

CLIMAT : un système chaotique naturellement variable.

Désordres climatiques ou désordres dus aux changements climatiques ?

Jean-Louis Dufresne

Laboratoire de Météorologie Dynamique (CNRS, UPMC, ENS, X)

Institut Pierre Simon Laplace.



Festival d'astronomie de Fleurance, 6/08/2016

Plan

- I. De la vision d'un climat immuable à celle d'un climat en évolution permanente
- II. Les mécanismes régissant le climat et ses variations
- III. Variations passées, récentes et futures
- IV. Épilogue

Qu'est ce que le climat ?

Climat :

- Provient du grec « klima » « inclinaison du ciel »
l'inclinaison de la Terre par rapport au Soleil
- Caractéristiques statistiques des conditions météorologiques en un lieu donné
- Jusqu'à la fin du 19^e siècle : *la météorologie varie, pas le climat*

Climatologie : description des « climats »

Physique du climat, étude du système climatique :
compréhension, mécanisme

Naissance de la physique du climat

Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaire, J. Fourier, 1824

- La température en un lieu donné est régie par des phénomènes locaux mais aussi par des **phénomènes globaux**, valable en tous points du globe, **dont il est possible de chercher les lois.**
- Le bilan d'énergie pilote la température de surface de la Terre
- Les principaux modes de transferts d'énergie sont
 1. le rayonnement solaire
 2. le rayonnement infra-rouge
 3. la conduction avec le centre de la Terre (négligeable)
- Rôle du rayonnement infra-rouge et hypothèse de « l'effet de serre » (« *boite chaude* »)
- La Terre est une planète comme les autres



Joseph Fourier
(1768-1830)

Naissance de la physique du climat

➤ Il pressent l'importance de changements d'ensoleillement

« *Les moindres variations de la distance de cet astre [le soleil] à la Terre occasionneraient des changements très considérables dans les températures, l'excentricité de l'orbite terrestre donnerait naissance à diverses saisons.* »

➤ Cette sensibilité au soleil lui semble trop élevée

Fourier introduit une température de ciel « *qui modère les températures à la surface du globe terrestre, et donne à cette planète une chaleur fondamentale, indépendante de l'action du Soleil et de la chaleur propre que sa masse intérieure a conservée.* »

➤ Il envisage néanmoins que le climat puisse changer:

« *L'établissement et le progrès des sociétés humaines, l'action des forces naturelles peuvent changer notablement, et dans de vastes contrées, l'état de la surface du sol, la distribution des eaux et les grands mouvements de l'air. De tels effets sont propres à faire varier, dans le cours de plusieurs siècles, le degré de la chaleur moyenne* »



Joseph Fourier

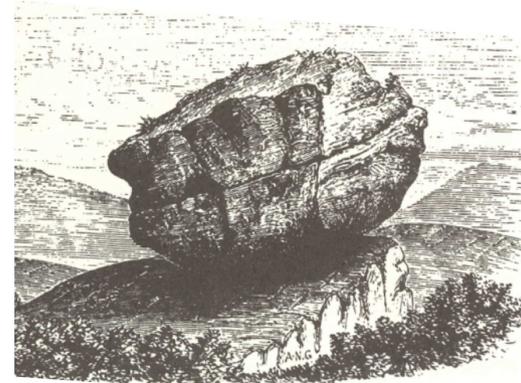
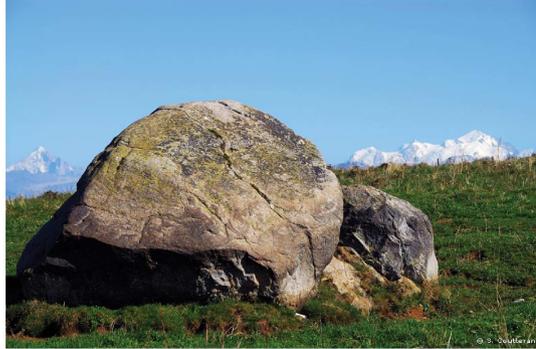
(1768-1830)

La découverte des variations passées

Hypothèse des périodes glaciaires (1840-1860)



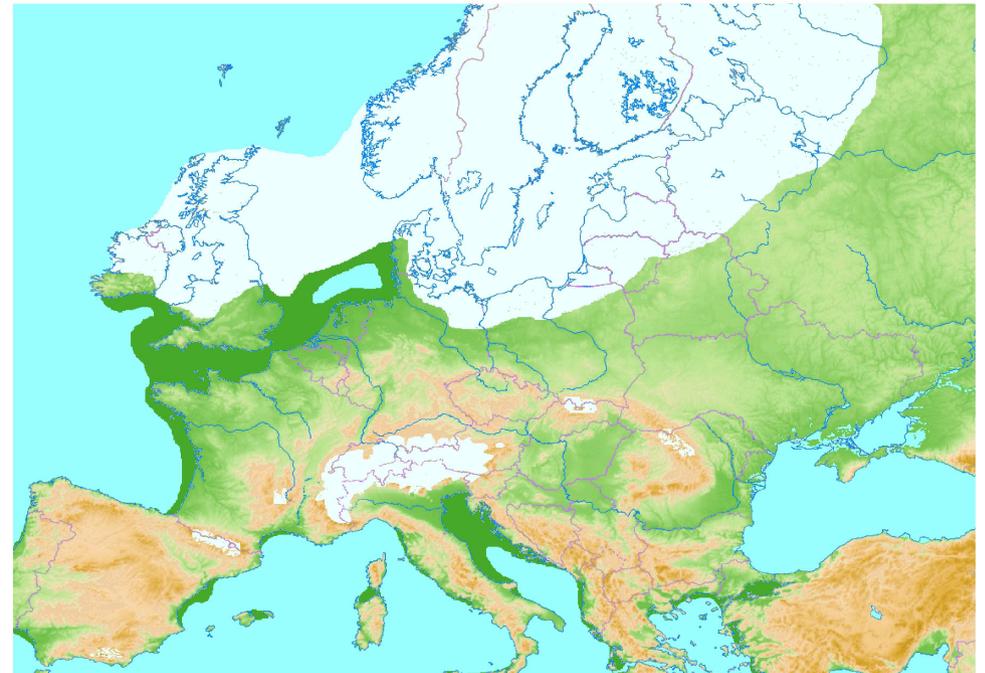
Jean de
Charpentier



Blocs erratiques



Louis Agassiz

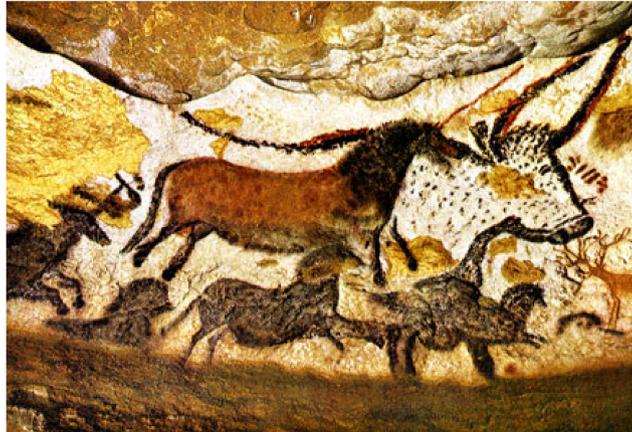


La découverte des périodes glaciaires

Une période documentée par des peintures



Cosquer

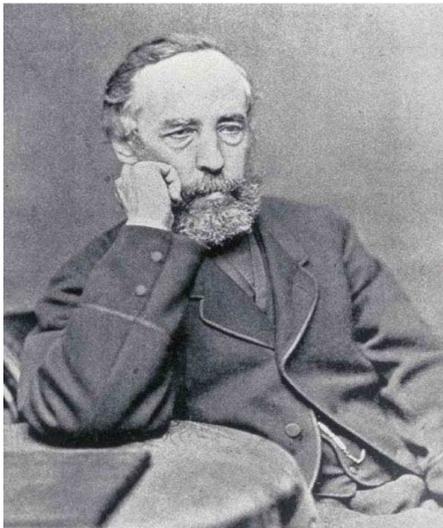


Lascaux



Chauvet

Origine de ces variations : soleil ou CO_2 (1860-1900) ?



