

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

- 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

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

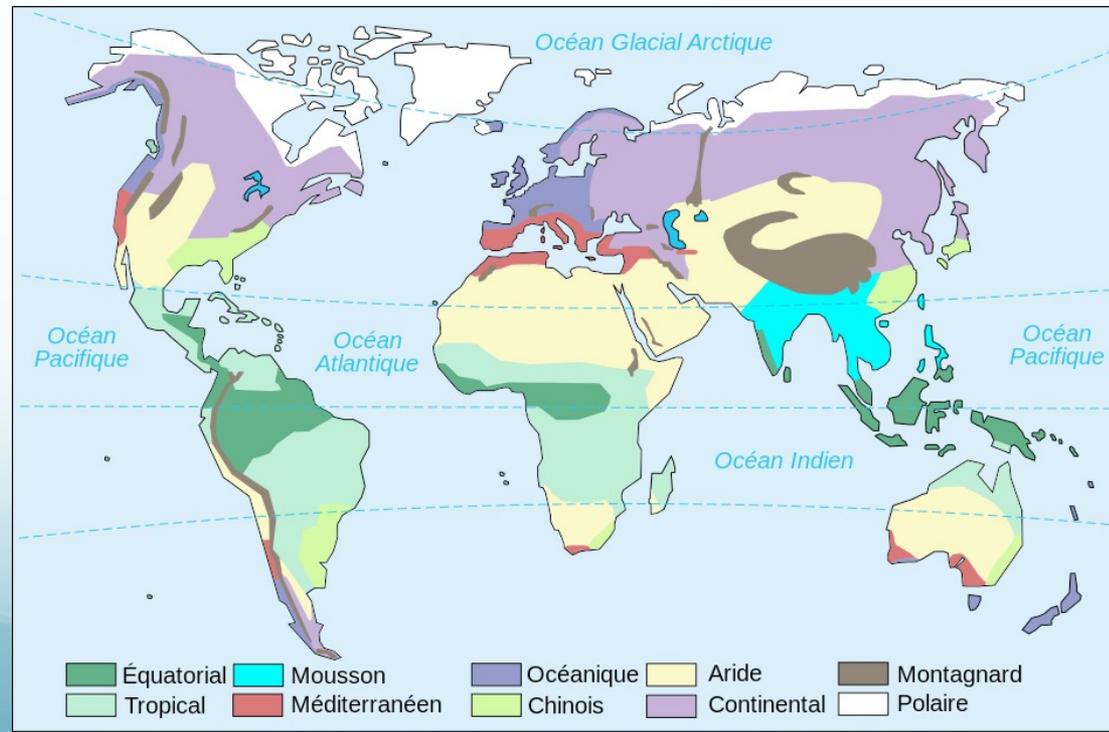
- Larousse : Ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un lieu donné.
- Wikipédia : Le climat est la distribution statistique des conditions de l'atmosphère terrestre dans une région donnée pendant une période donnée. Il se distingue de la météorologie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

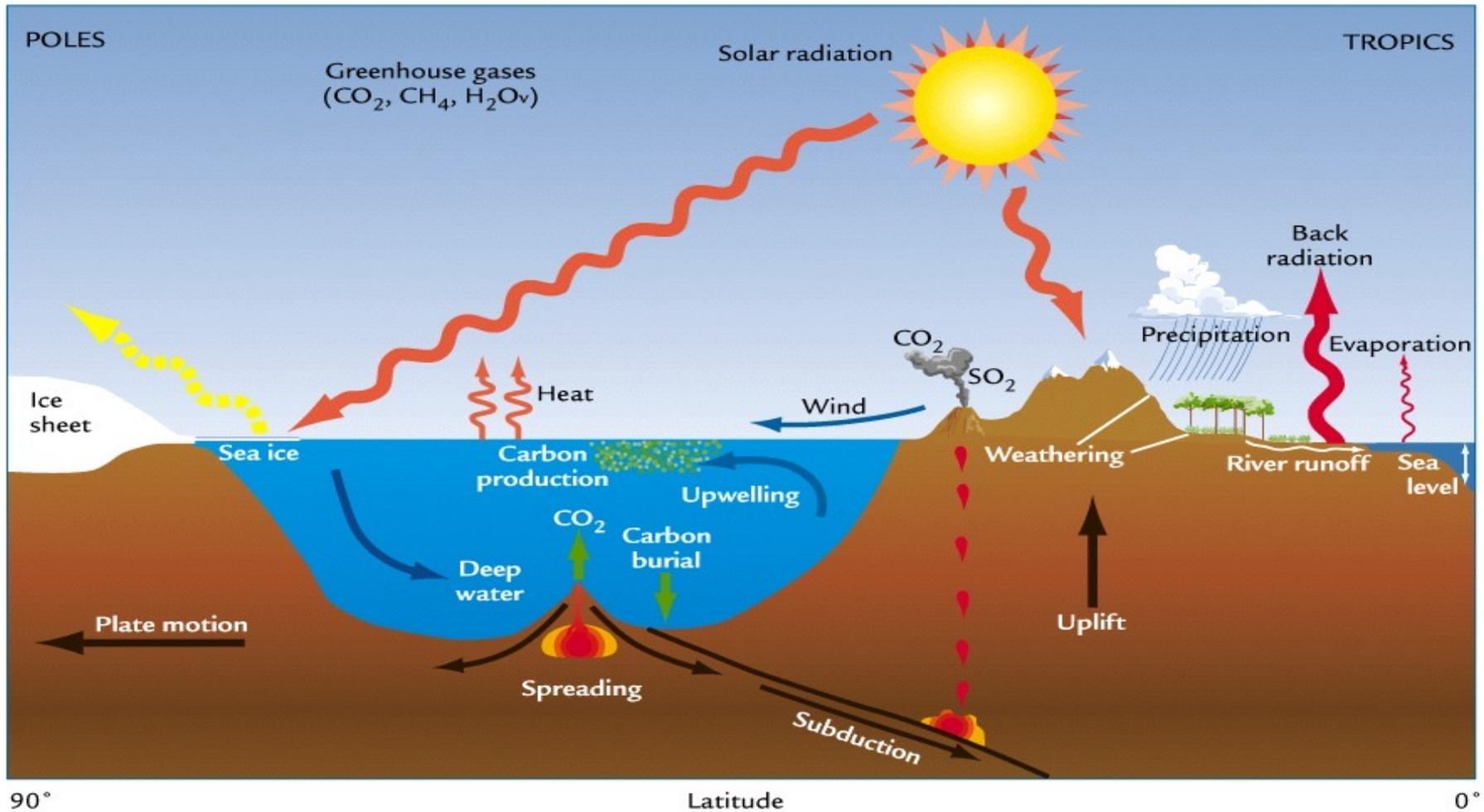


Définition du climat

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

Notion de système climatique

Besoin de connaissance pluri-disciplinaire !

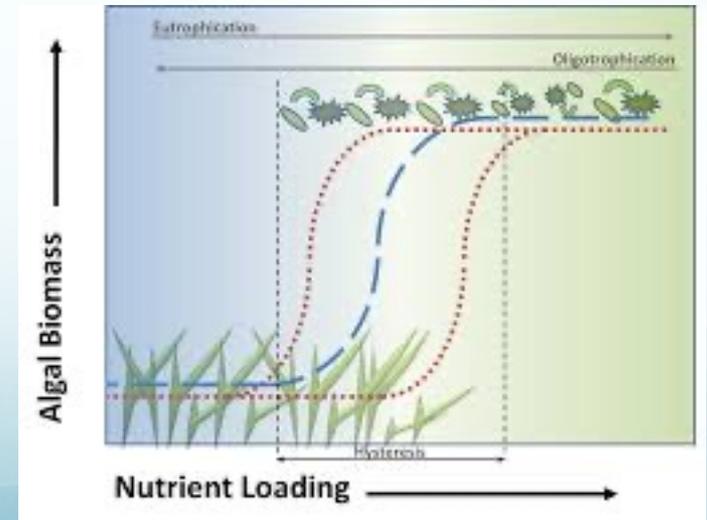


Notion de système climatique

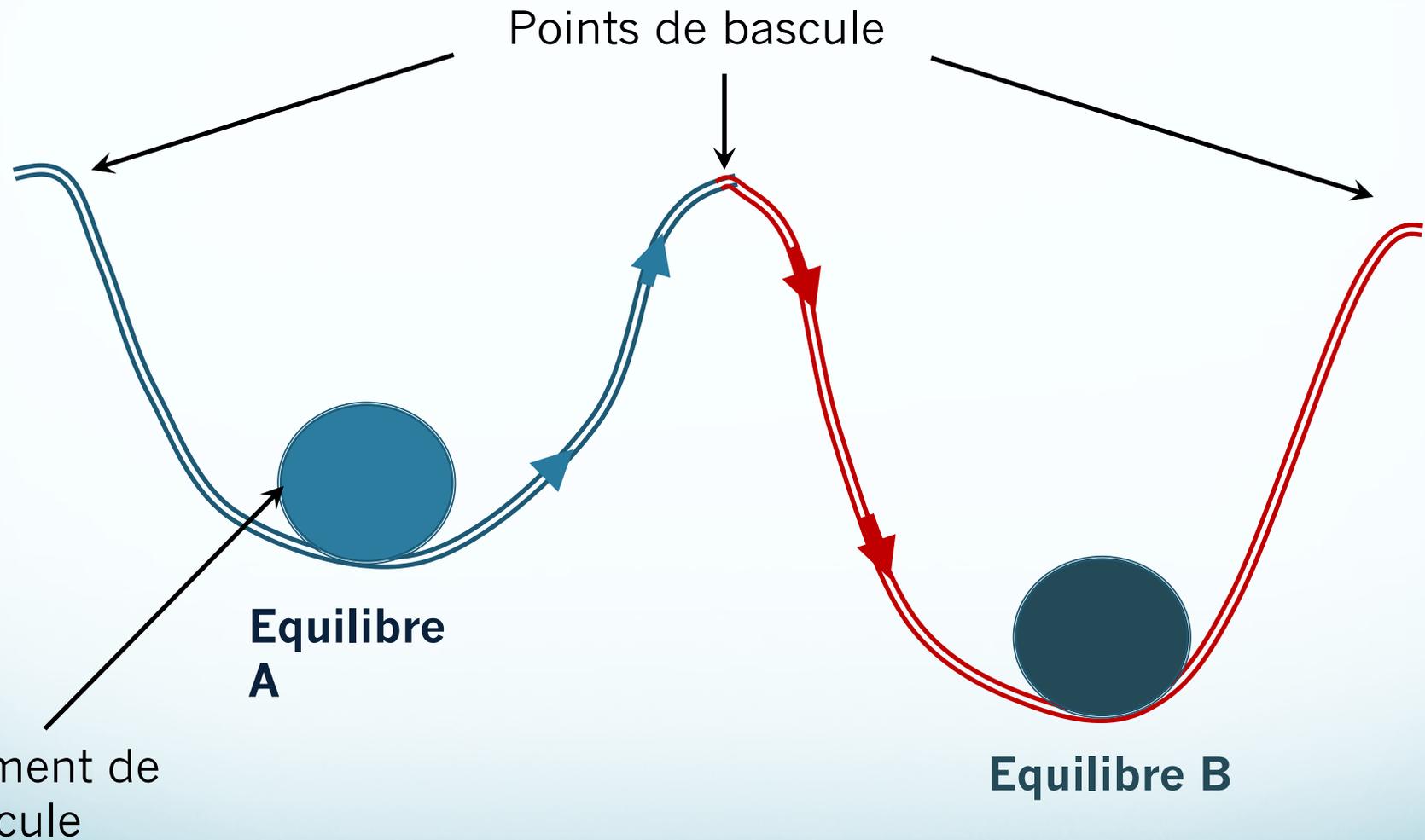
- Par analogie à un **système physique**, on définit le **système climatique** comme constitué de plusieurs composantes (atmosphère, l'océan, banquise, surfaces continentales, végétation, calottes glaciaires...) et leurs interactions.
- Il s'agit d'un **système ouvert**, qui échange en permanence de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

Exemples de systèmes dynamiques

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



Qu'est ce qu'un point de bascule ?



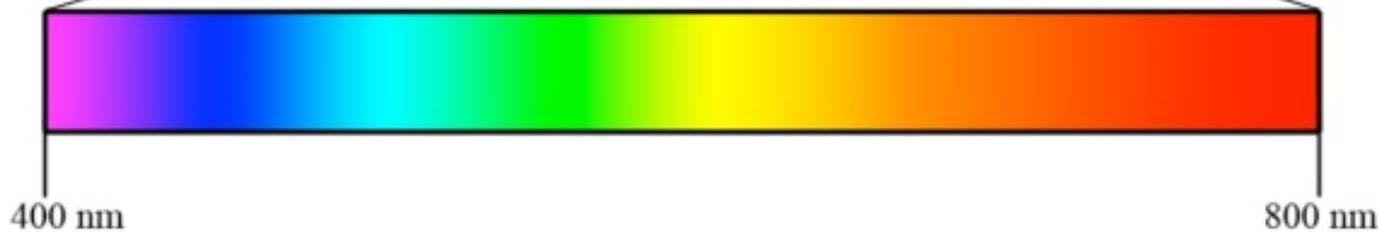
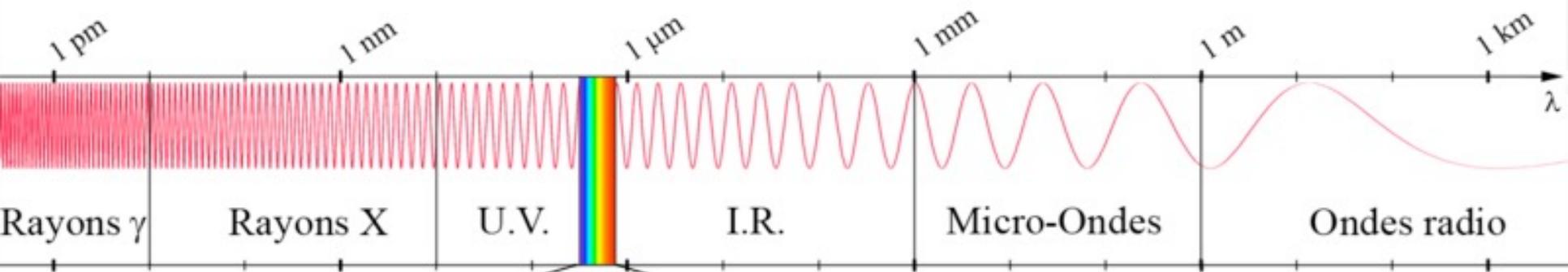
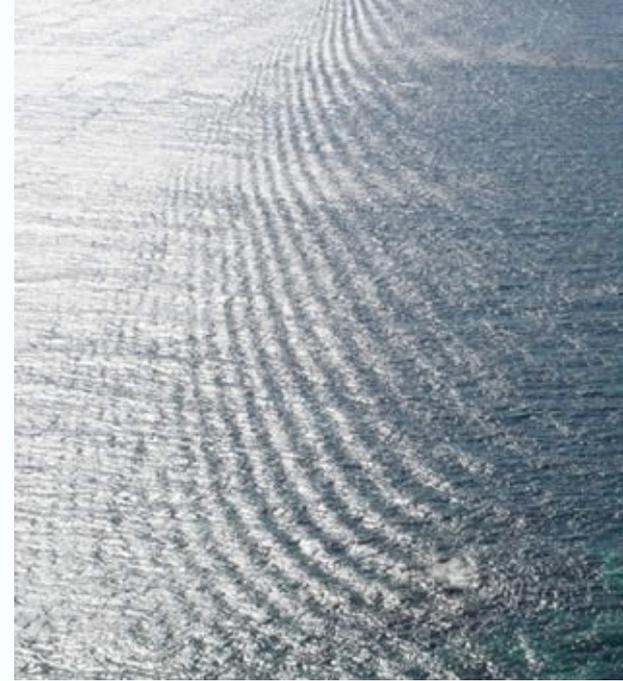
Lenton et al. (2008) : Le terme “**point de bascule**” se réfère à un seuil critique au delà duquel une petite perturbation peut modifier qualitativement l’état d’un système.

Plan du cours

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

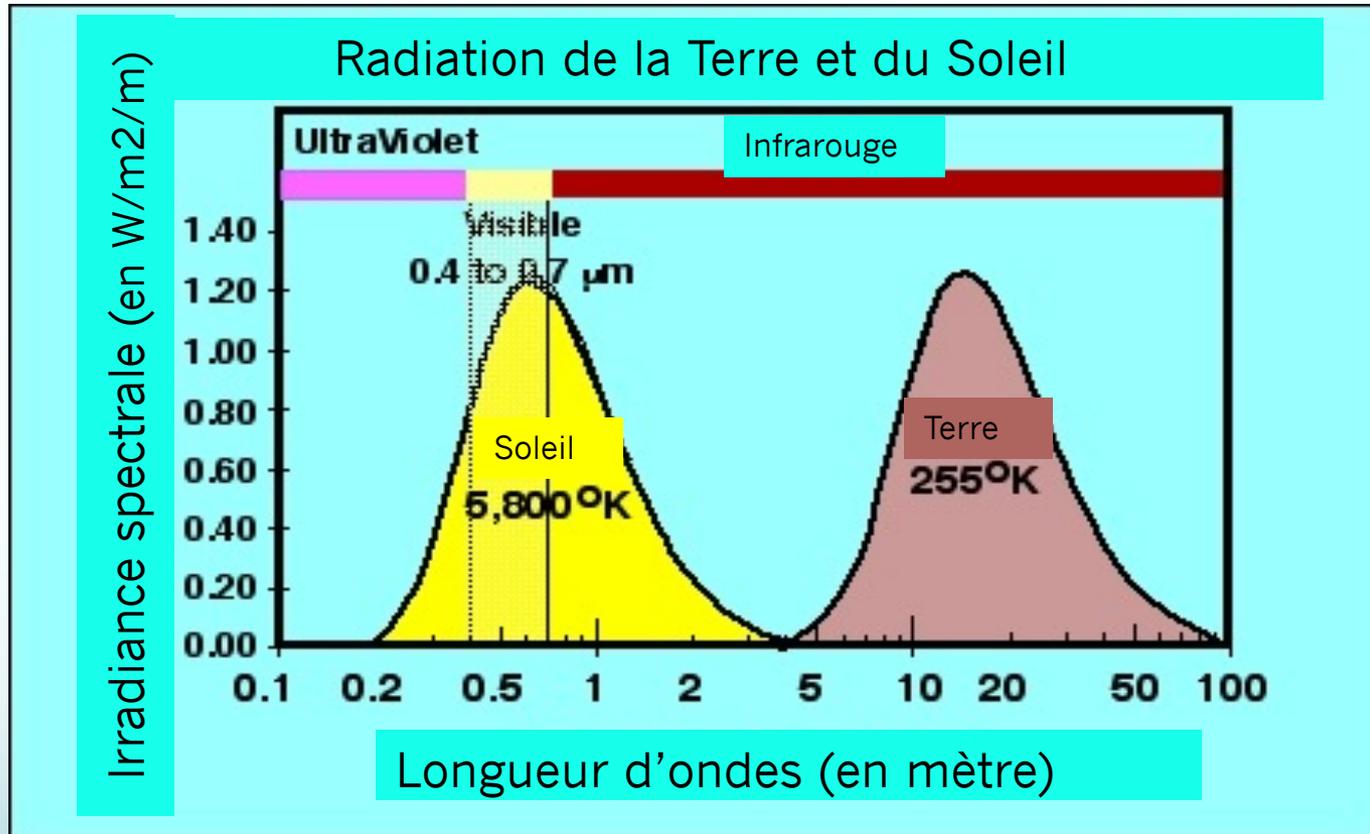
Ondes et rayonnement électromagnétiques

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



Equilibre radiatif de la Terre

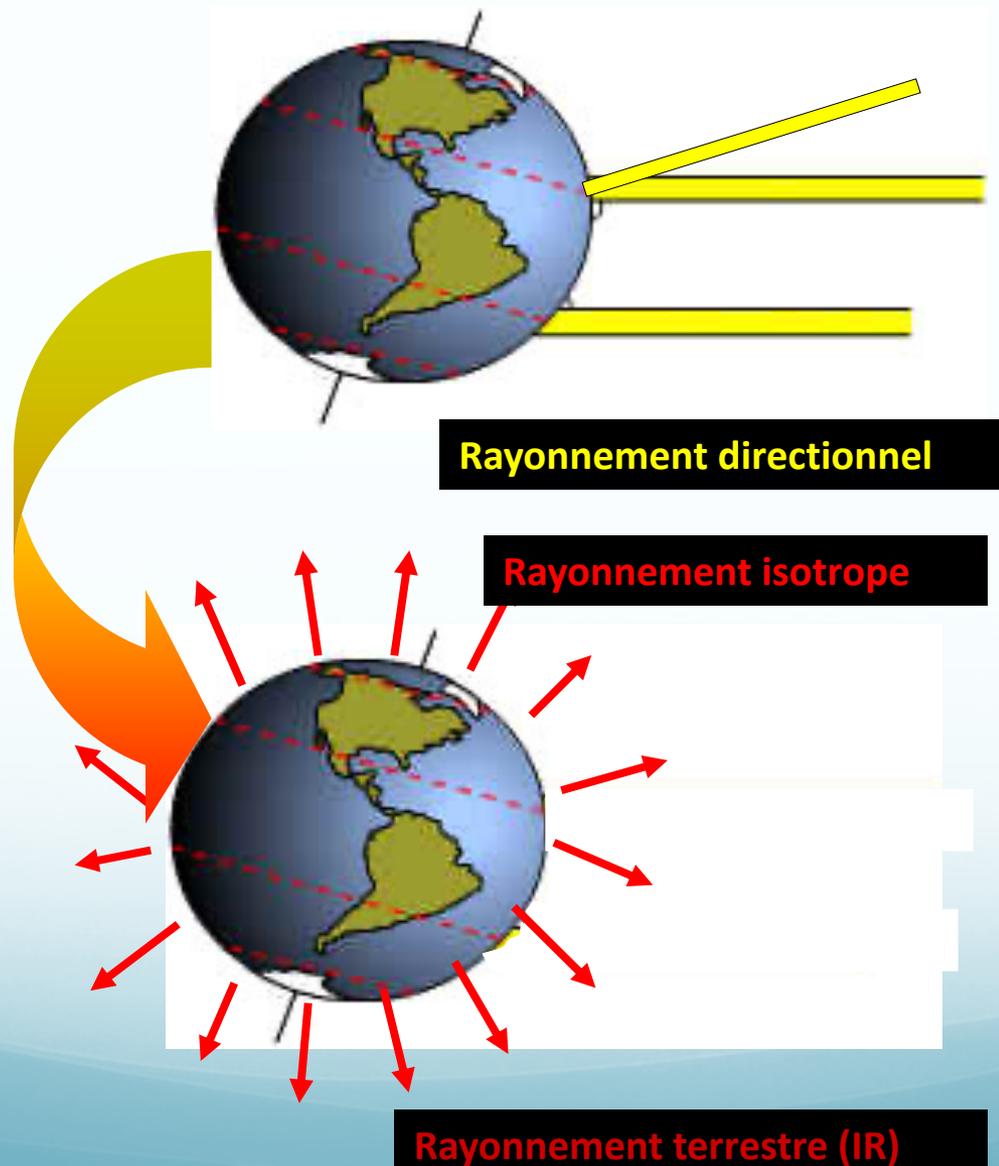
Loi de **Planck** stipule que la distribution de luminance énergétique spectrale du rayonnement thermique du corps noir est fonction de sa température



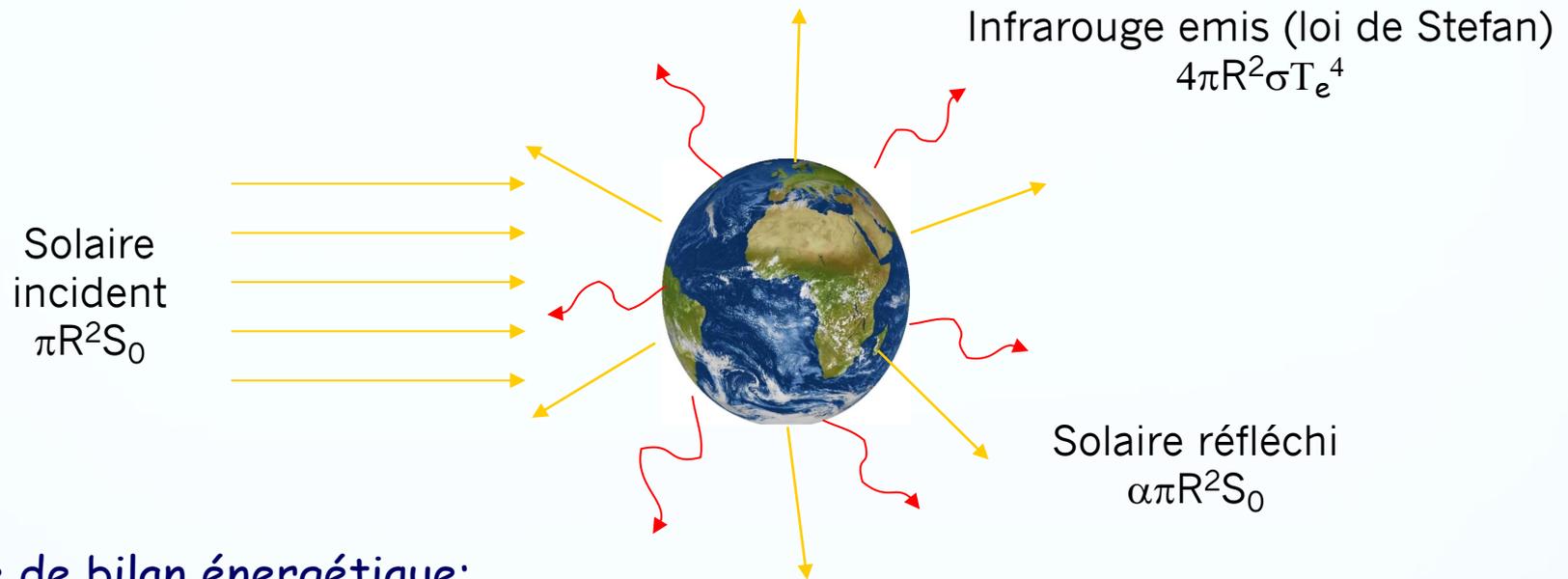
Loi de **Stefan-Boltzmann** stipule le flux d'énergie émis par un corps noir est lié à sa température à la puissance 4.

$$F = \sigma T^4$$

Equilibre radiatif de la Terre



Un modèle simple de Terre



Modèle de bilan énergétique:

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

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

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

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

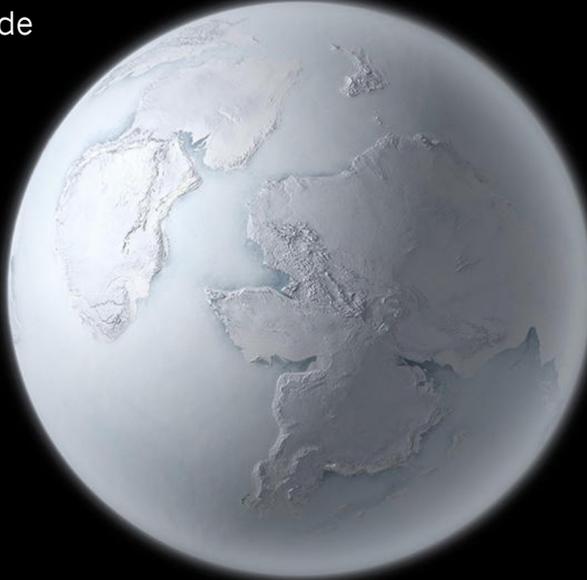
→ $T_e = 255\text{K}$

Effet de serre:

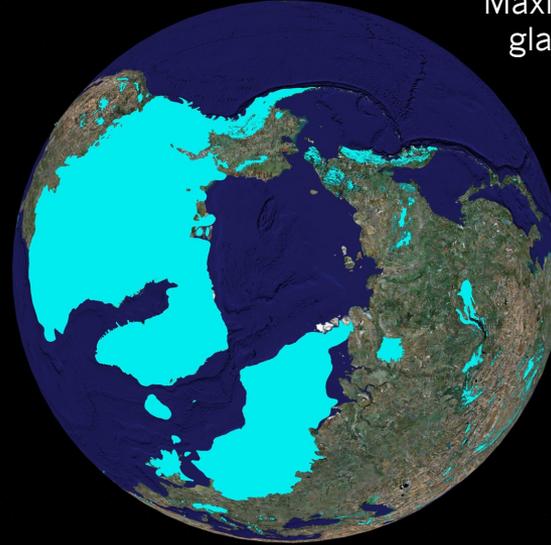
$T_s = 288\text{K}$

Plusieurs états stables du climat planétaire

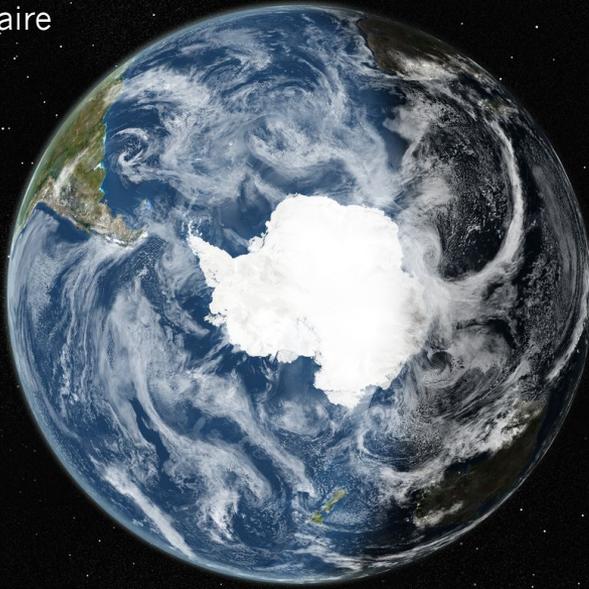
Boule de neige



Maximum glaciaire



Interglaciaire



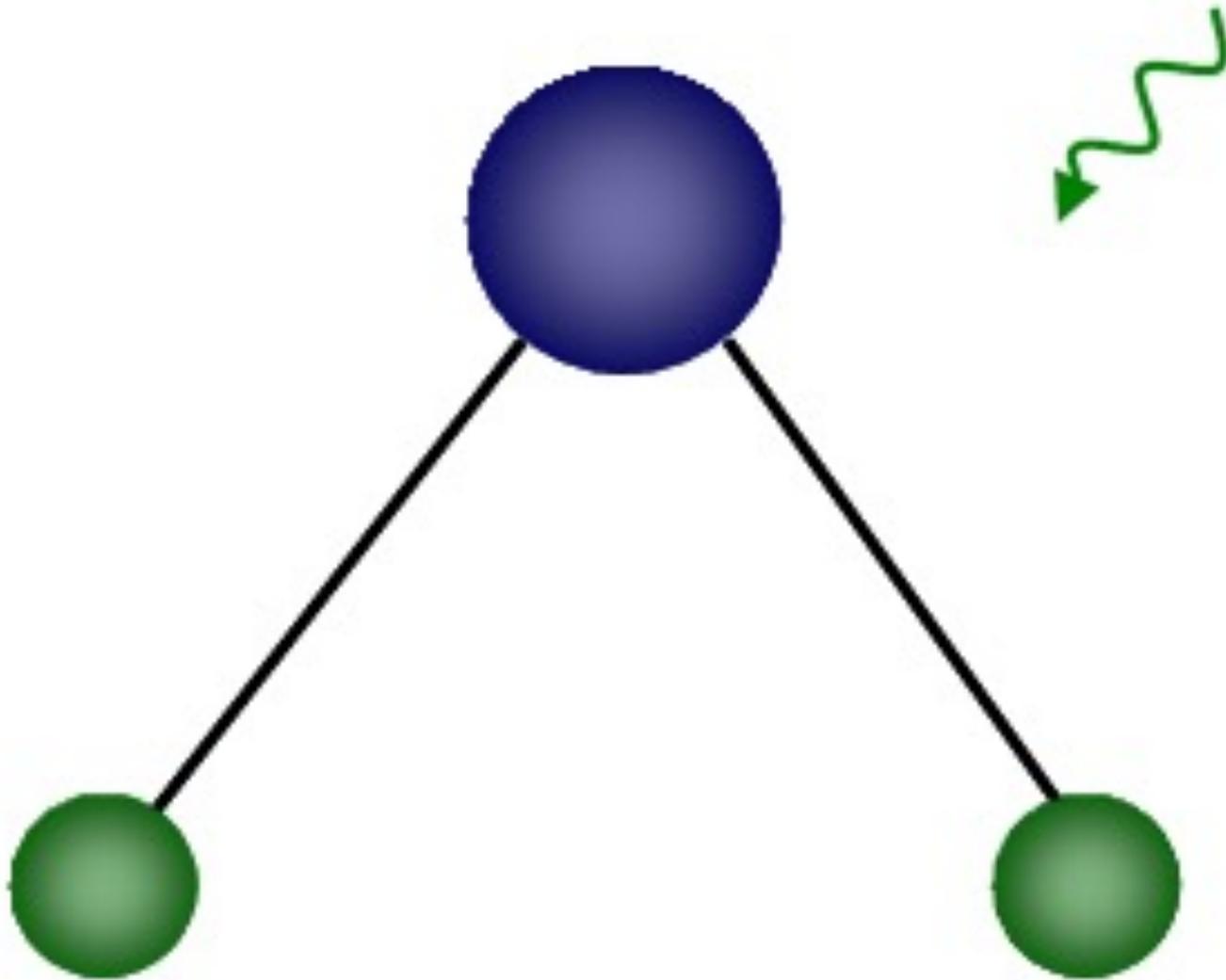
Sans cryosphère



Histoire de l'effet de serre

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

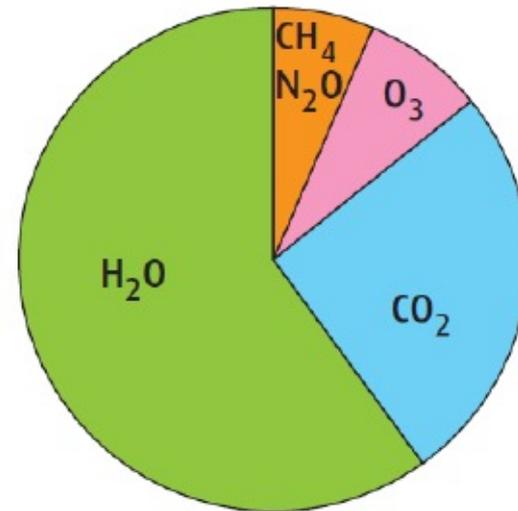
Principe de l'effet de serre



Principaux gaz à effet de serre

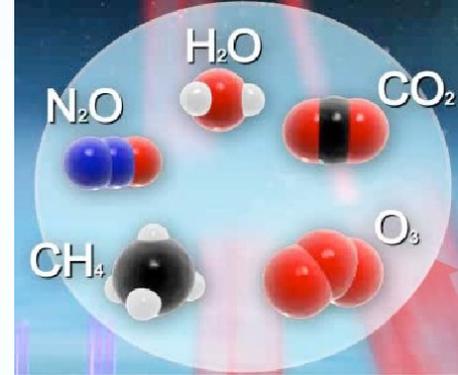
Effet de serre ciel clair

	(W.m ⁻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 %

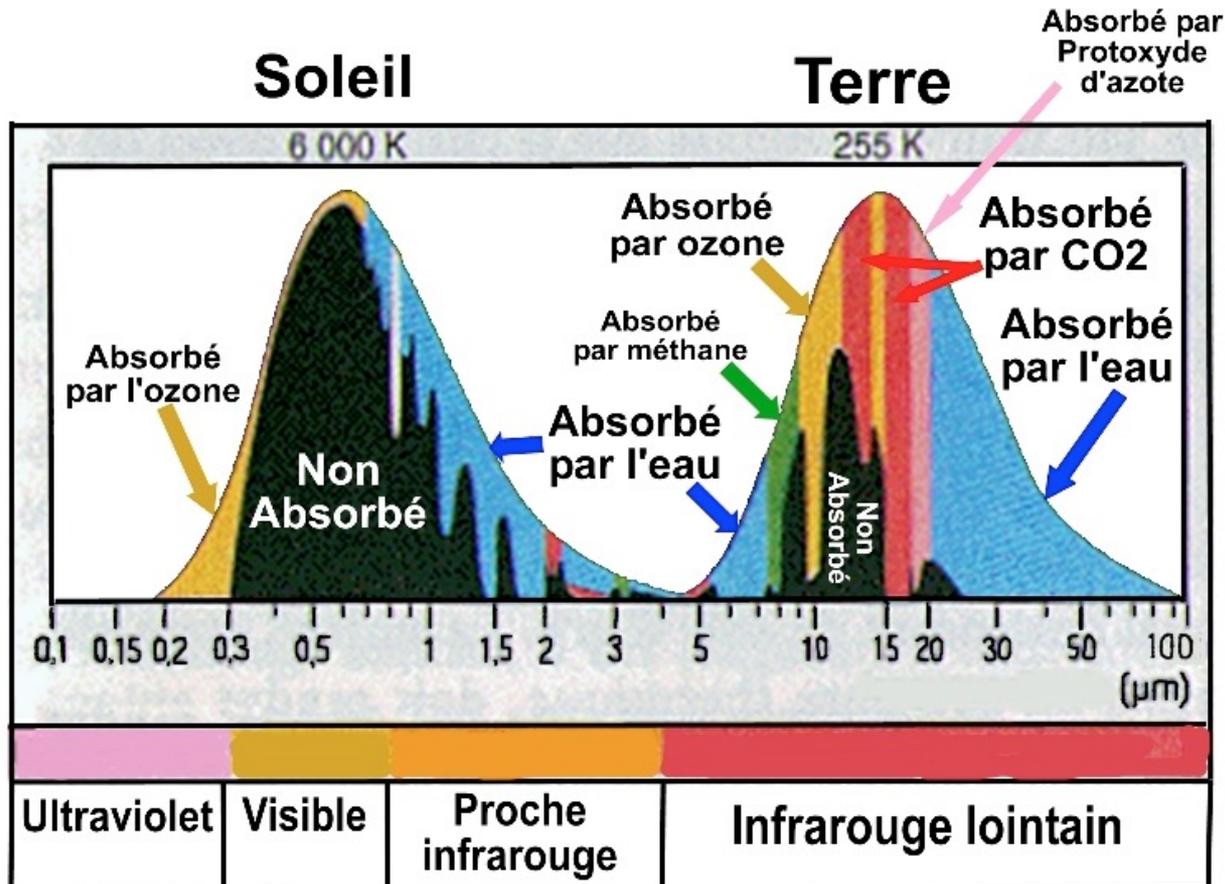


Dufresne et Treinier,
La Météorologie

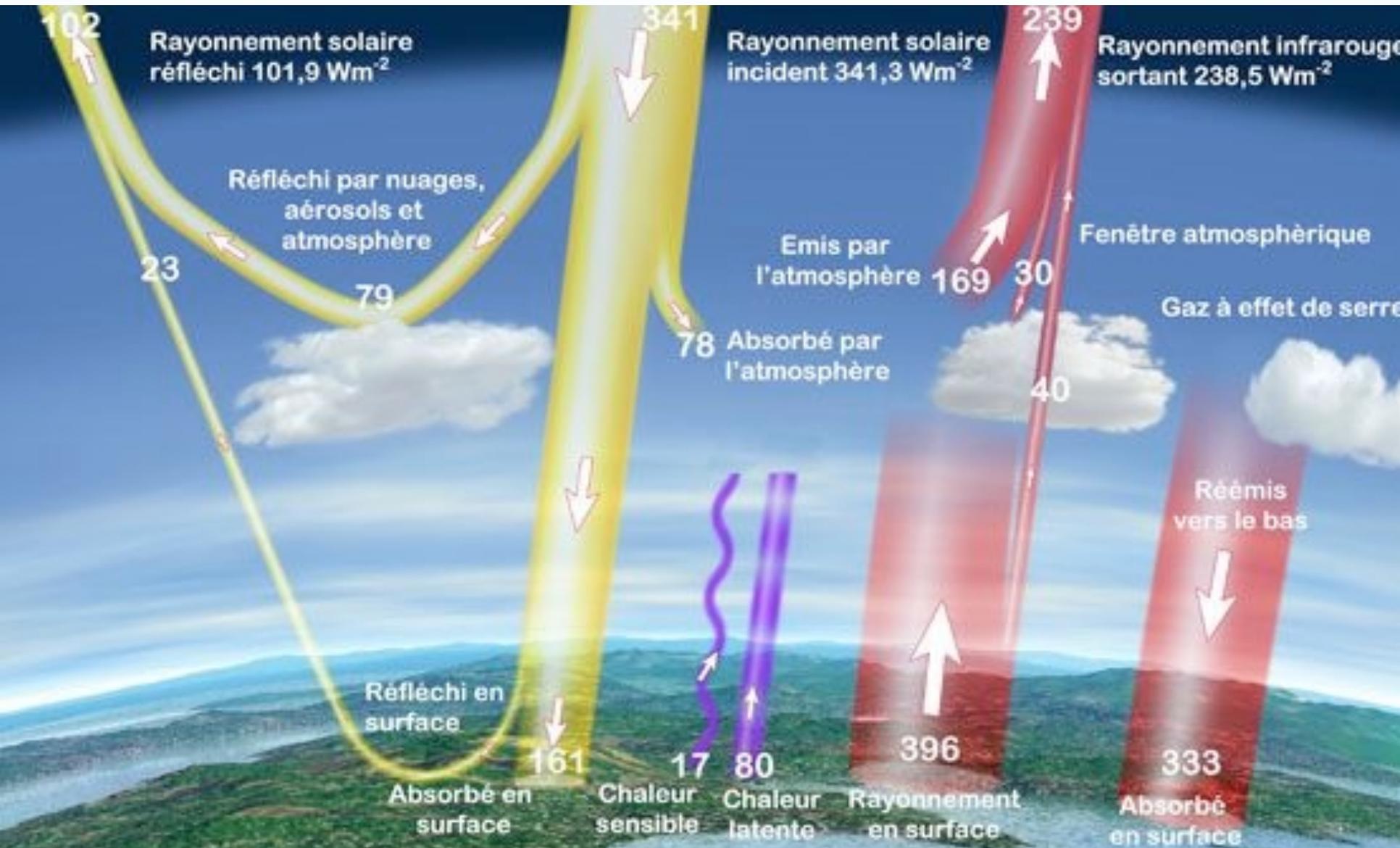
Gaz à effet de serre



Spectre d'absorption du rayonnement thermique

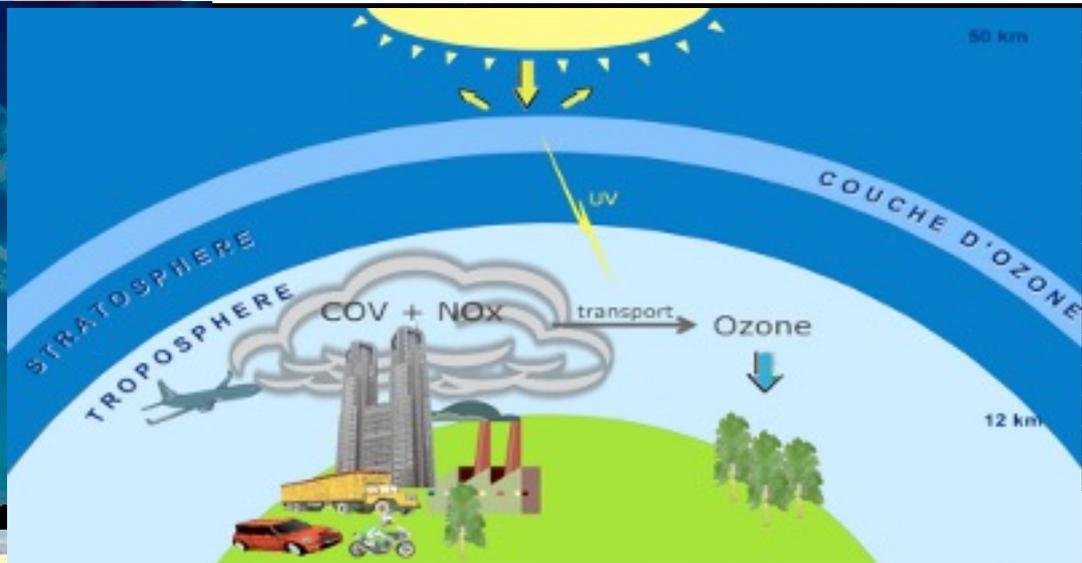


Bilan radiatif "réel"



