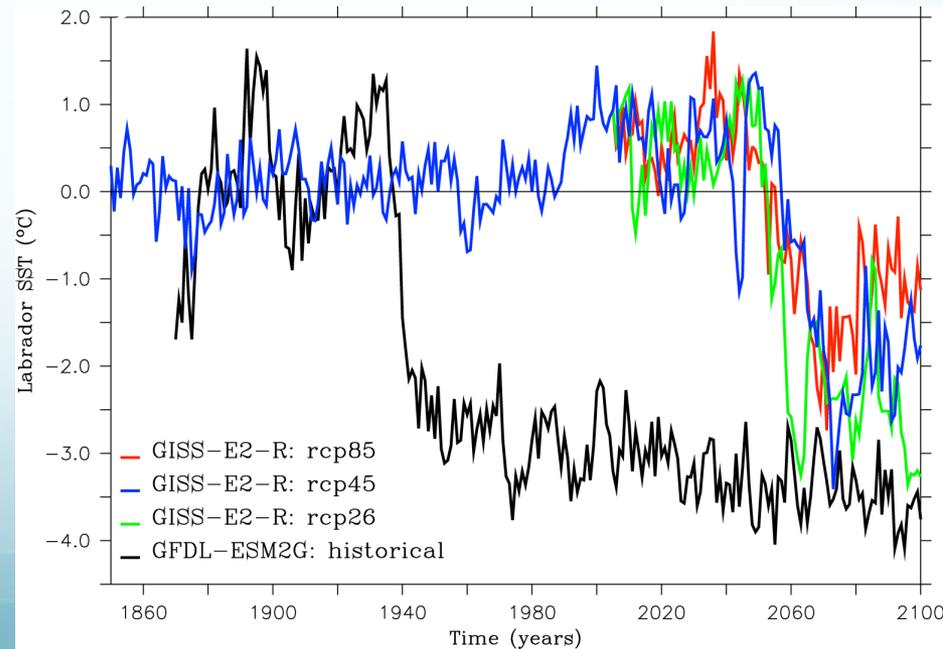
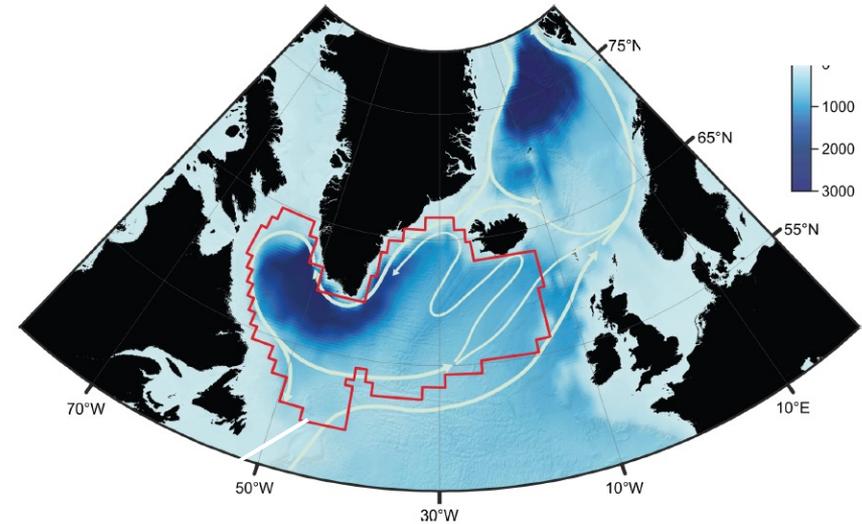
Explication du hiatus?

- 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^e siècle (2015-2100).