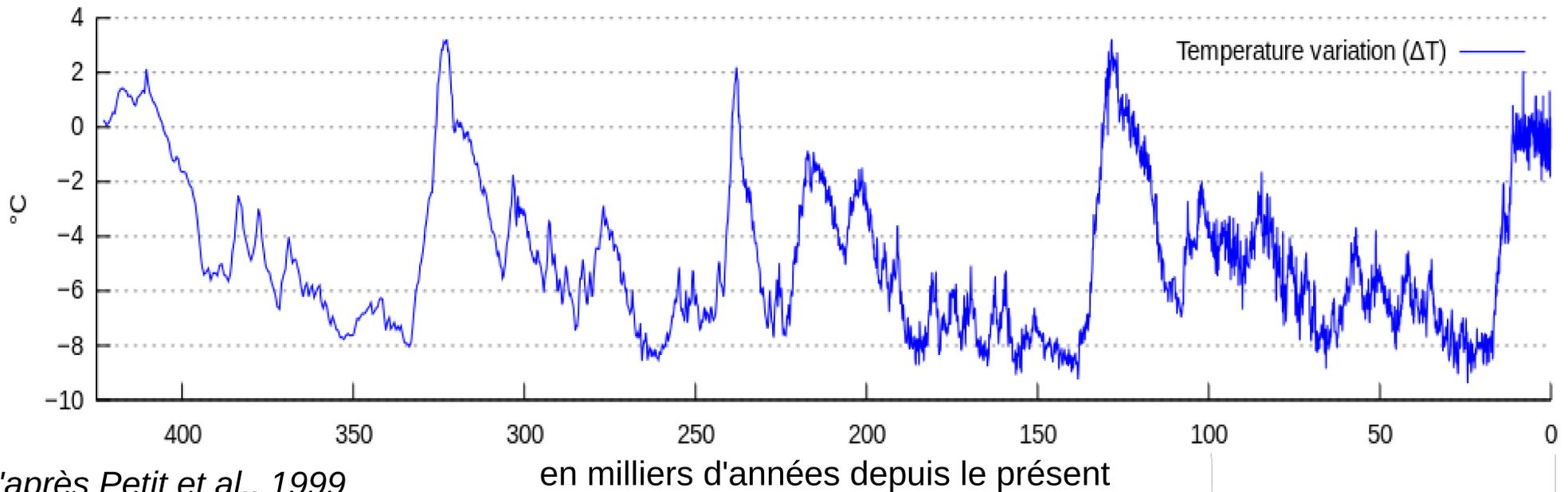
James Croll



Svante Arrhenius

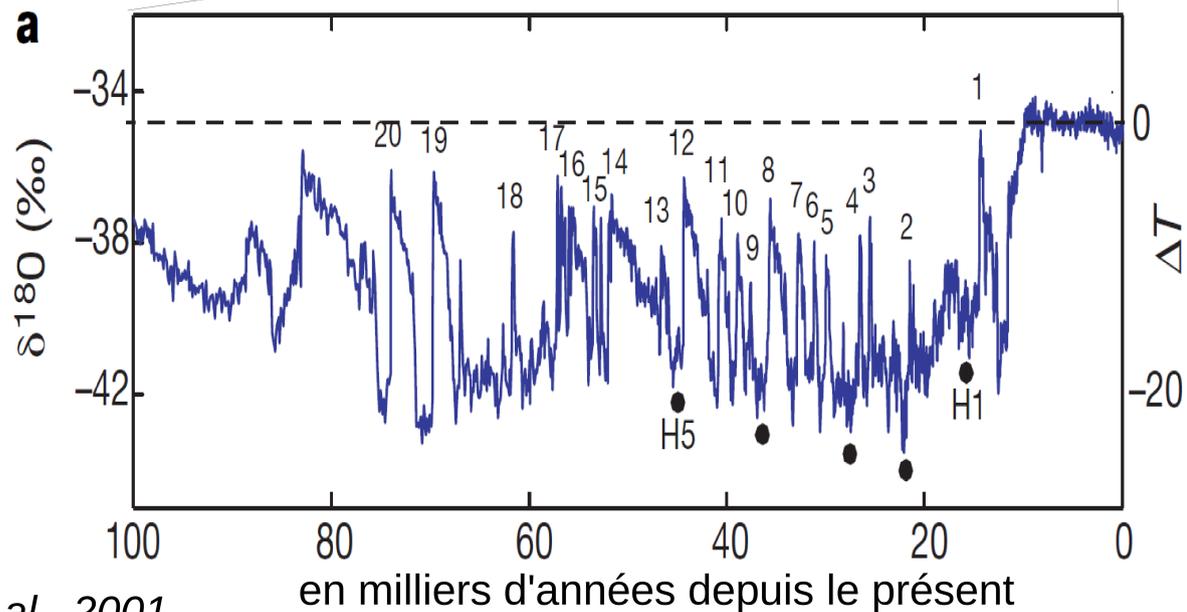
Périodes glaciaires

Forages de glace en **Antarctique** : des « cycles » à 120 000 ans



d'après Petit et al., 1999

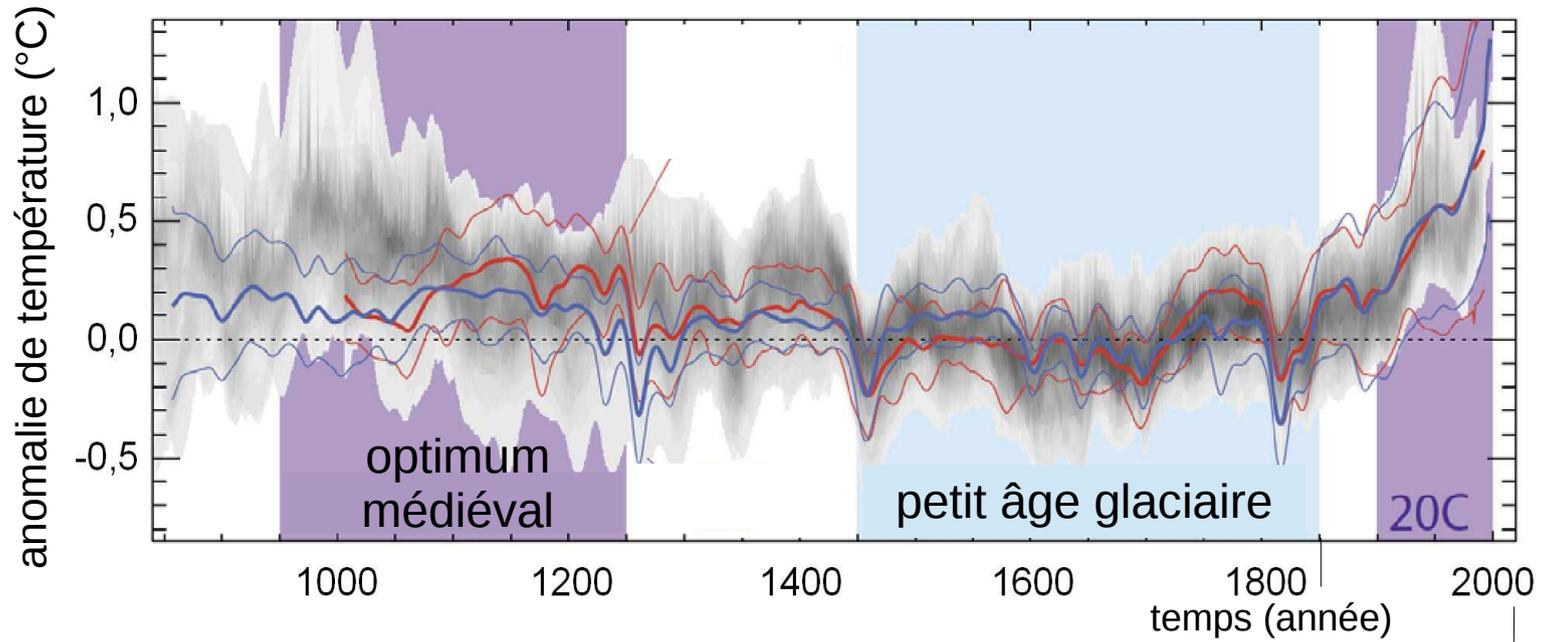
Forages de glace au **Groenland** : des variations très rapides en périodes glaciaires