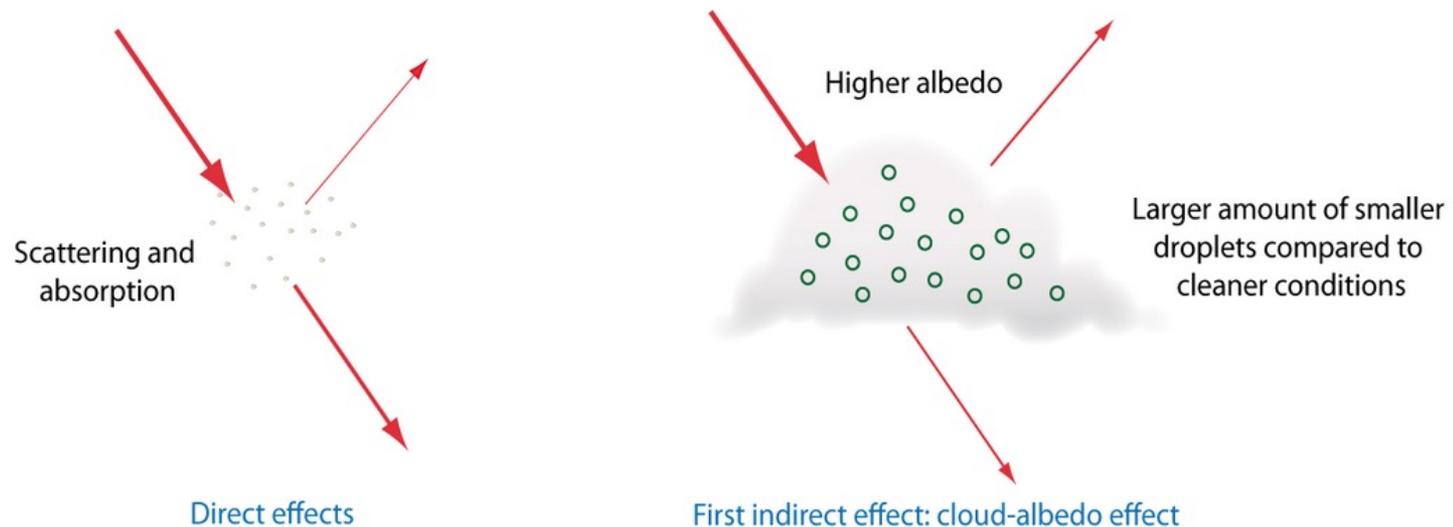
Différents forçages climatiques

Volcans,
aerosols,



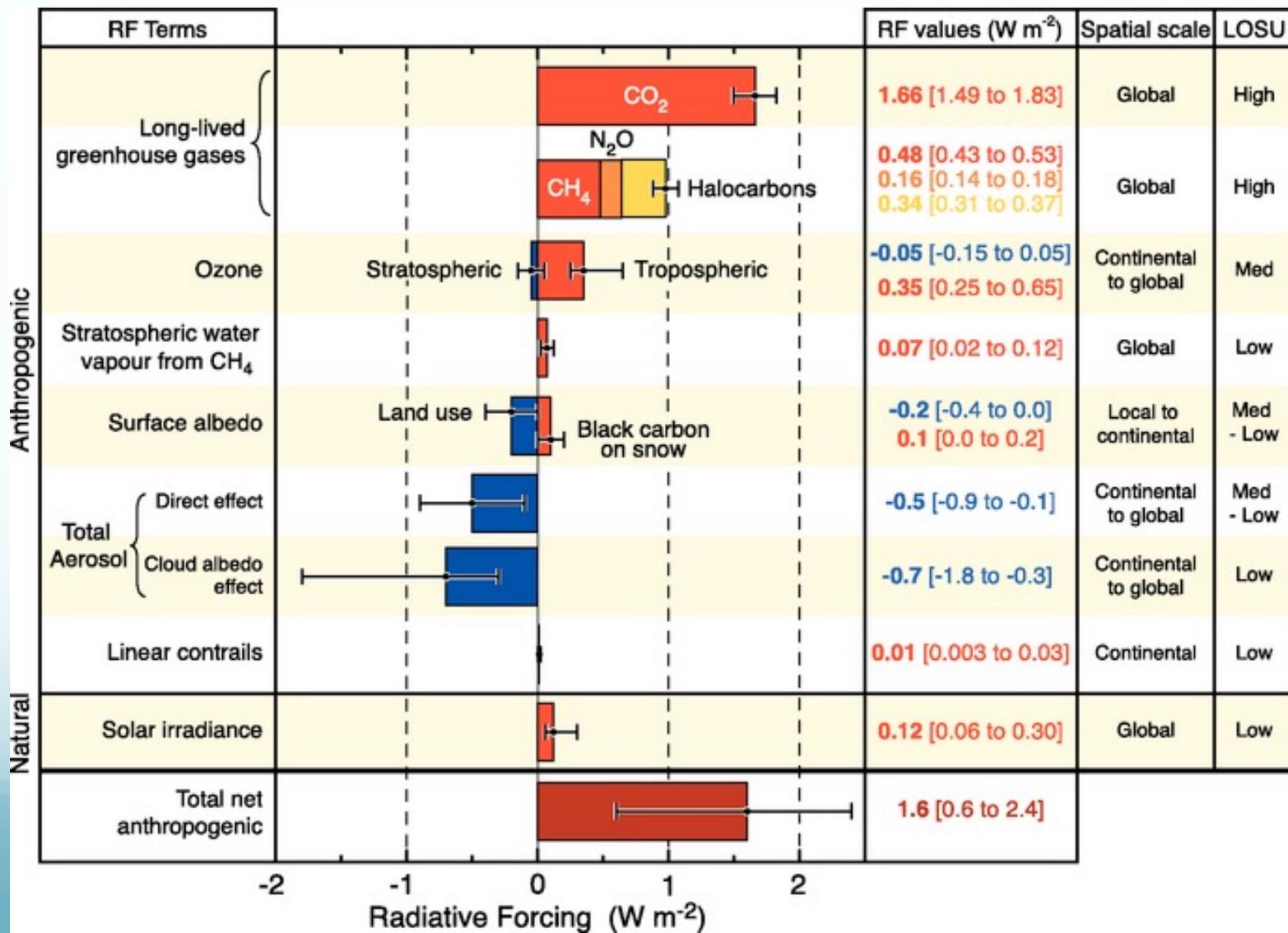
L'effet particulier des aérosols

- ▶ 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 (−).



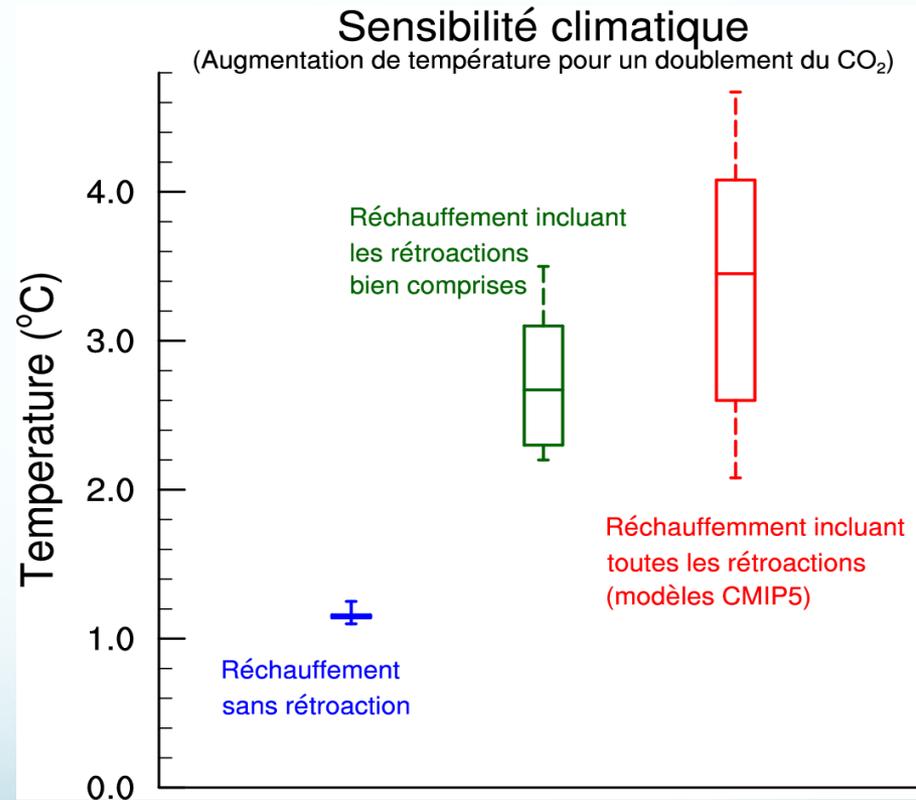
Source : Goosse et al. [online](#) textbook.

Changement de forçage externe (100 dernières années)



Notion de sensibilité climatique

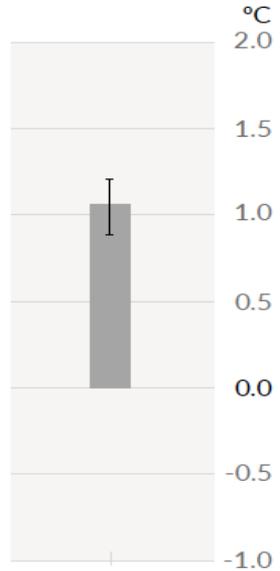
- Augmentation de température pour un doublement de CO_2 (de 280 à 560 ppm par ex.)
- Evaluation des rétroactions robustes :
 - Albedo
 - Vapeur d'eau
 - Nuages



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

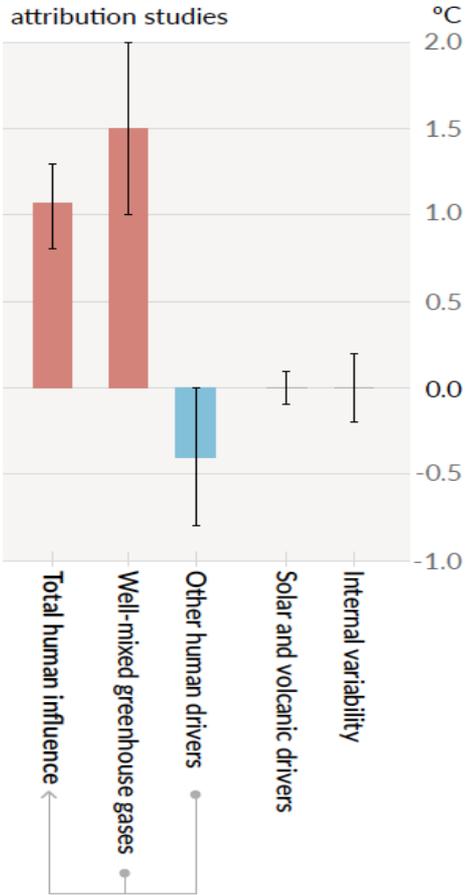
Observed warming

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

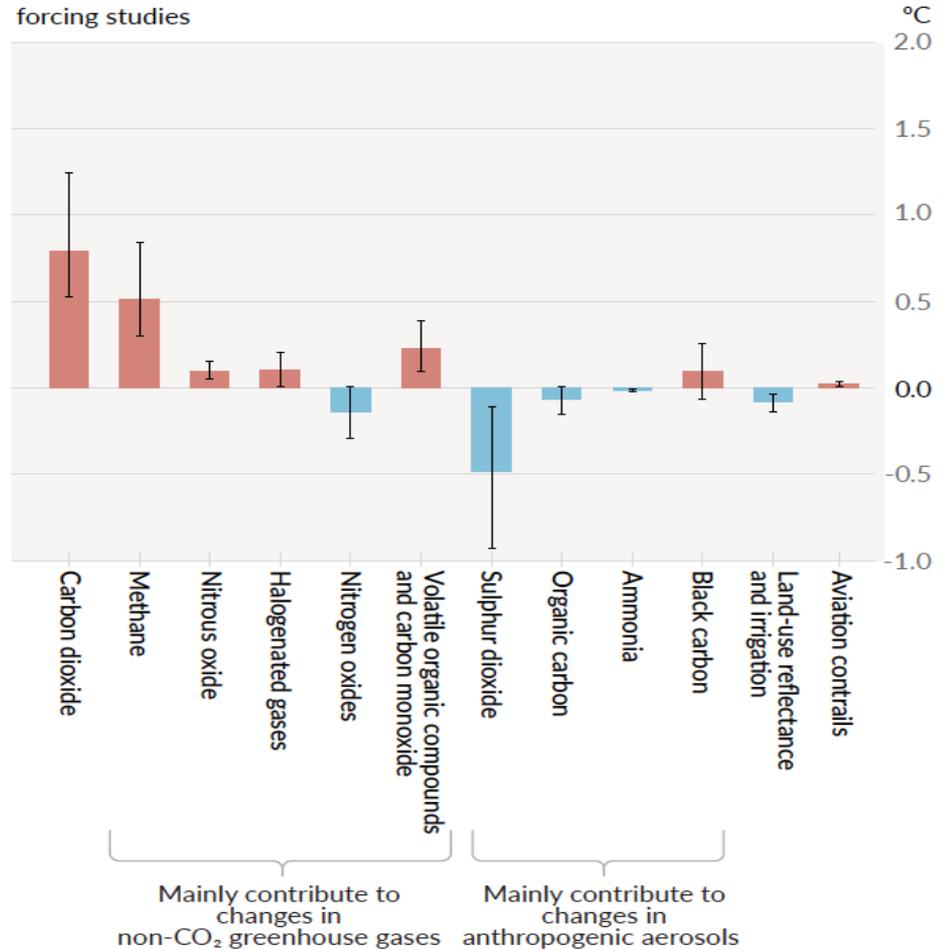


Contributions to warming based on two complementary approaches

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

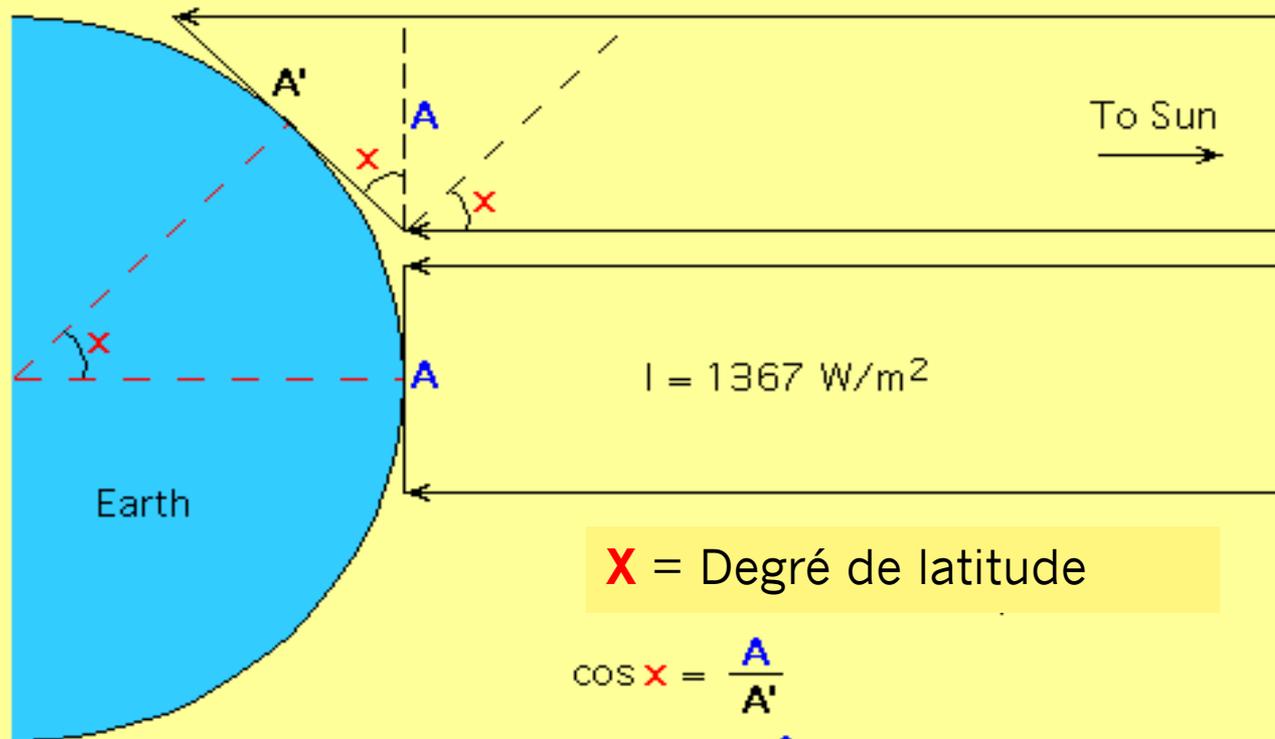


c) Contributions to 2010-2019 warming relative to 1850-1900, assessed from radiative forcing studies



Pour sortir de l'approche à une dimension !

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

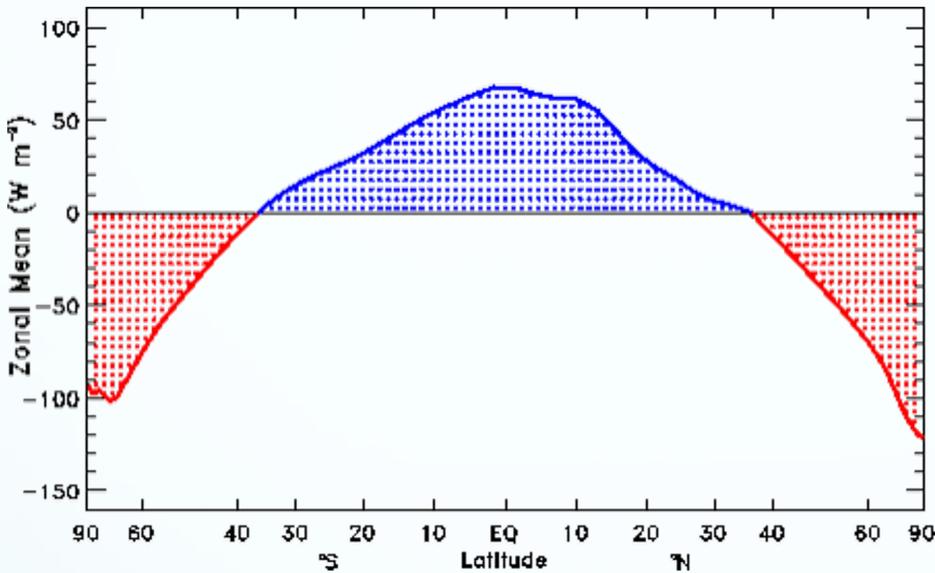


x = Degré de latitude

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

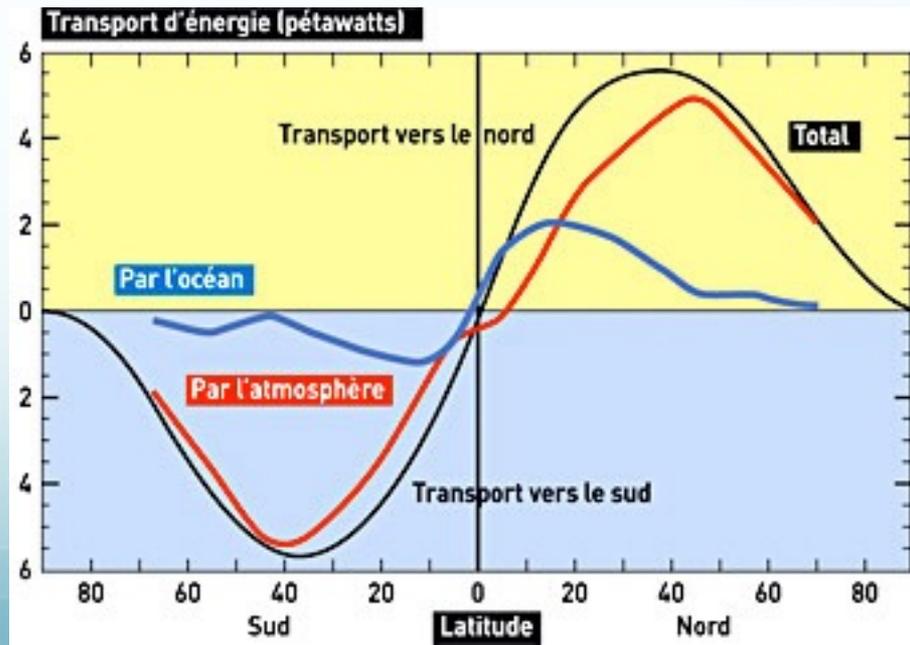
$$A' = \frac{A}{\cos x}$$

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

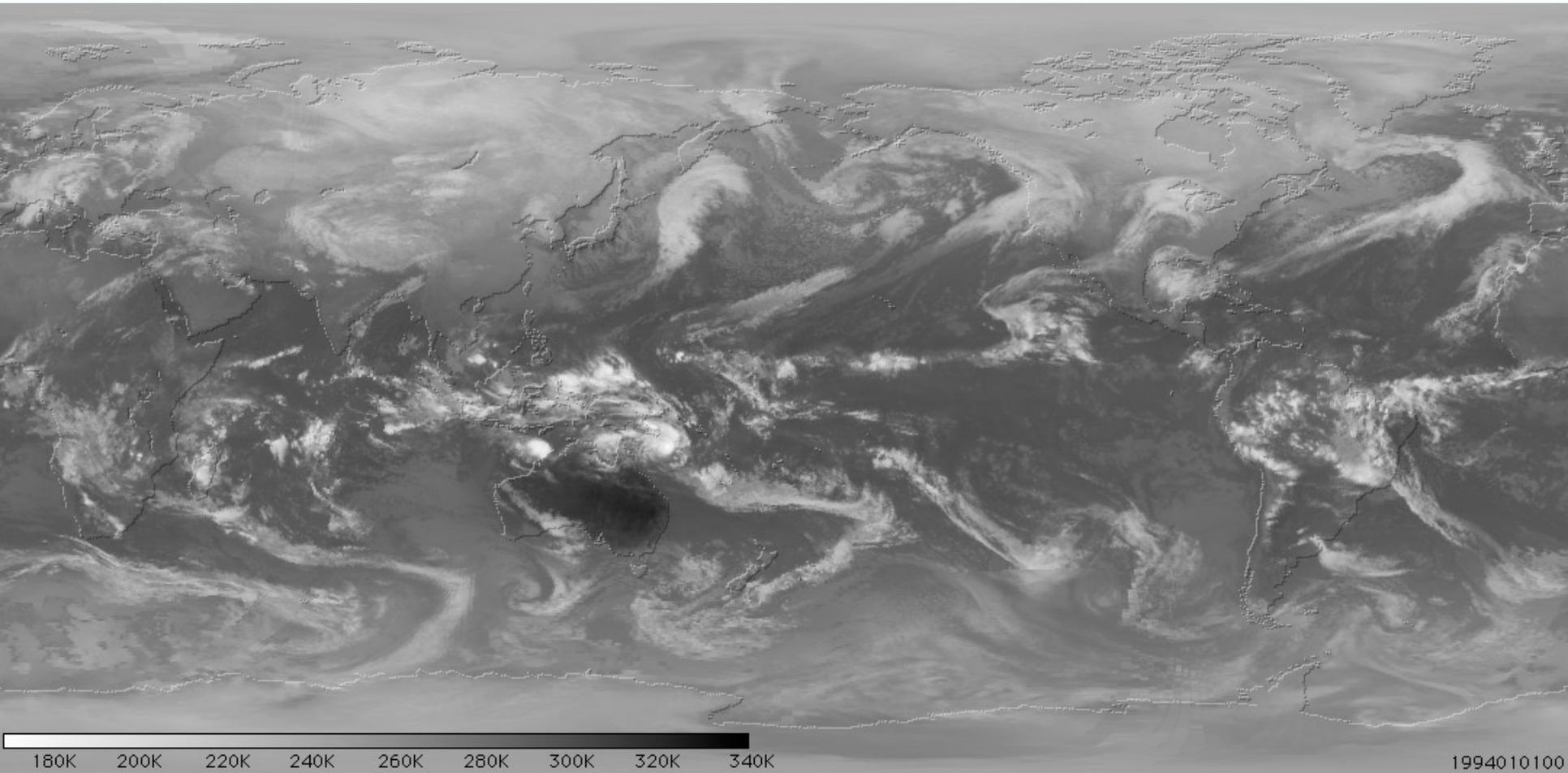


Transport vers le Nord par l'atmosphère et par l'océan (PW)

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



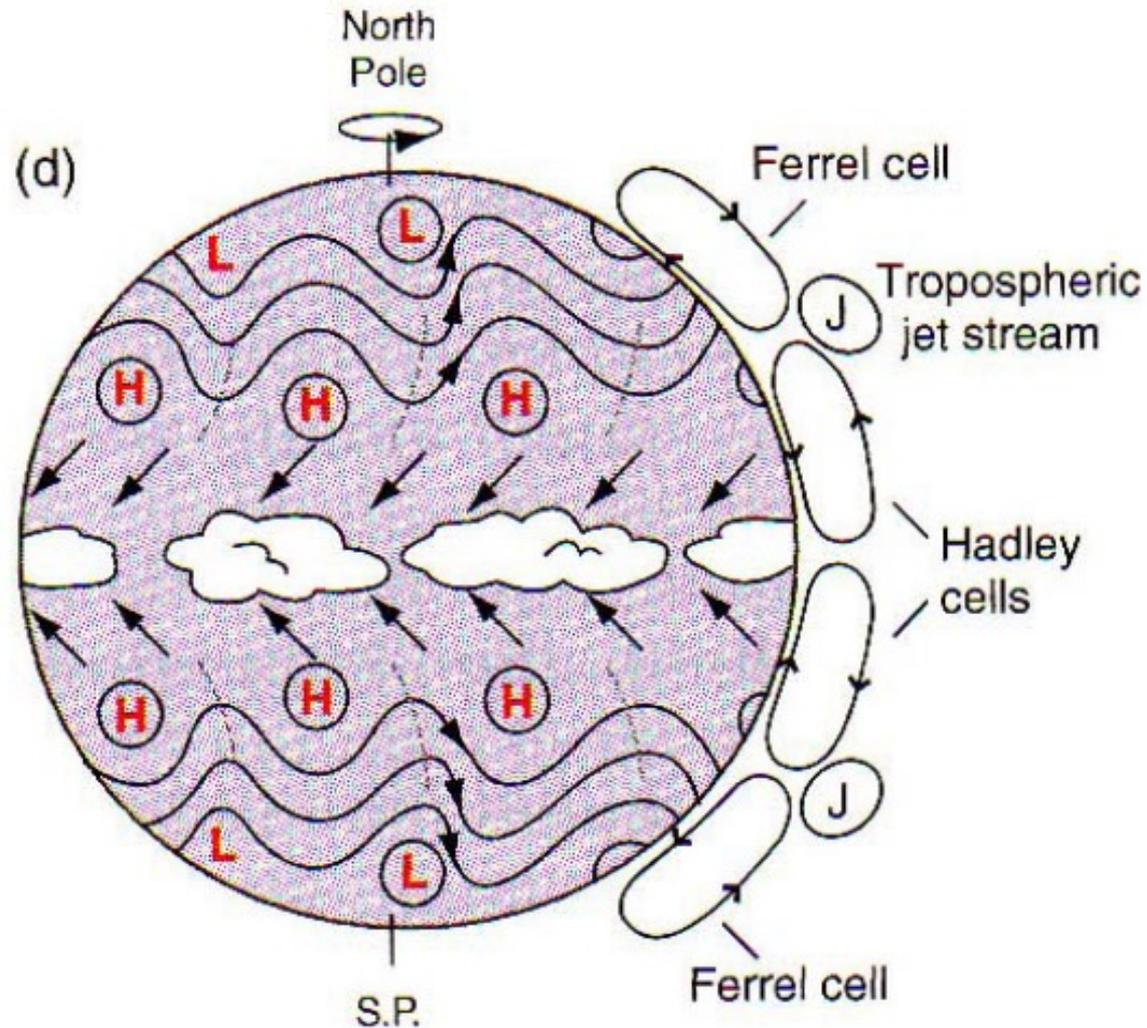
Circulation atmosphérique



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

1994010100

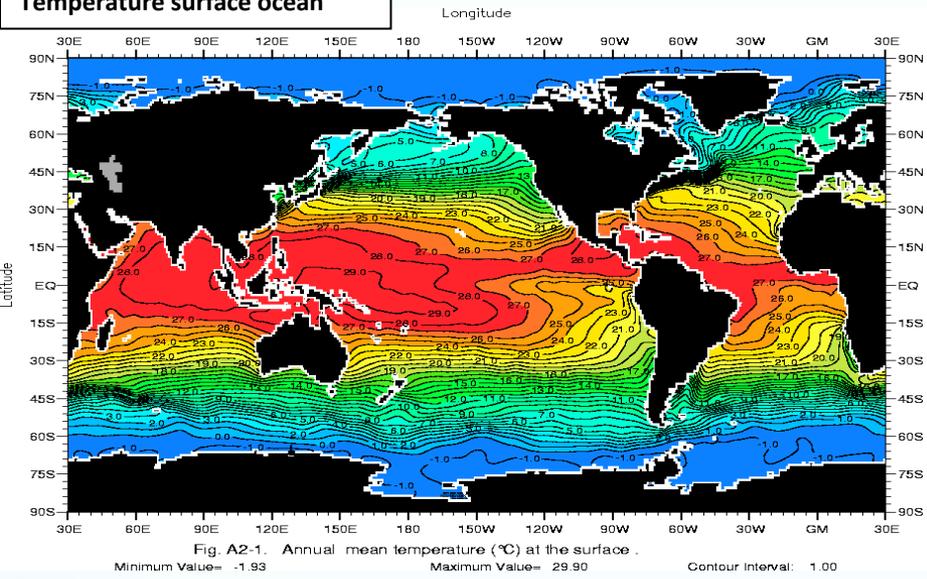
Circulation atmosphérique



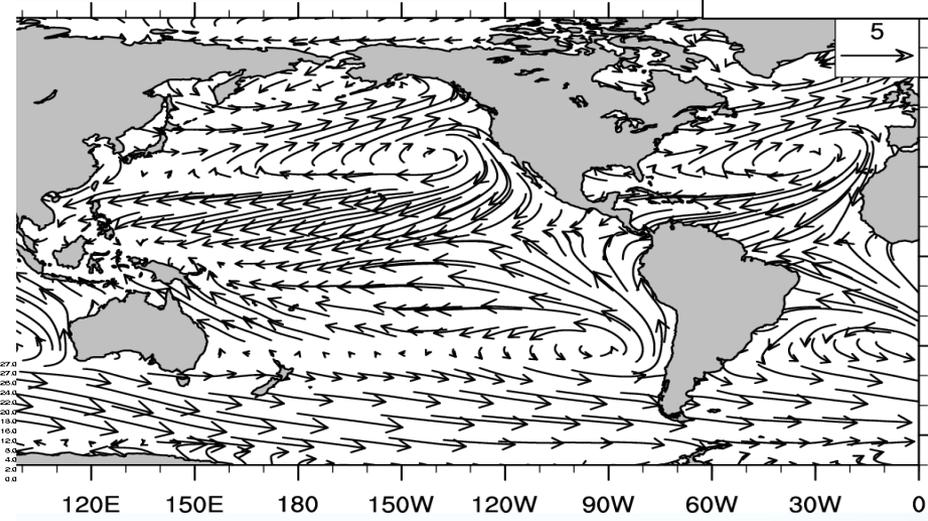
Circulation océanique

Circulation océanique

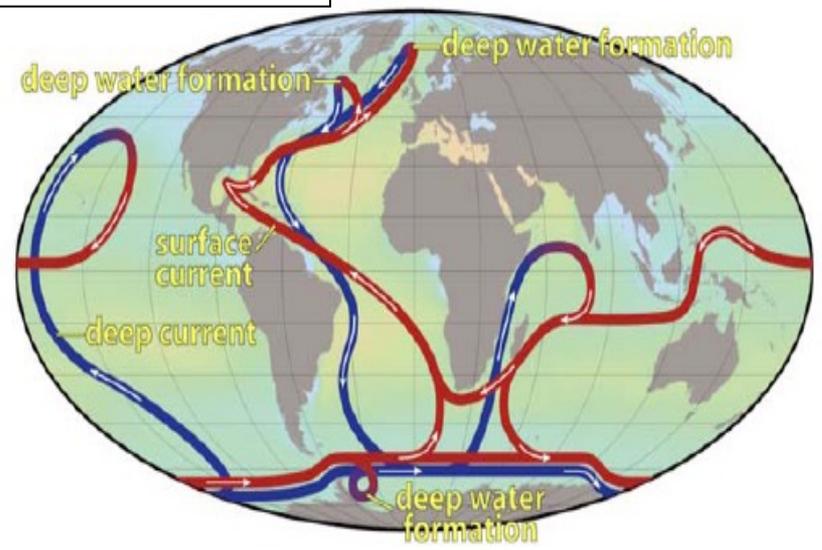
Température surface océan



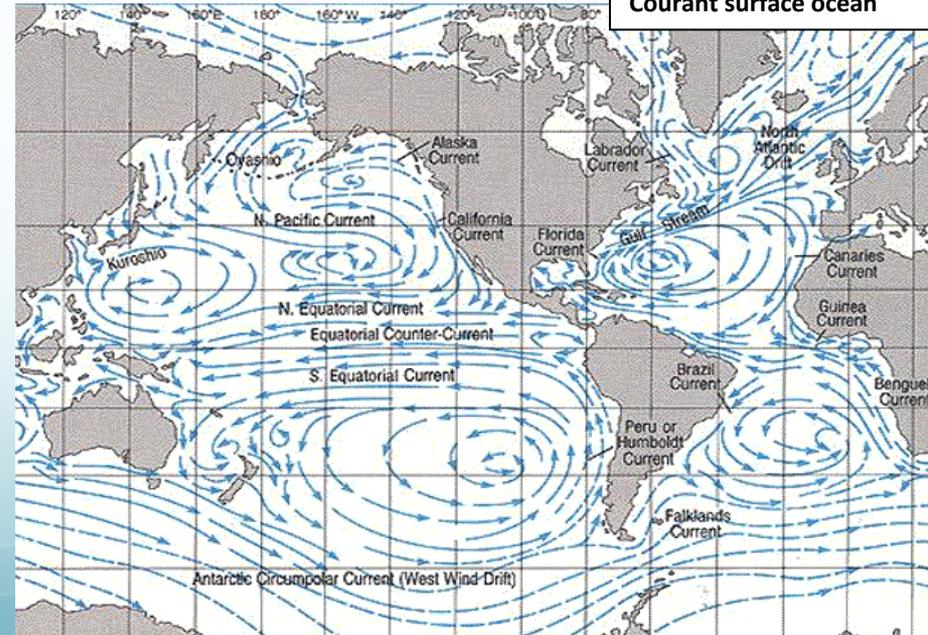
Vent de surface



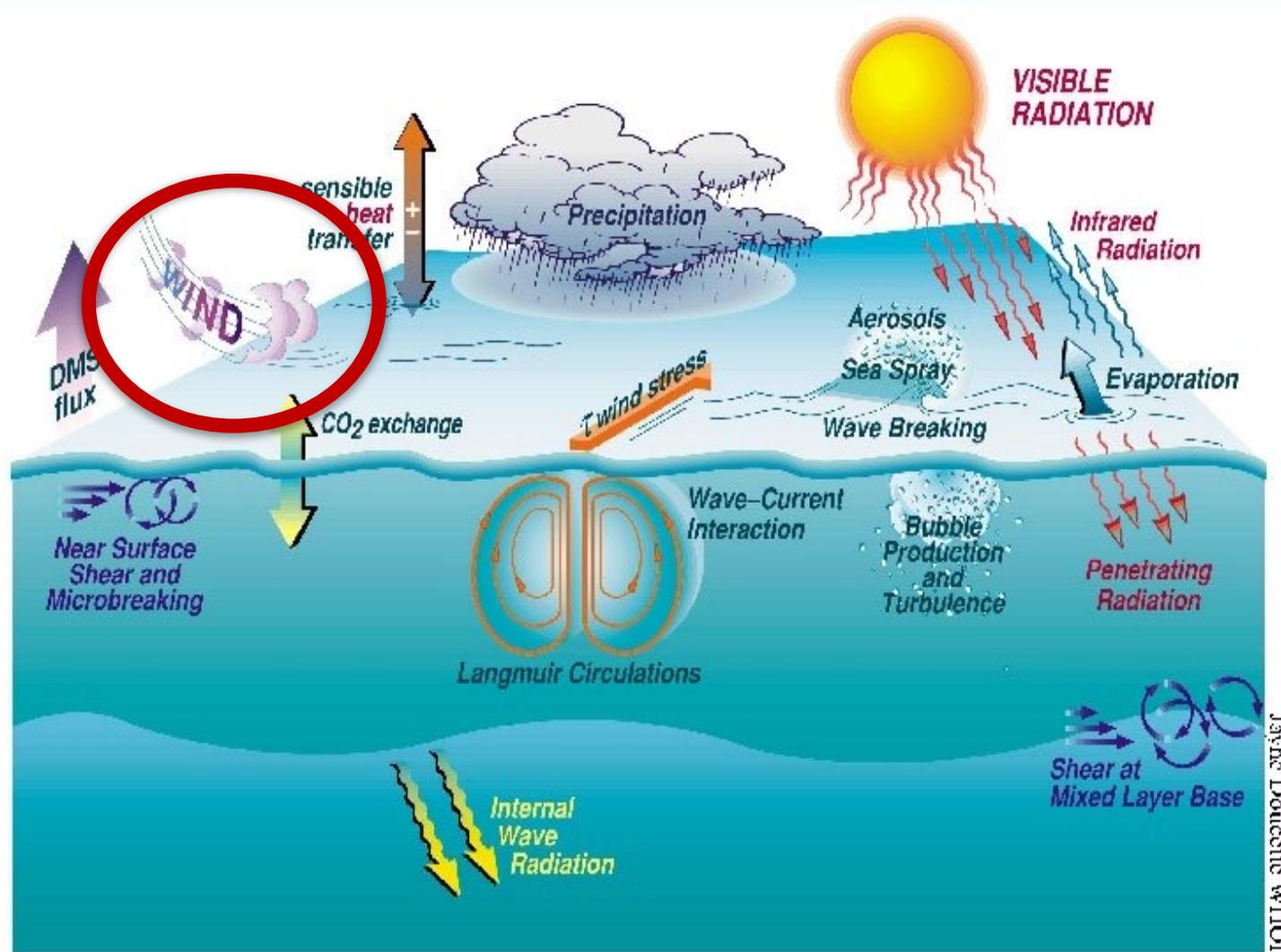
Circulation thermohaline



Courant surface océan



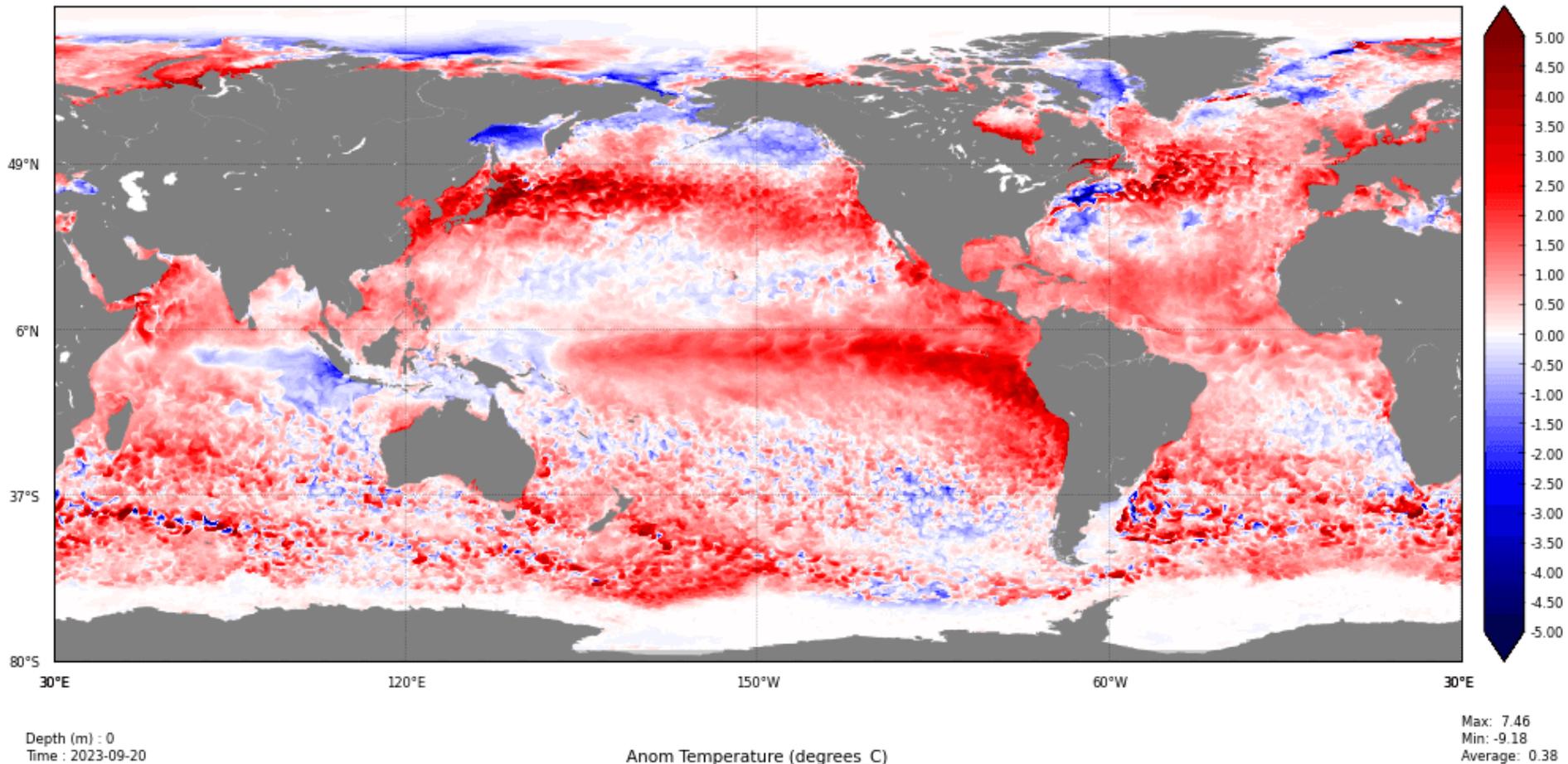
Interactions océan-atmosphère



La température de surface hier



Anomalies de température de surface océanique observée le 19 Septembre 2023
(période de référence = même jour pour les 30 dernières années)



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

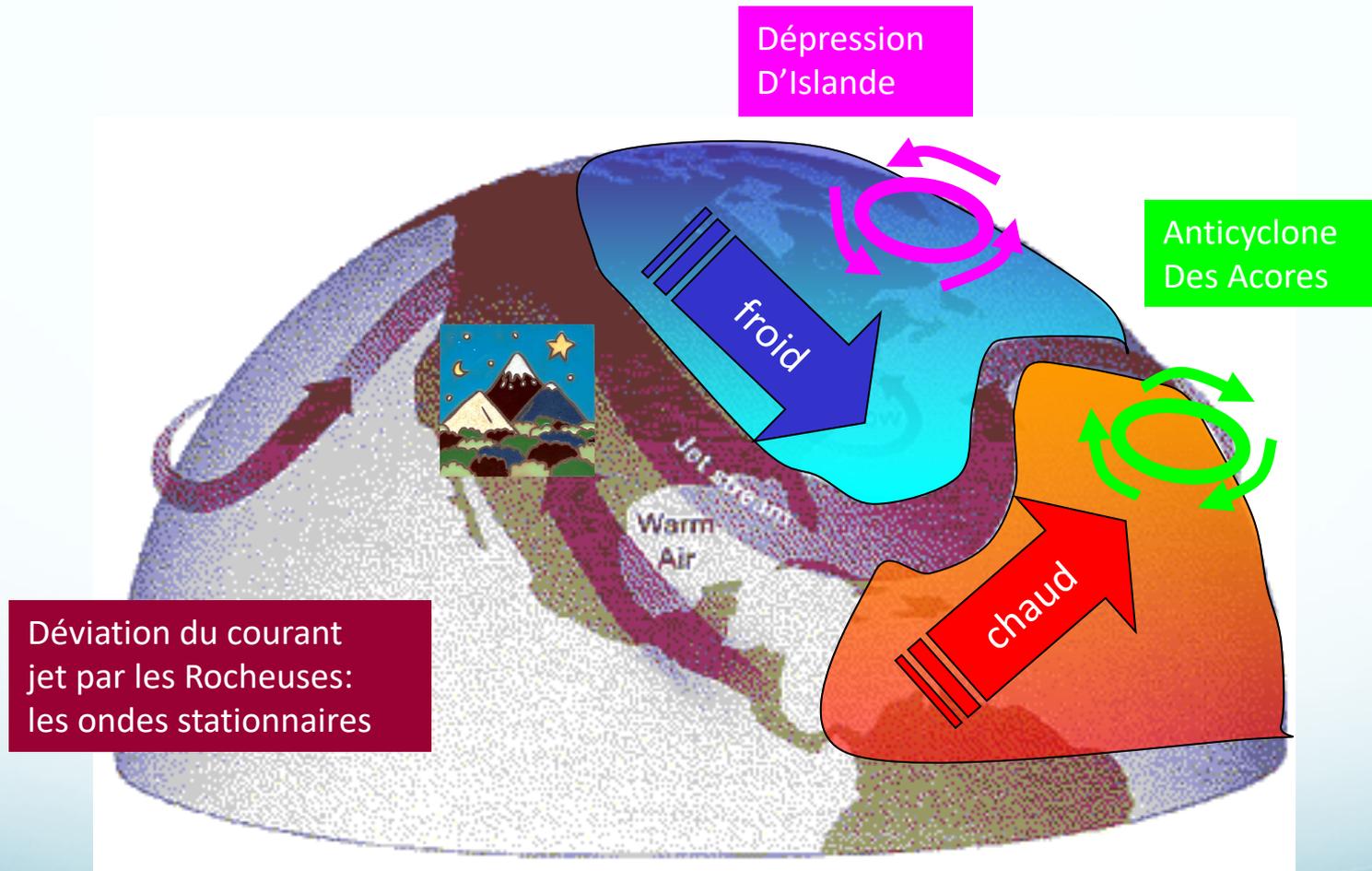
Quelques grands modes de variabilité climatique

- 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

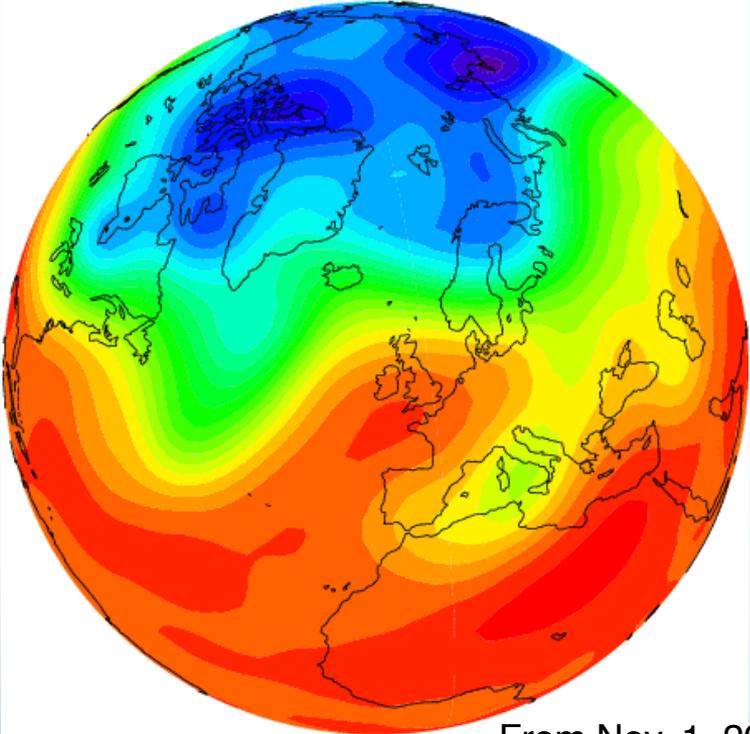


Les ondes stationnaires associées à la présence de massifs montagneux expliquent en grande partie l'asymétrie zonale entre les bords Ouest et Est du bassin Atlantique.

Variations de pression en Atlantique

Geopotentiel à 500 millibars

20071101



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

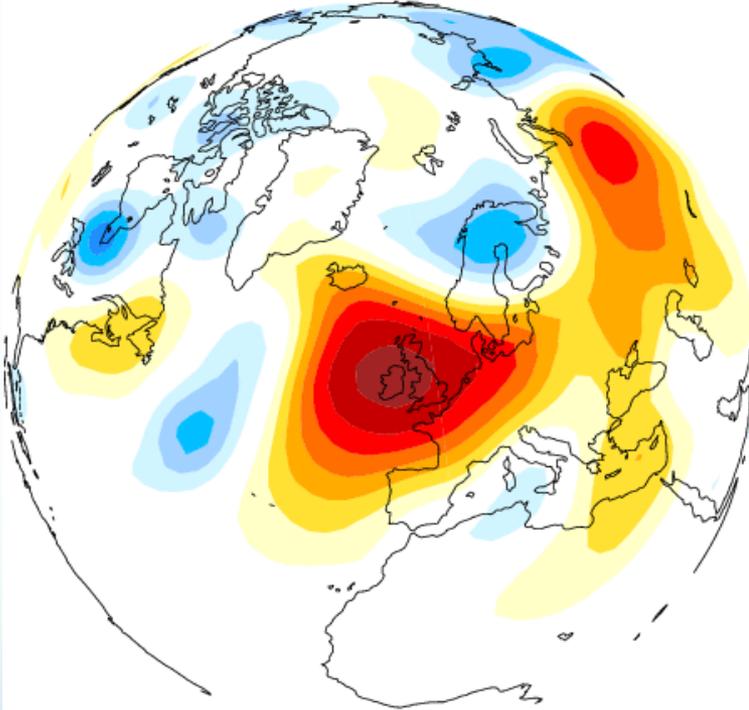
Meter



4850 4970 5090 5210 5330 5450 5570 5690 5810 5930

Anomalies de Geopotentiel

20071101



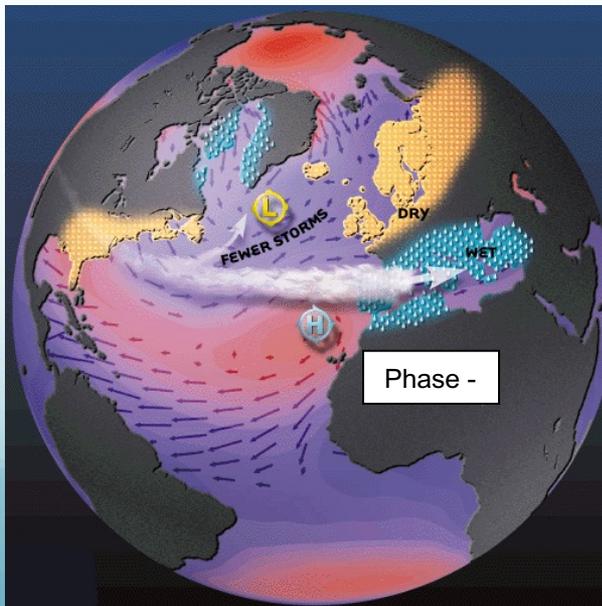
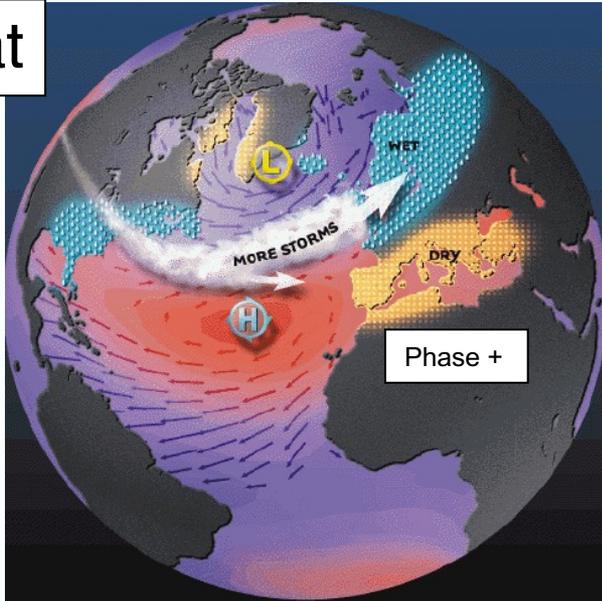
Meter



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

L'oscillation Nord Atlantique (NAO)

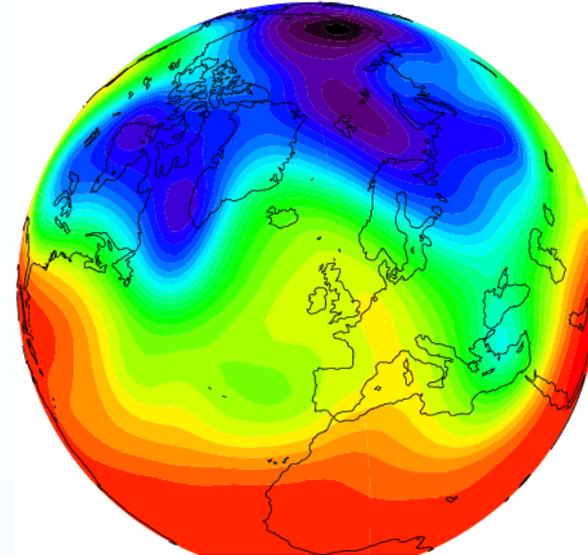
Climat



Blocking

20080218

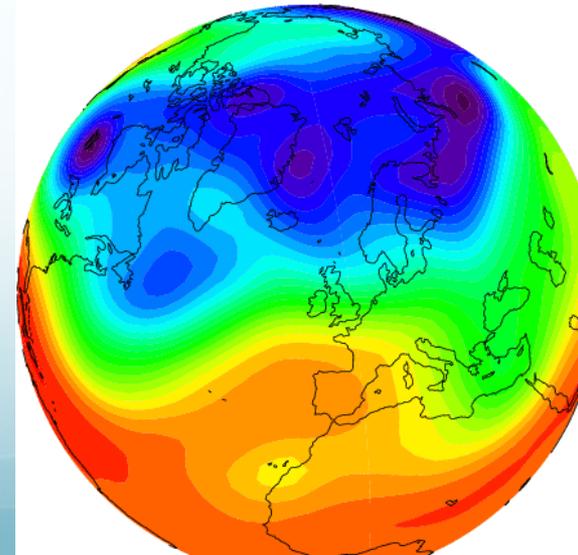
Météo



Déferlement anticyclonique

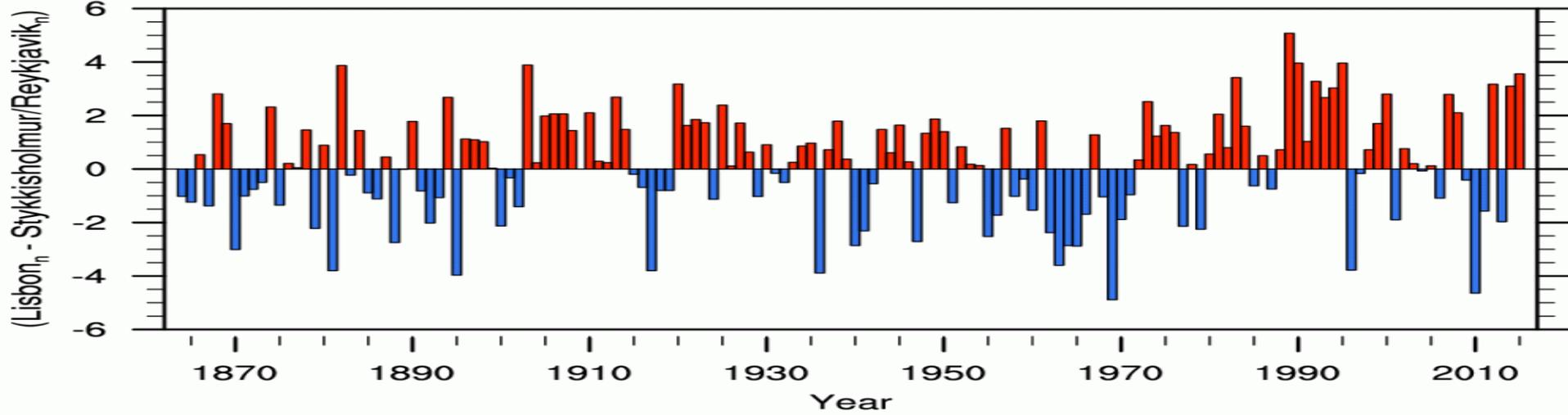
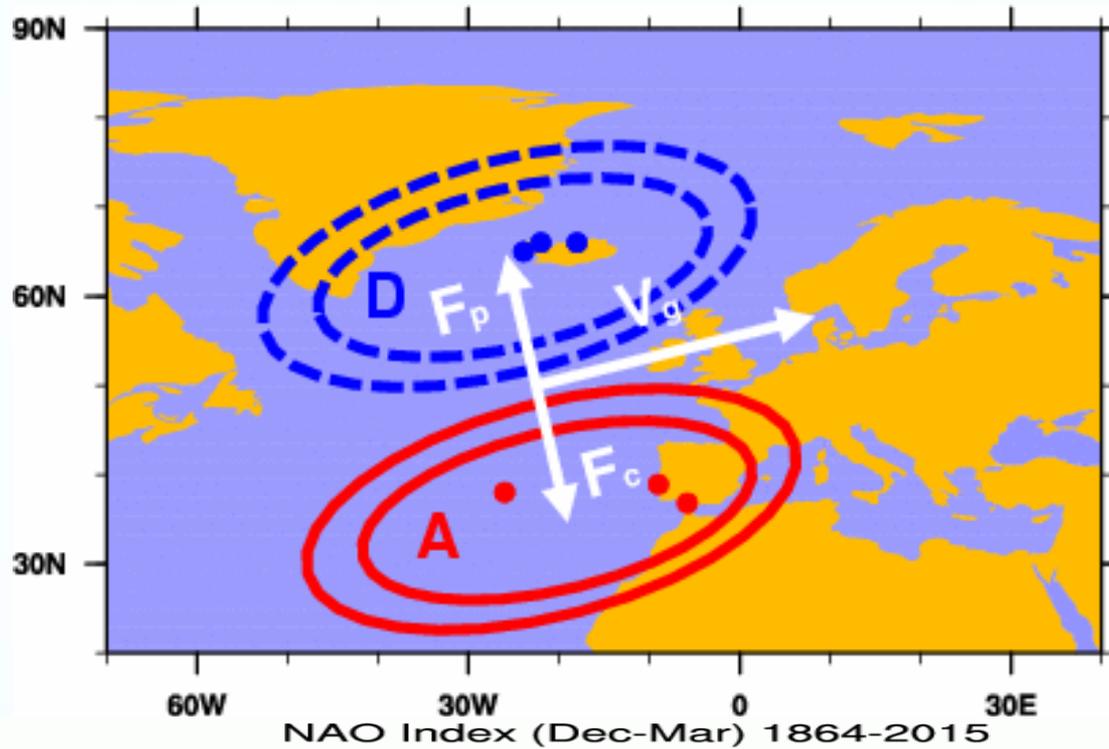
NAO-

19850131



Déferlement cyclonique

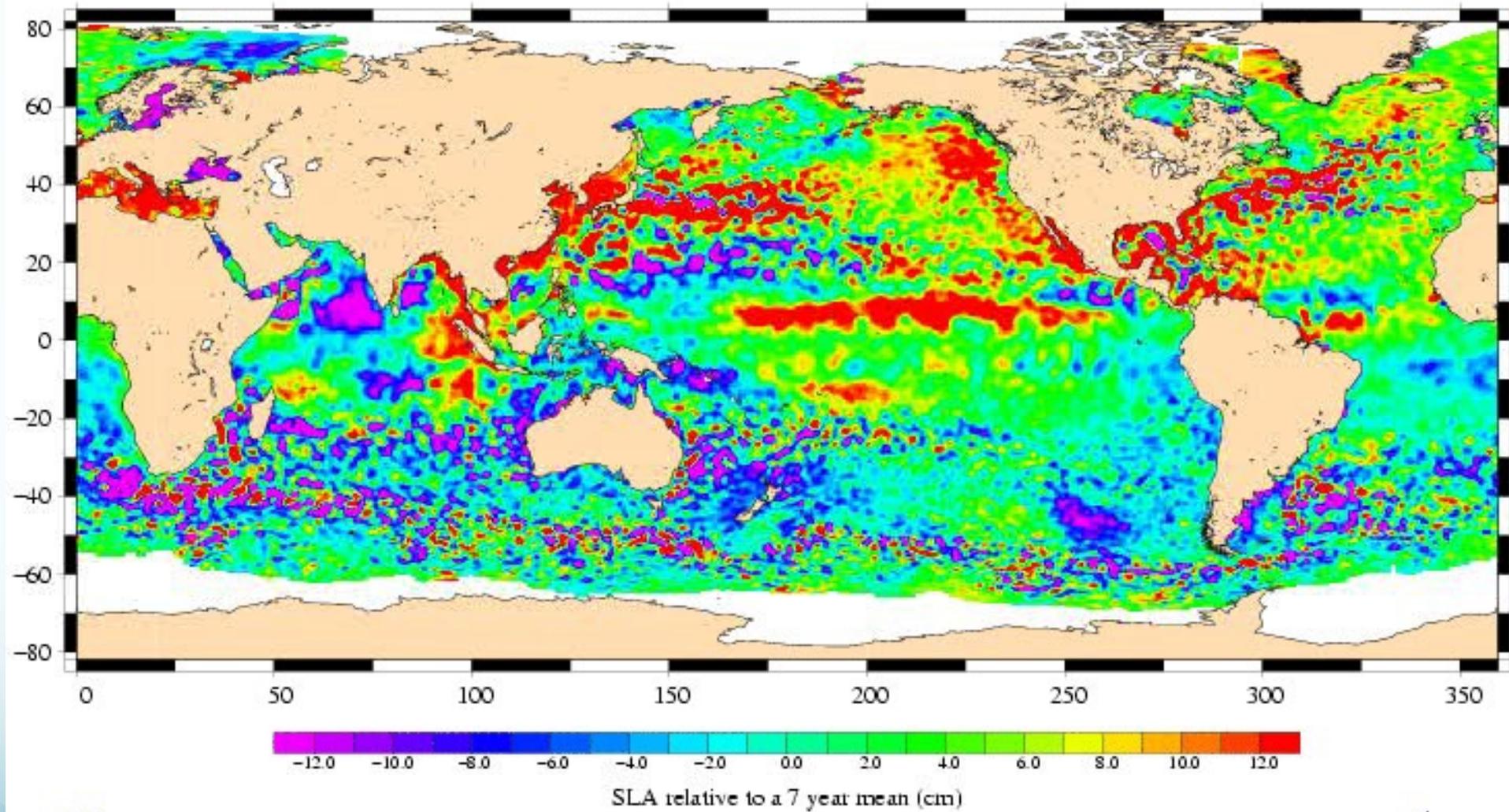
Explication physique de la NAO



Quelques grandes modes de variabilité climatique

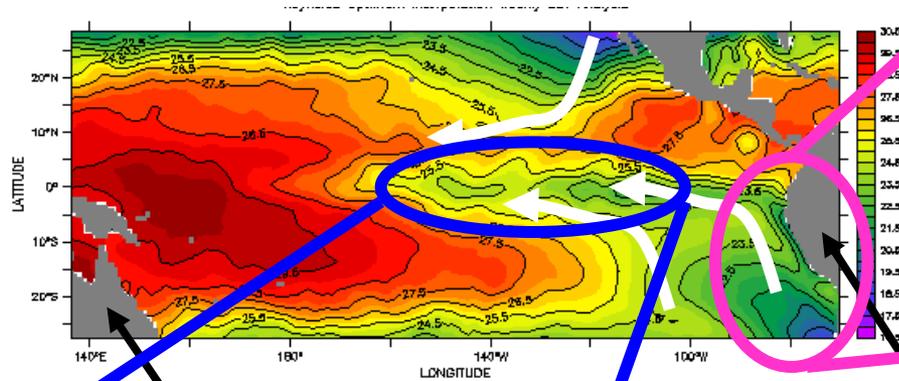
- Oscillation Nord Atlantique : NAO
- Oscillation El Nino : ENSO
- Variabilité multi-décennale atlantique : AMV
- Oscillation décennale Pacifique : PDO

1992/10/14



Conditions normales dans le Pacifique

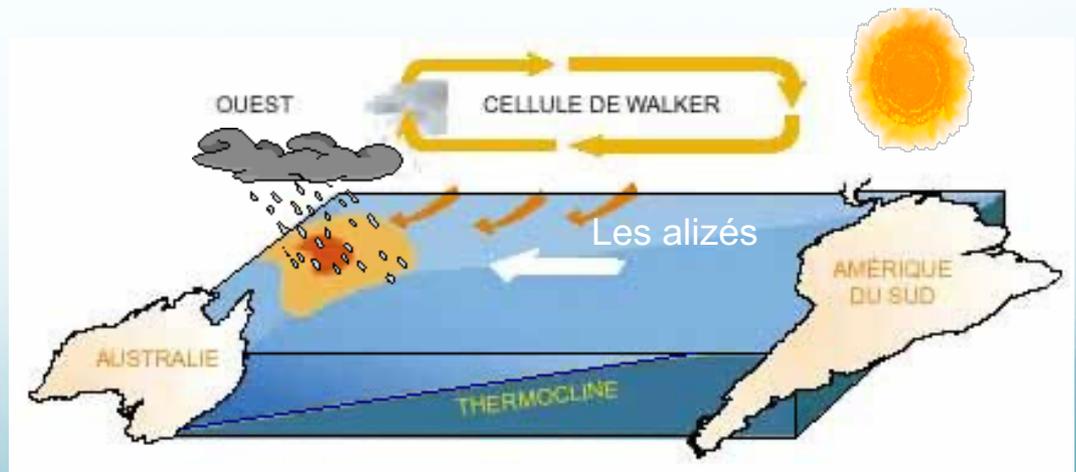
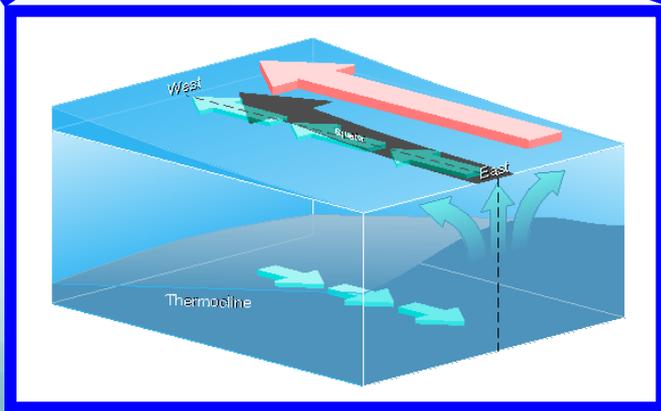
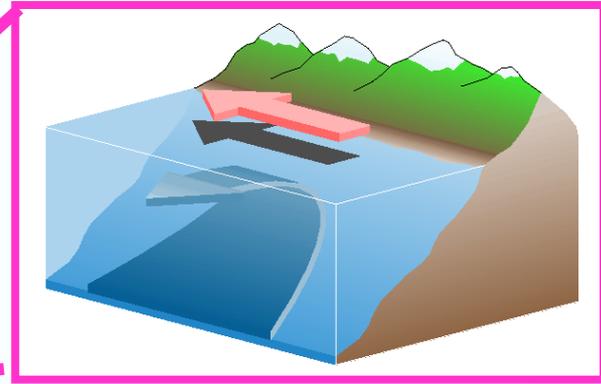
Température de surface



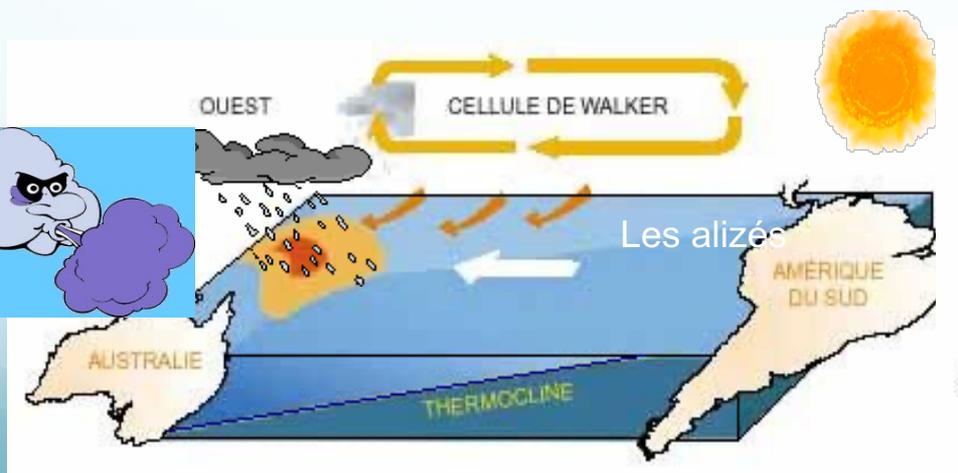
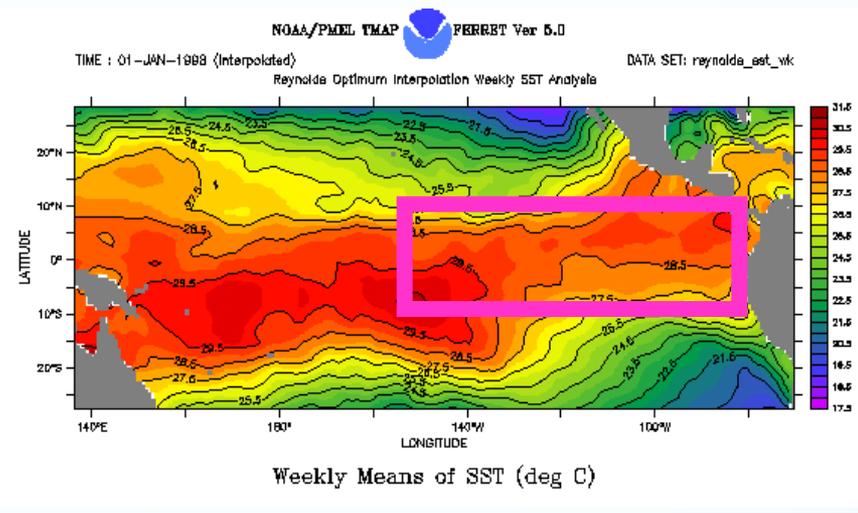
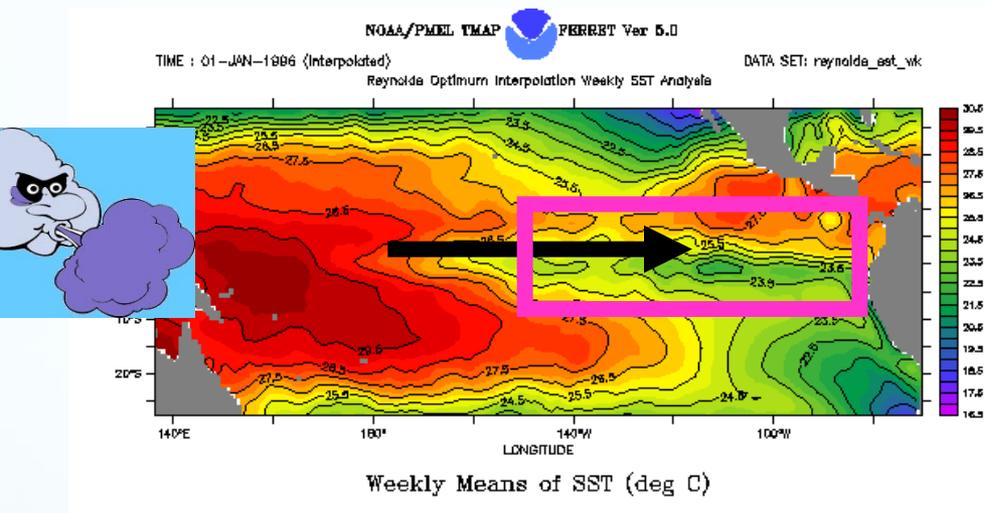
Weekly Means of SST (deg C)

Australie

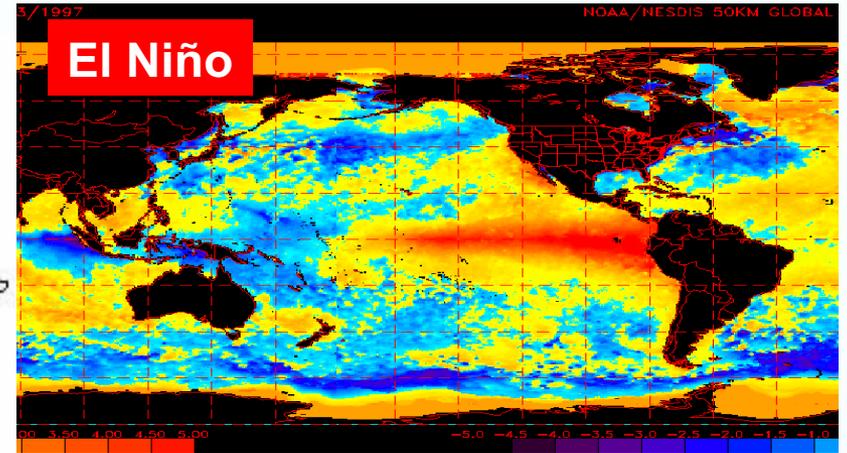
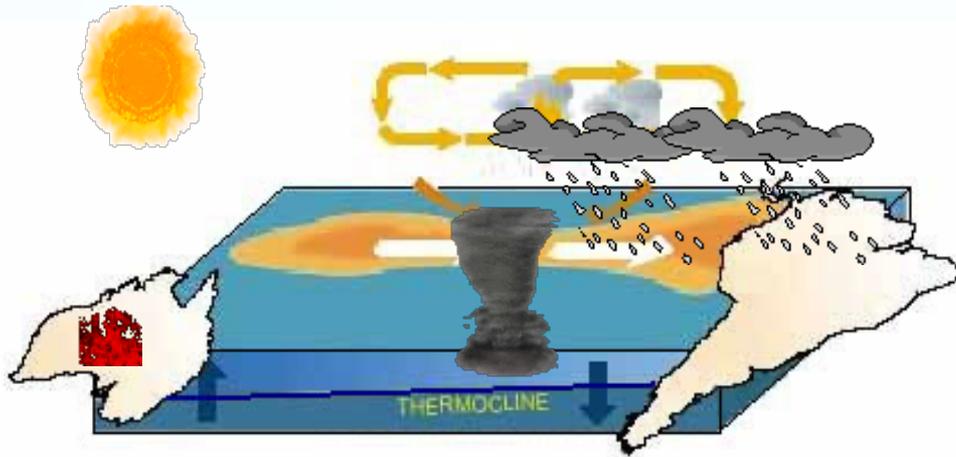
Amérique du Sud



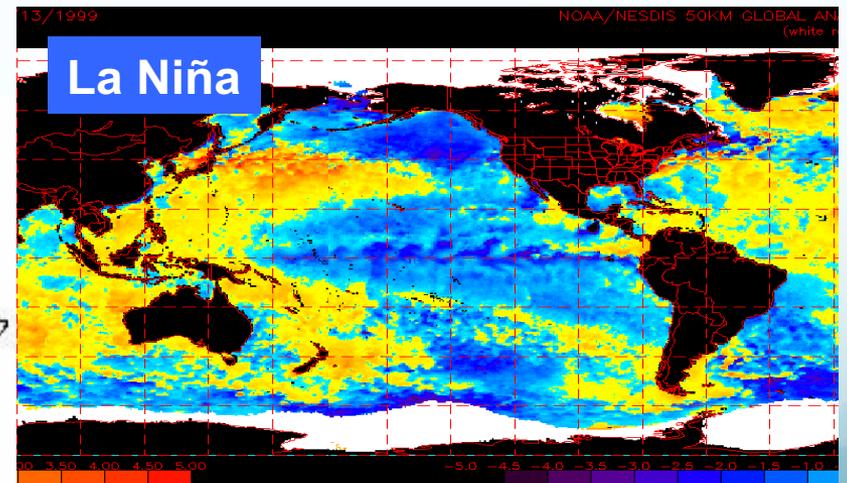
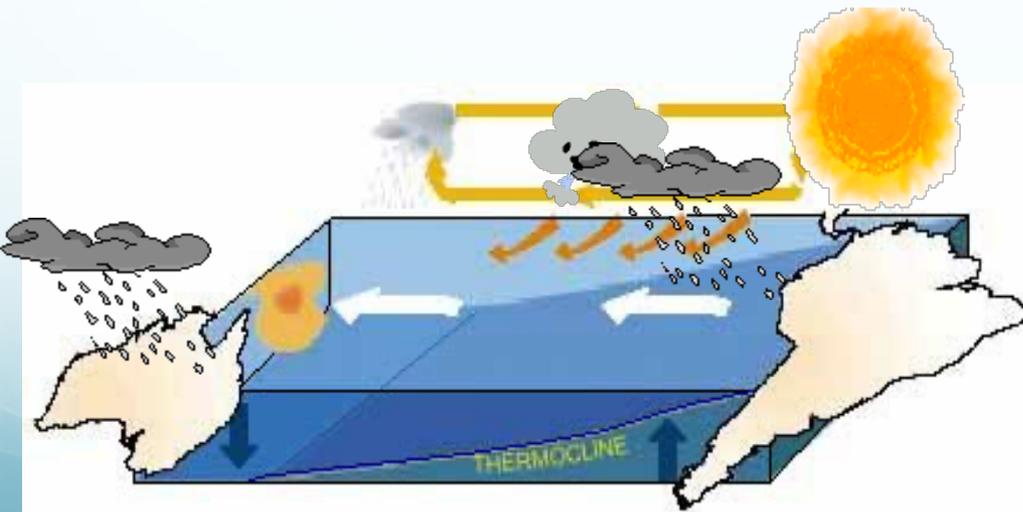
El Niño : Une oscillation couplée océan-atmosphère dans le Pacifique



La petite sœur : La Niña

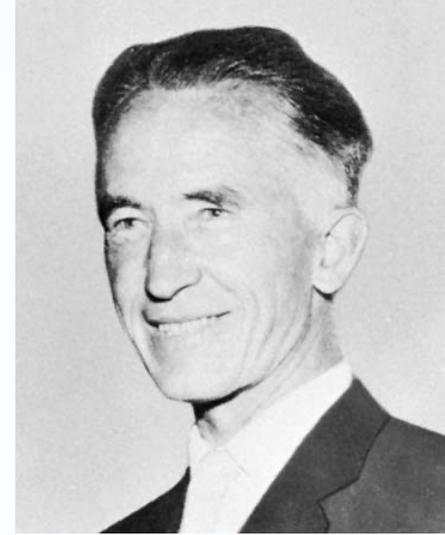


Anomalies de température du 13 Nov. 1997

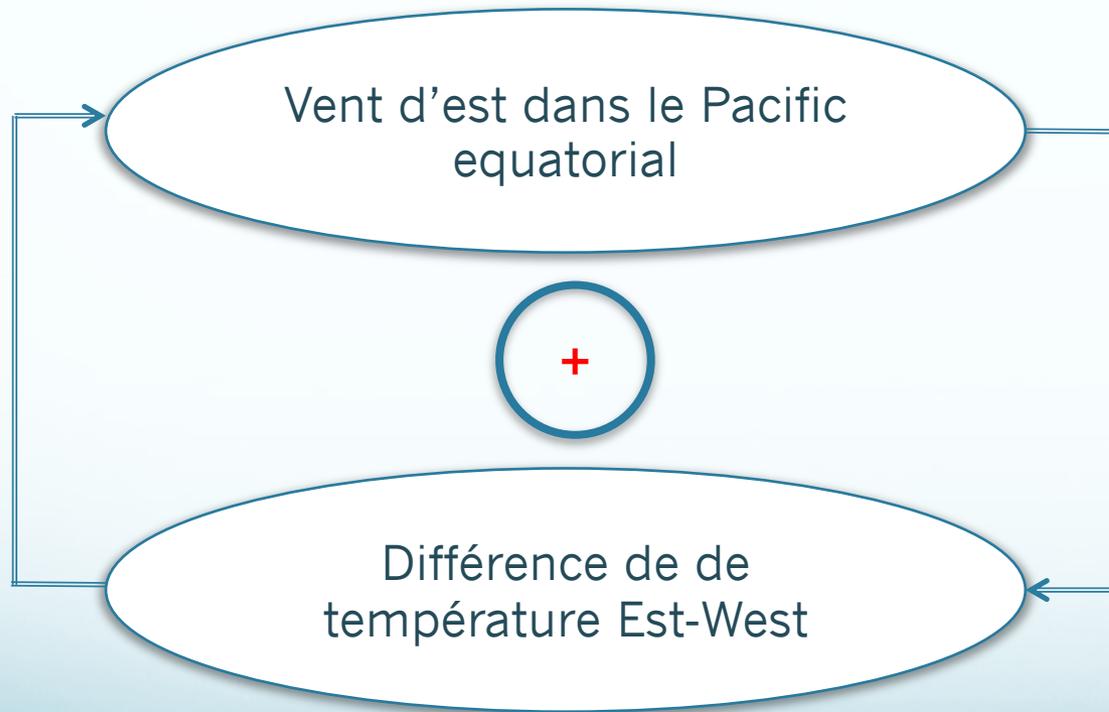


Anomalies de température du 11 Nov. 1998

Rétroaction positive de Bjercknes



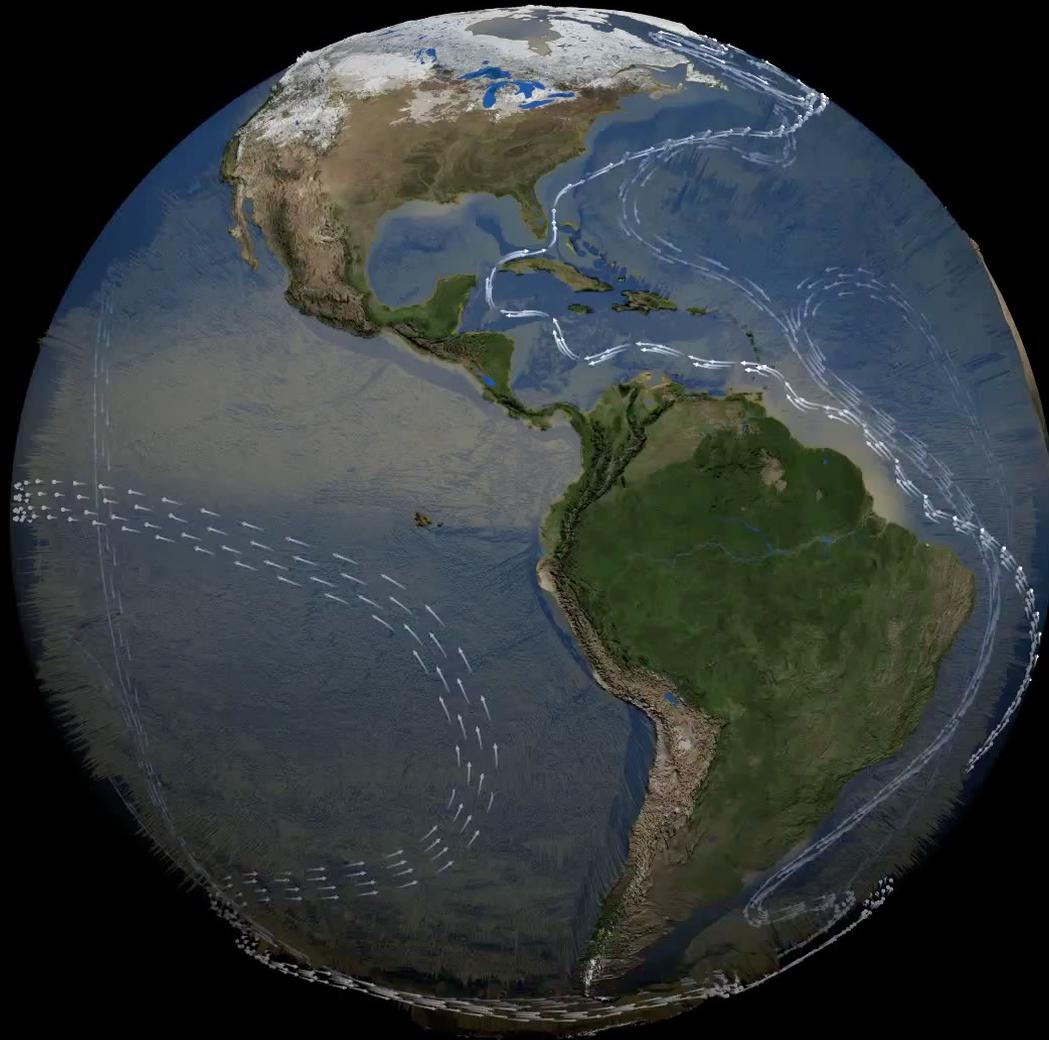
Jacob Bjercknes (1897-1975)



Quelques grands modes de variabilité climatique

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

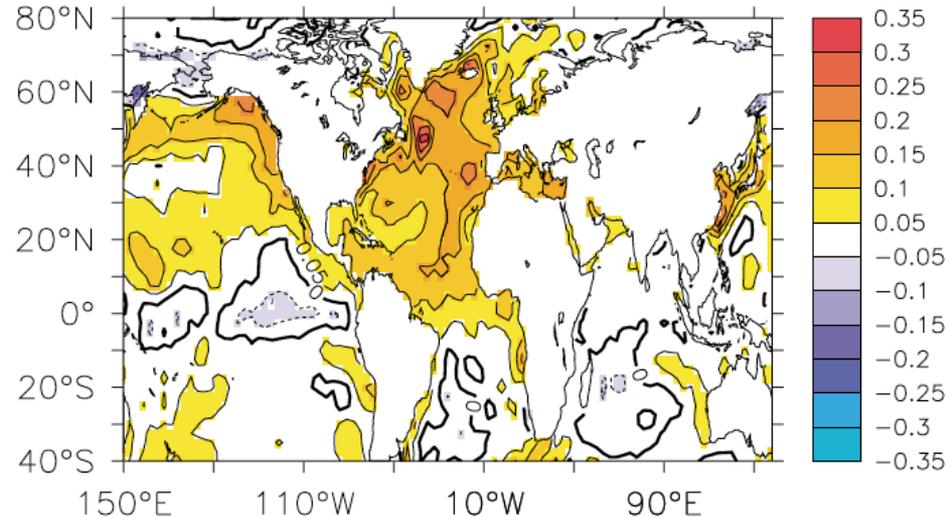
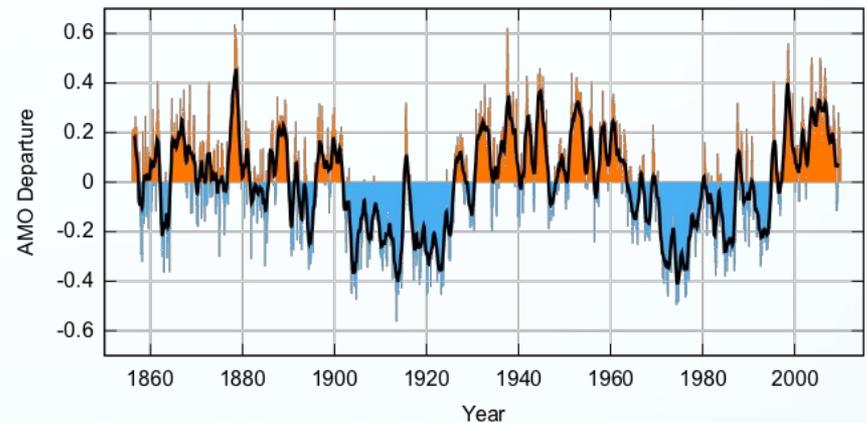
Circulation thermohaline