Ganopolski et al., 2001

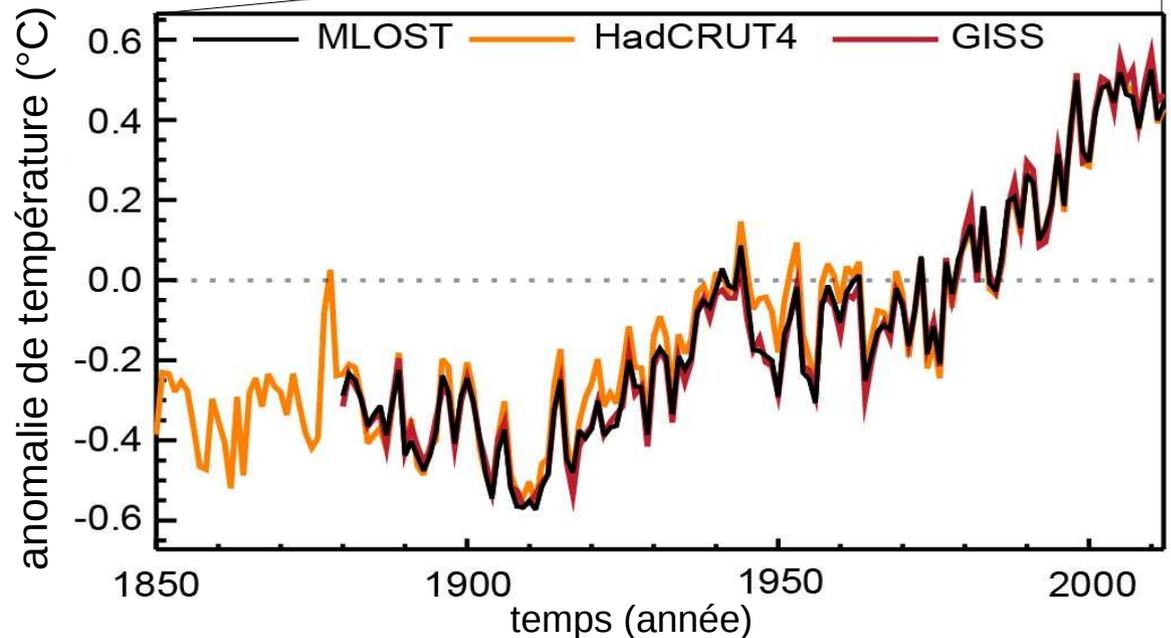
Dernier millénaire

température moyenne de l'hémisphère nord estimée à partir d'indicateurs



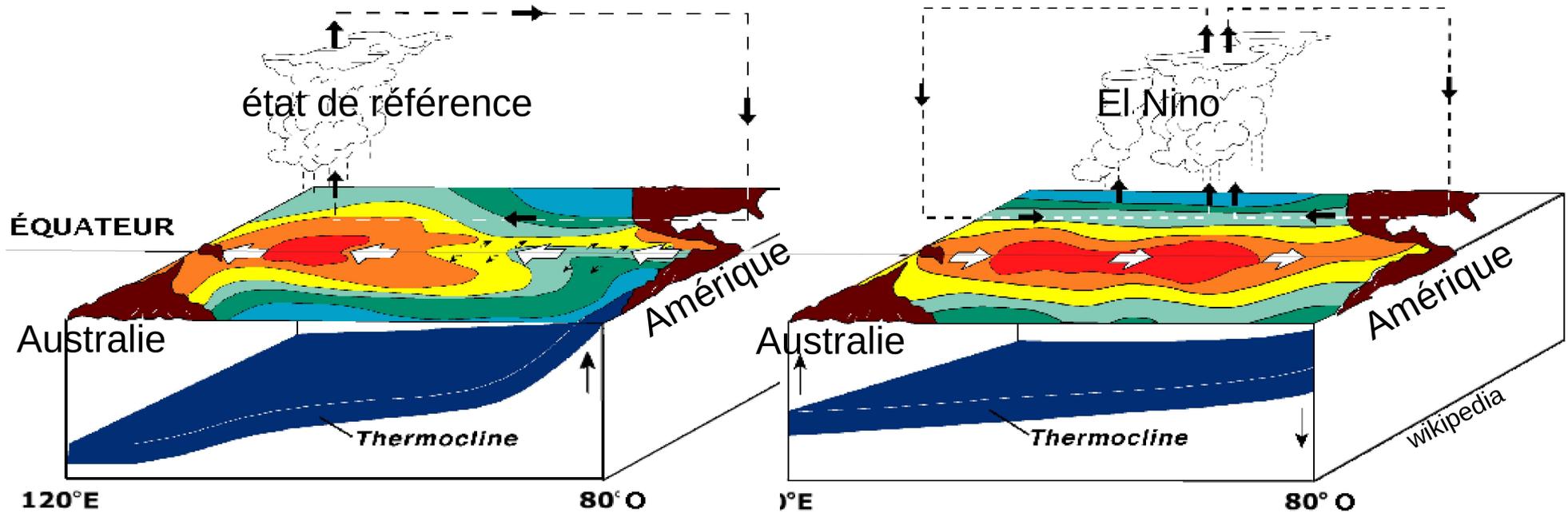
Dernier centenaire

température moyenne globale estimée à partir de mesures directes

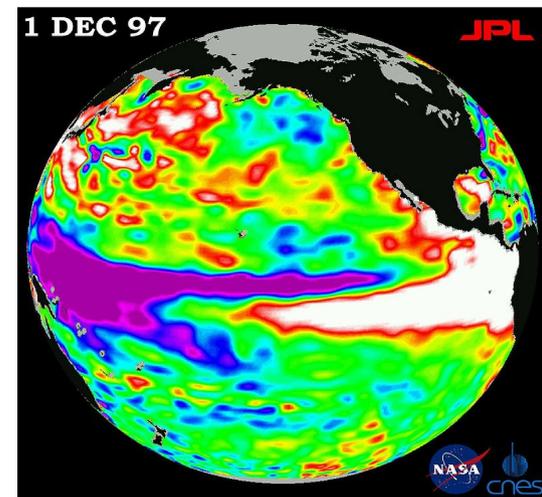
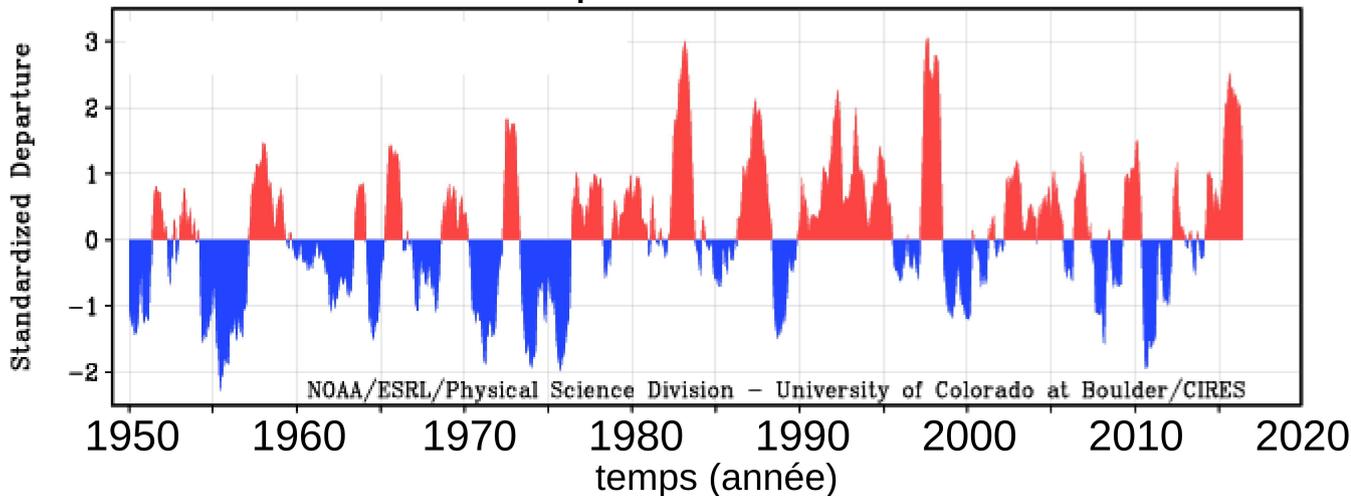