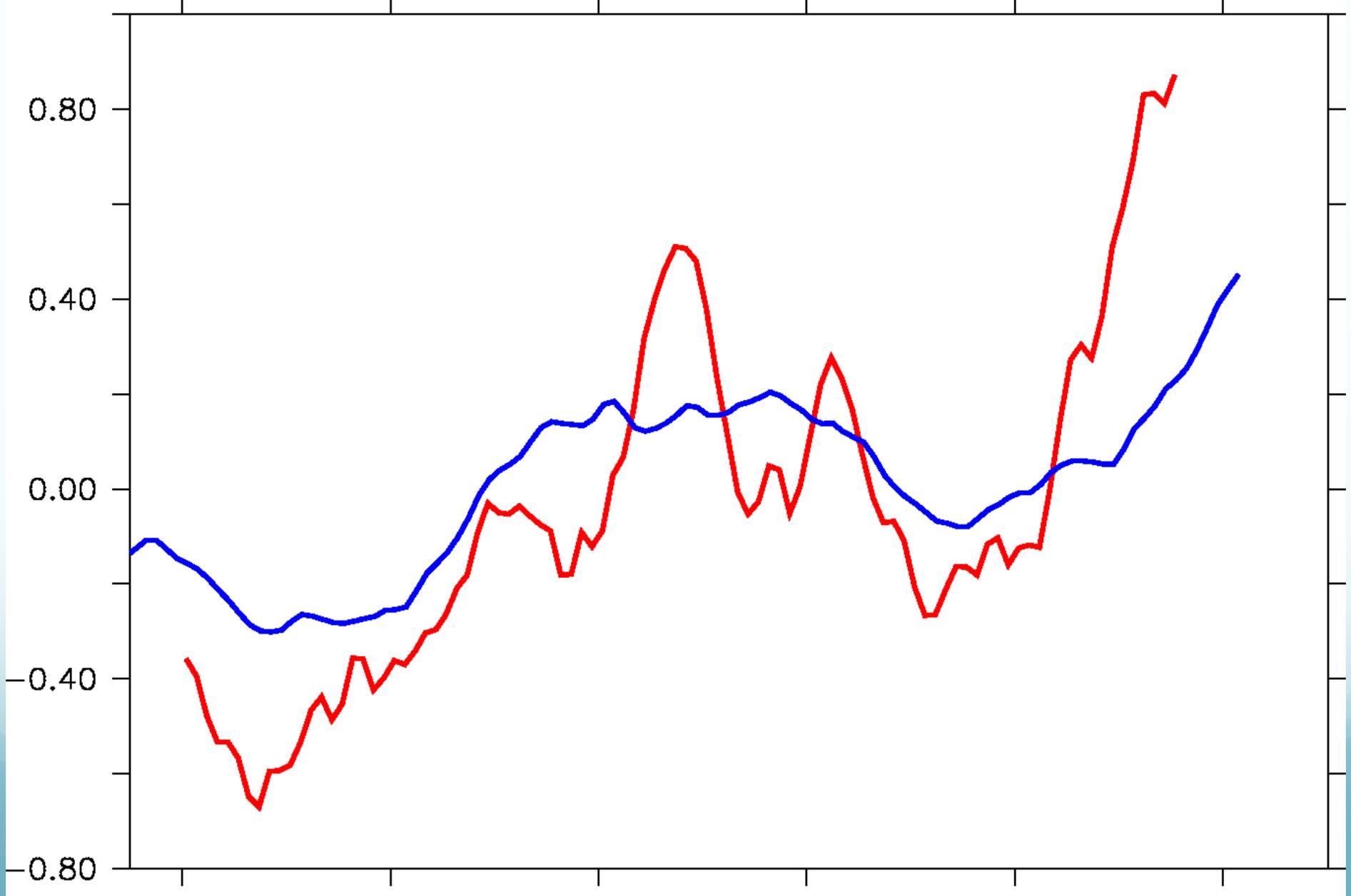
Variabilité multi-décennale atlantique

- 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

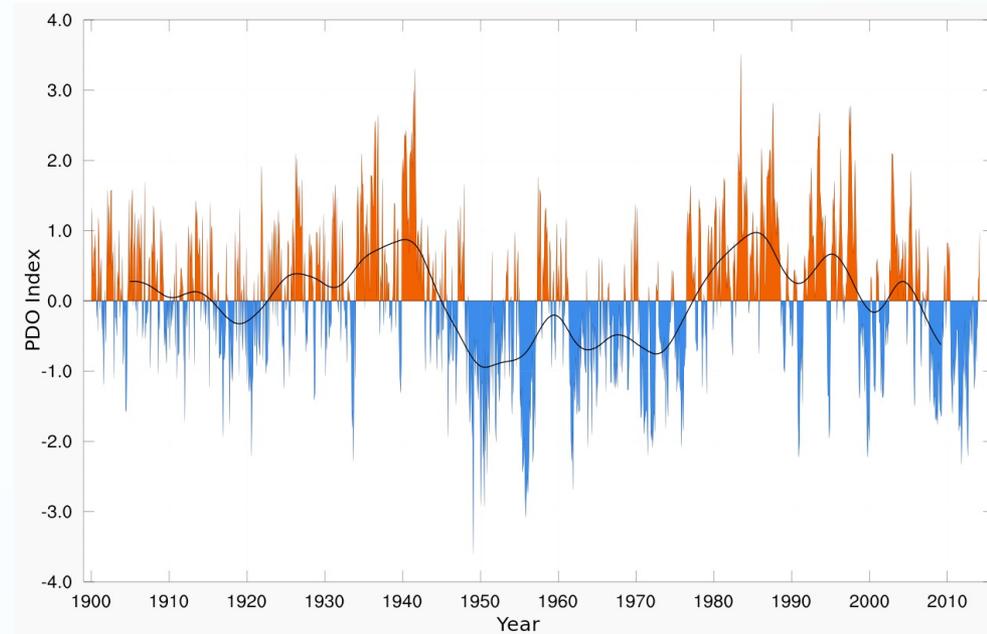


Quelques grands modes de variabilité climatique

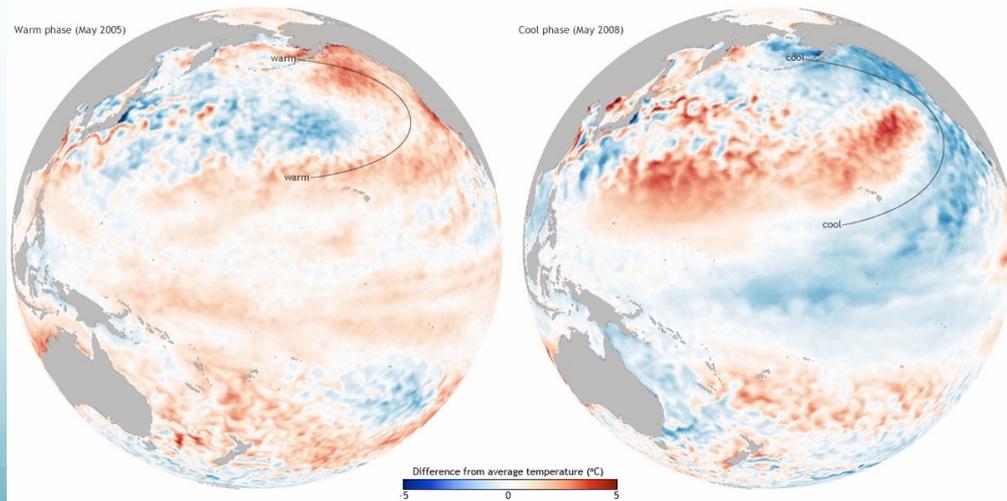
- Oscillation Nord Atlantique : NAO
- Oscillation El Nino : ENSO
- Variabilité multi-décennale atlantique : AMV
- Oscillation décennale Pacifique : PDO

Oscillation décennale pacifique

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

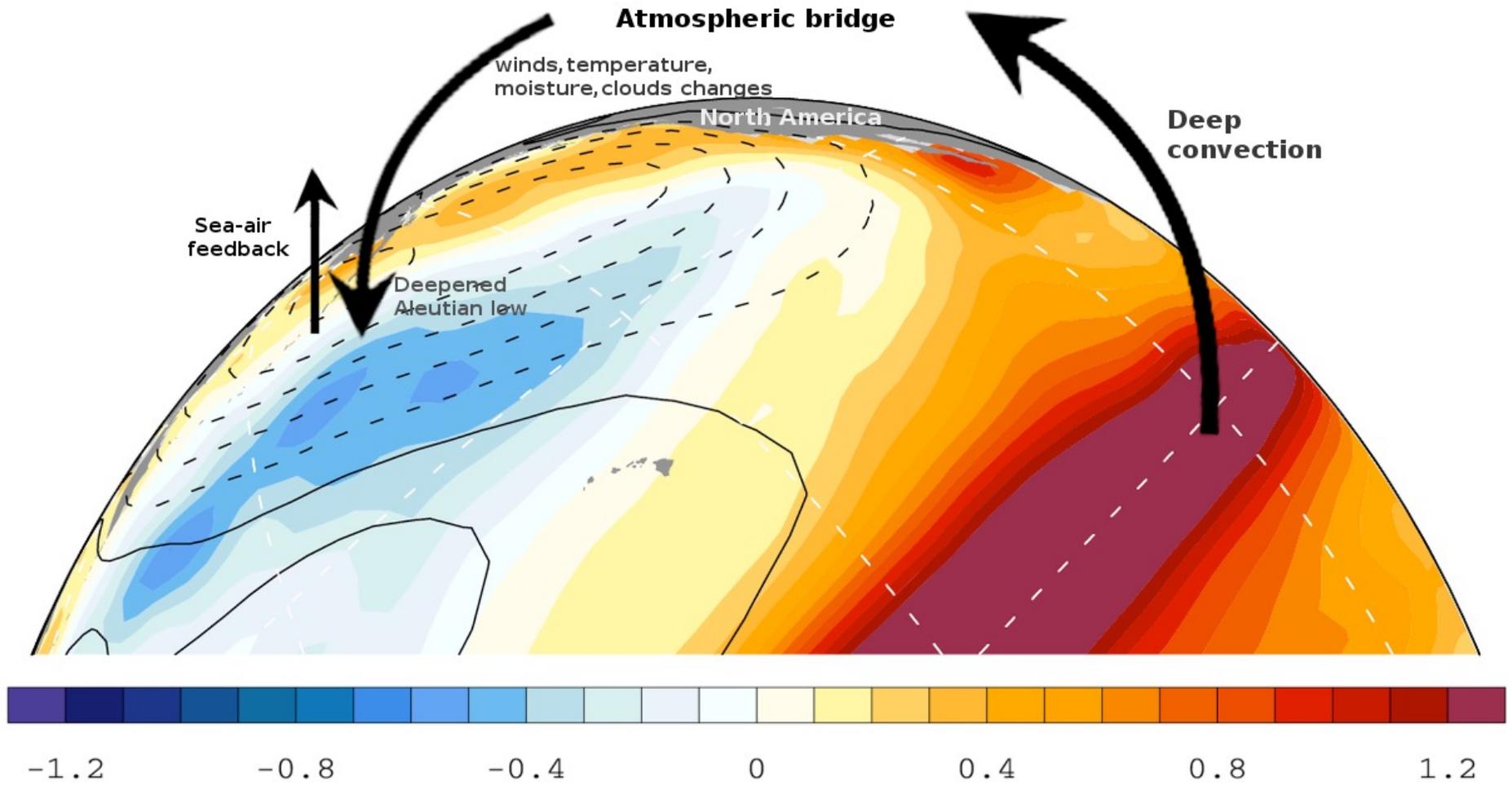


Pacific Decadal Oscillation



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

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

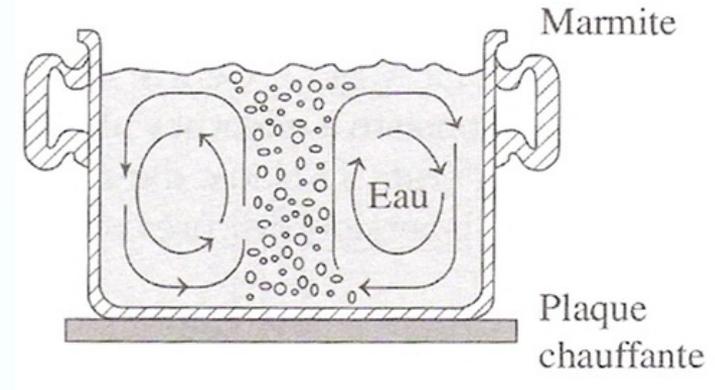


Autres lois inclues dans les modèles

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

Modèle de Lorenz

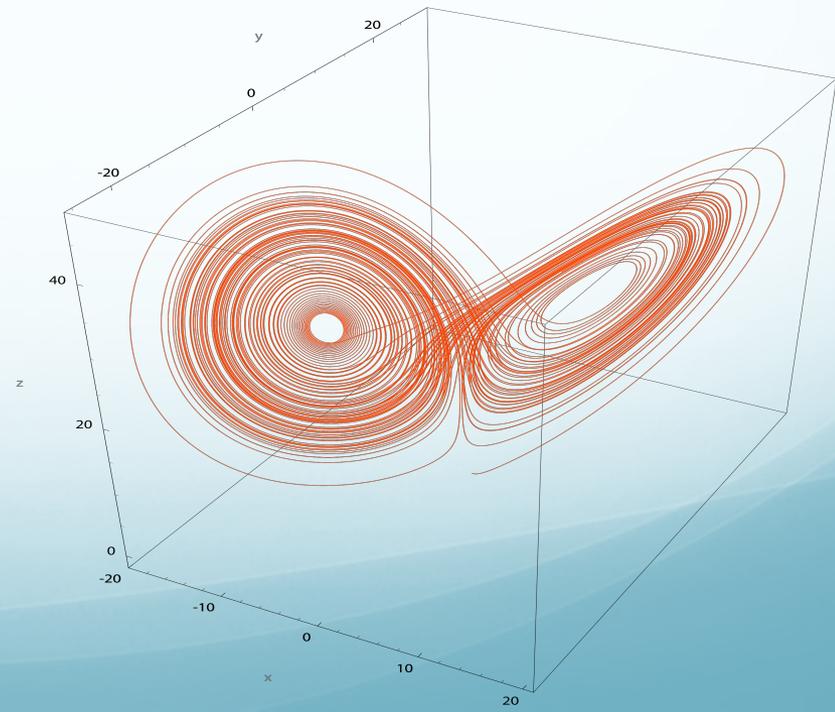
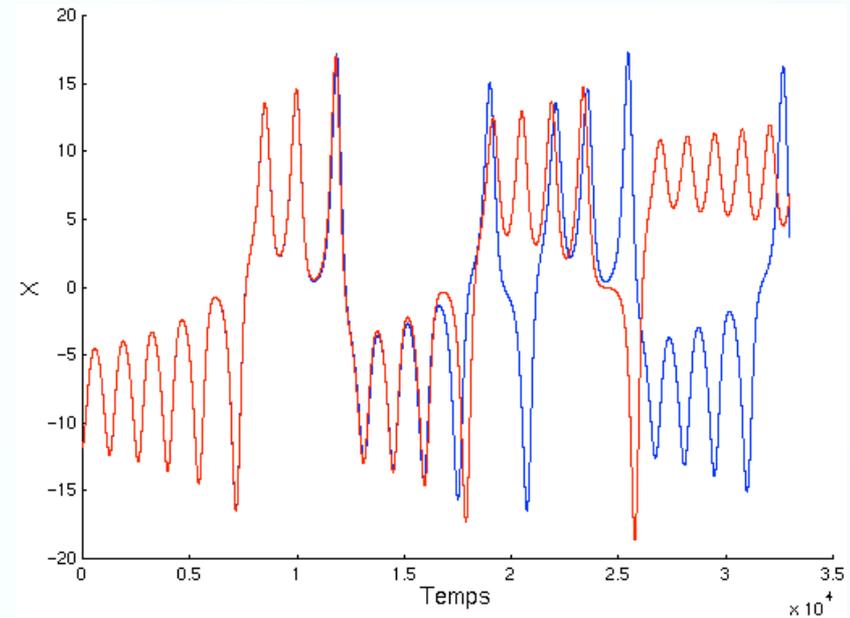
- Modèle simplifié de l'équation Navier Stokes appliqué au phénomène de convection (dite de Rayleigh-Bernard)
 - X est la vitesse de montée
 - Y le gradient de T horizontal
 - Z est le gradient de T vertical
- Système non linéaire
- Simplification de la réalité !



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

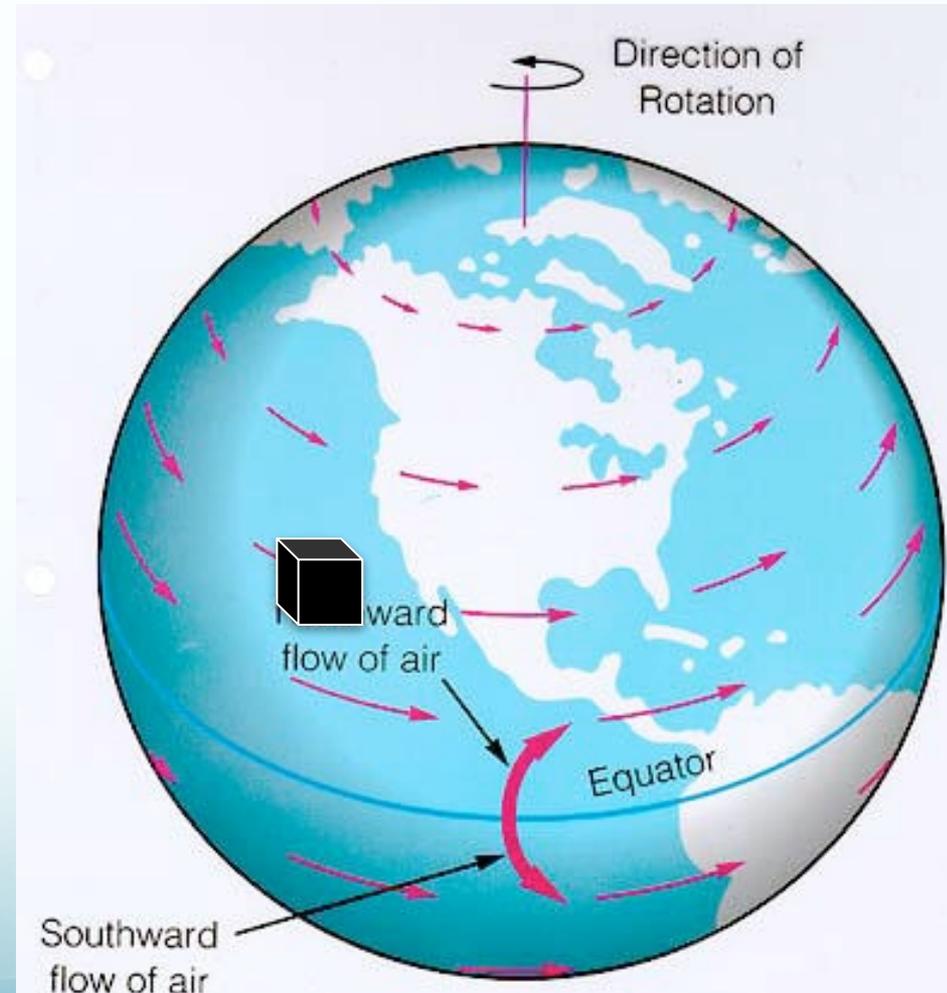
Modèle de Lorenz

- Sensibilité aux conditions initiales
- Attracteurs étranges



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

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



Résolution numérique des équations

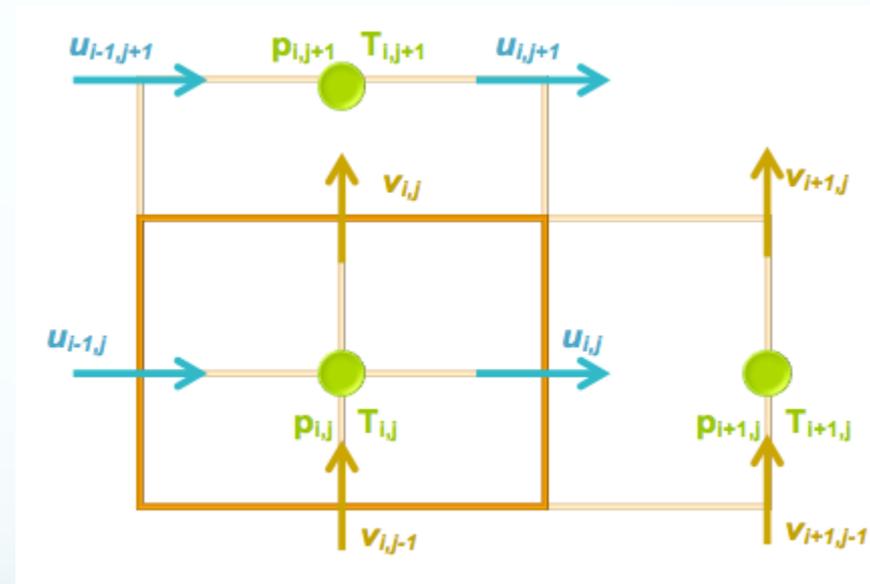
Pression, vitesse dépend de i, j, k (espace) et du temps discret p

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

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”

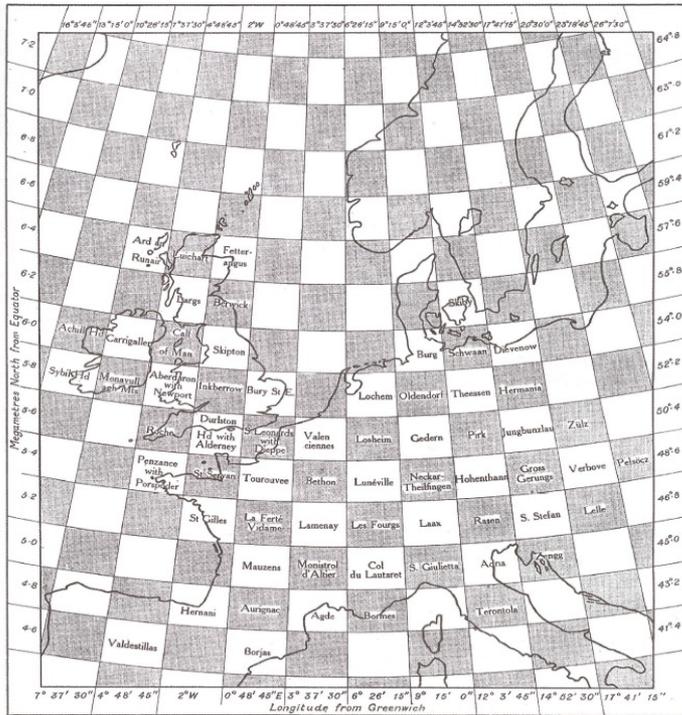
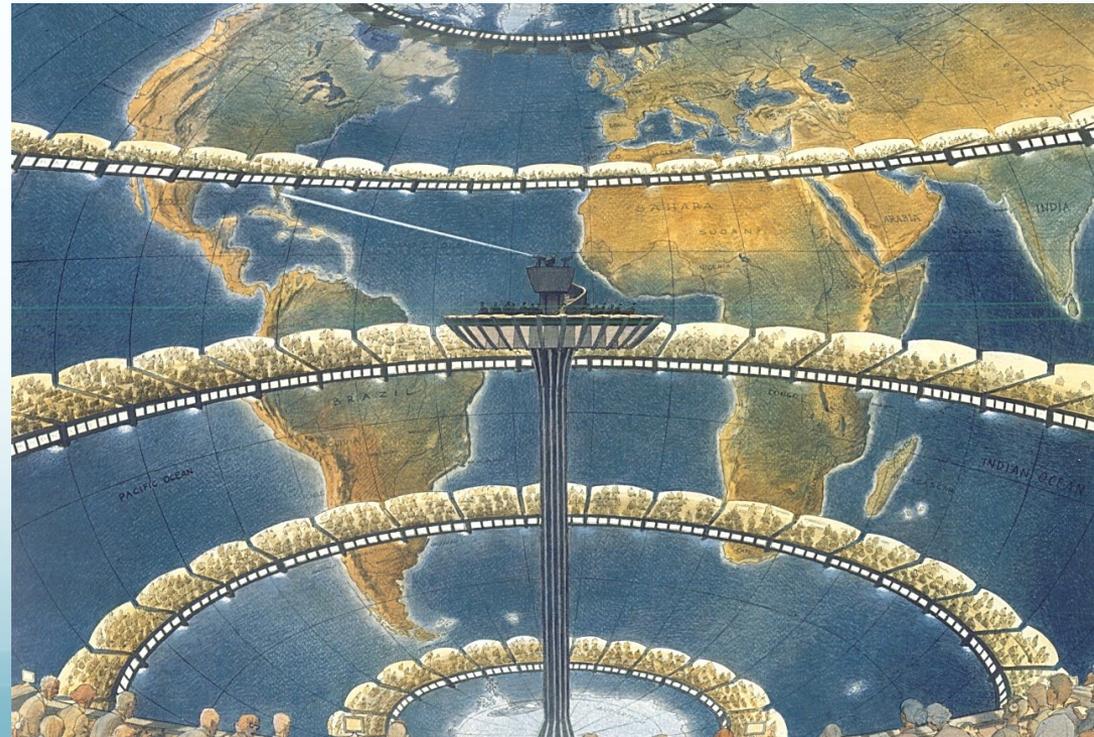
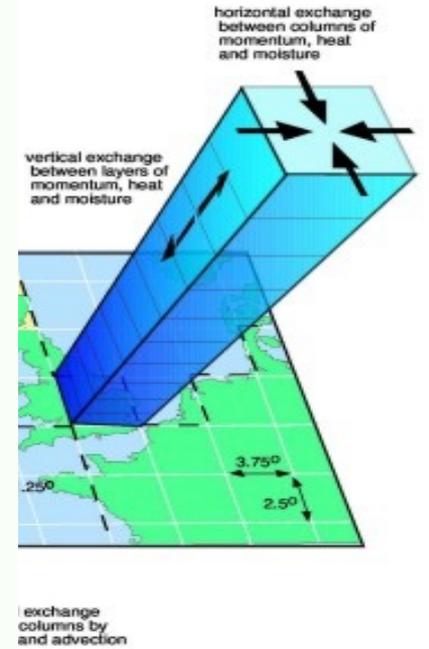
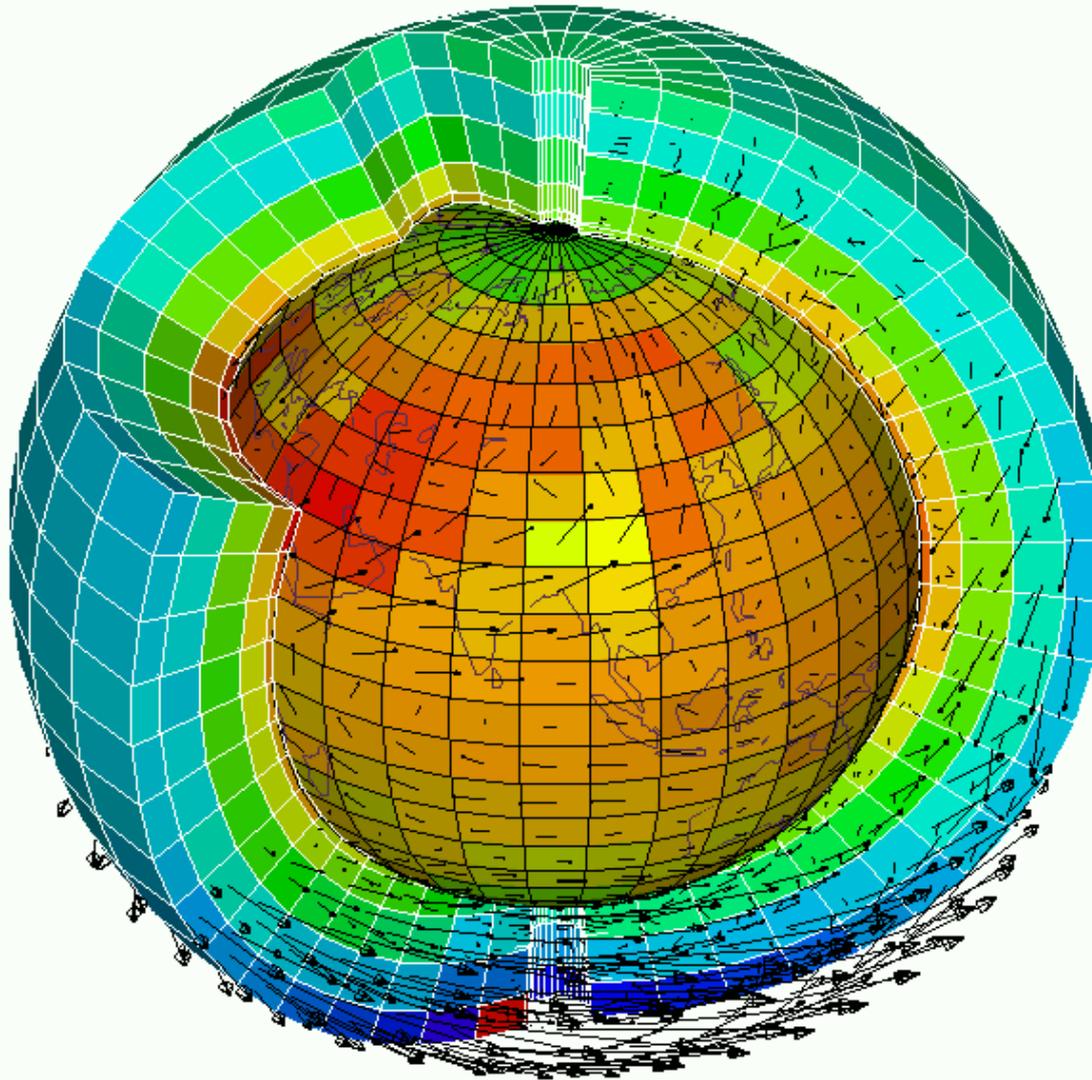


Figure 1.6 Richardson's idealised computational grid. (Frontispiece of WPNP)

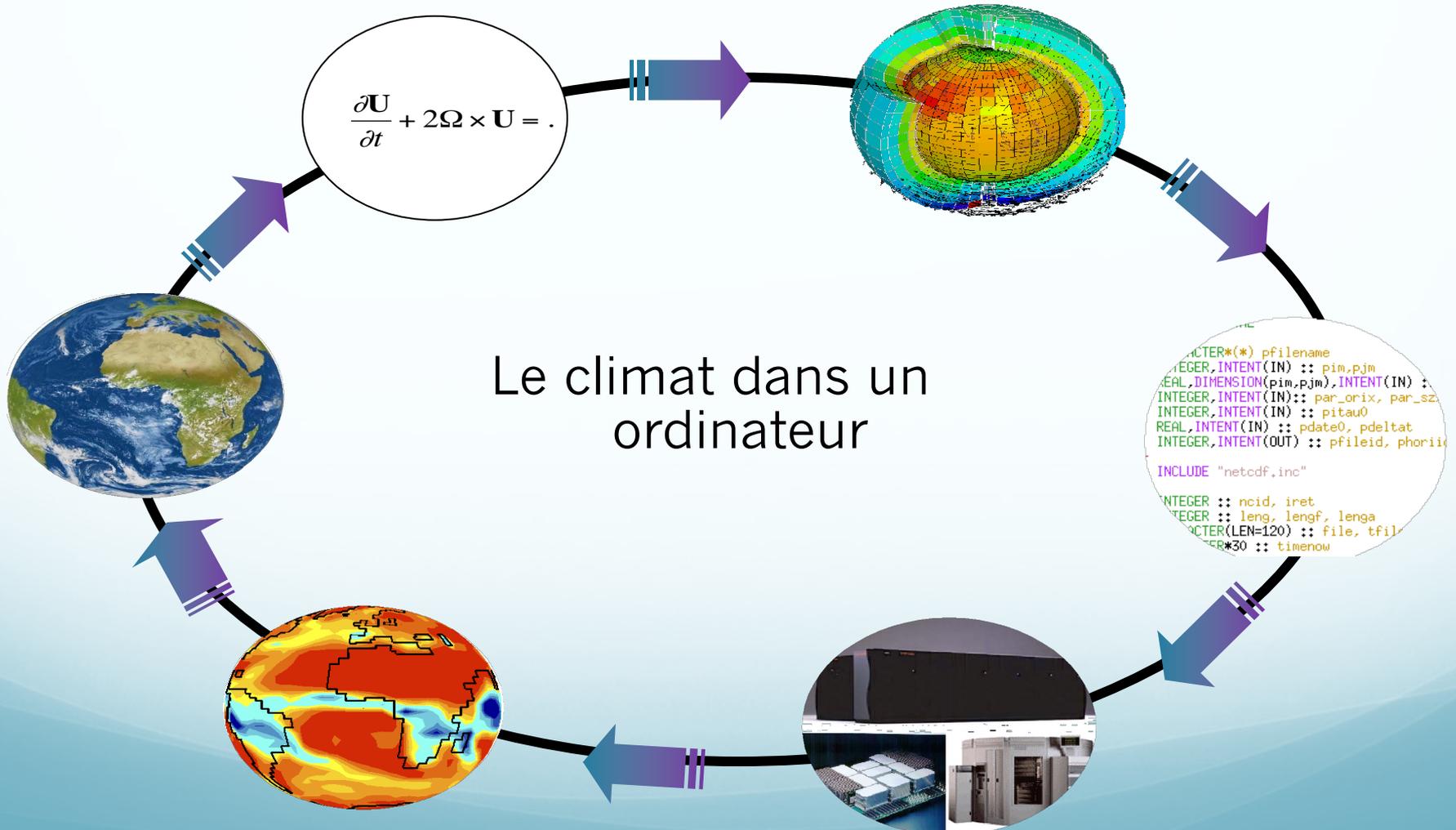
Les calculateurs



Le maillage de la Terre dans un modèle

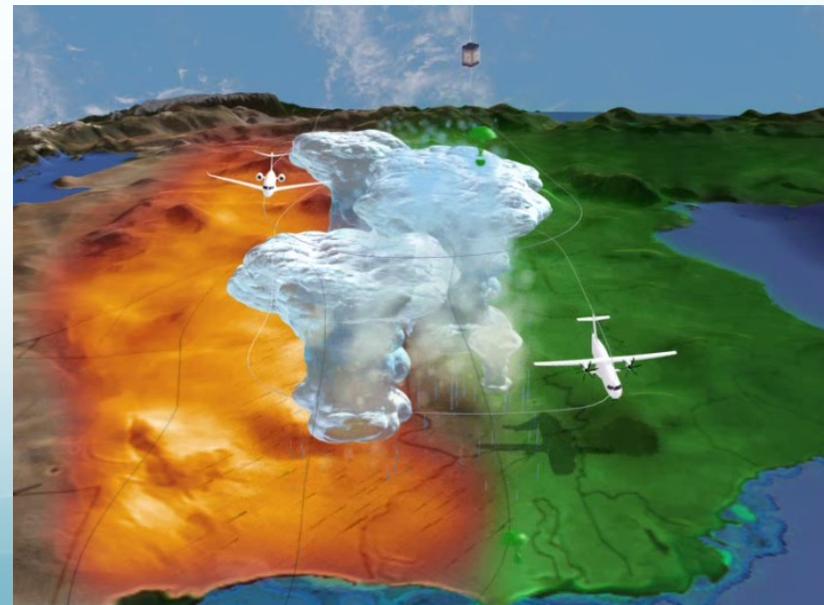
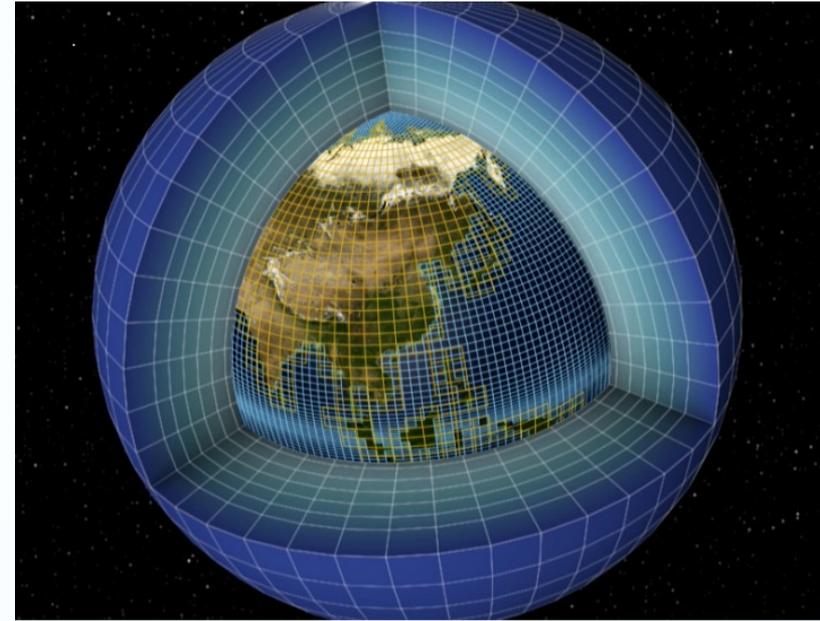


Principe de la modélisation du climat



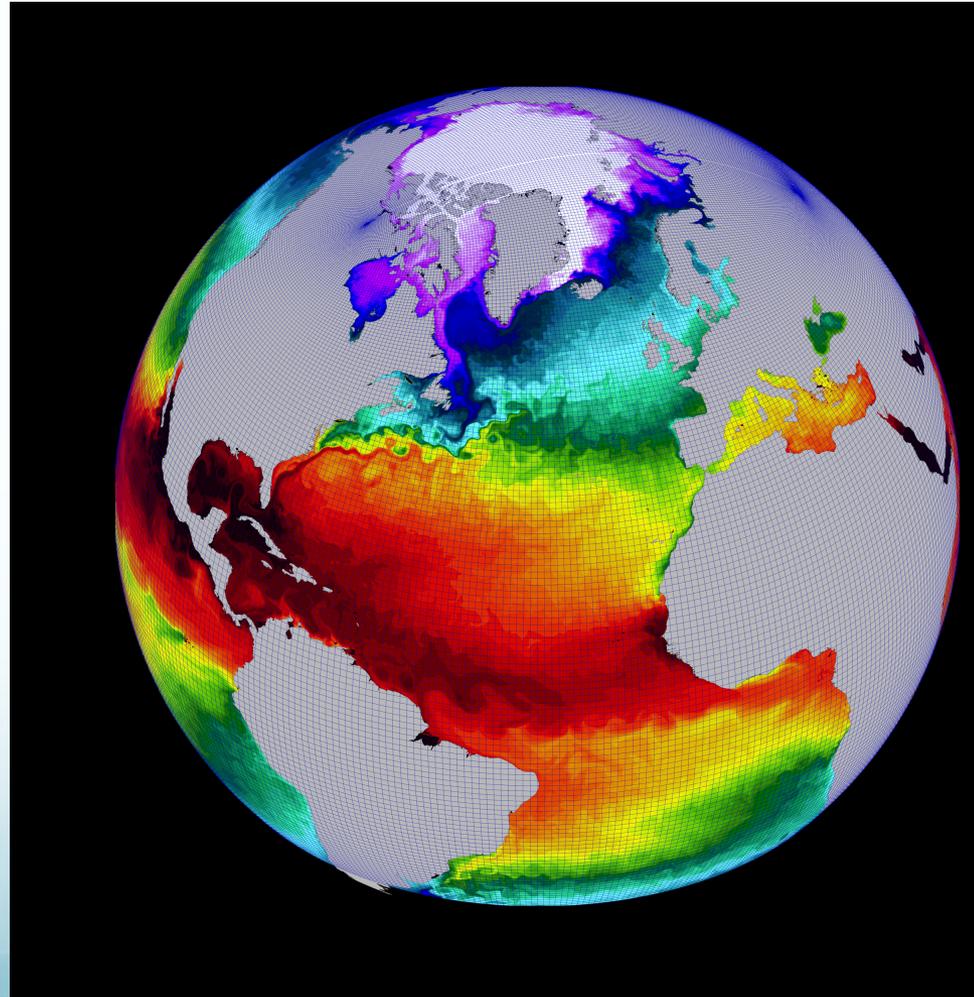
Modèle d'atmosphère

- 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

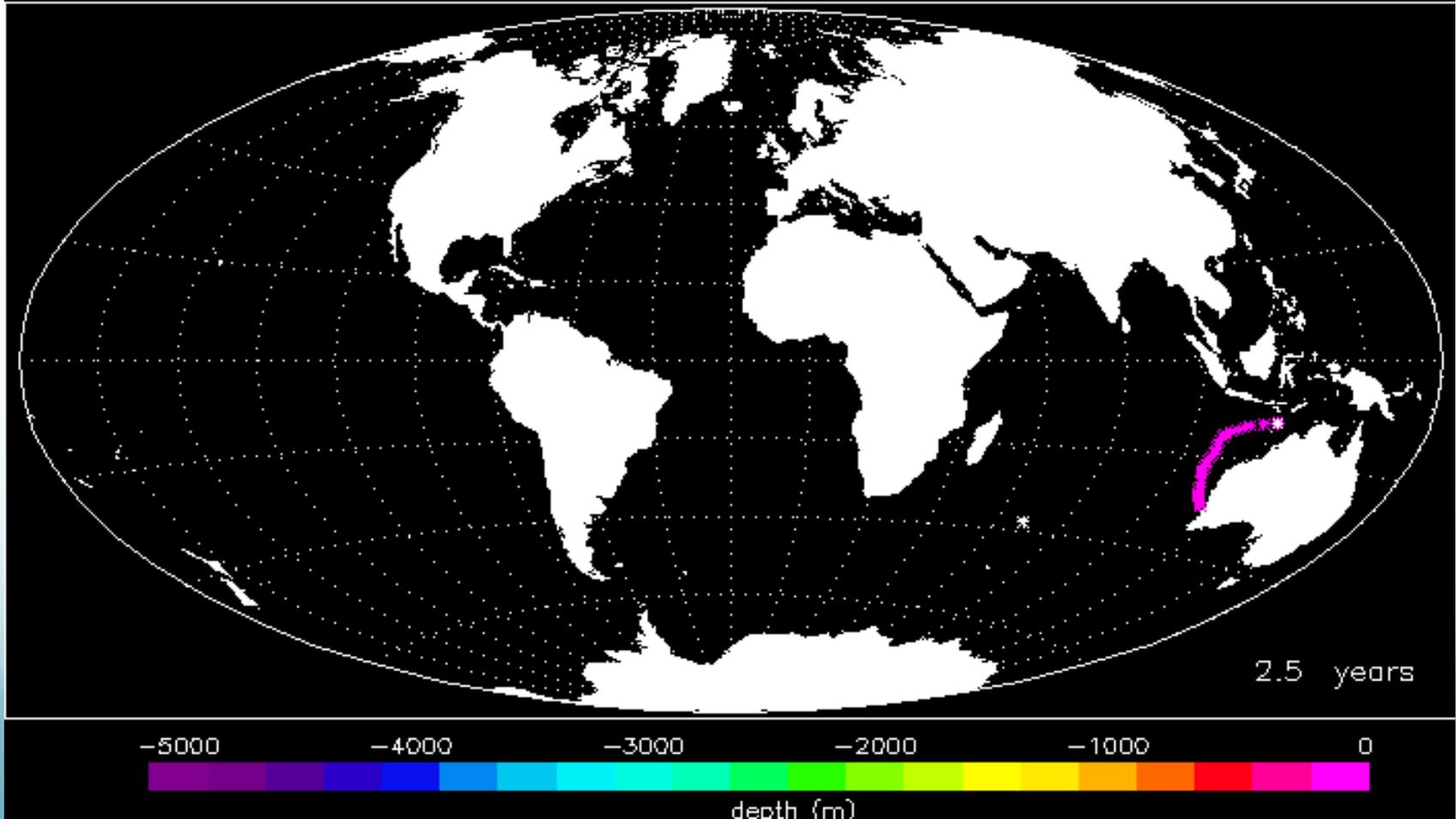
- Modèles plus récents par rapport atmosphère
- Problématiques spécifiques (tourbillon plus petit, salinité, chauffé par le dessus...)



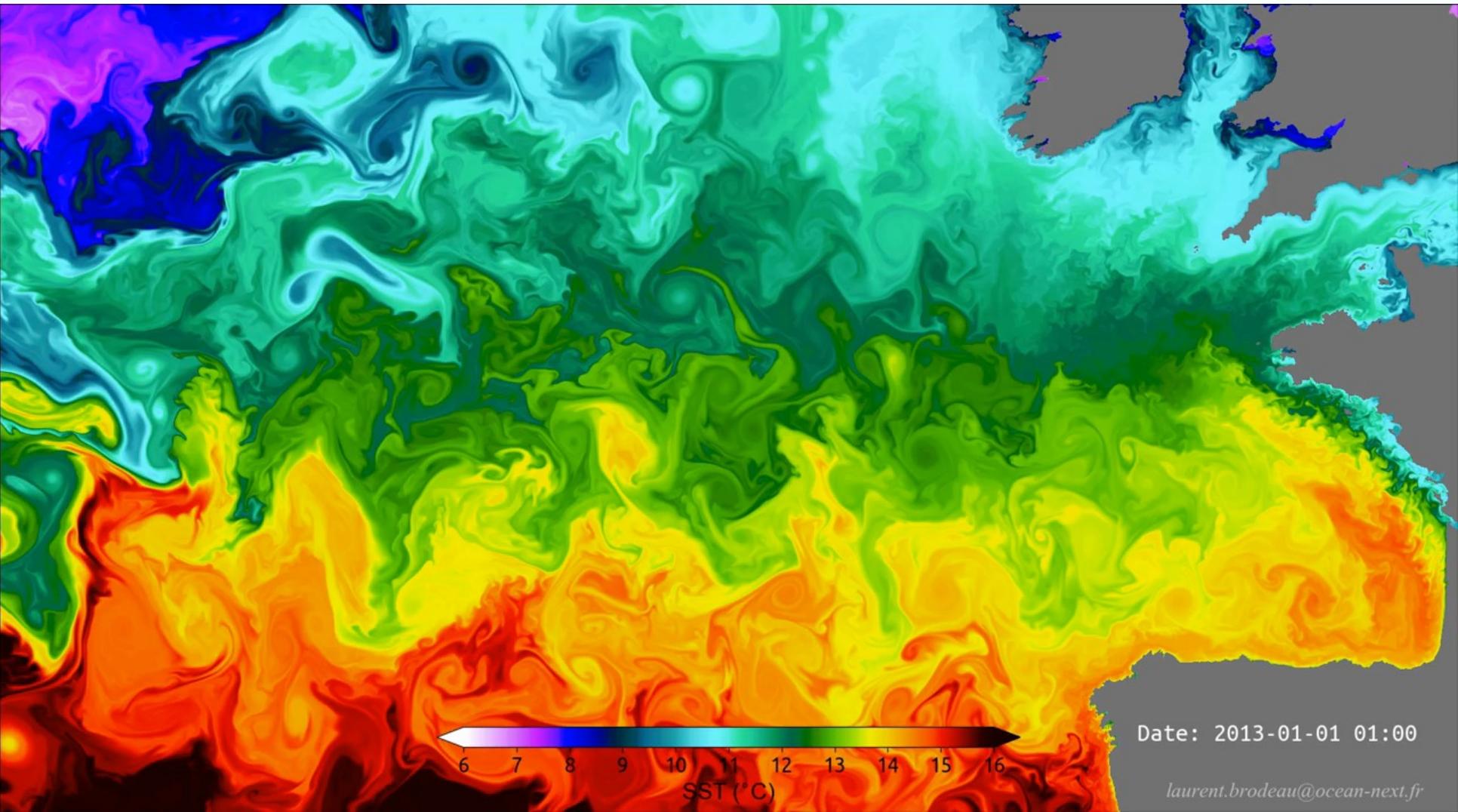
Trajectoire lagrangienne dans un modèle d'océan

"Global" trajectory in the OPA model

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

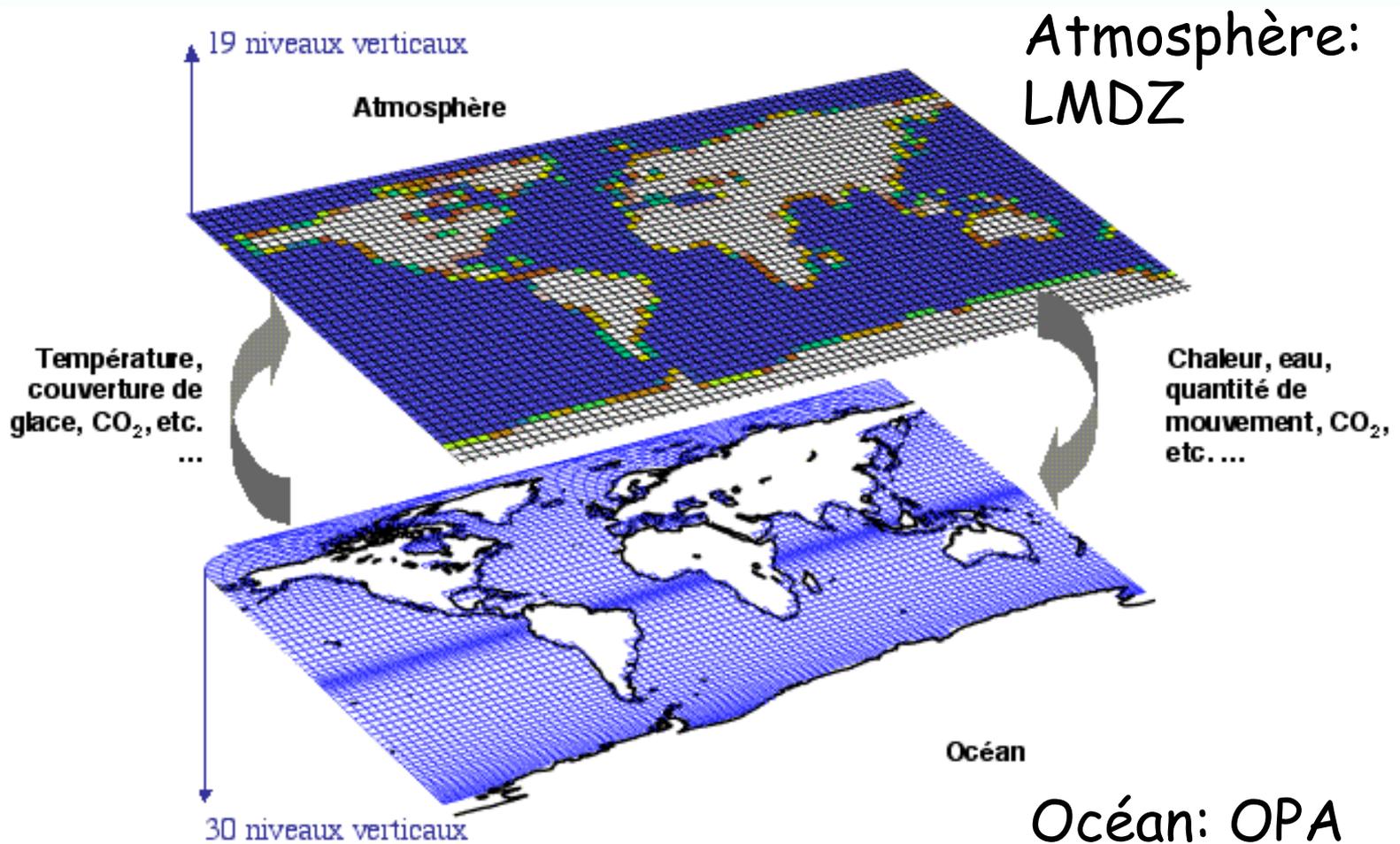


Océan, un monde fascinant



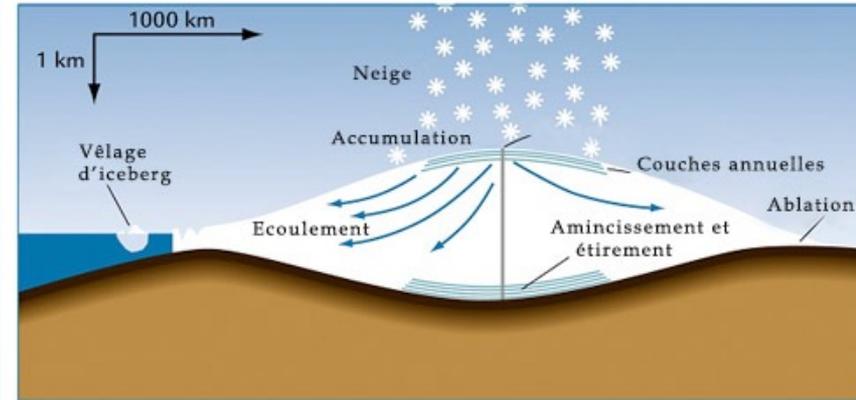
Modèles couplés océan-atmosphère

Exemple du modèle de l'IPSL



Autres composantes...

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

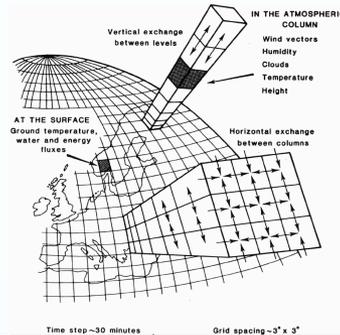


Conditions Initiales « météo »

T_0, V_0, P_0, q_0

Modèle

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



Statistiques
Mois/saisons

Conditions aux limites

Relief, nature du sol

Albedo

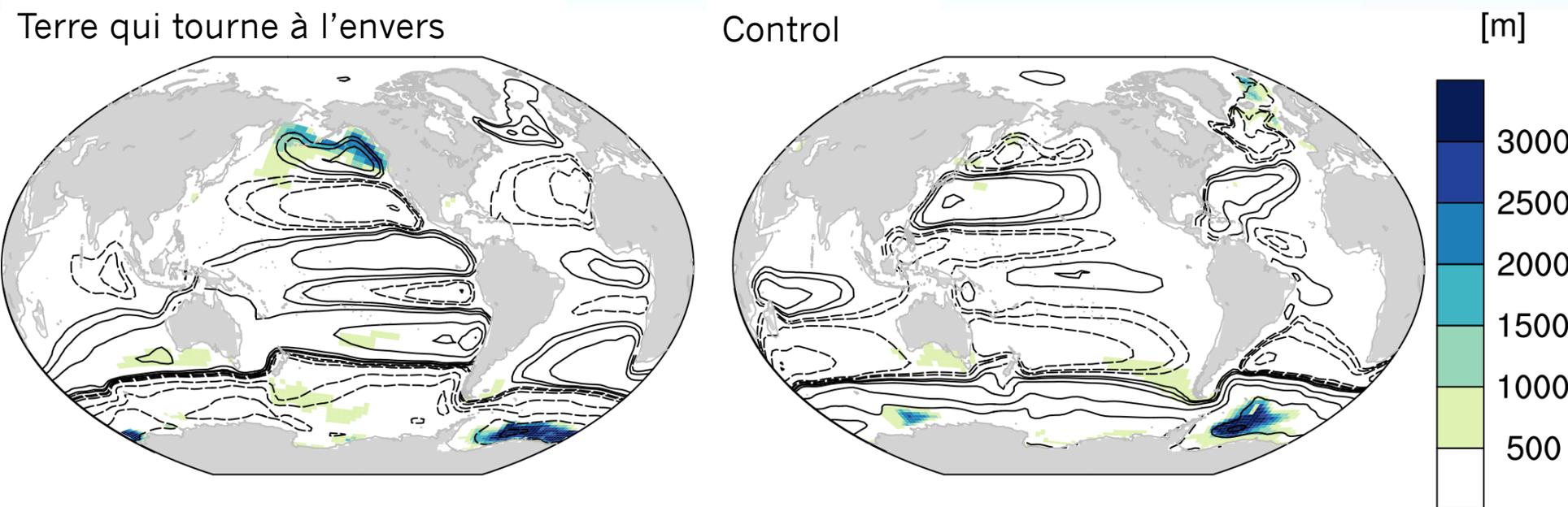
Température de surface des océans

Composition de l'atmosphère (CO₂, O₃)

Rayonnement solaire incident

Terre qui tourne à l'envers

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



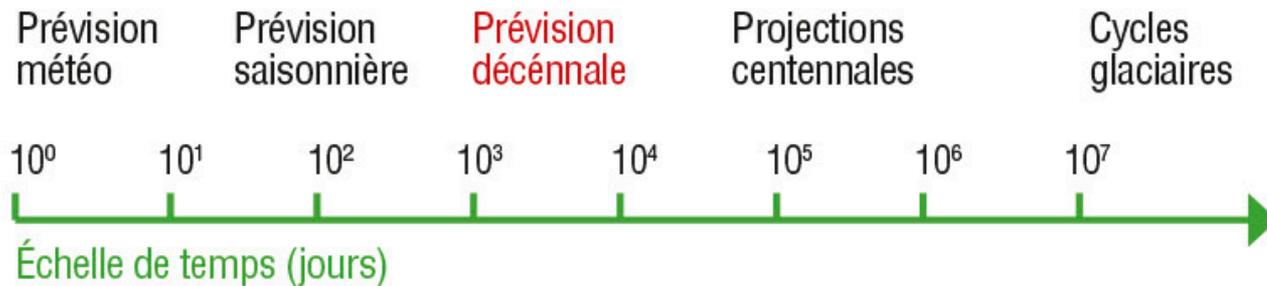
Prévision décennale

© D. Swingedouw

**Importance
conditions initiales**



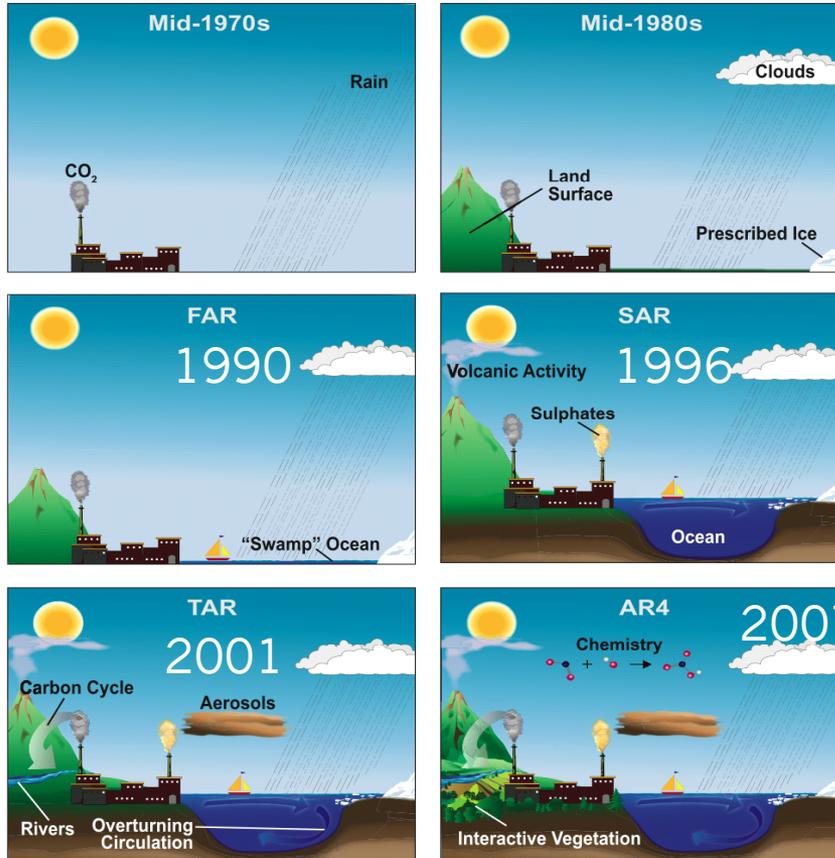
**Importance
conditions aux limites**



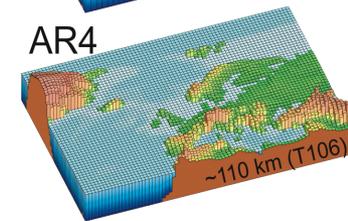
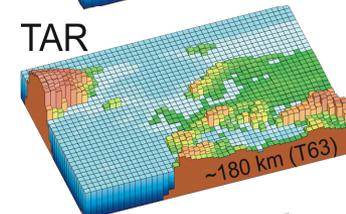
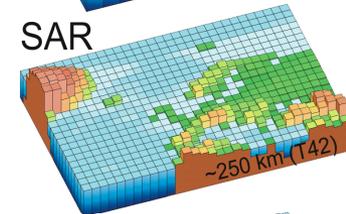
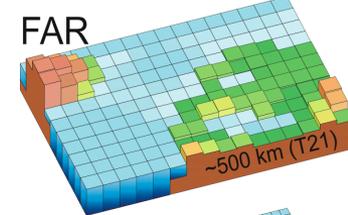
► Schéma montrant l'importance relative des conditions initiales et aux limites pour le climat selon les échelles de temps.

Evolution des modèles climatiques

composantes

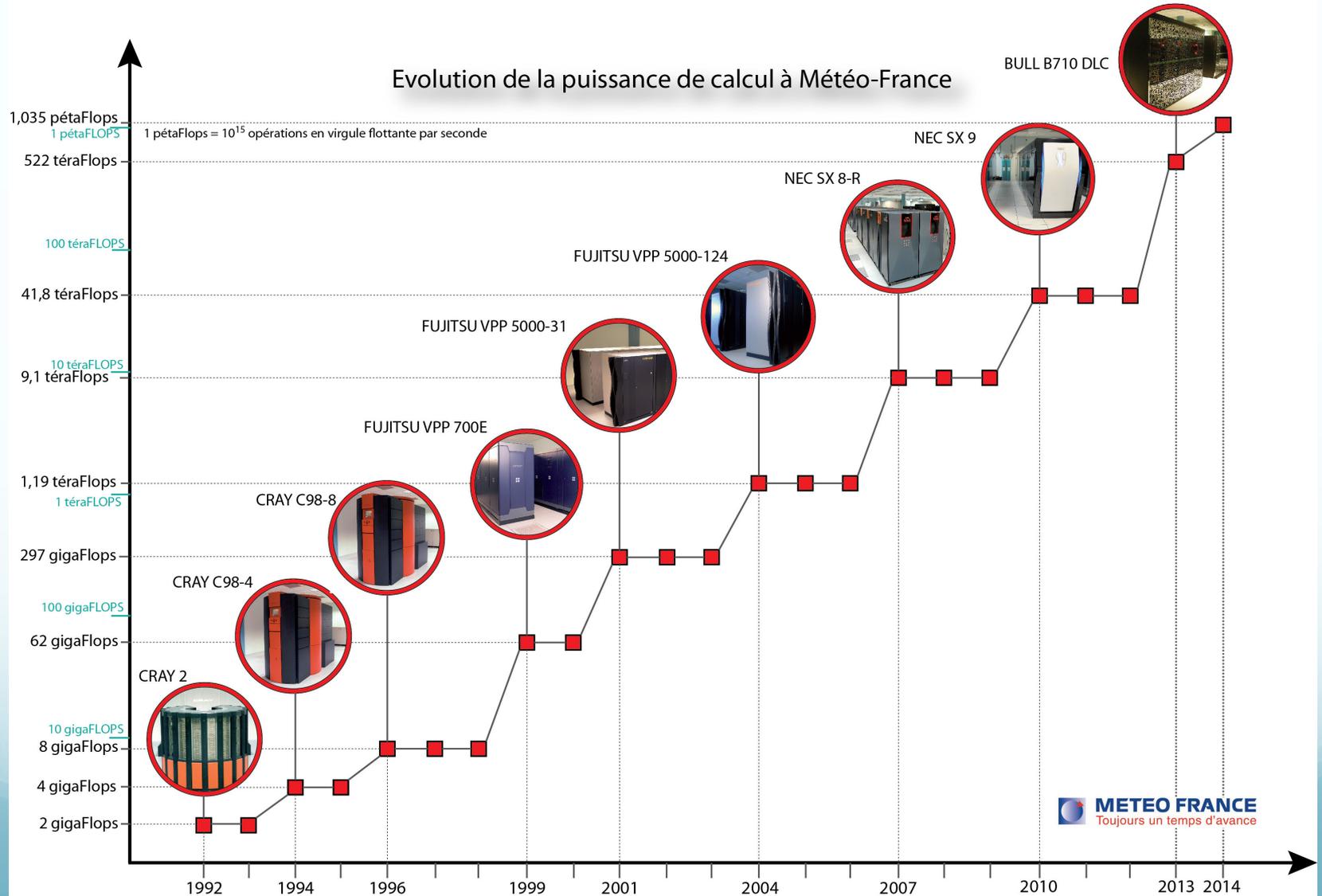


résolution



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

Moyens de calcul



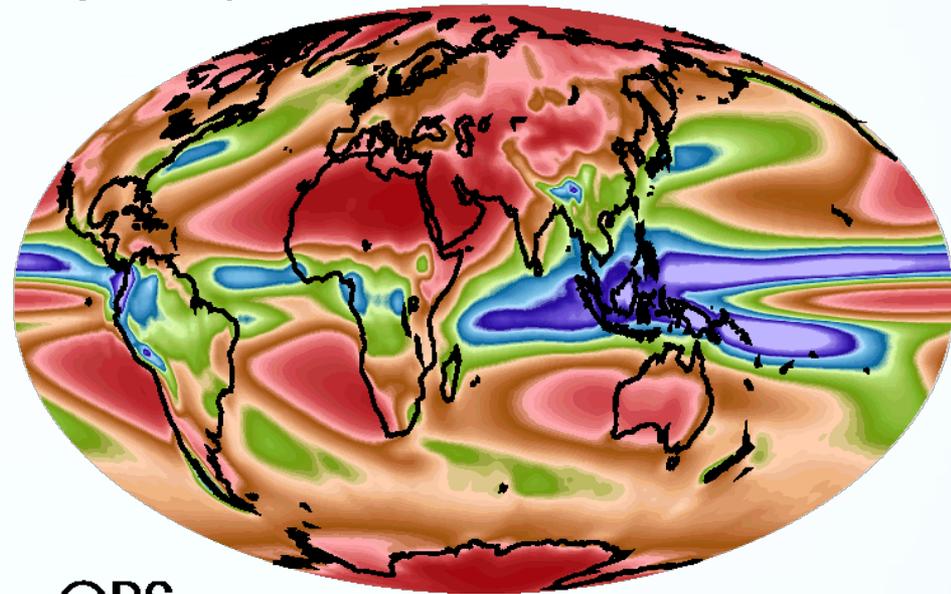
Tester les modèles

Des moyens de mesures inédits:

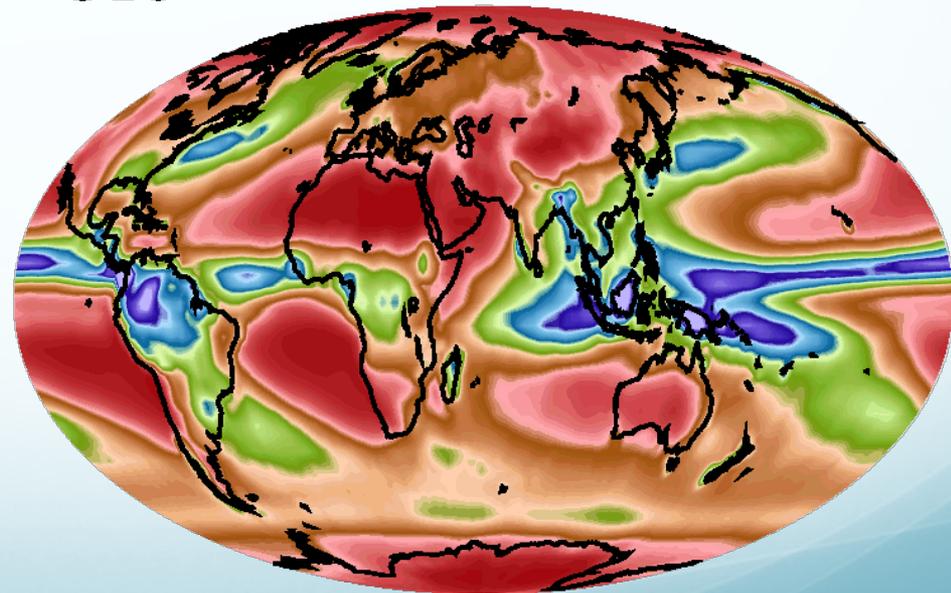
- Satellites
- Balises ARGO



CMIP5

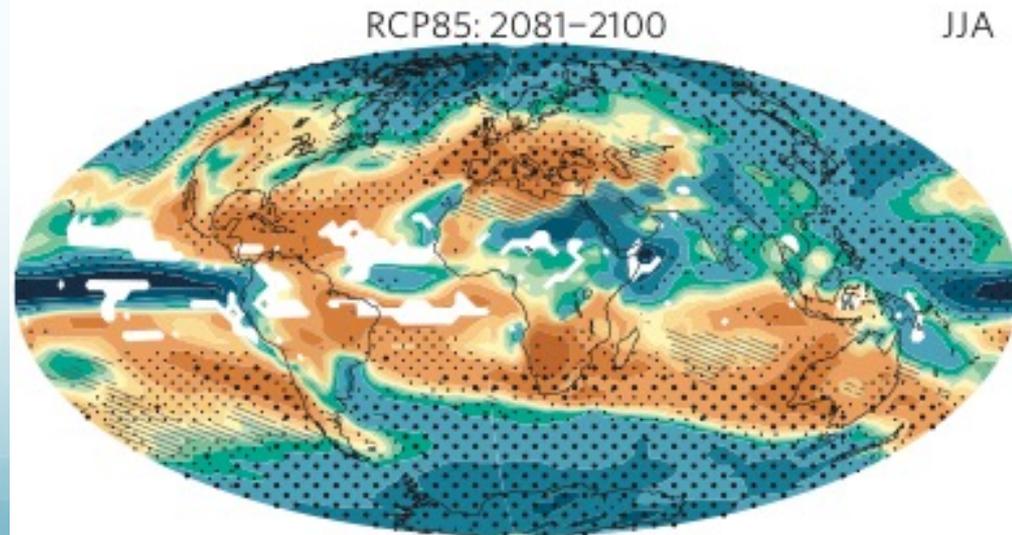
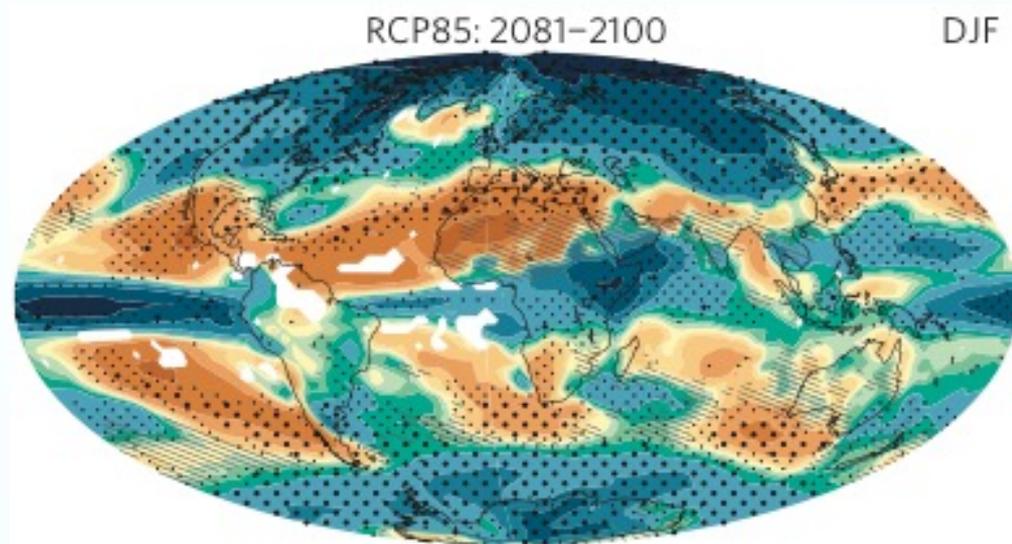


OBS

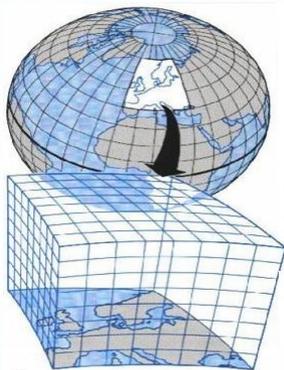


Projection de précipitations

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

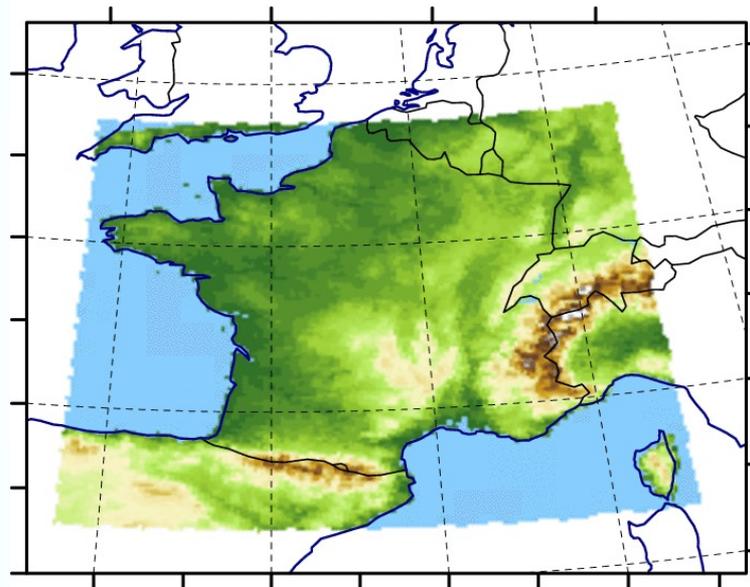


Regionalisation

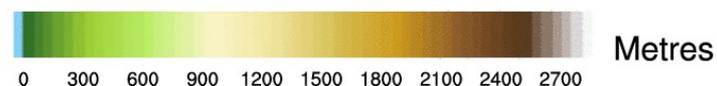
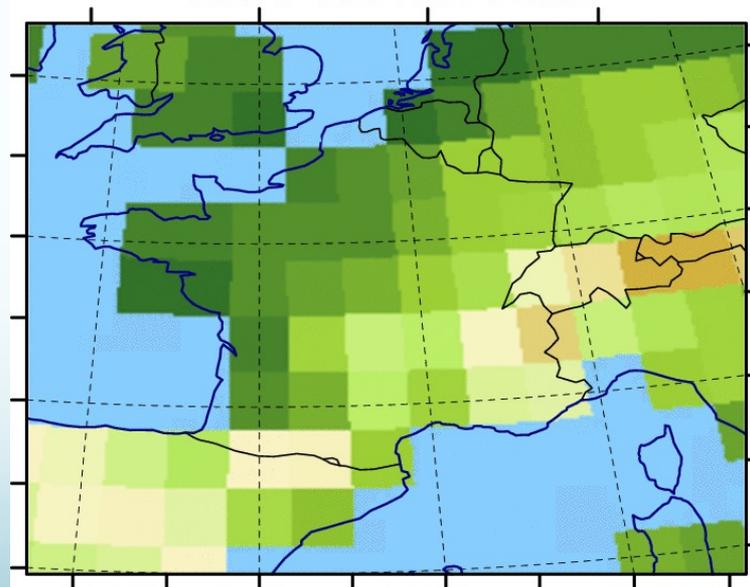


- Possibilité d'imbriquer les modèles les uns dans les autres
- Meilleure résolution du climat local (vent vallée du Rhone, événement cévenols, orages...)

CORDEX - ALADIN 12km

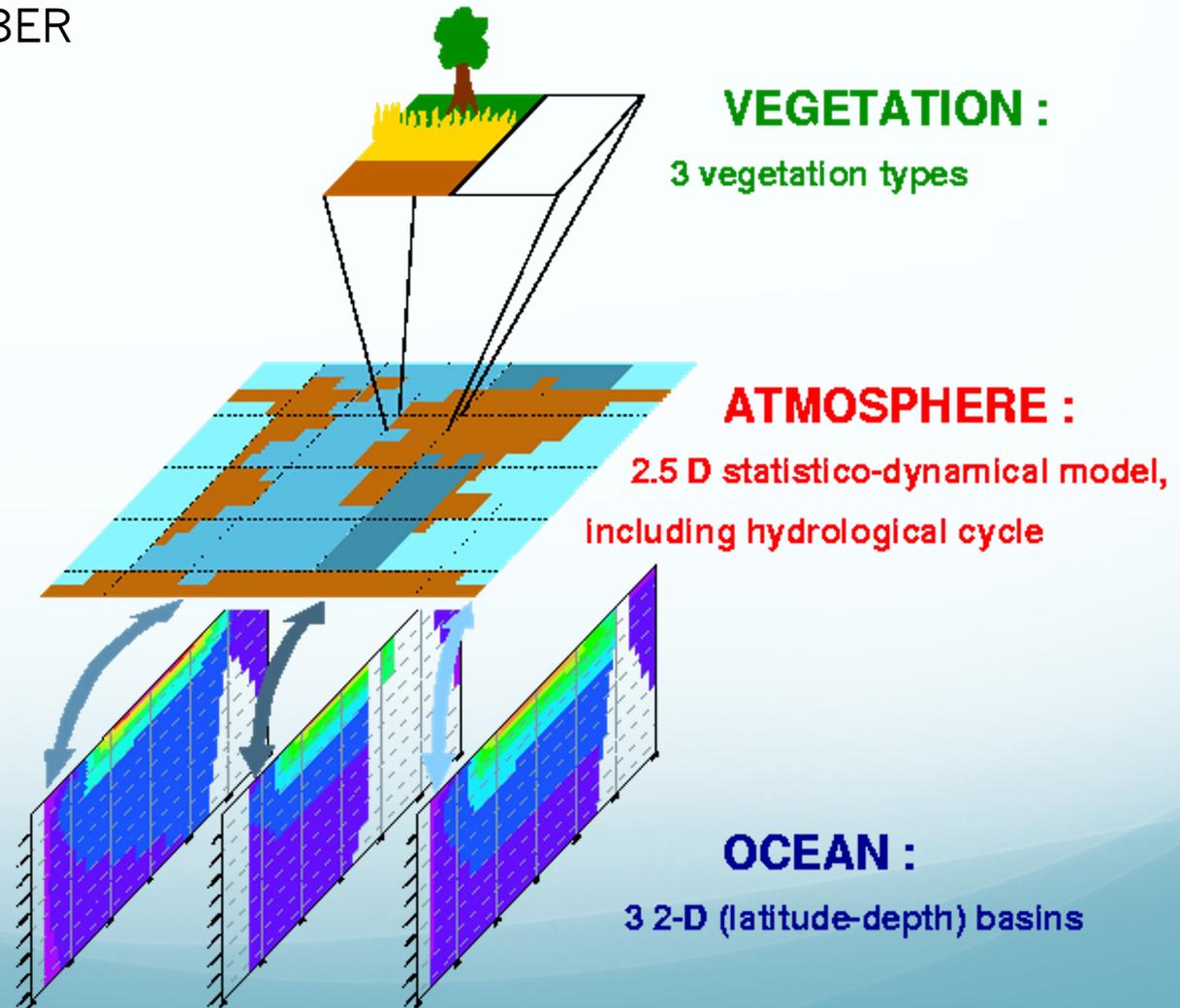


CMIP5 - ARPEGE 120km



Modèle de complexité intermédiaire (EMIC)

Exemple : modèle CLIMBER



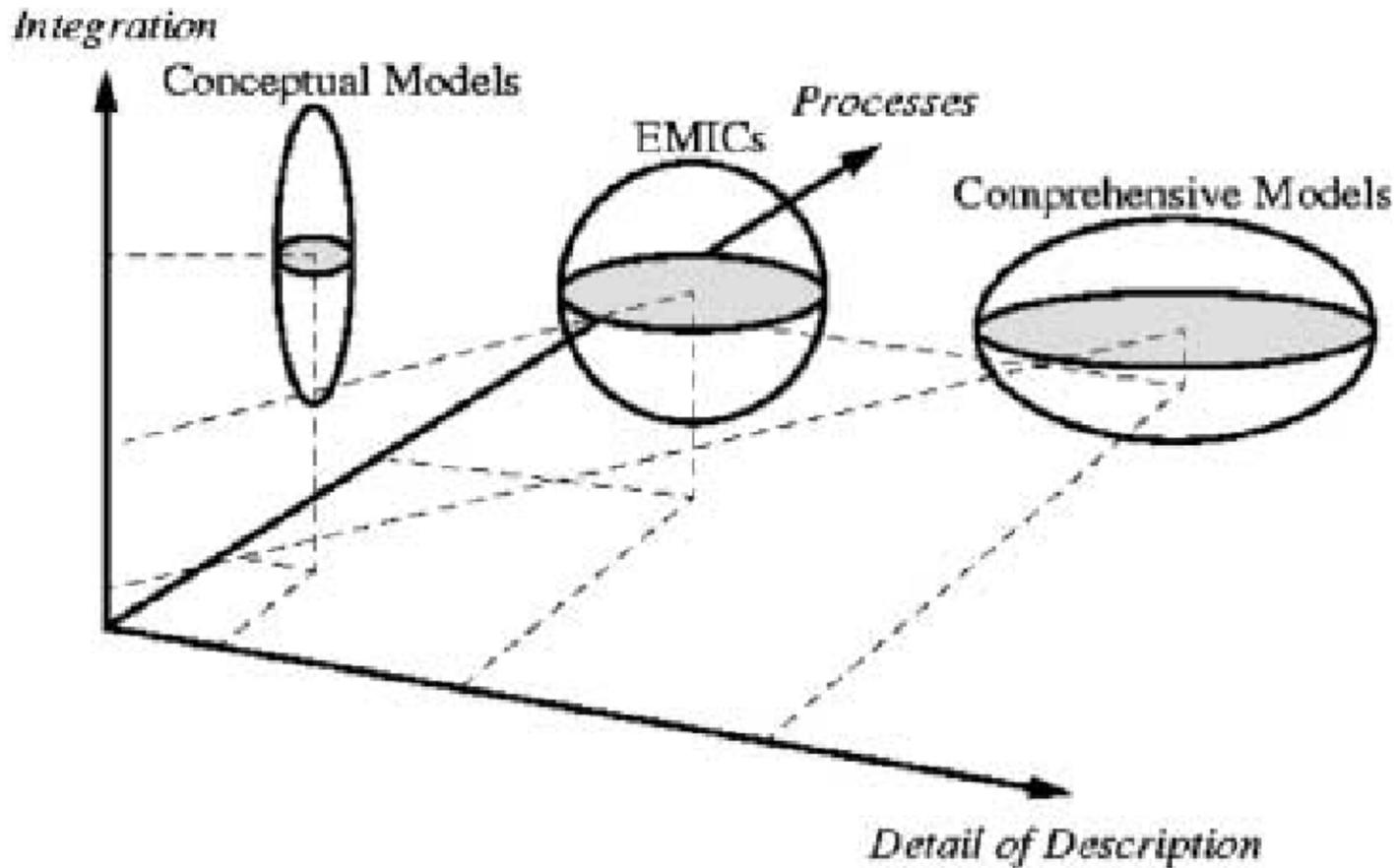


Les grandes familles de modèles

- 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



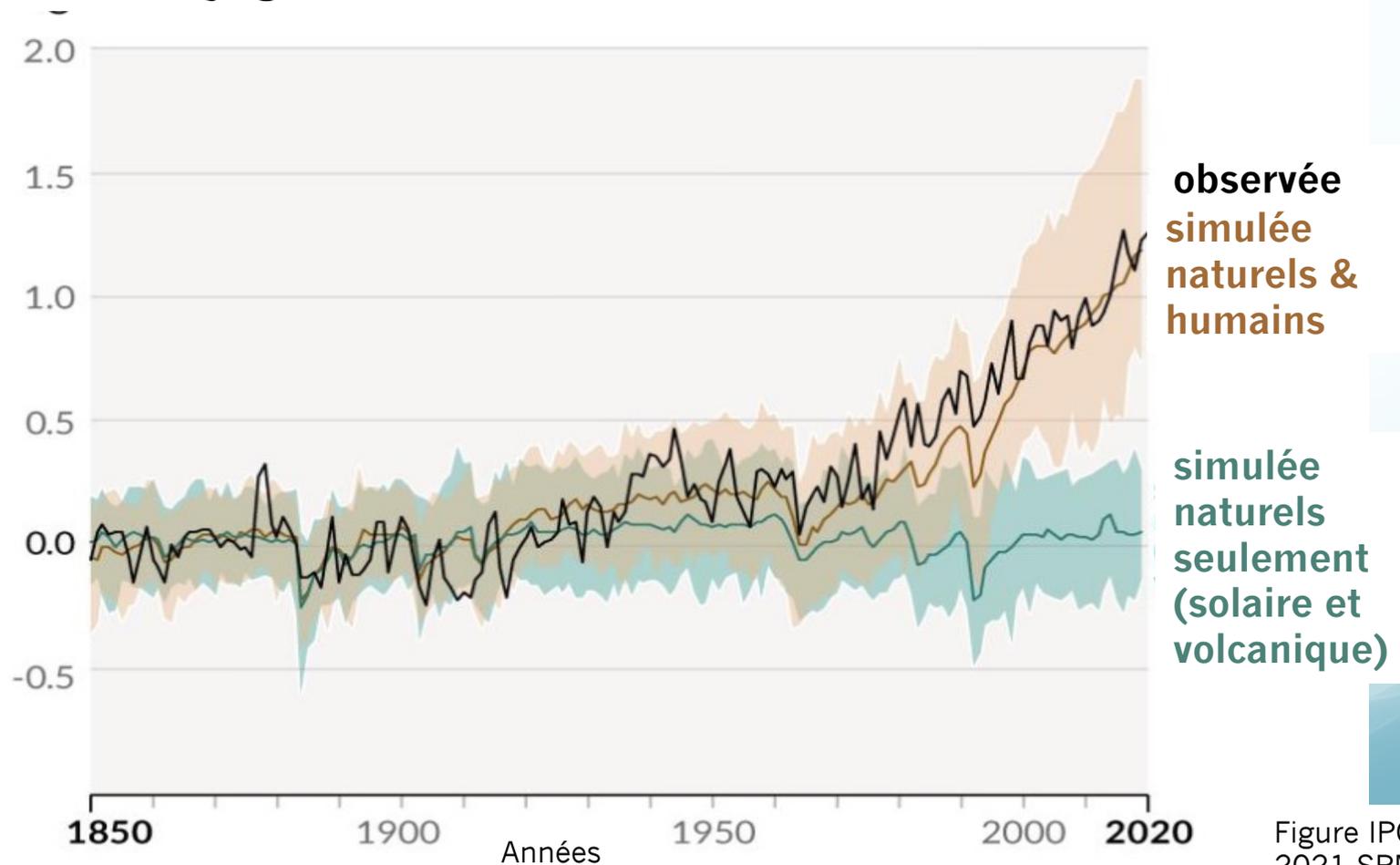
(Claussen et al, 2002)

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

Détection-attribution du changement climatique

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

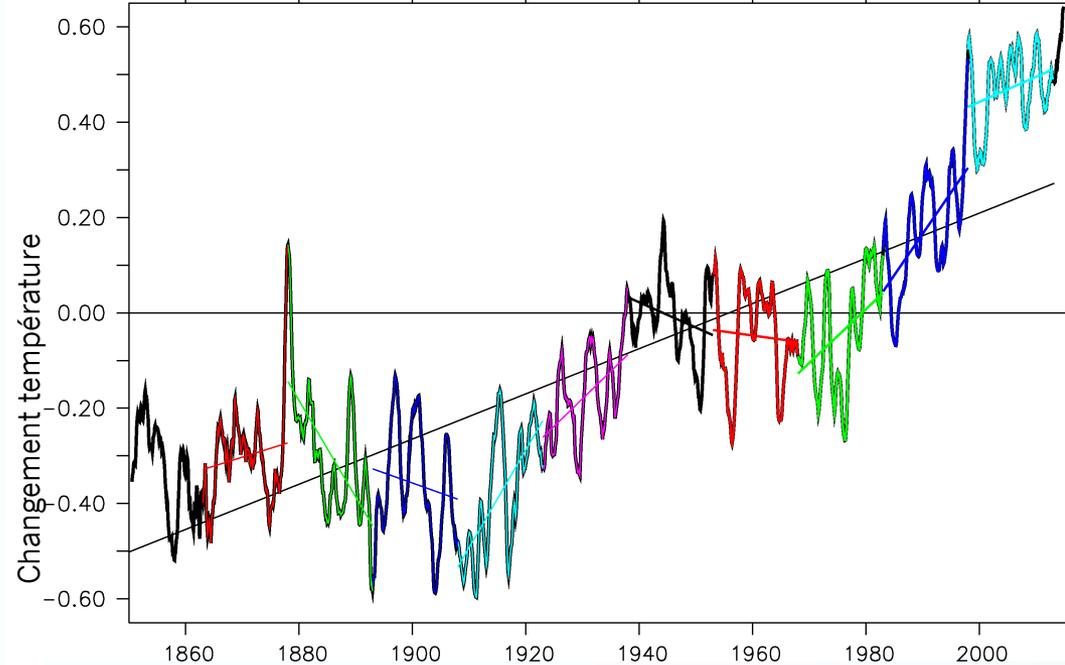


Un plateau de température ?