Variabilité inter-annuelle : El Nino

Principal mode de variabilité tropicale, océan Pacifique



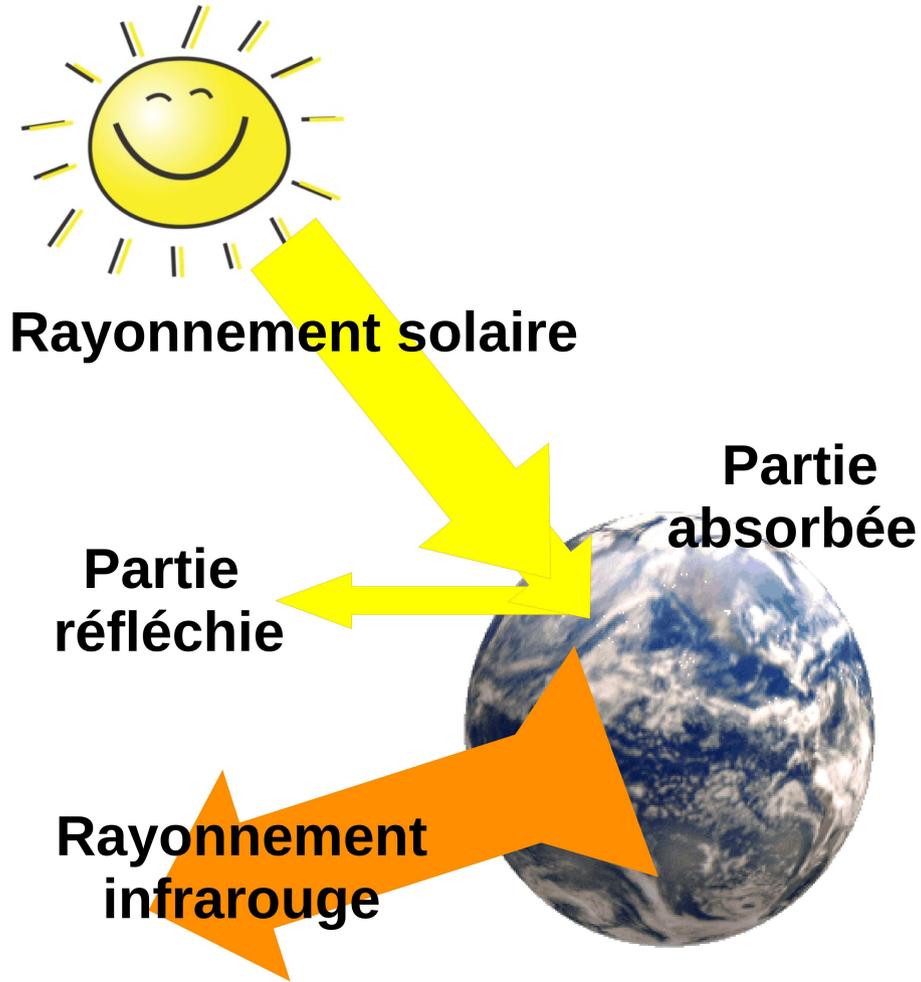
Évolution temporelle d'un indice El Nino



Plan

- I. De la vision d'un climat immuable à celle d'un climat en évolution permanente
- II. Les mécanismes régissant le climat et ses variations
- III. Variations passées, récentes et futures
- IV. Épilogue

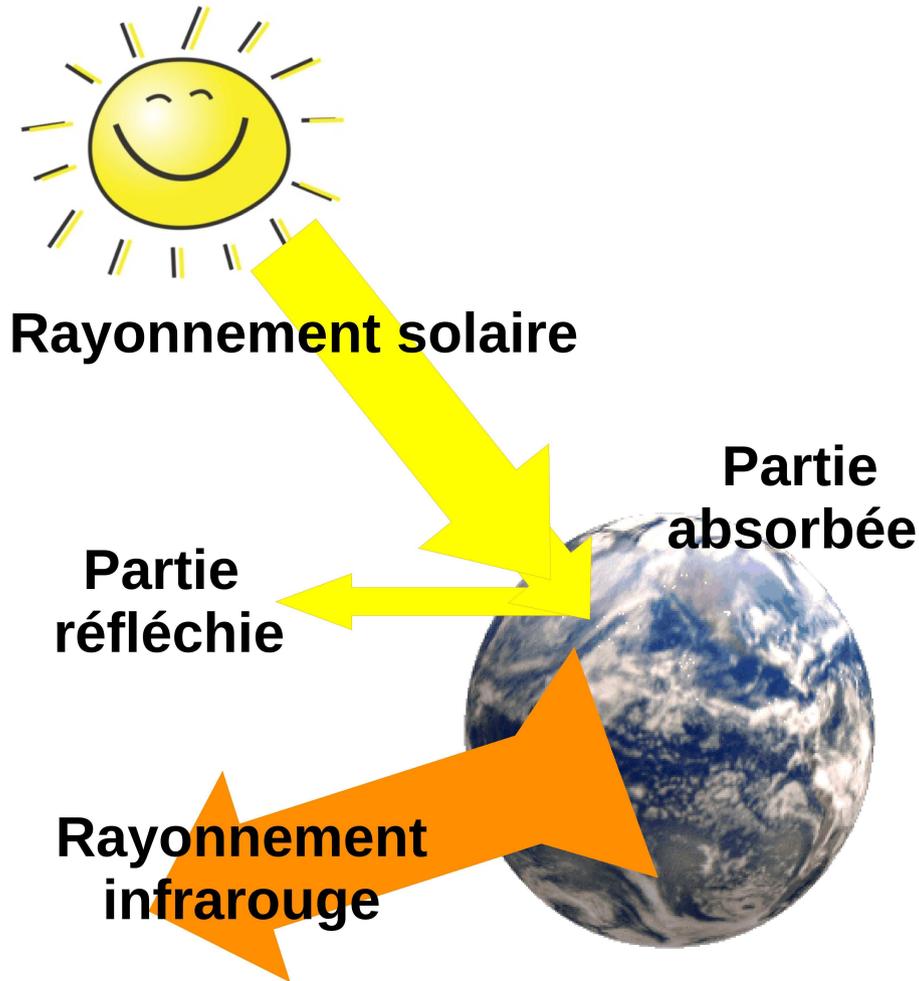
Température d'équilibre d'une planète



Joseph Fourier
(1768-1830)