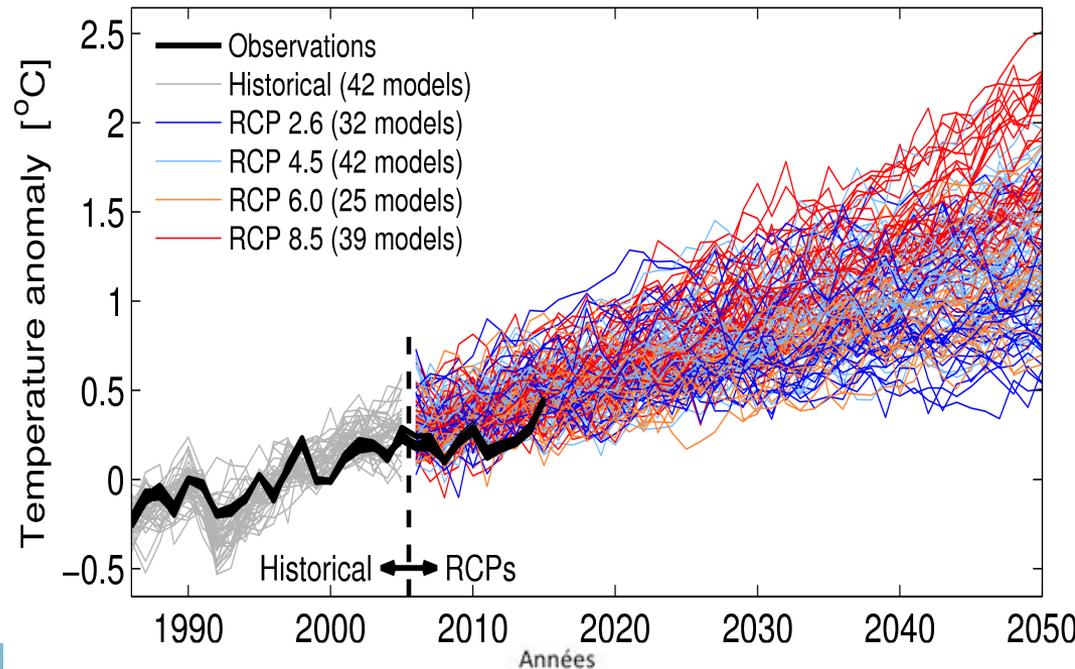
- Un réchauffement moindre depuis 15 ans
- Les modèles semblent presque sur-estimer le réchauffement:
 - Un passage transitoire ?
 - Une erreur dans la sensibilité climatique modèle ?



**Le climat
a cessé de
se
réchauffer**



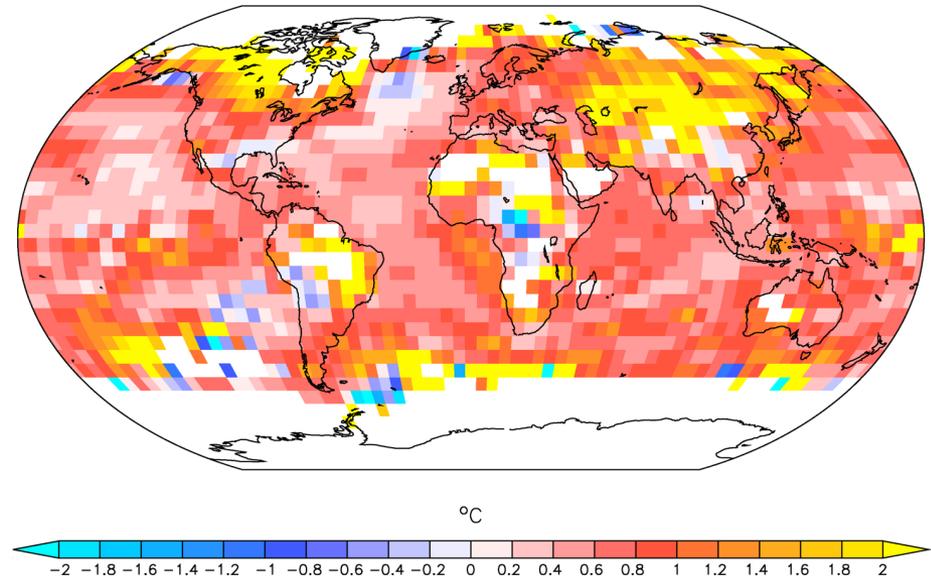
Global mean temperature near-term projections relative to 1986–2005



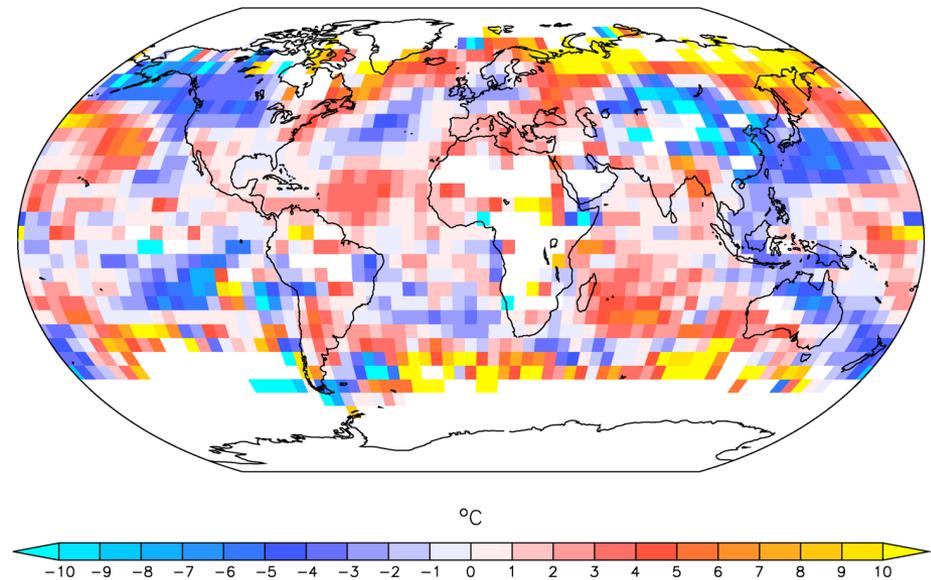
Un plateau de température ?

- 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

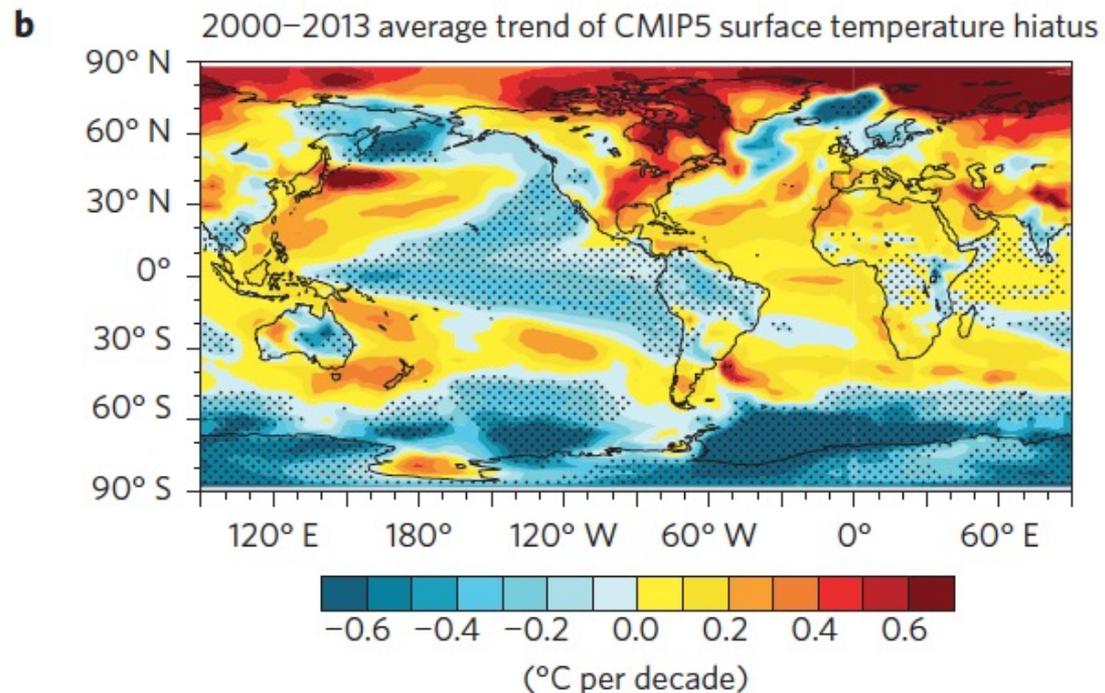
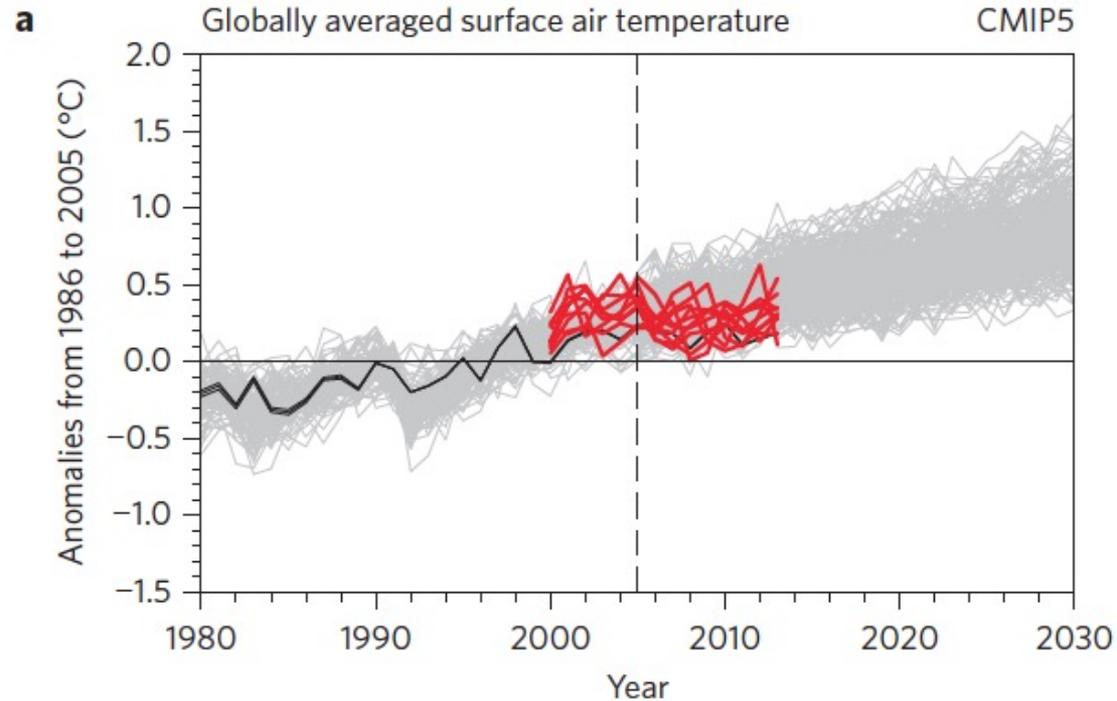


Tendance 1998-2012



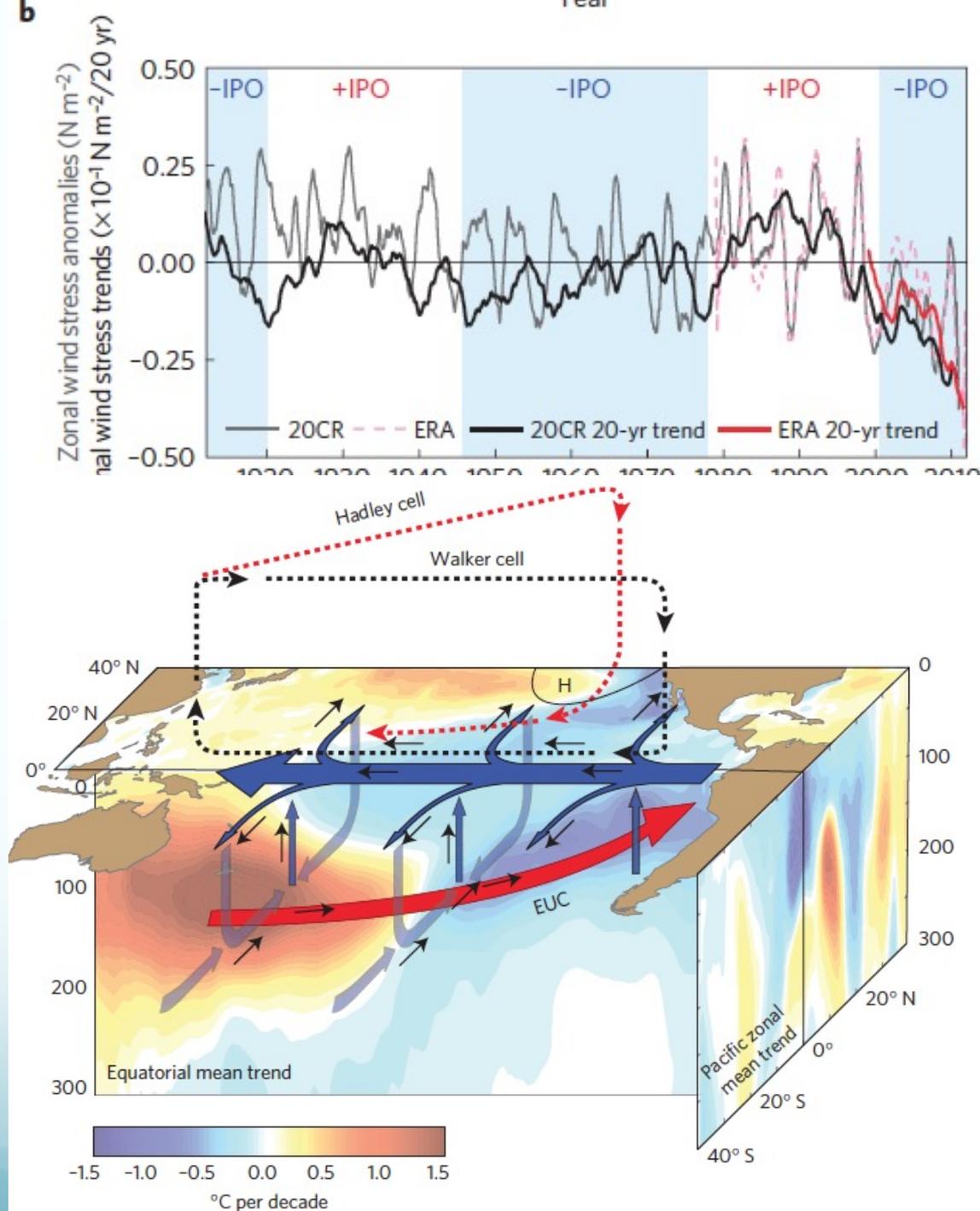
Hiatus & Modèles

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

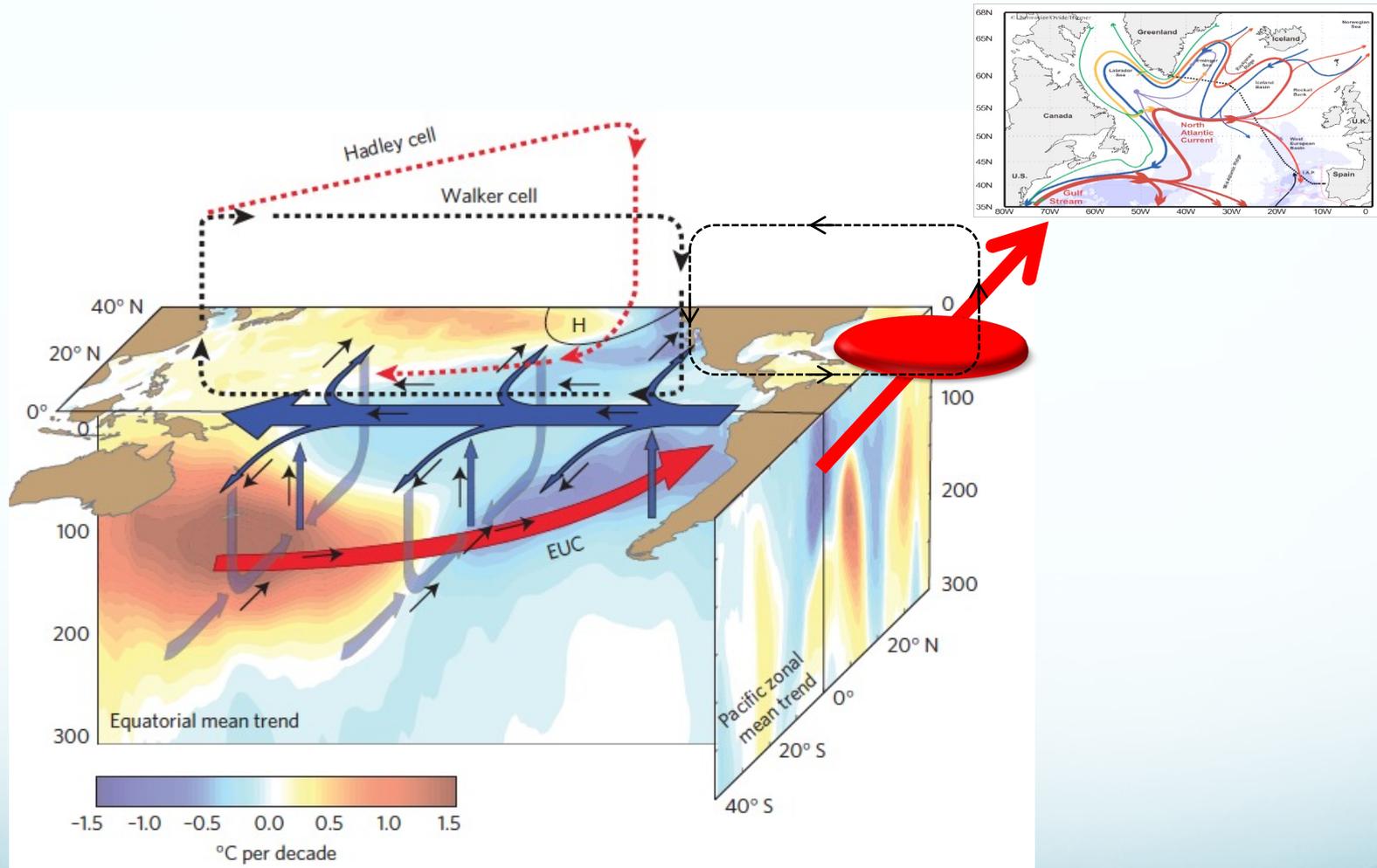


Explication du hiatus?

- 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

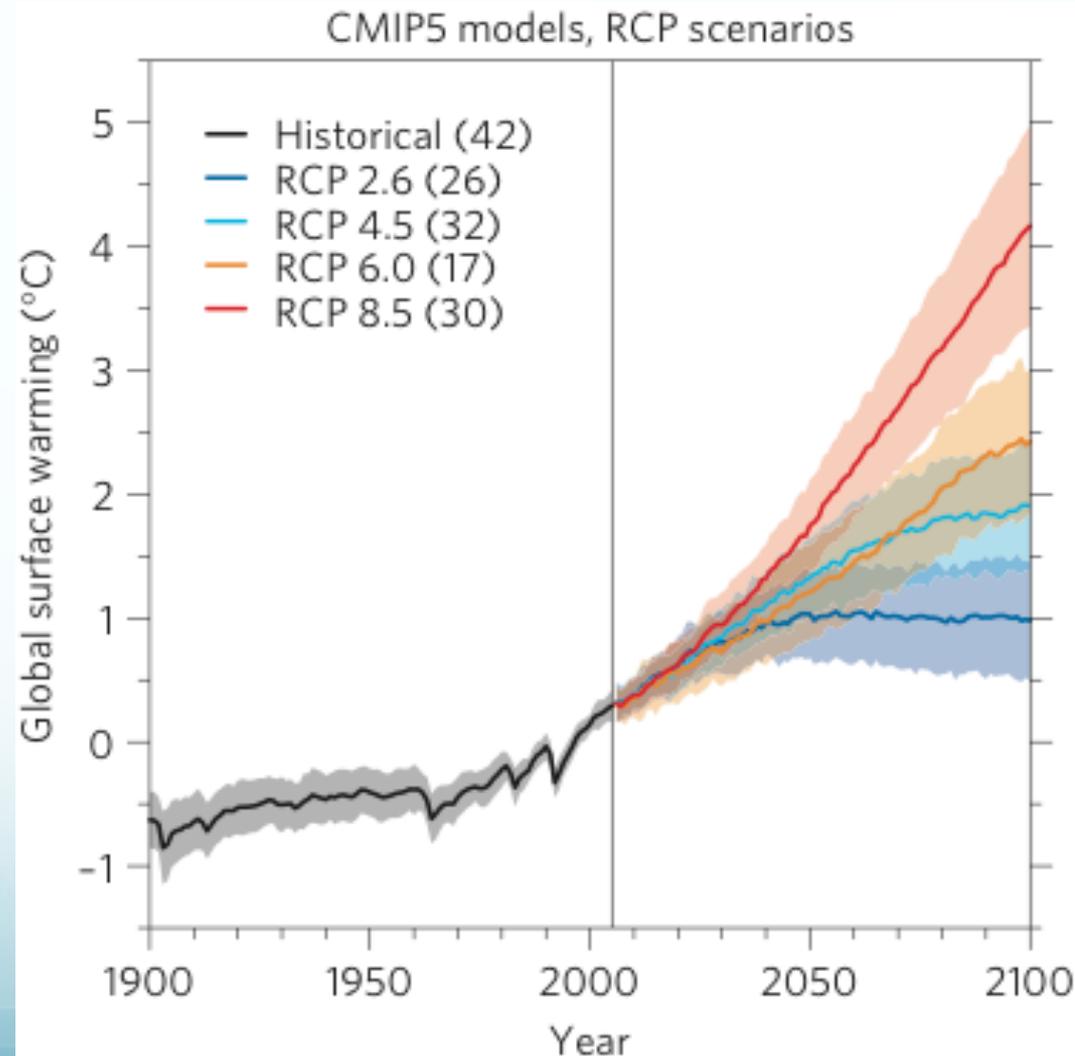


Explication du hiatus? Qui mène la danse

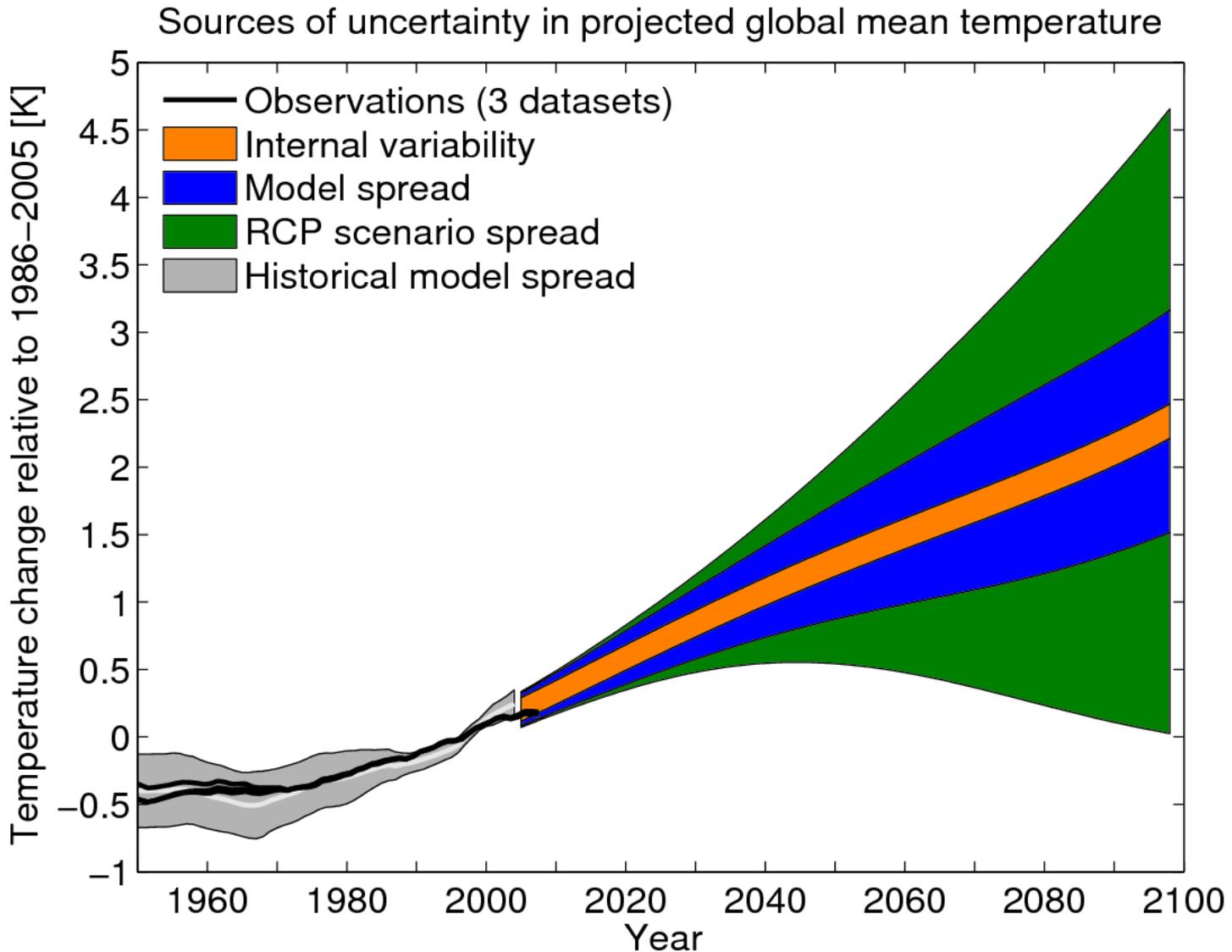


Projections climatiques

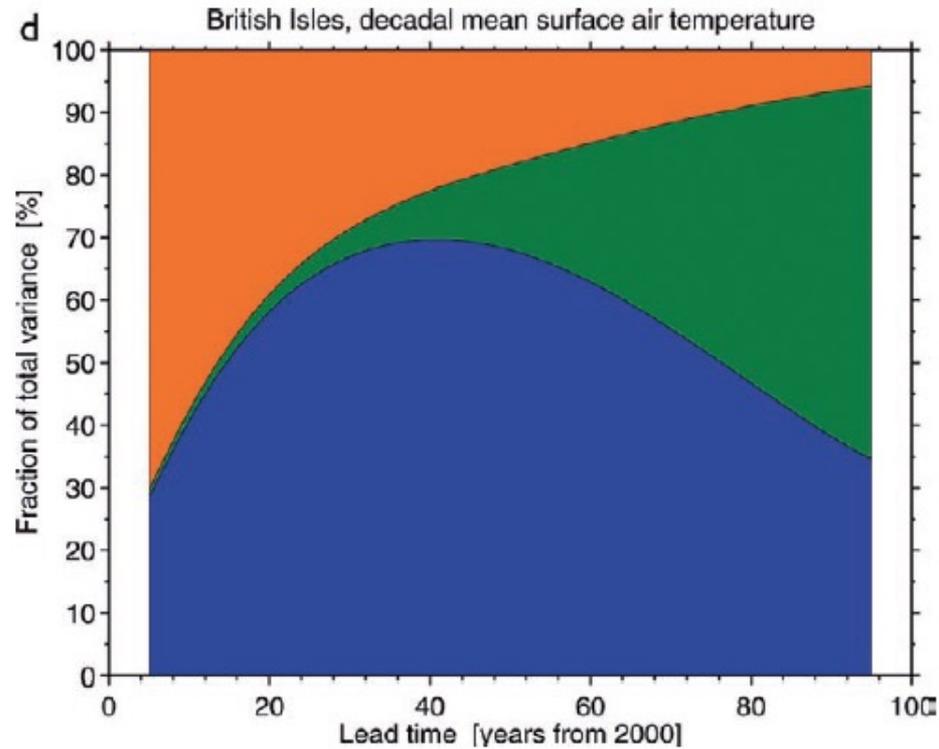
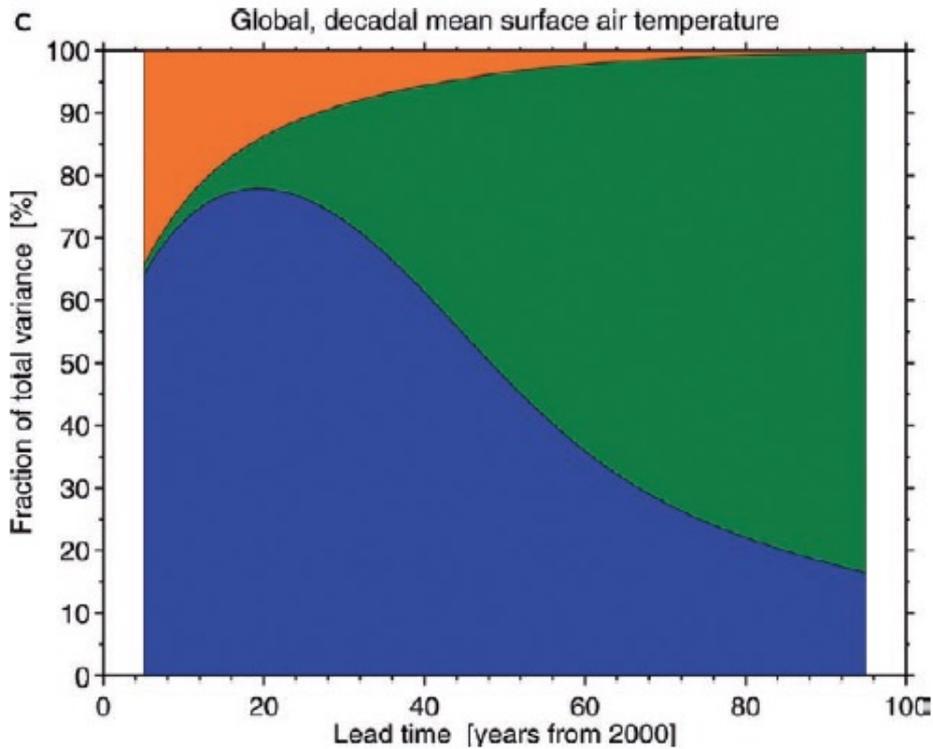
- Des dizaines de modèles développés de par le monde
- Deux en France (Paris et Toulouse)
- Projettent un réchauffement entre 1 et 4°C en 2100 selon nos émissions



Notion d'incertitude

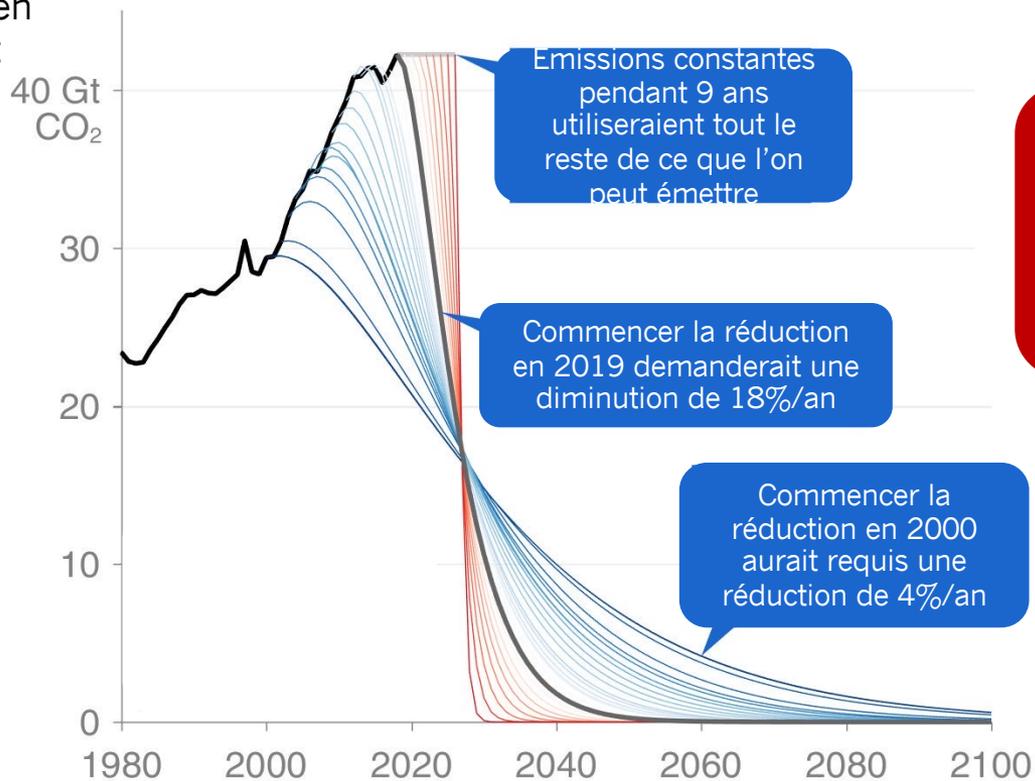


Incertitudes



Comment atteindre les objectifs de l'accord de Paris sur 1.5°C ?

Emission en équivalent CO₂



@robbie_andrew • Data: GCP • Emissions budget from IPCC SR1.5

**Le changement
c'est
maintenant !**

Plan du cours

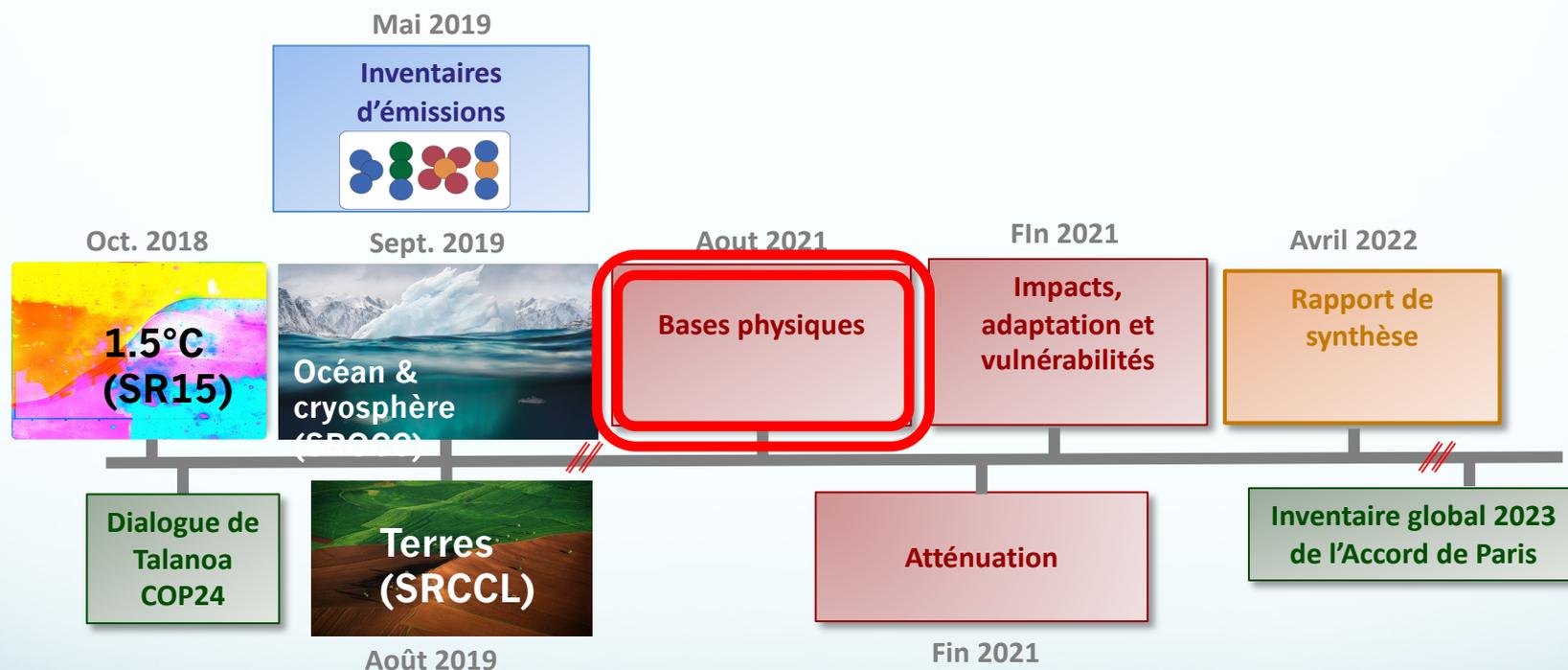
- Définition du climat
- Equilibre énergétique du système Terre
- Principaux modes de la variabilité climatique
- Qu'est ce qu'un modèle de climat ?
- Utilité des modèles de climat : quelques applications
- Résultat clef du dernier rapport du GIEC !

Qu'est ce que le GIEC ?

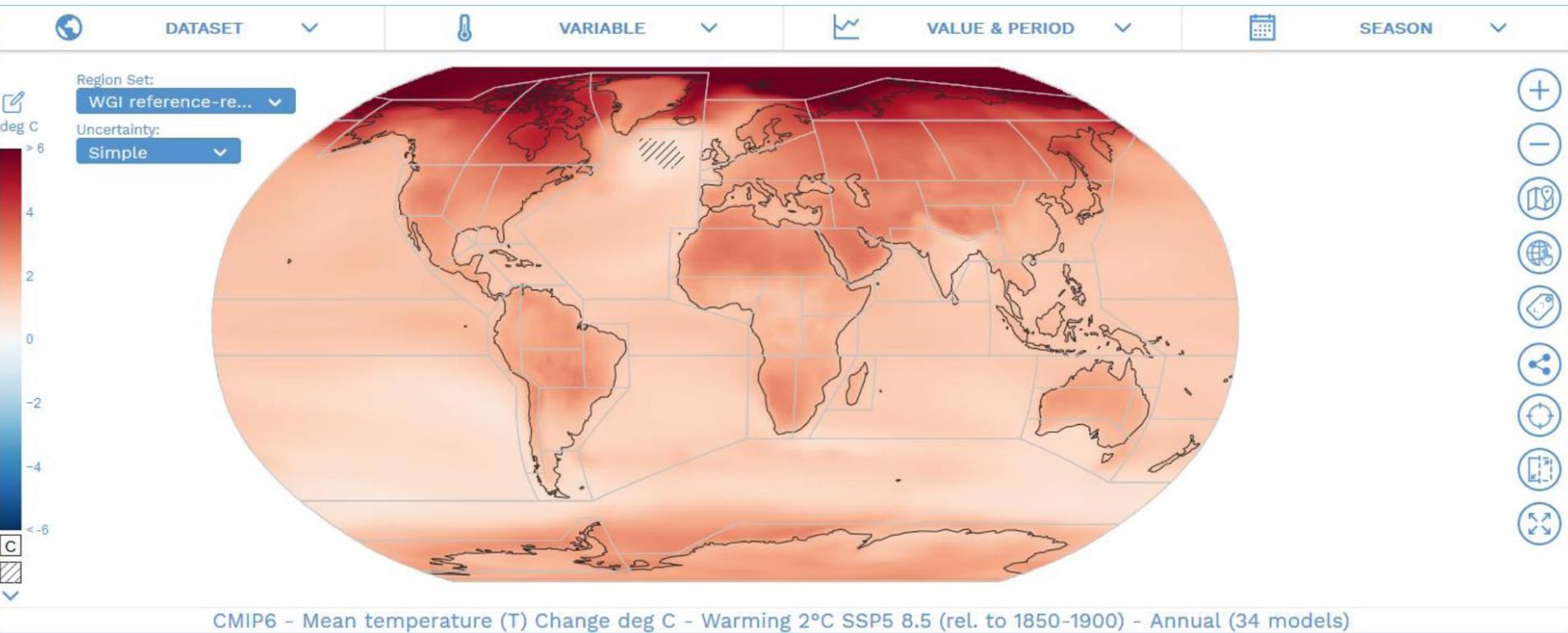


- ❖ Le GIEC est une organisation qui a été mise en place en **1988**, à la demande du G7 par :
 - L'organisation météorologique mondiale
 - Le Programme pour l'Environnement des Nations Unies
- ❖ C'est donc une **organisation onusienne** qui émet des rapports d'expertises sur le changement climatique
- ❖ Ce n'est donc pas un laboratoire, il ne fait pas de recherches mais photographie l'état des connaissances à un instant donné

Le 6ème cycle d'évaluation du GIEC

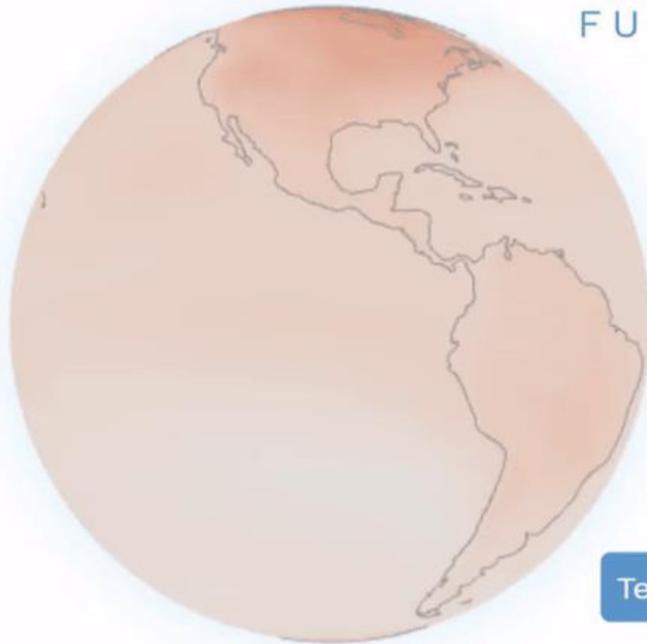


Atlas interactif en ligne !



Atlas interactif en ligne !

OUR POSSIBLE
CLIMATE
FUTURES



+1.5°C

+2°C

+3°C

+4°C

Temperature

Precipitation

<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>

#IPCCData

#IPCCAtlas



A. Etat actuel du climat

Un réchauffement sans précédent...



- ❖ Les changements récents dans le climat sont globaux, rapides et ils s'intensifient
- ❖ Ils sont sans précédents depuis plusieurs millénaires

Changement de température globale **reconstruit** (1-2000) et **observé** (1850-2020)

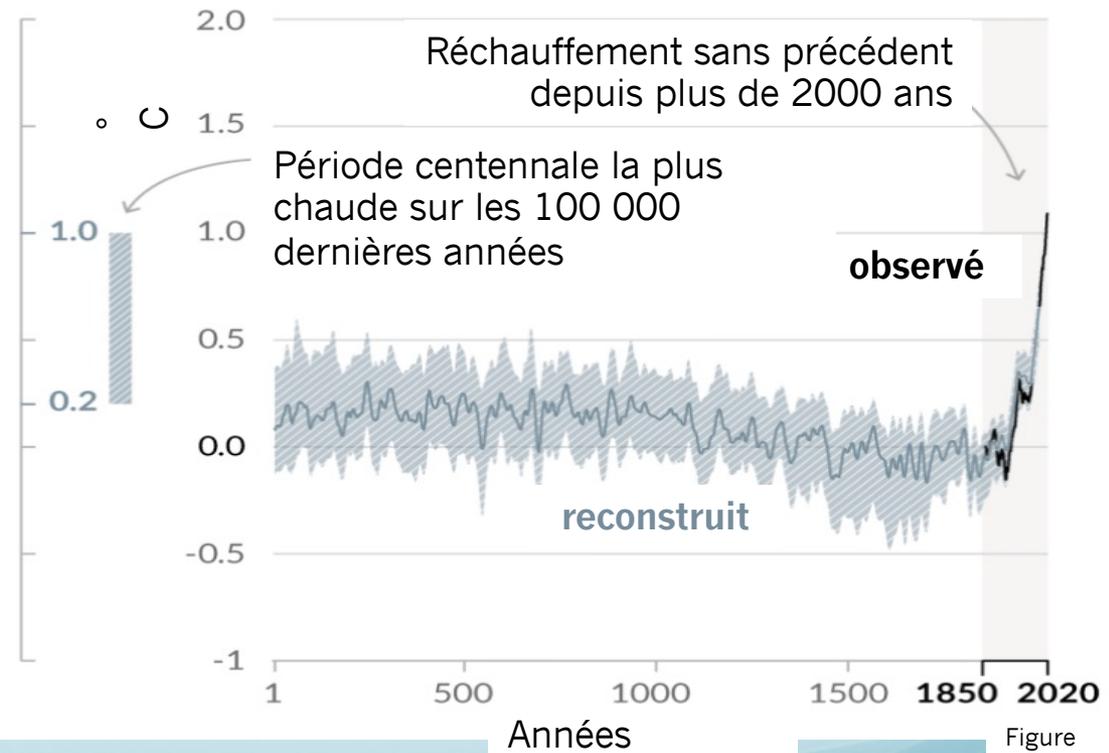
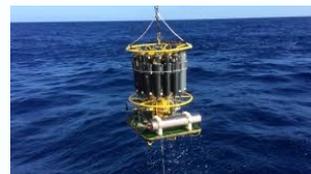


Figure SPM.1



Un réchauffement indiscutablement anthropique



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

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

❖ Cet impact rend les événements climatiques extrêmes comme les vagues de chaleur, les précipitations extrêmes, les sécheresses plus fréquentes et plus intenses

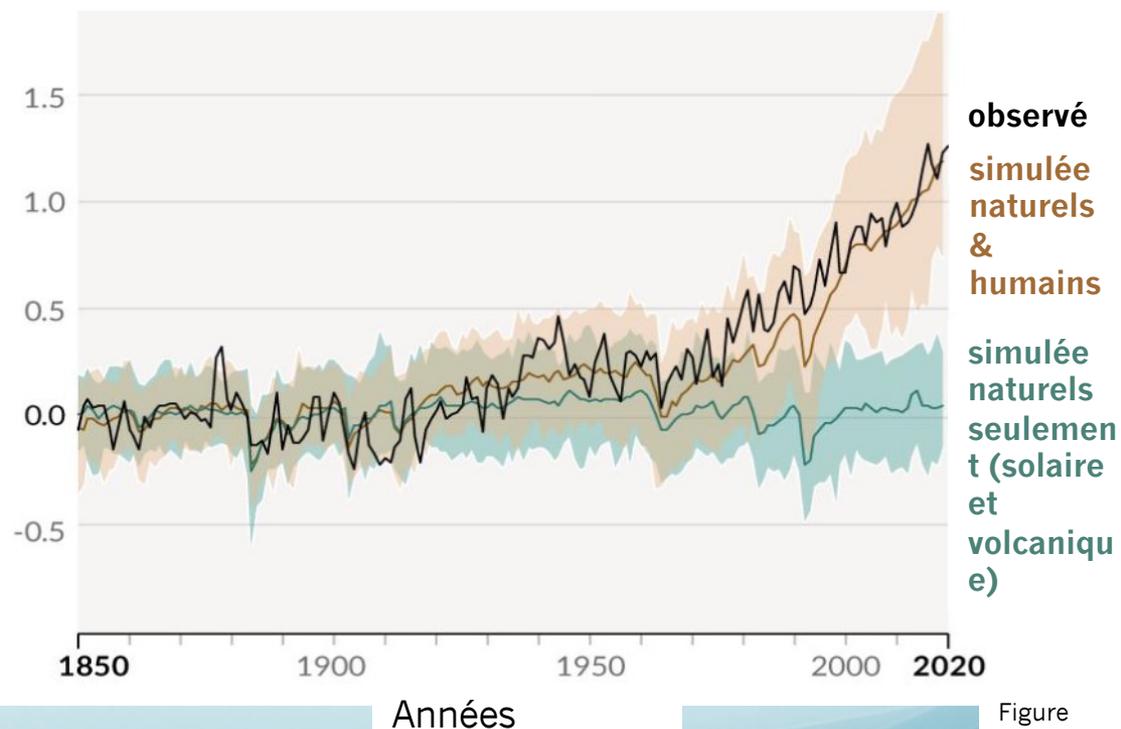
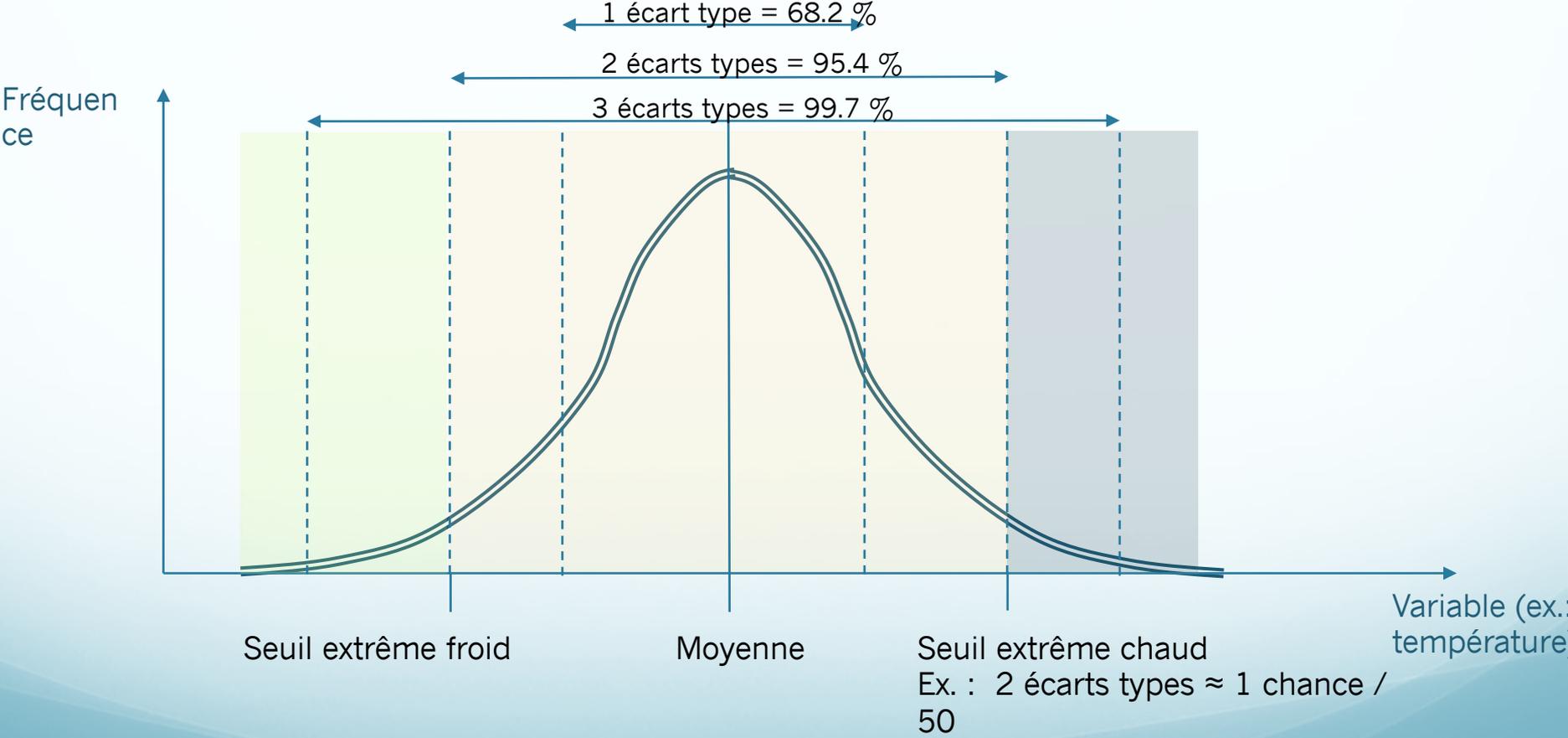
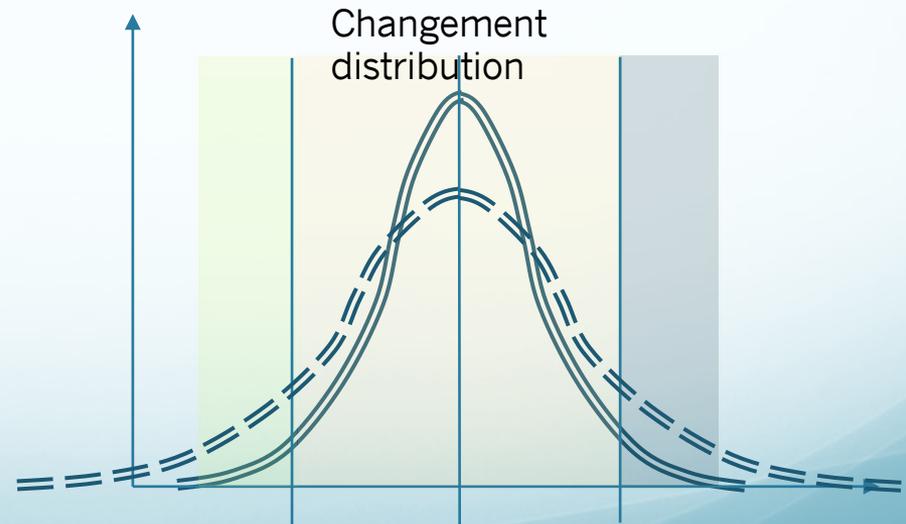
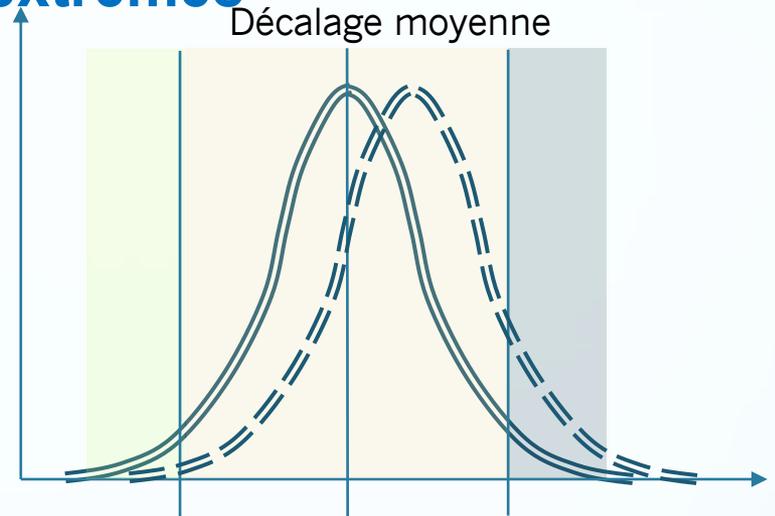
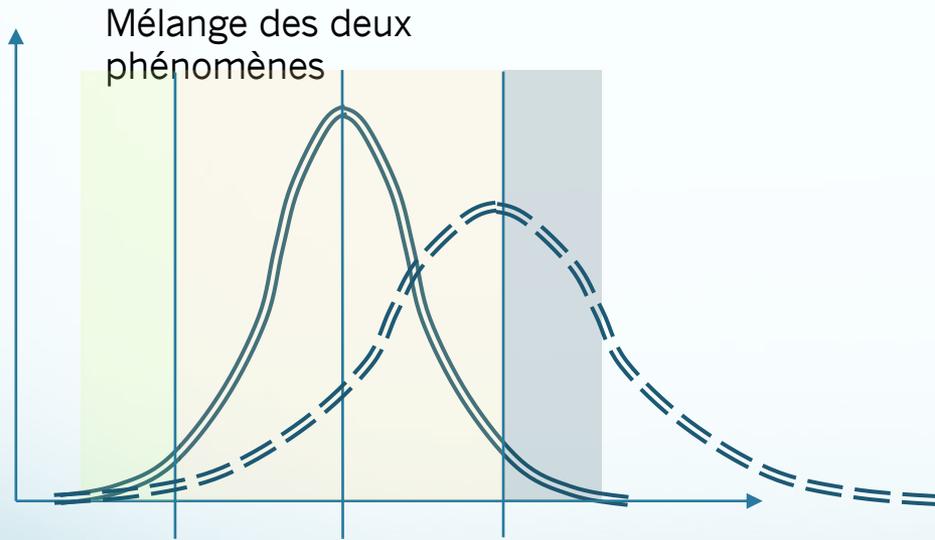


Figure SPM.1

Definition des extremes



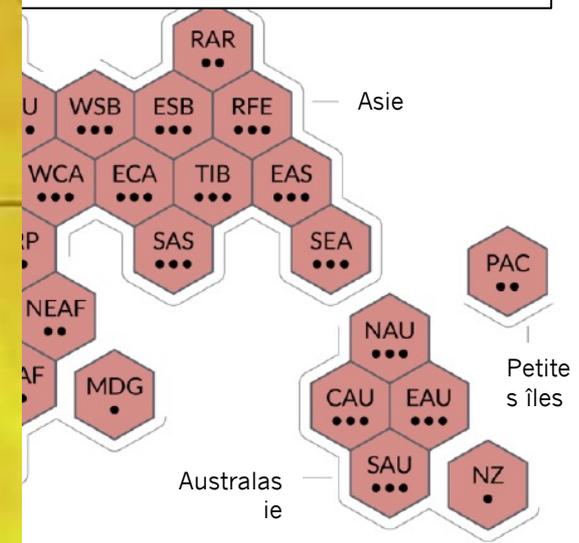
Changement des extrêmes



- Le changement climatique affecte déjà chaque région habitée du globe
- L'influence anthropique contribue à de nombreux changements de météo et d'extrêmes



ans les extrêmes chauds
on humaine aux



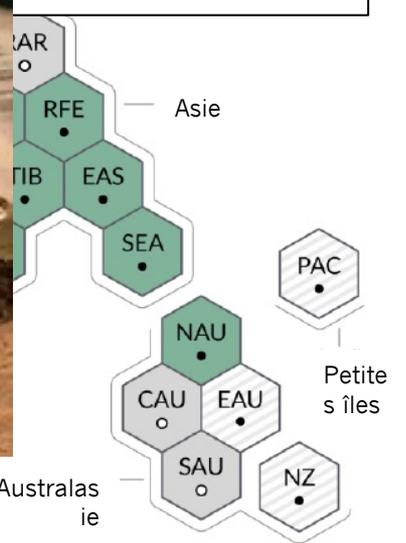
nt observé depuis

Figure SPM.3

- Le changement climatique affecte déjà chaque région habitée du globe

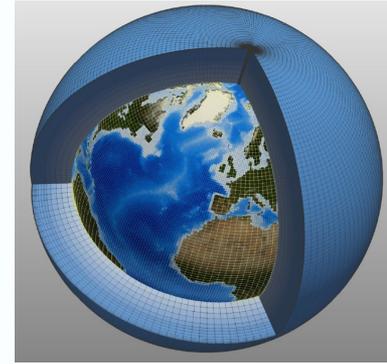
Le réchauffement climatique contribue à de nombreux changements de phénomènes

Synthèse des changements observés dans les extrêmes chauds et les précipitations extrêmes



Type de changement observé depuis 1950

Figure SPM.3

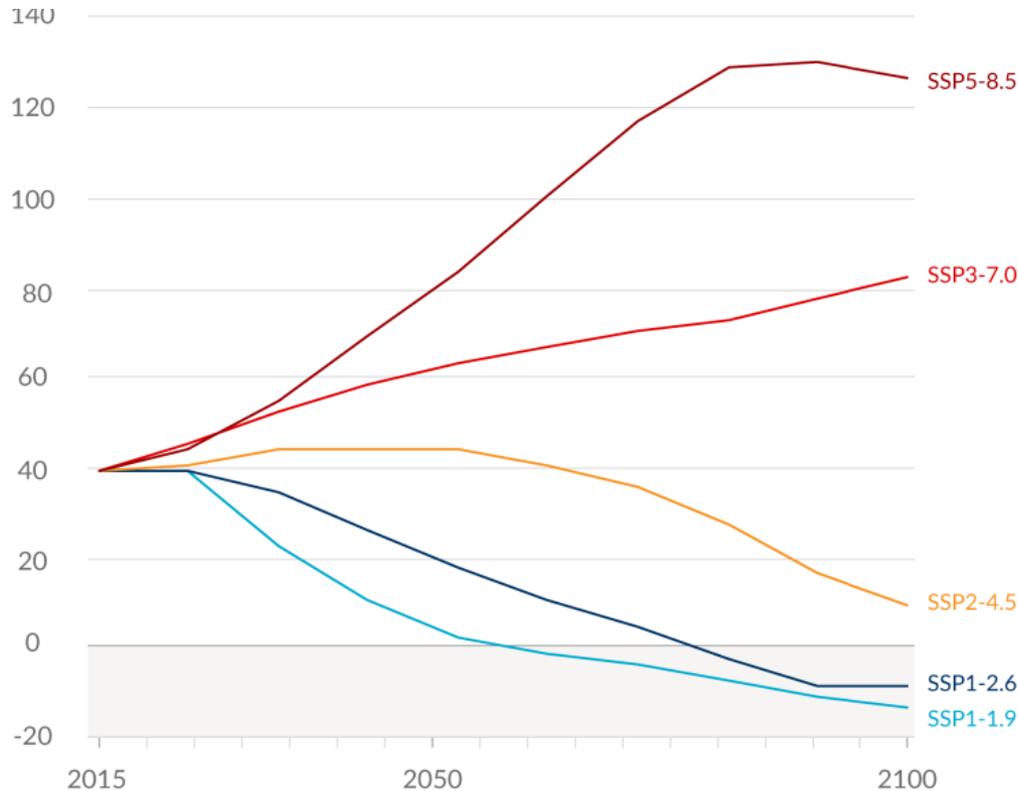


B. Futurs possibles

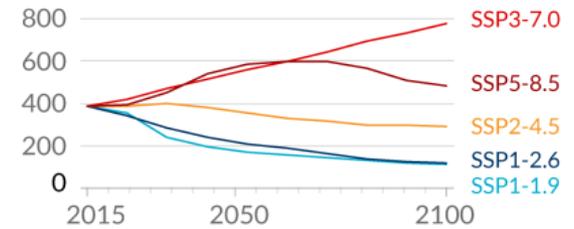


Cinq scénarios futurs d'émissions de CO₂ et autres

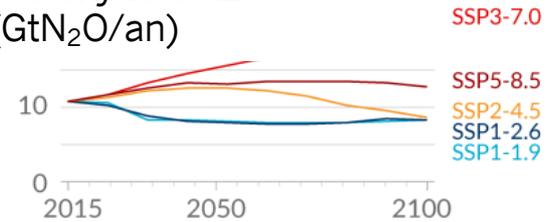
Dioxyde de carbone (GtCO₂/an)



Méthane (GtCH₄/an)



Protoxyde d'azote (GtN₂O/an)



Pollution liée aux aérosols (MtSO₂/an)

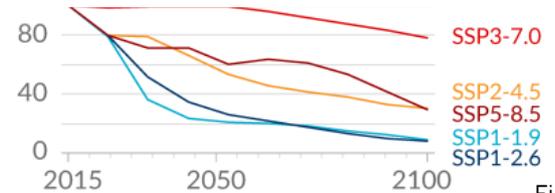
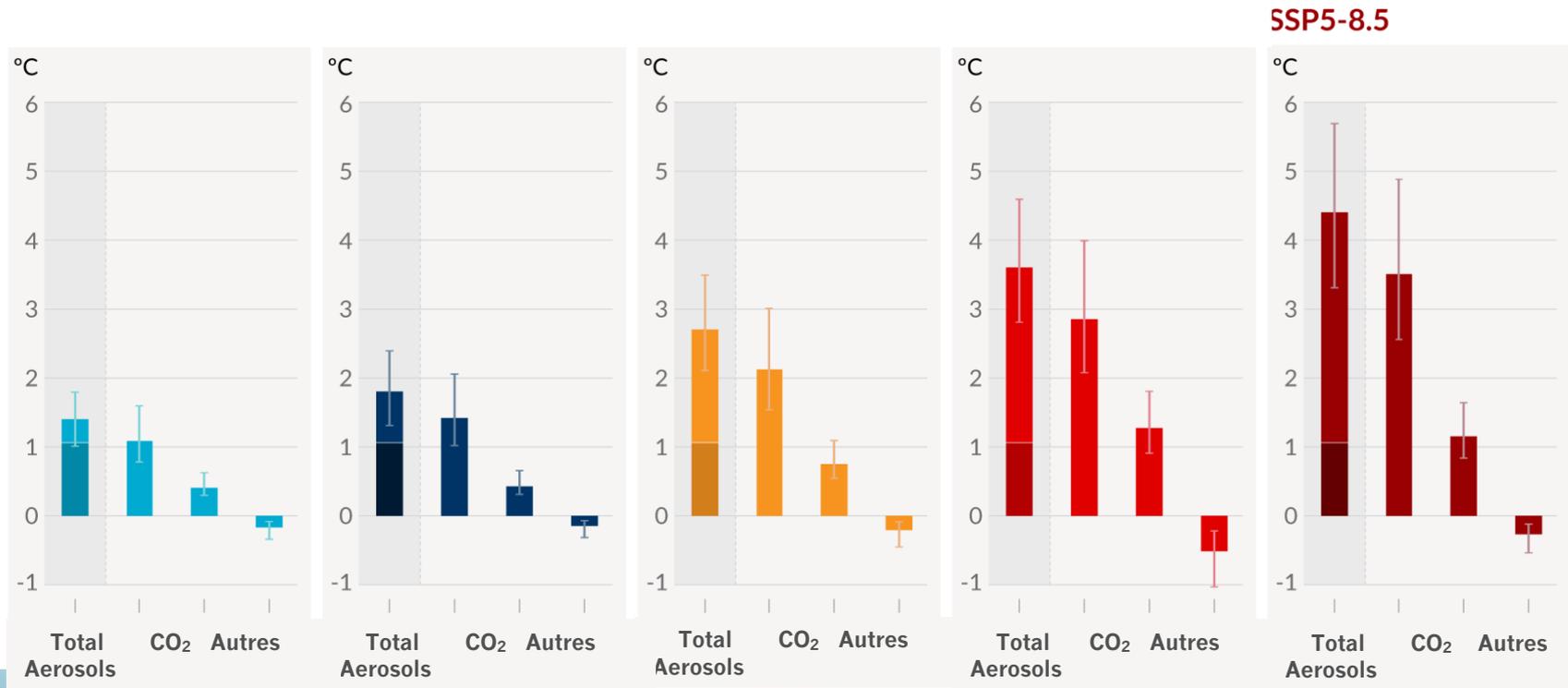


Figure SPM.3

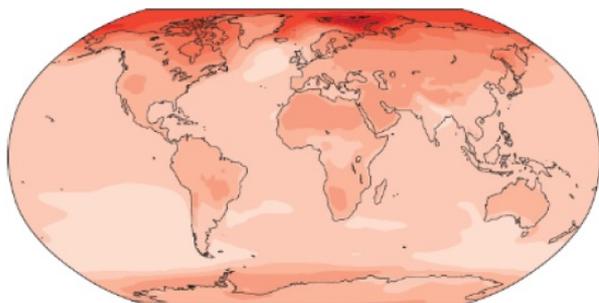
Les impacts des émissions futures sont dominés par le CO₂

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

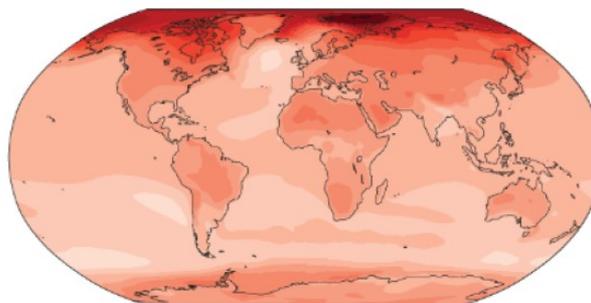


Chaque $\frac{1}{2}^{\circ}\text{C}$ de plus en température globale amène plus d'extrêmes de température, précipitations et sécheresses

Changement simulé pour un réchauffement mondial de 1.5°C



Changement simulé pour un réchauffement mondial de 2°C



Changement simulé pour un réchauffement mondial de 4°C

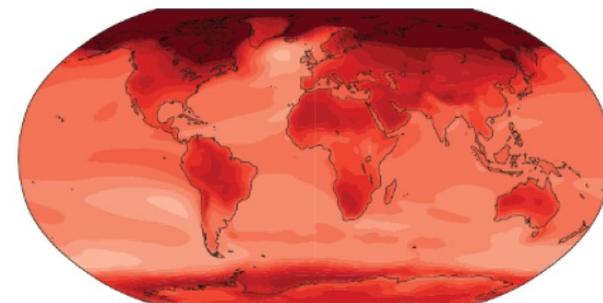
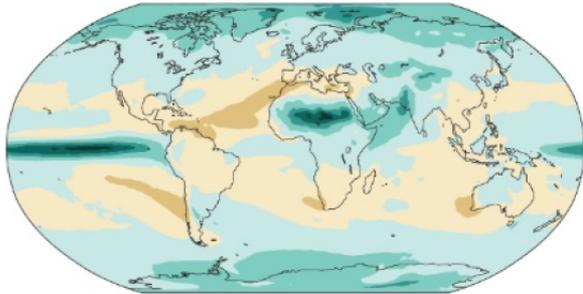


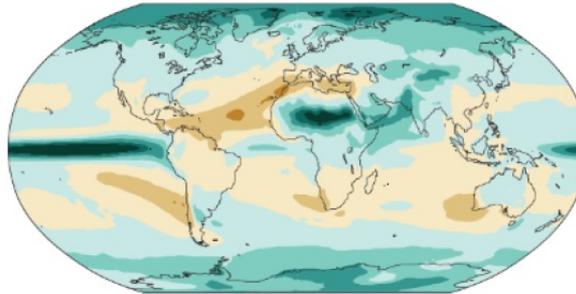
Figure SPM.5

Chaque $\frac{1}{2}^{\circ}\text{C}$ de plus en température globale amène plus d'extrêmes de température, précipitations et sécheresses

Changement simulé pour un réchauffement mondial de 1.5°C



Changement simulé pour un réchauffement mondial de 2°C



Changement simulé pour un réchauffement mondial de 4°C

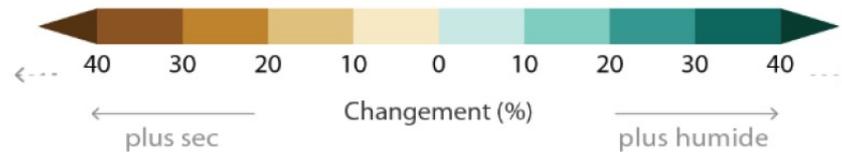
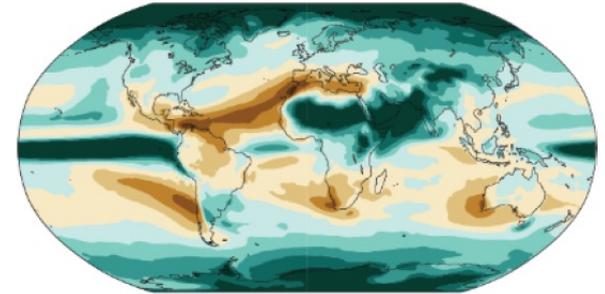
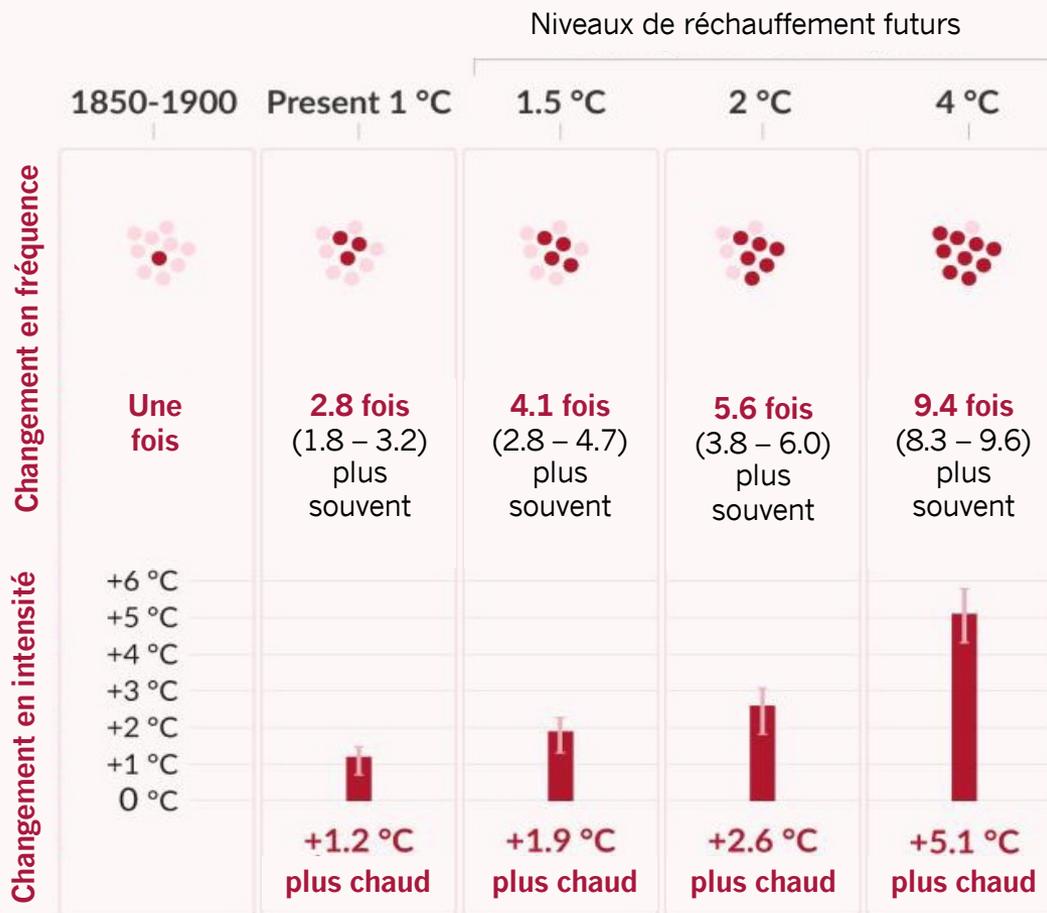


Figure SPM.5

Changement d'extrêmes



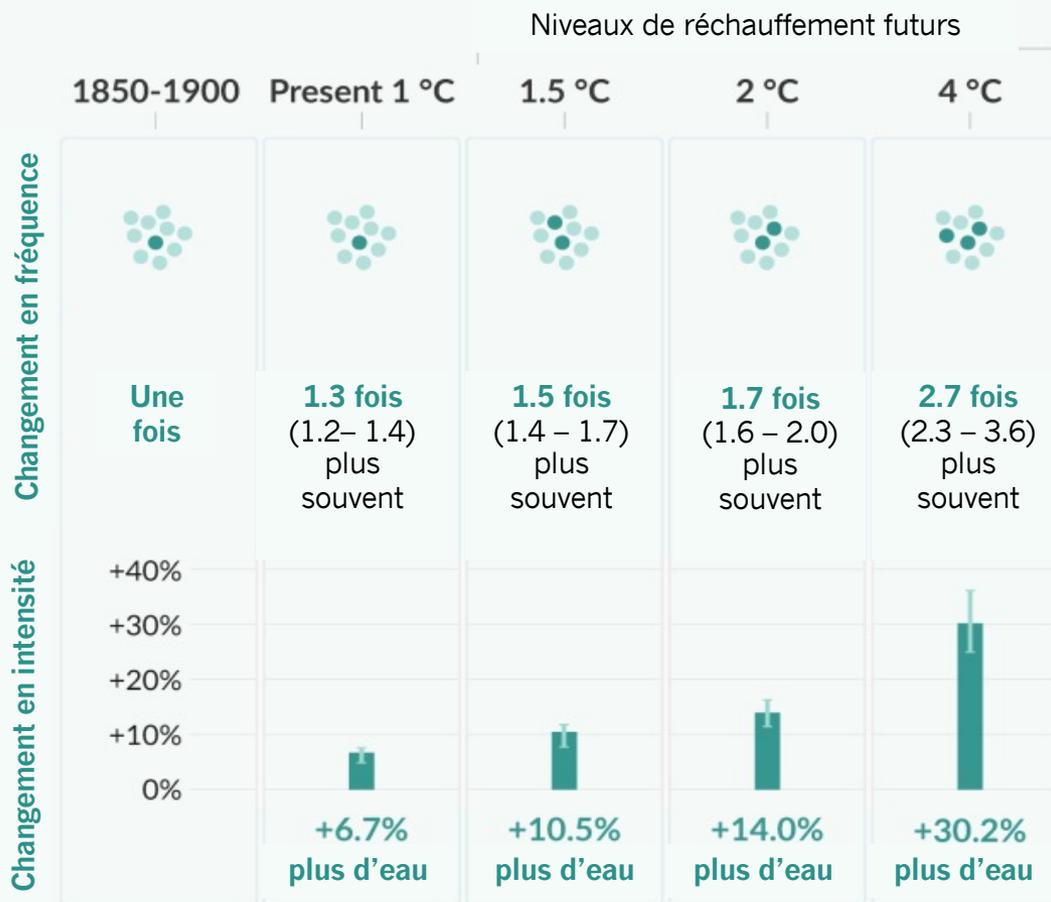
Changement **d'extrêmes de température** ayant lieu tous les 10 ans dans un climat pré-industriel



Changement d'extrêmes

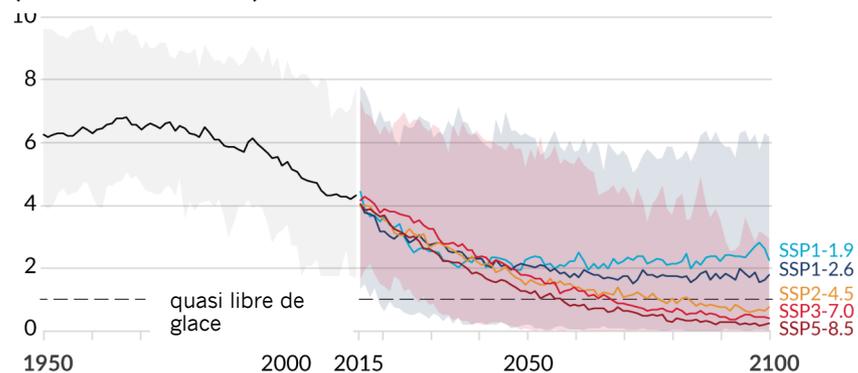


Changement d'extrêmes de précipitation ayant lieu tous les 10 ans dans un climat pré-industriel

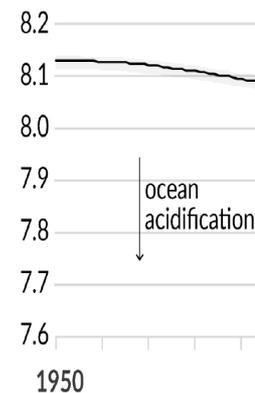


Changements en cascades

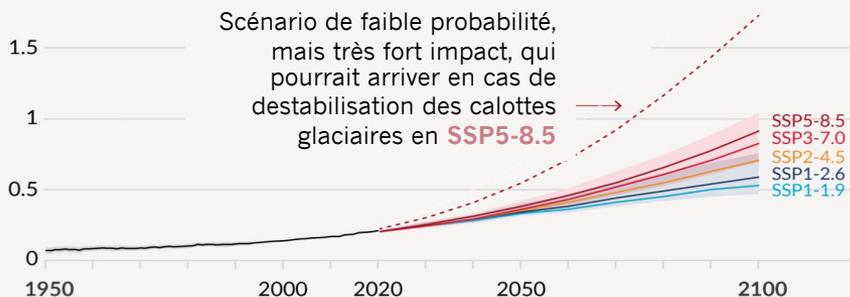
Couverture de banquise arctique en Septembre
(en millions de m³)



pH océanique



Changement global de niveau marin par rapport à 1900



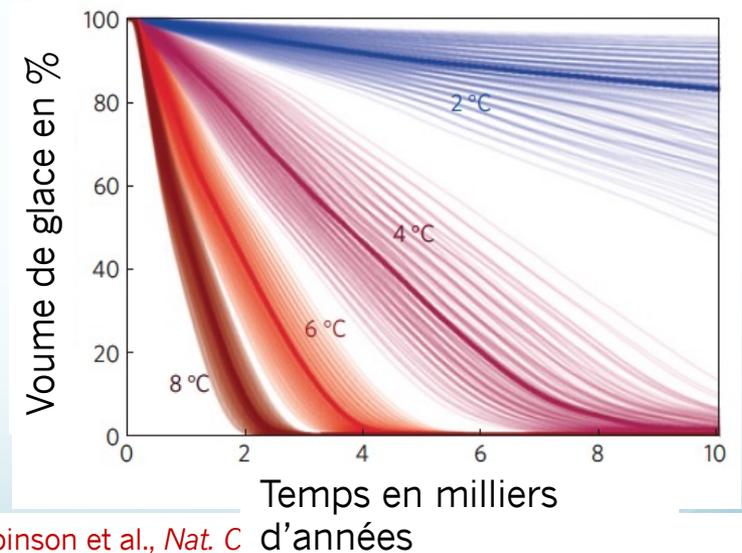
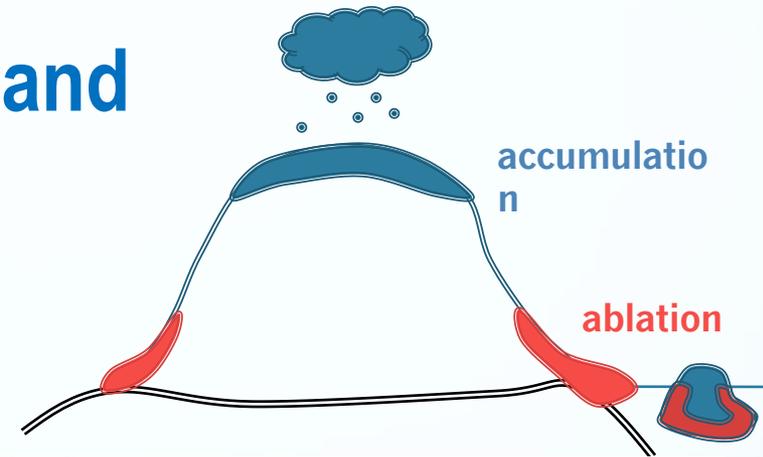
acidité)





Groenland

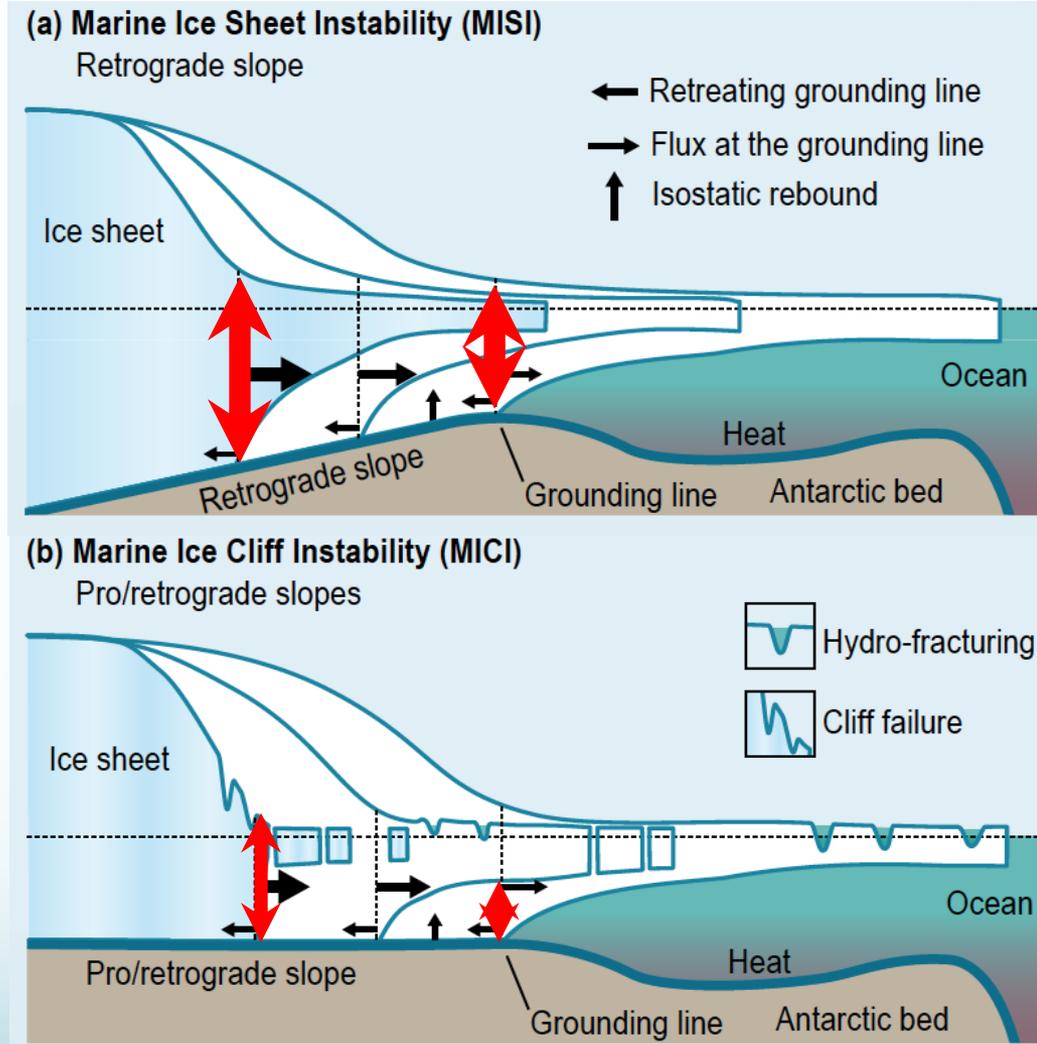
- ❖ Accumulation de la neige en altitude
- ❖ Fonte sur les marges en été
- ❖ Vélage iceberg lié à l'écoulement
- ❖ Rétroactions positives en réponse à une augmentation de température estivale :
 - Élévation (moins on est haut, plus il faut chaud)
 - Albedo
- ❖ Risque de fonte totale **dès 2°C de réchauffement global**
- ❖ Temps de fonte difficile à estimer, mais a priori certaines à milliers d'années.