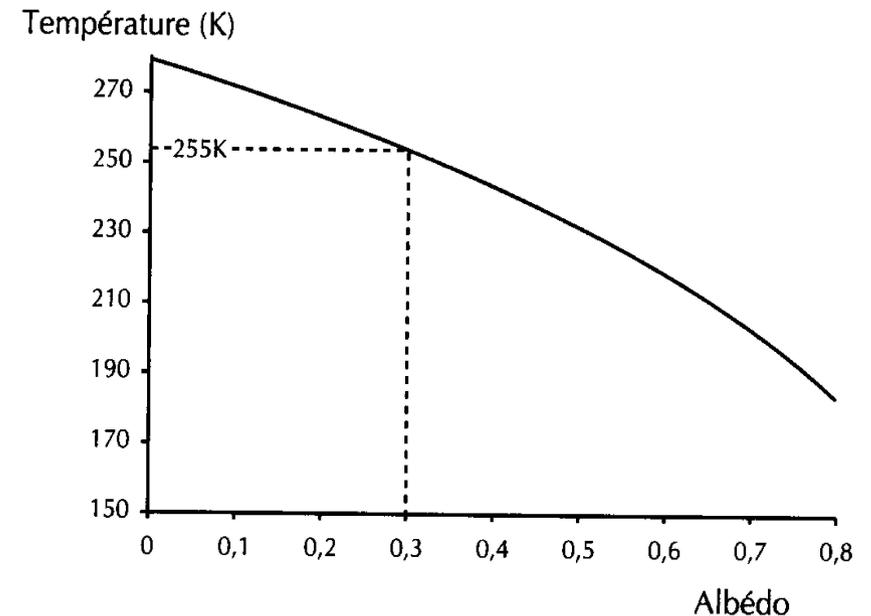
La température de surface moyenne résulte
de l'équilibre énergétique:
 $\text{flux infrarouge émis} = \text{flux solaire absorbé}$

Température d'équilibre d'une planète



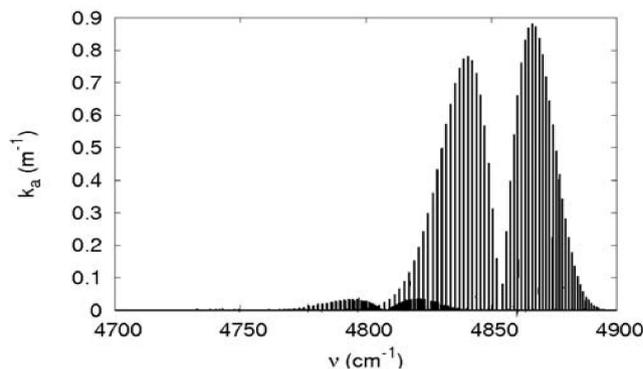
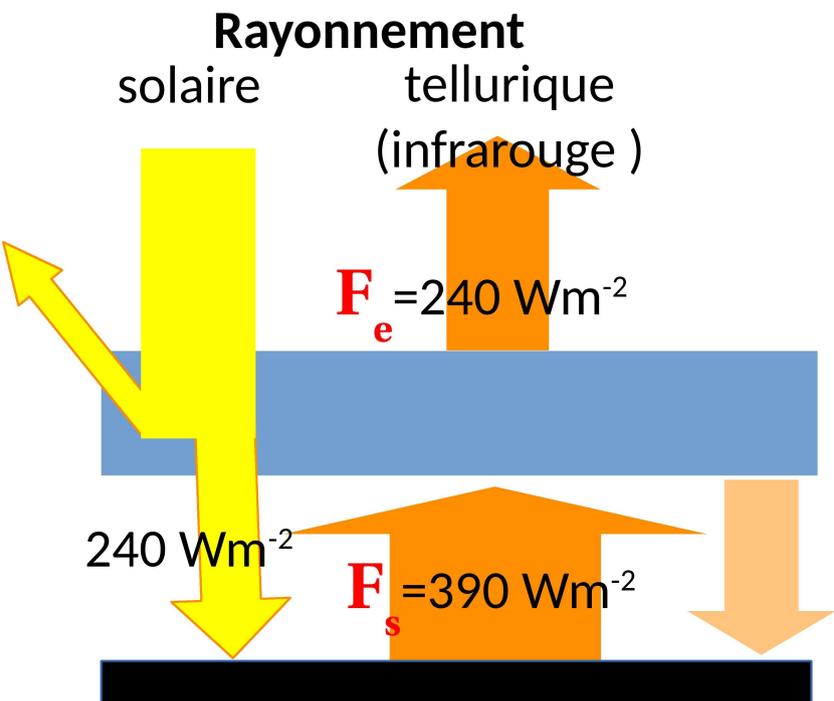
La température de surface moyenne résulte de l'équilibre énergétique:
flux infrarouge émis = flux solaire absorbé

Température de la surface si l'atmosphère était transparente au rayonnement infrarouge

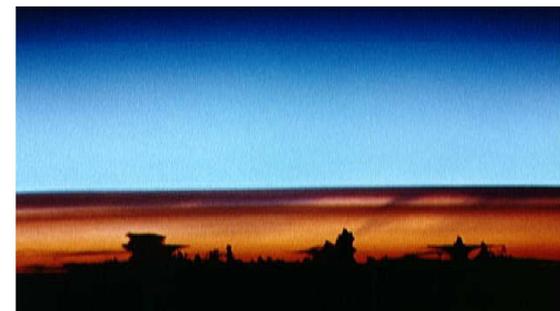


- T très sensible à l'albédo
- T=255K (-18°C) pour la valeur observée de l'albédo (0,3)
- Actuellement T≈ 288K (15°C)
- Différence due à l'effet de serre

Calcul de l'effet de serre



Propriétés radiatives

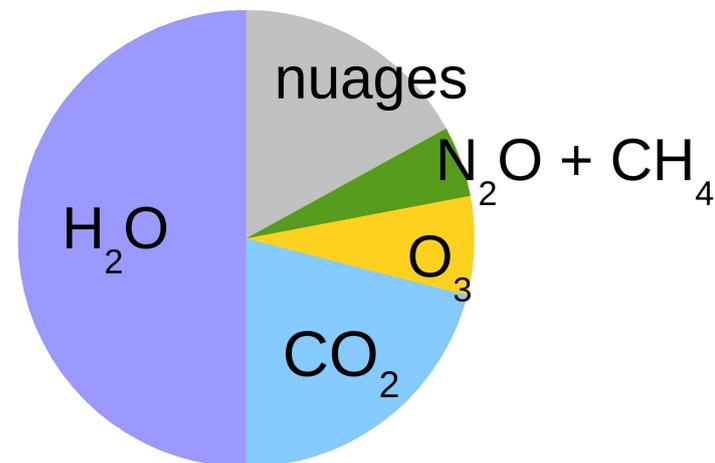


Profils atmosphériques

Calcul des flux radiatifs F et de l'effet de serre $G = F_s - F_e$

Effet de serre sur Terre : (W.m^{-2}) (%)

Total	150	
Vapeur d'eau	75	50
CO_2	32	21
ozone	10	7
$\text{N}_2\text{O} + \text{CH}_4$	8	5
Nuages	25	17



Modèle énergétique simple hérité de J. Fourier

Permet d'expliquer la **température actuelle** de la Terre

Ne permet pas de calculer les grandeurs qui **évoluent** et qui **conditionnent cette température** :

- albédo (neige, glace, nuages...) => flux solaire absorbé
- Composition et profil de l'atmosphère => rayonnement émis

Montre une **sensibilité** de la température au flux solaire absorbé (changement de flux de 4 % => changement de T de 2,5°C)

Mais cette sensibilité est **insuffisante** pour expliquer les variations passées du climat

Quelques ingrédients manquants



Rayonnement solaire

Partie réfléchie

Partie absorbée

Rayonnement infrarouge



Constante de temps (années)

- Circulation atmosphérique, vapeur d'eau, nuages, neige, océan superficiel, glace de mer, etc.

10

- Idem + circulation océanique, CO₂ biosphère continentale, CH₄, etc.

100

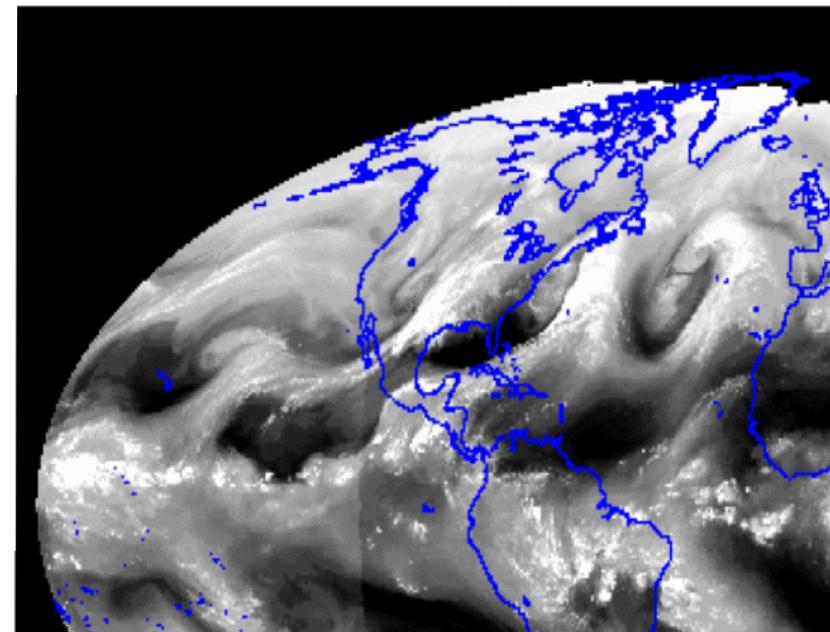
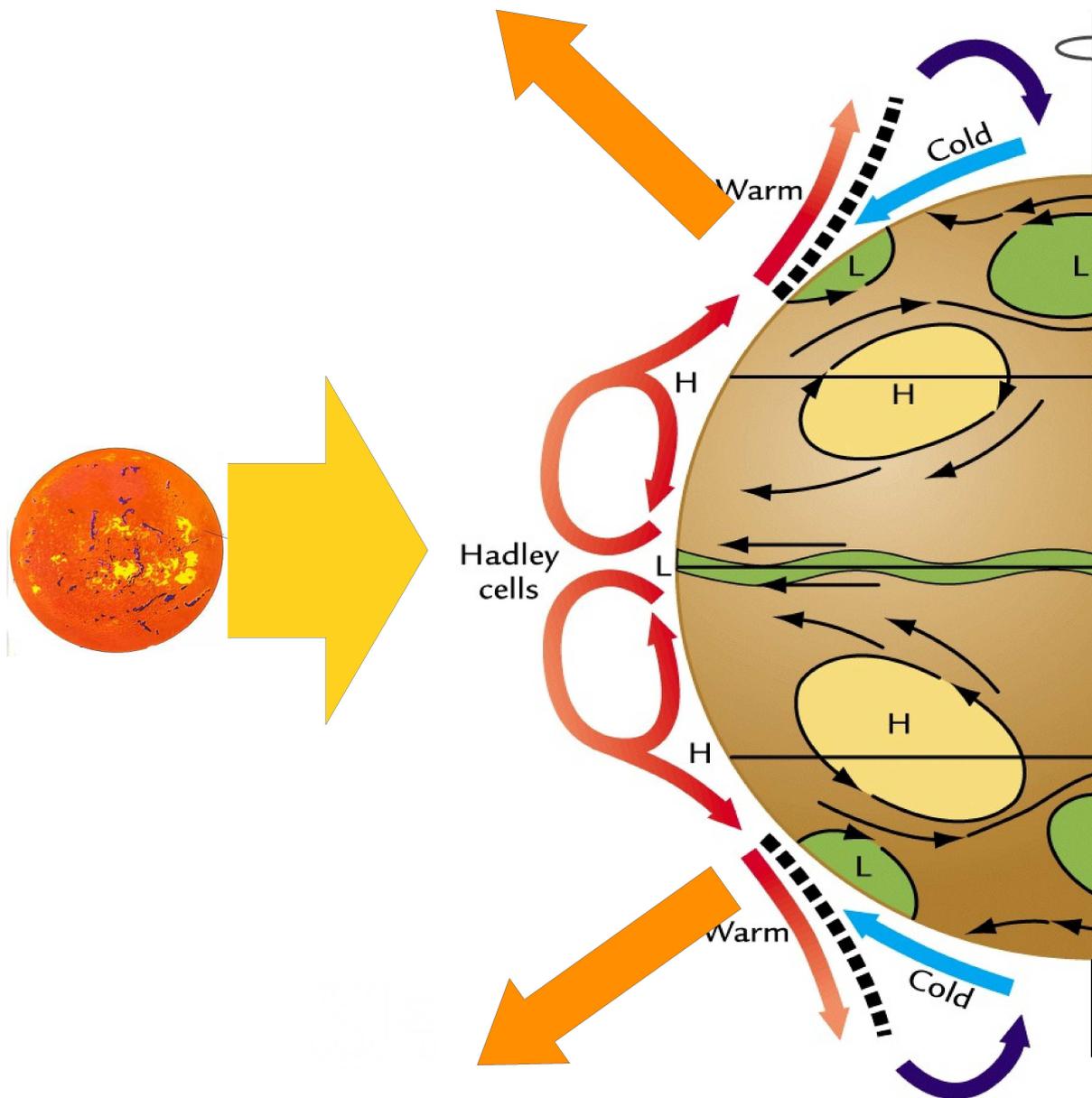
- Calottes de glace, CO₂ continental

1000

- CO₂ « géologique » (érosion continentale, volcanisme)

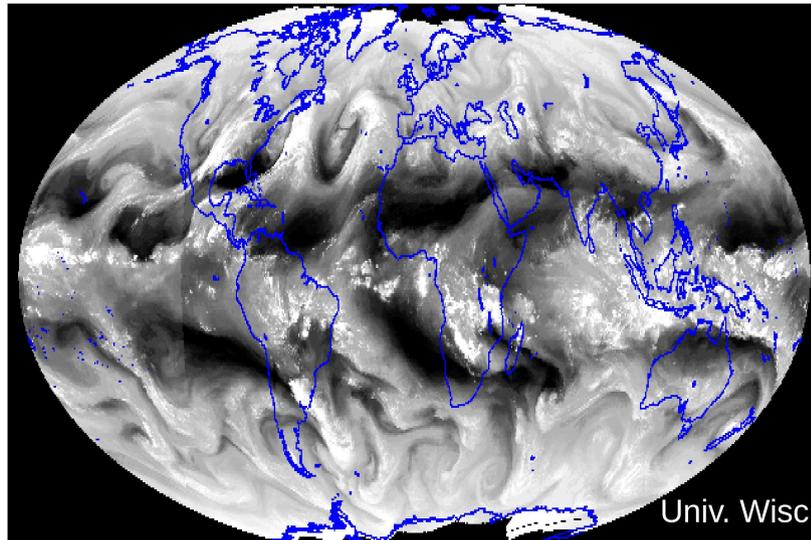
>10⁶

Circulation grande échelle sous l'effet du transport méridien de chaleur et de la rotation de la Terre

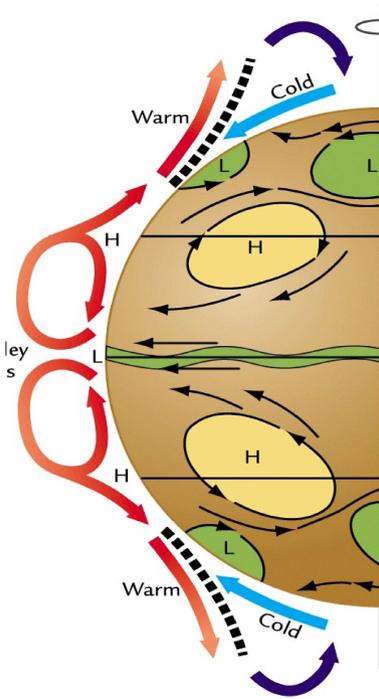
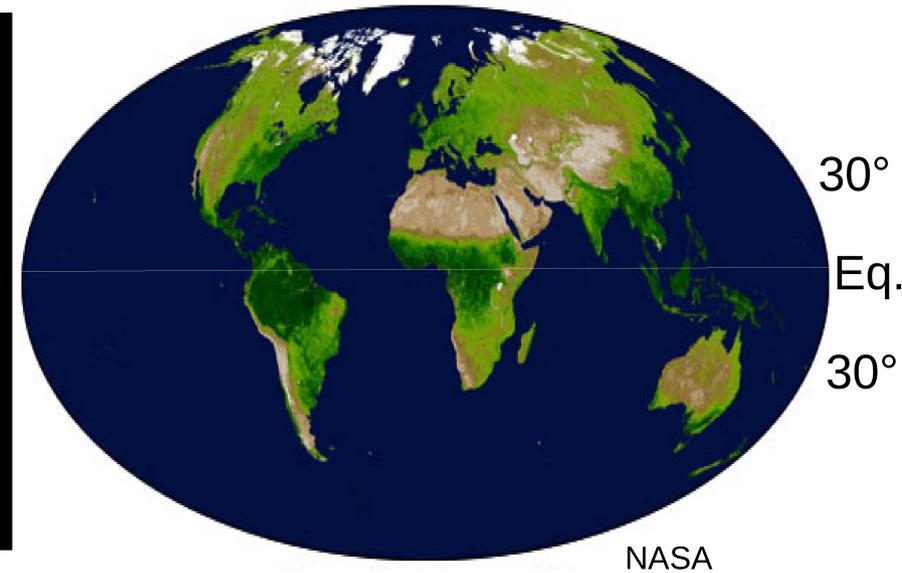