Robinson et al., *Nat. C*



- ❖ Accumulation quasiment partout
- ❖ Perte masse principalement par vélage iceberg lié à l'écoulement
- ❖ Fonte basale importante
- ❖ Rétroactions positives :
 - Instabilité des calottes marimes (posé sous le niveau marin)
 - Instabilité liée aux falaises de glace

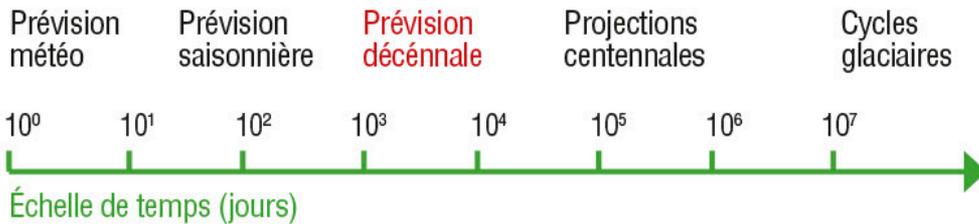


Vers des temps chaotiques

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.

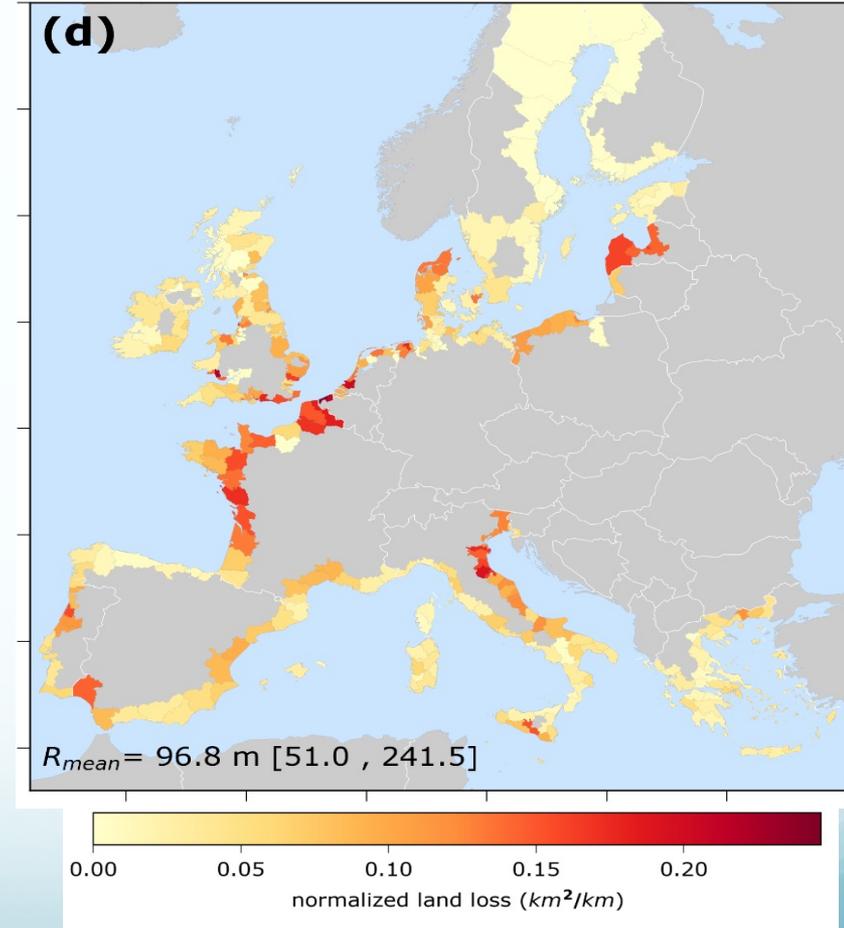


C. Informations climatiques pour l'évaluation des risques et l'adaptation régionale

Erosion

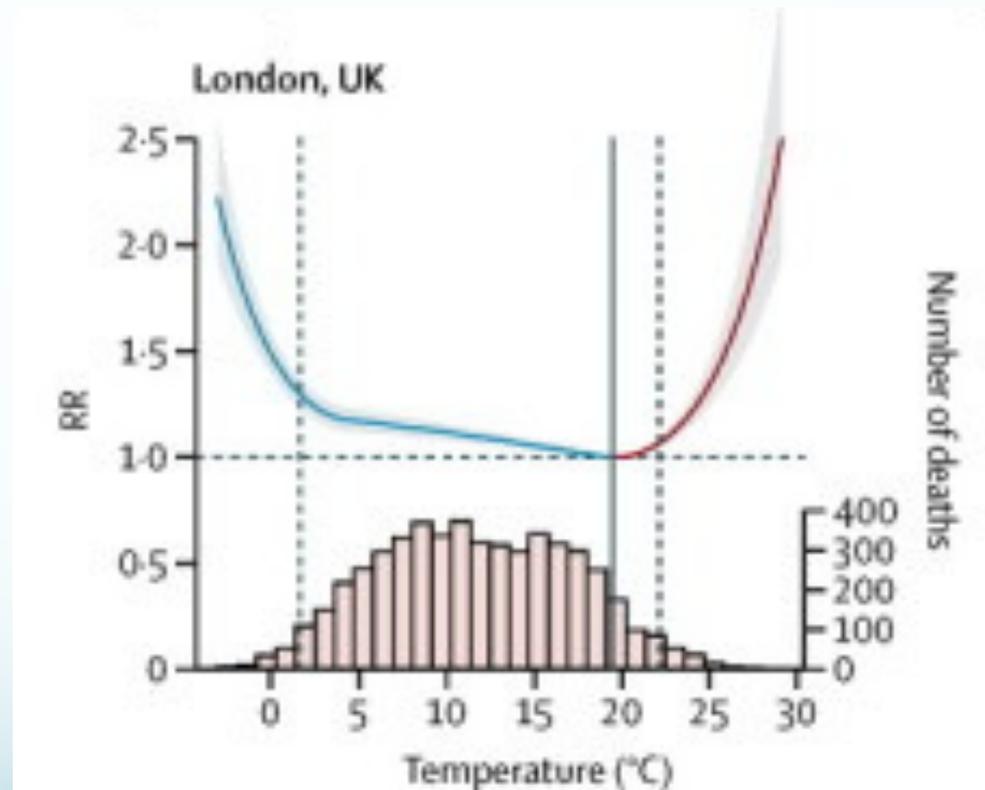


- ❖ Côte française potentiellement parmi les plus touchées en Europe
- ❖ Recul du trait de cote de plus de 200 m en 2100 sur la plupart des côtes atlantique



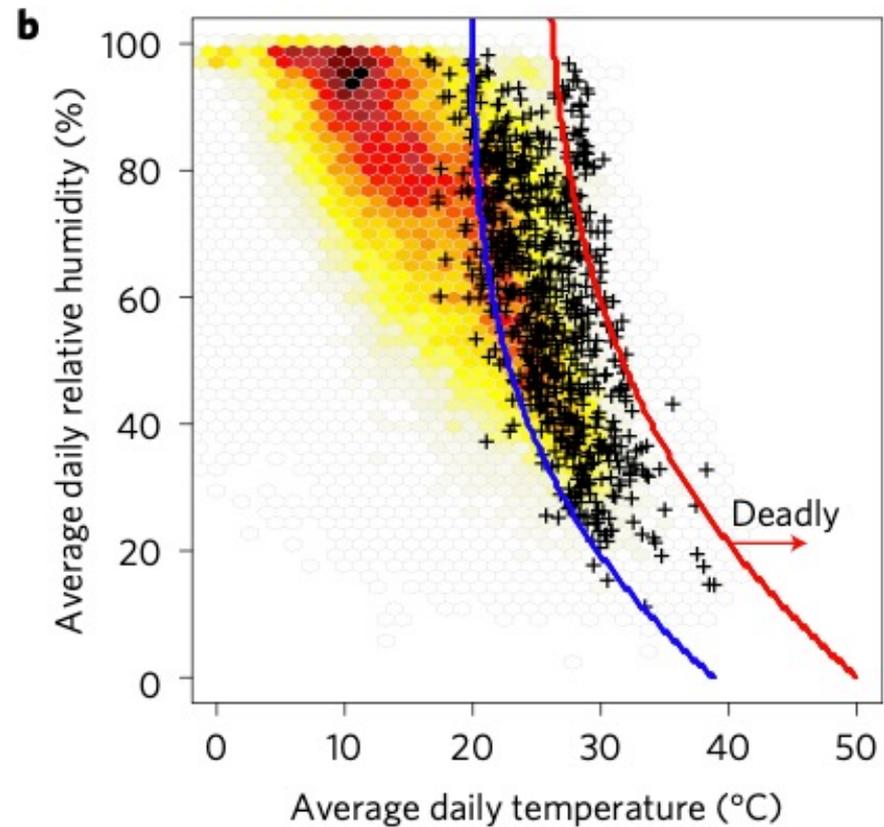
Santé humaine

- Le changement climatique a déjà un effet sur la santé humaine (15 000 morts lors de la vague de chaleur de 2003)
- Il peut également affecter la santé mentale
- Le multi-risque est un facteur aggravant (e.g. été 2022 en Gironde)

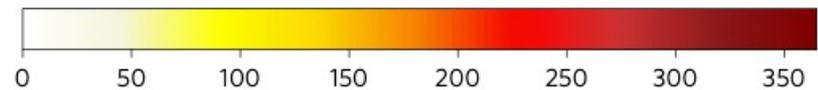
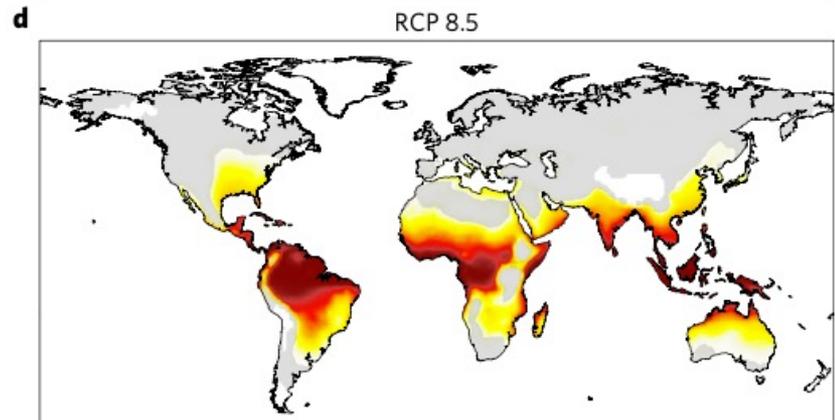
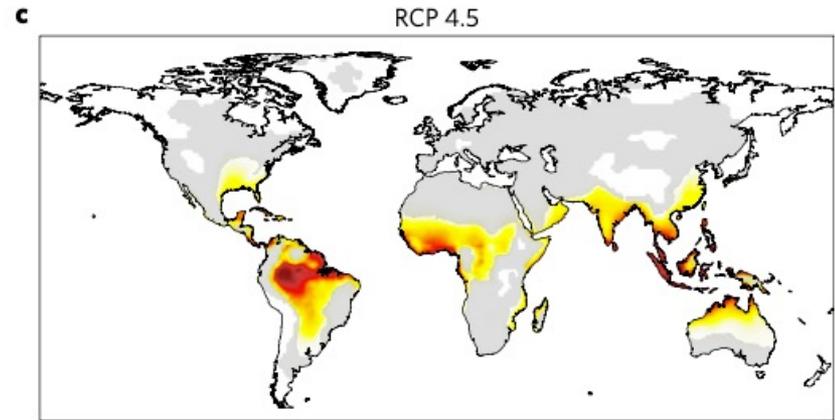
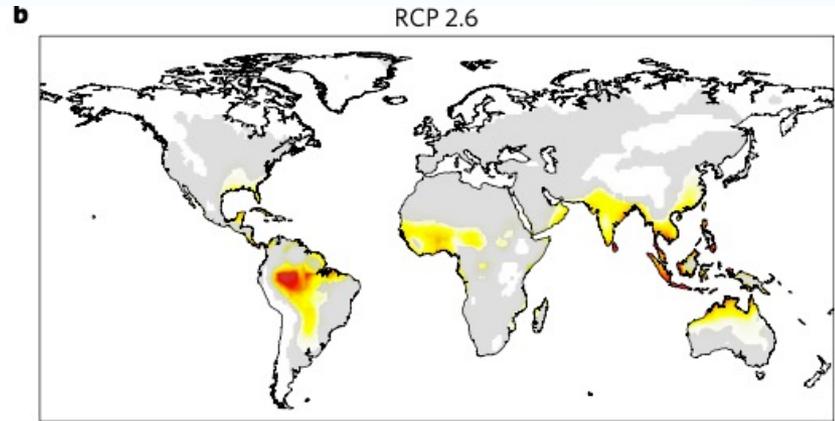
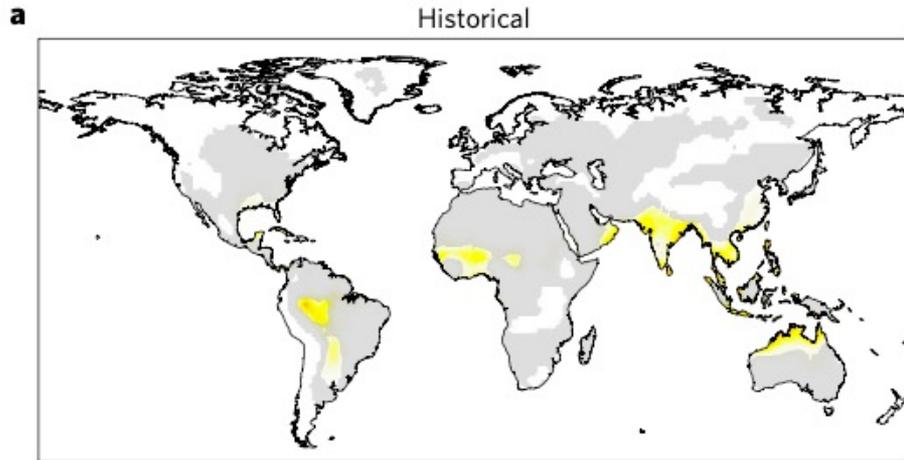


Santé humaine

- De nombreuses zones dans le monde risquent de devenir physiologiquement invivable
- En effet, au delà d'une certaine température et d'un certain niveau d'humidité, notre corps ne sait plus comment se refroidir



Des zones physiologiquement inhabitable toute l'année ?



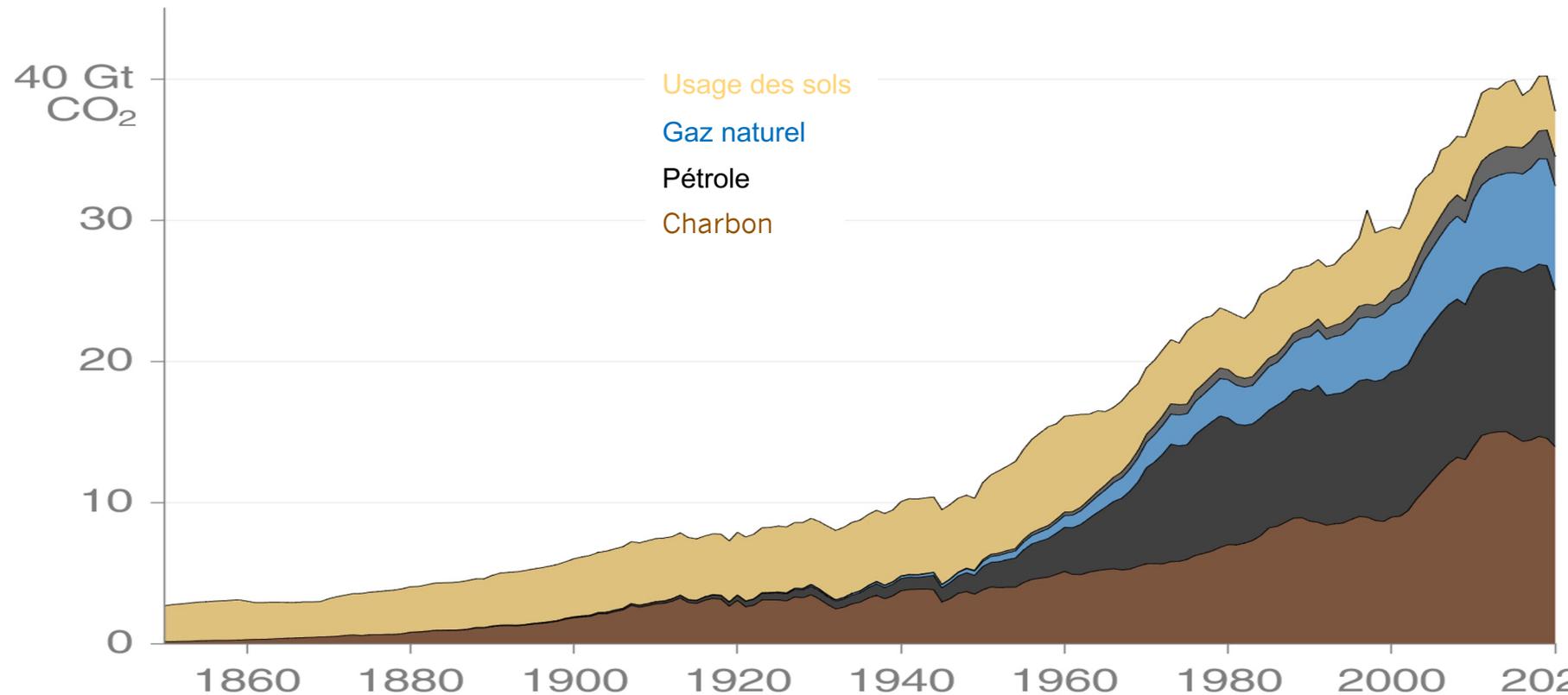
Number of days per year above deadly threshold

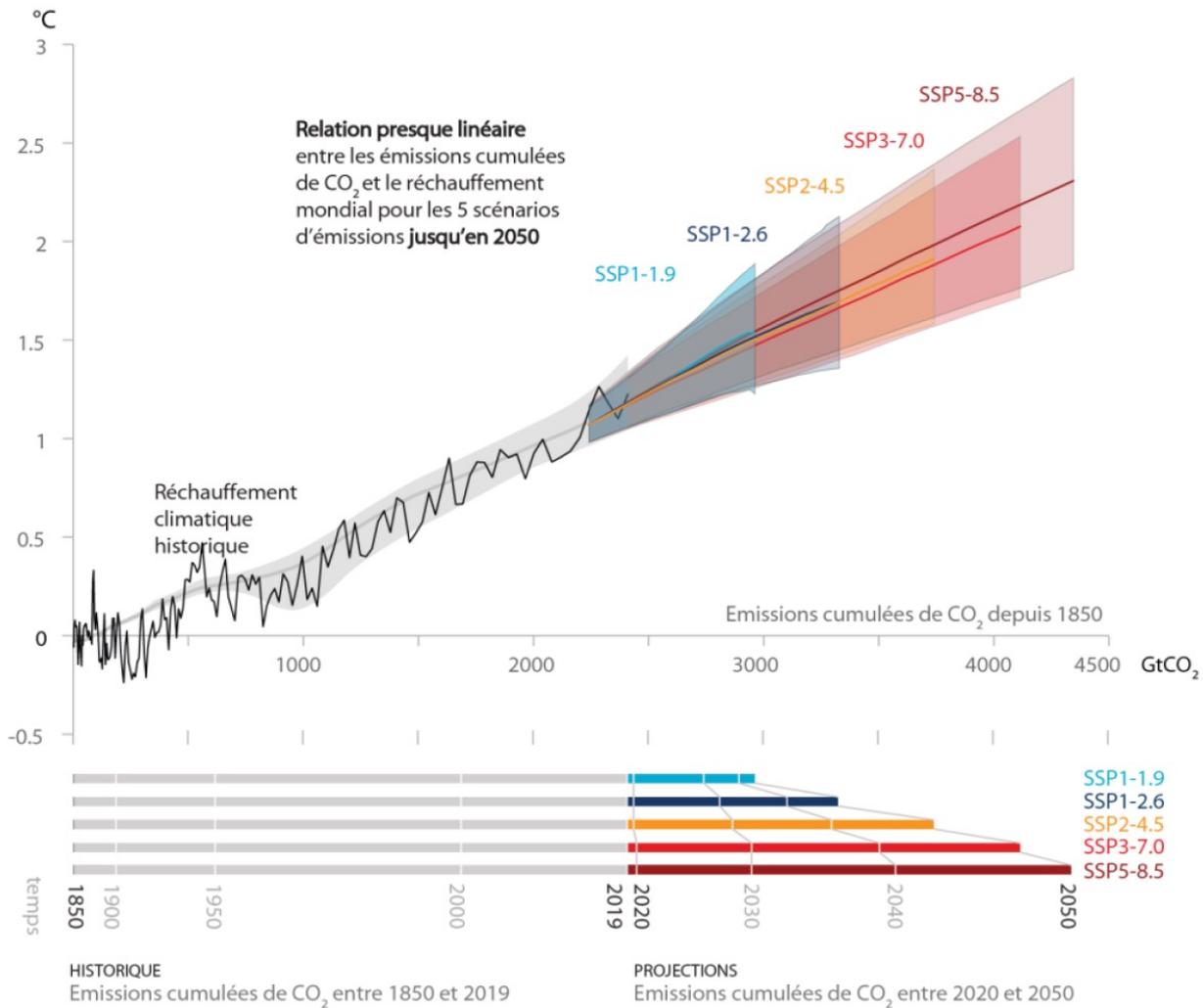
D. Limiter le changement climatique futur



L'usage des énergies fossiles et le changement d'affectation des terres (principalement déforestation) émettent des milliards de tonnes de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et sont responsables de l'excès d'énergie dans le système climatique

Emissions de CO₂ en milliards de tonnes (Gt)



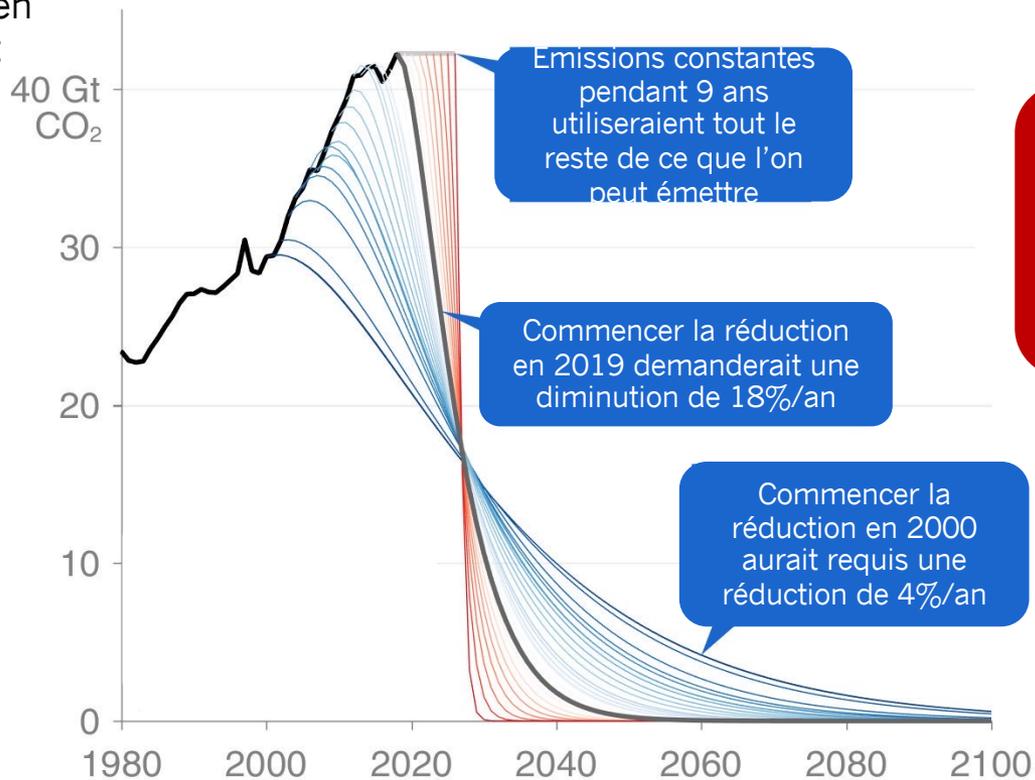


Les émissions futures
diffèrent selon les
scénarios, et déterminent
le réchauffement que
nous allons connaître

Les émissions futures
diffèrent selon les
scénarios, et déterminent
le réchauffement que
nous allons connaître

Comment atteindre les objectifs de l'accord de Paris sur 1.5°C ?

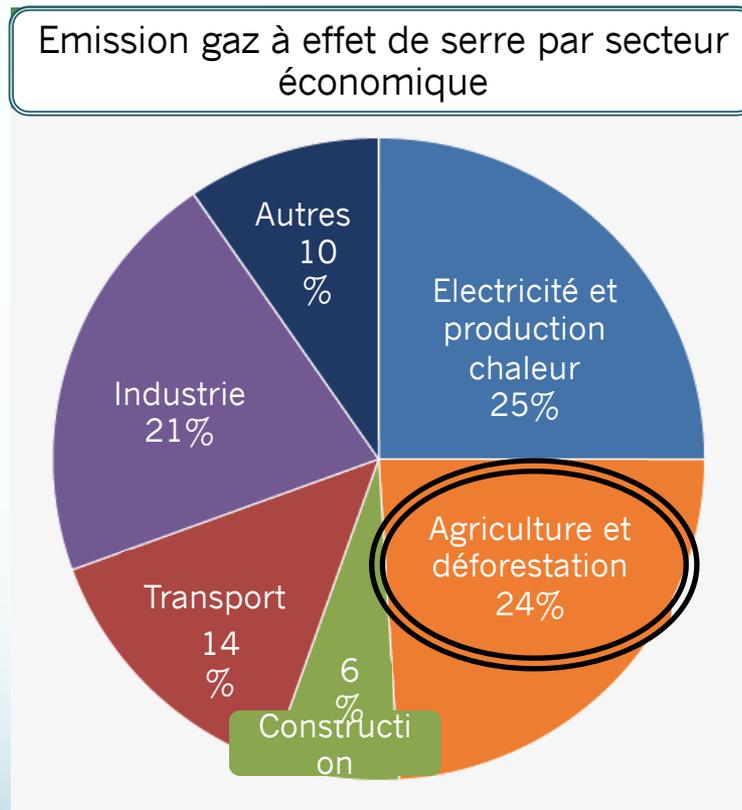
Emission en équivalent CO₂



@robbie_andrew • Data: GCP • Emissions budget from IPCC SR1.5

Le changement
c'est
maintenant !

Source de gaz à effet de serre à l'échelle globale

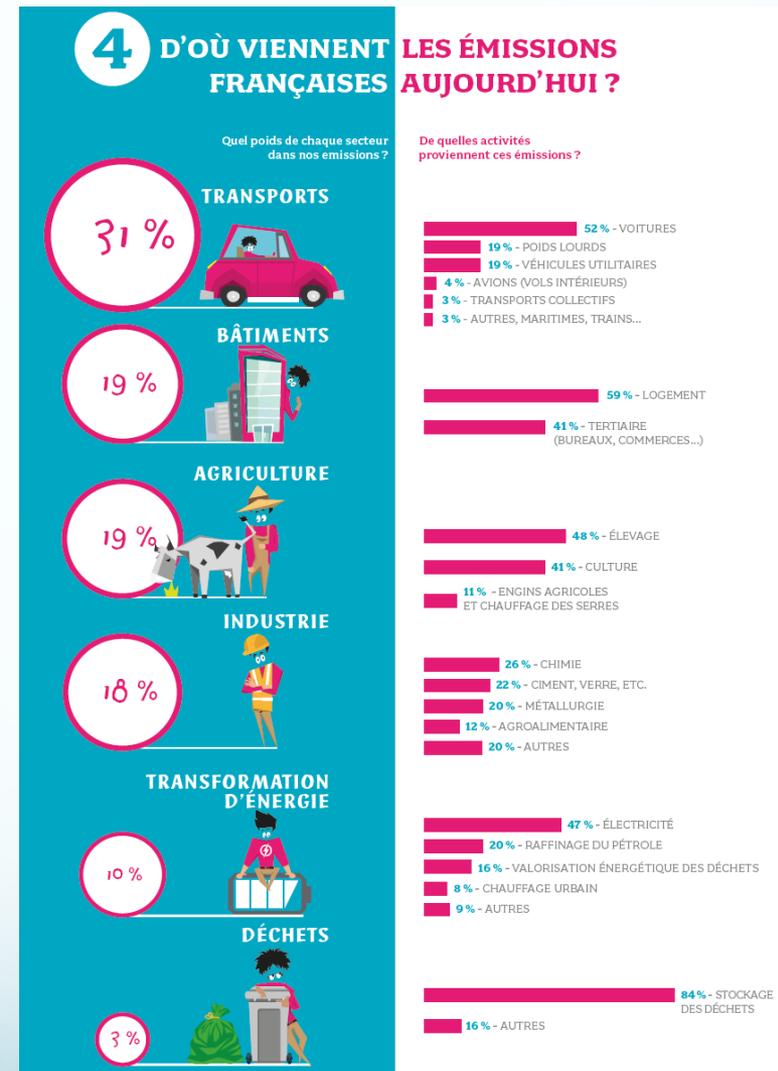


Manger moins ou pas de viande pourrait faire décroître de moitié ces 24% d'émission...

Source:
IPCC
2014

A l'échelle individuel ?

- Les principales sources d'émissions françaises => voir rapport Haut conseil pour le climat
- Evolution récente des émissions à la baisse en France, mais en deçà de l'objectif des accords de Paris
- Un exemple d'incohérence : le développement des SUV...

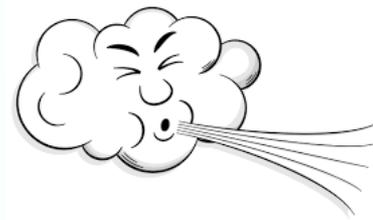


100% énergie renouvelable, c'est possible !



Courtesy: Jean-Marc Jancovici

**Il fut un temps où nous étions
renouvelables et durables...**



**Il fut un temps où nous étions
renouvelables et durables...**



Il fut un temps où nous étions renouvelables et durables...



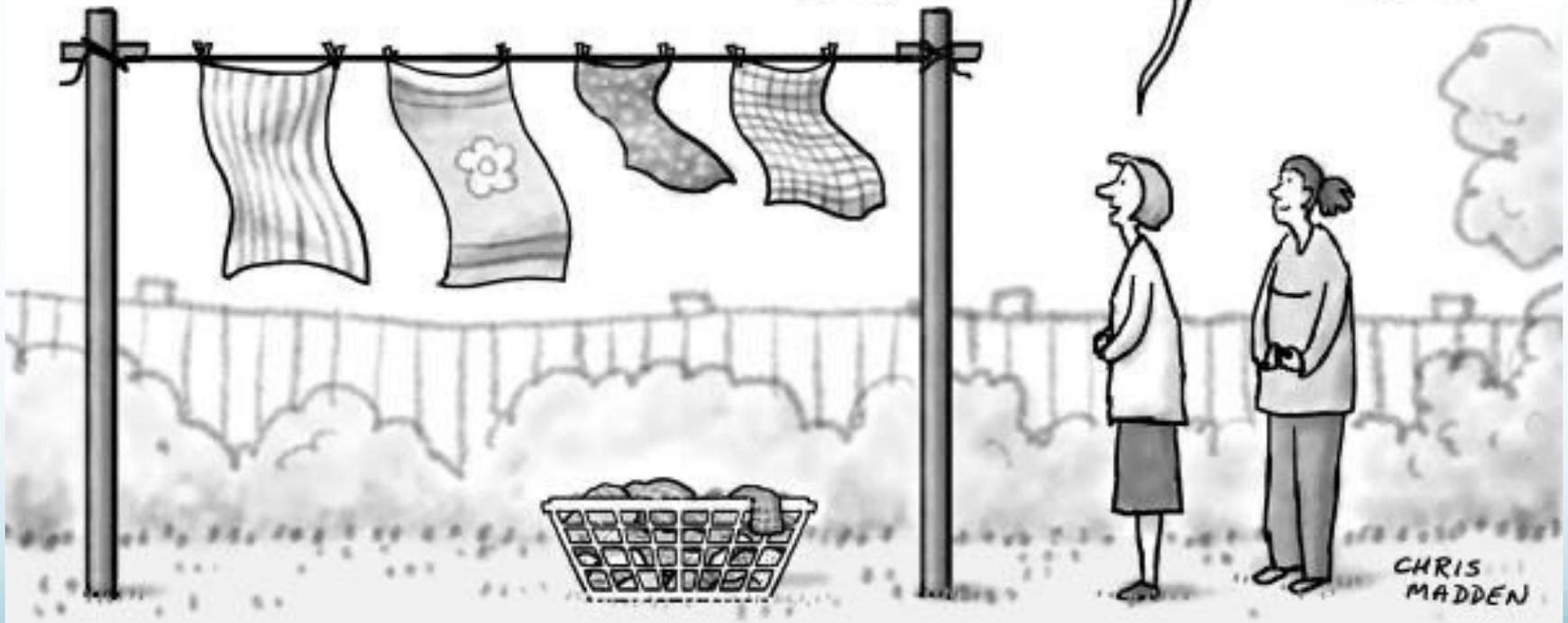
**Il fut un temps où nous étions
renouvelables et durables...**



Il fut un temps où nous étions renouvelables et durables...



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





PACTE FINANCE-CLIMAT

Mettre la finance au service du climat.

- Porté par Jean Jouzel (climatologue) et Pierre Larrourou (économiste)
- Vous pouvez le signer/soutenir en ligne:

<https://climat-2020.eu/l-appel/>

JEAN JOUZEL
PIERRE LARROUROU

**POUR ÉVITER
LE CHAOS**
CLIMATIQUE ET FINANCIER



Une solution
scandaleusement
SIMPLE

Combattre les émissions de gaz à effet de serre au quotidien

=> On peut s'enthousiasmer pour le défi qui est devant nous (éviter la culpabilité ou la déprime par des actions collectives)

Collectivement :

- ❖ En parler autour de soi (émulation positive)
- ❖ Mouvement citoyen : e.g. « affaire du siècle », passant par la voie judiciaire, capable de contraindre l'exécutif
- ❖ Planter des arbres...

Individuellement :

- ❖ Voter ... pour une personne/un parti qui met ces enjeux en avant
- ❖ Manger moins de viande
- ❖ Mieux isoler son logement
- ❖ Faire du vélo, transport en commun, voiture **légère**...

Merci !

More Information:

IPCC: www.ipcc.ch

IPCC Secretariat: ipcc-sec@wmo.int

IPCC Press Office: ipcc-media@wmo.int

Follow Us:

  @IPCC

 @IPCC_CH

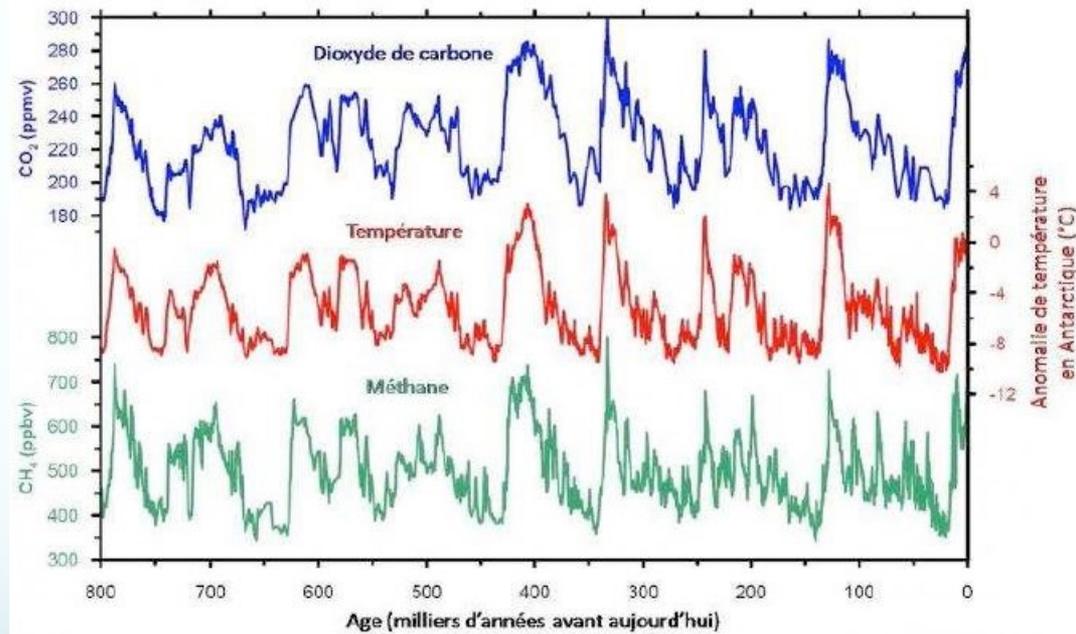
 [linkedin.com/company/ipcc](https://www.linkedin.com/company/ipcc)

#ClimateReport #IPCC

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

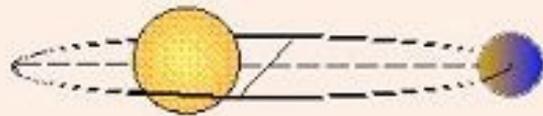
Variation enregistrées dans les carottes d'Antarctique



Théorie de Milankovitch



Variations de l'EXCENTRICITE de l'orbite terrestre



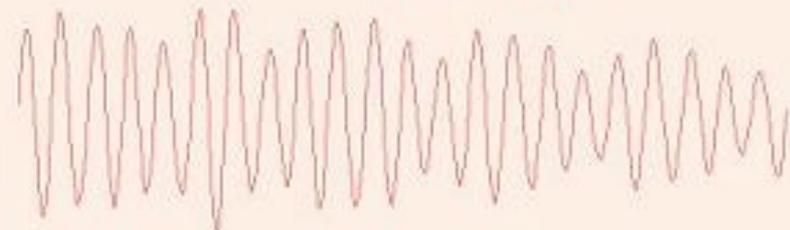
périodicités de 100 et 413 ka



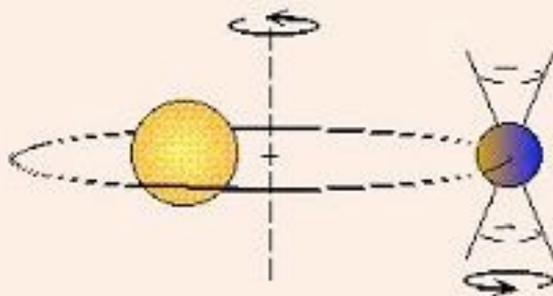
Variations de l'OBLIQUITE de l'axe de rotation



périodicité de 41 ka



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

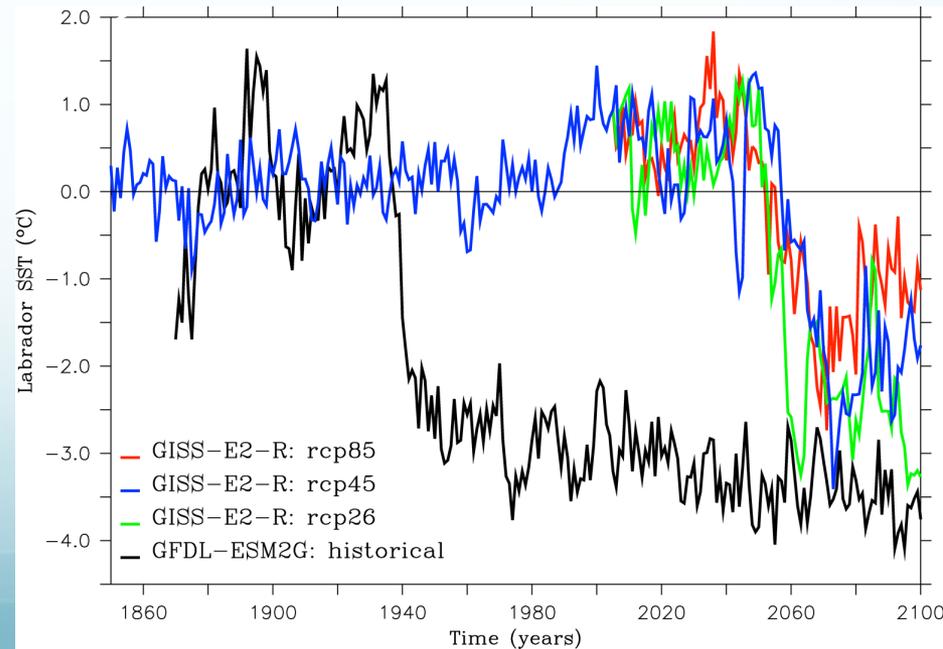
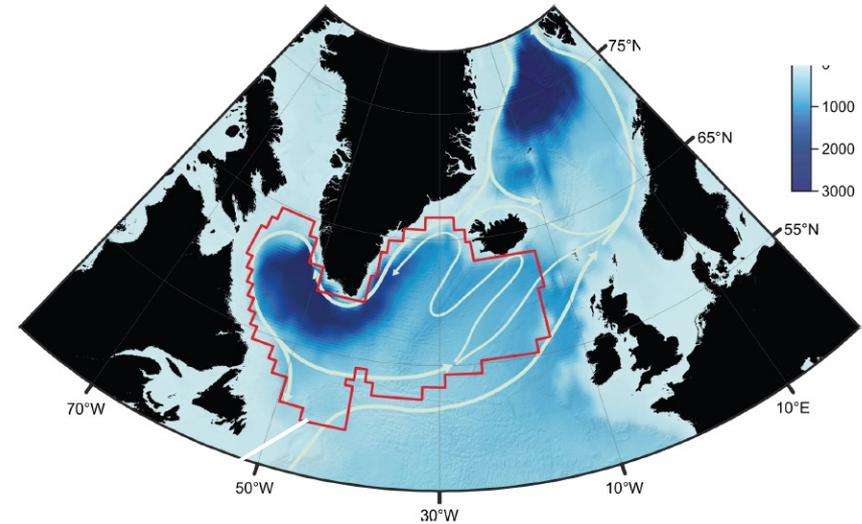


périodicités de 23 et 19 ka



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).