L'empreinte de la circulation générale atmosphérique sur la végétation

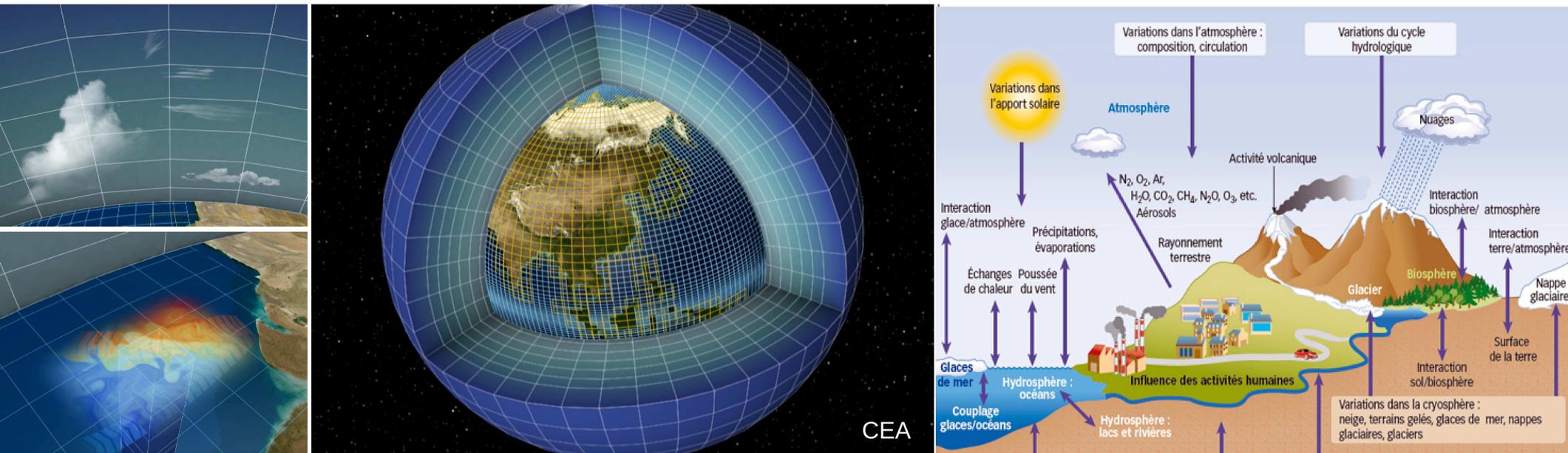
Rayonnement infrarouge
« canal » vapeur d'eau



Indice de végétation



Modèle numérique du système climatique



Modélisation :

- représentation 3D de l'atmosphère, l'océan, la glace de mer et les surfaces continentales
- résolution des équations de la mécanique des fluides, de la thermodynamique et du rayonnement
- approximation des phénomènes sous-mailles
- couplage avec les cycles biogéochimiques dans l'atmosphère, l'océan et le continent

Système :

- Multi-compartiments
- Multi-processus (physique, biogéochimique..)
- Multi-échelle de temps (quelques minutes à plusieurs millions d'années)

Plan

- I. De la vision d'un climat immuable à celle d'un climat en évolution permanente
- II. Les mécanismes régissant le climat et ses variations
- III. Variations passées, récentes et futures
- IV. Épilogue

Variabilité interne et variations dues à des forçages

Les variations climatiques ont plusieurs origines:

$$\underbrace{\Delta T}_{\text{variation}} \approx \underbrace{\Delta T_{int}}_{\text{Variabilité interne}} + \underbrace{\frac{\partial T}{\partial Q} \Delta Q_{nat}}_{\text{Réponse aux forçages naturels}} + \underbrace{\frac{\partial T}{\partial Q} \Delta Q_{ant}}_{\text{Réponse aux forçages anthropiques}}$$

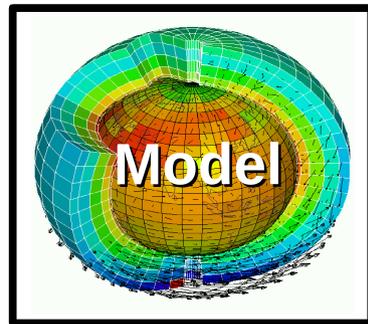
$\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{Variabilité naturelle}}$

- L'importance relative de ces termes dépend de la moyenne spatiale et temporelle considérée, et de l'amplitude des forçages
- Les différences entre observations et résultats de modèles, ou entre résultats de modèles, peuvent inclure tous ces termes

Simulations climatiques

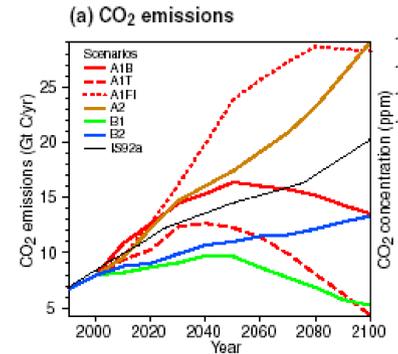
Conditions initiales:
température,
humidité,
salinité,
etc.

Conditions aux limites (forçages):
ensoleillement,
gaz à effet de serre, etc.



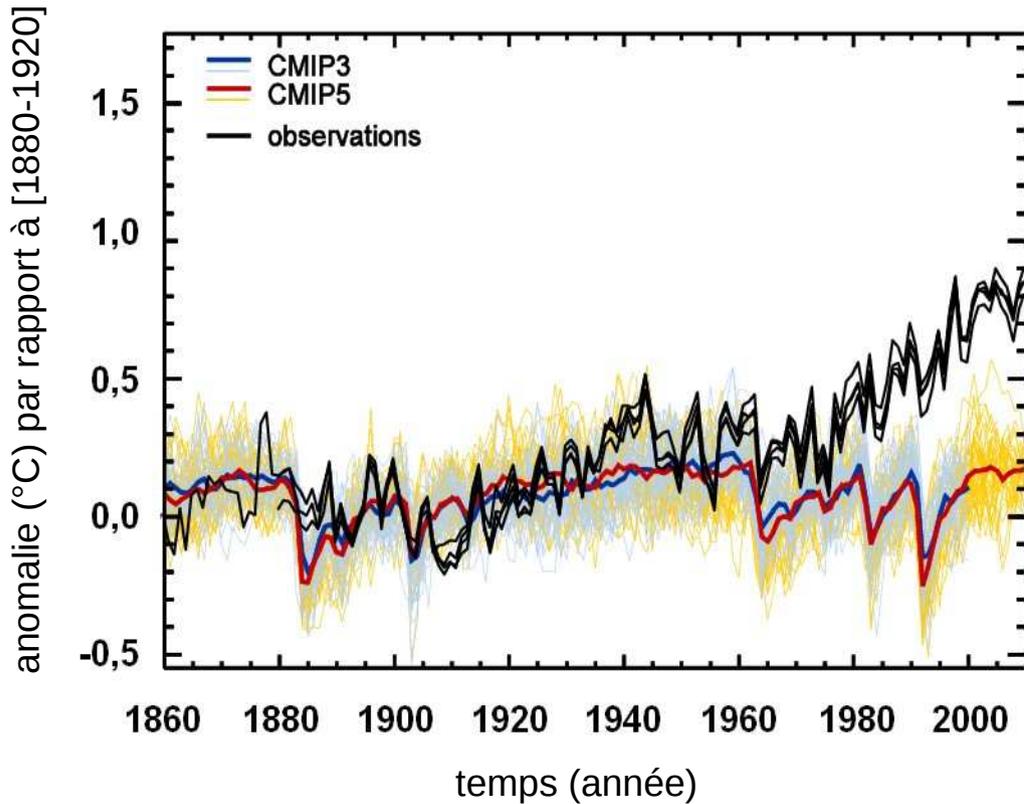
Résultats
température, vapeur
d'eau, vent,
courants, salinité
etc.

**Analyse
statistique**

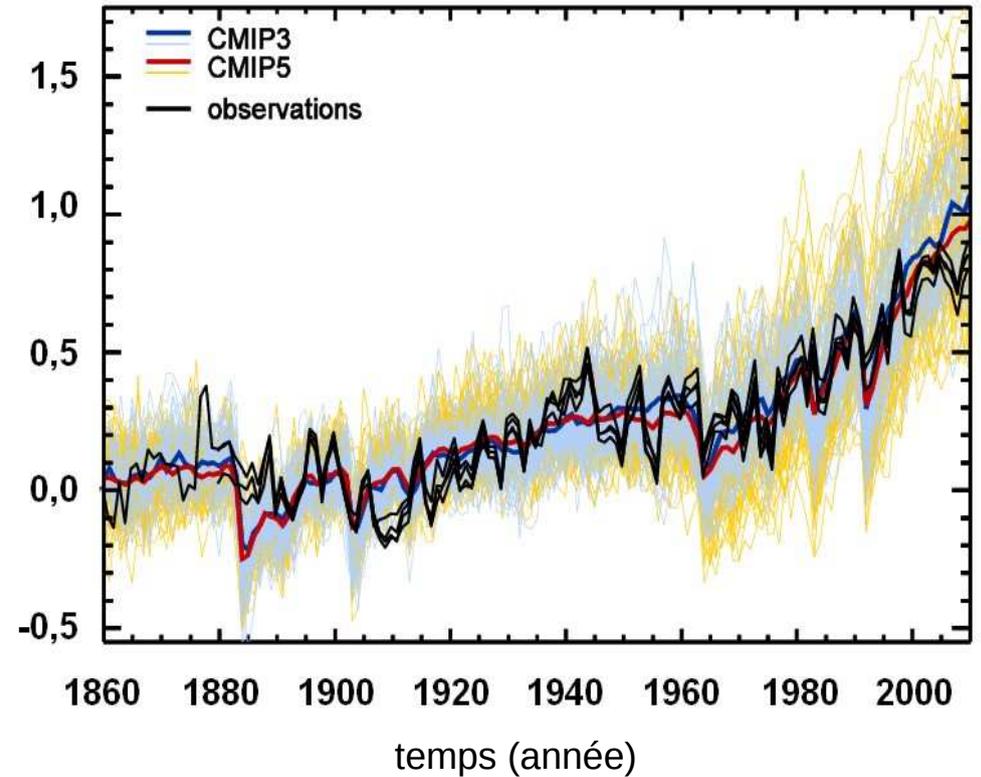


Évolution récente de la température de surface : observations et simulations

Simulations avec **forçages naturels** seulement



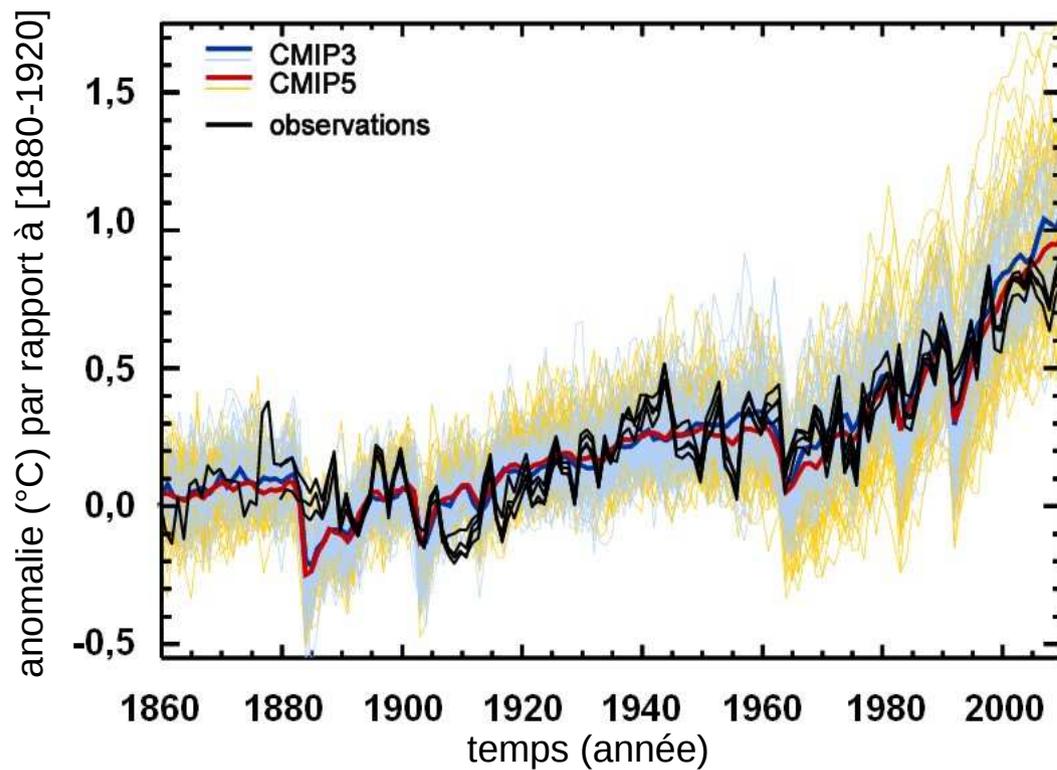
Simulations avec **forçages naturels et anthropiques**



Évolution récente de la température de surface : observations et simulations

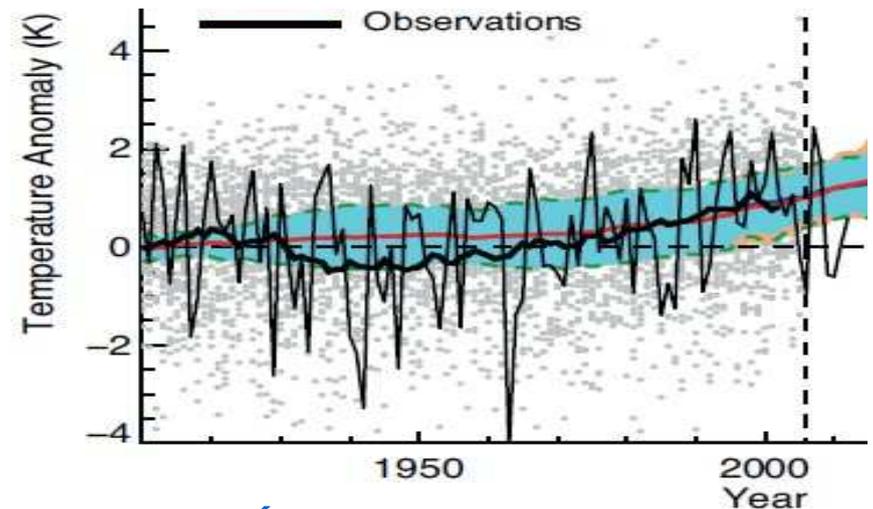
Simulations avec **forçages naturels** et **anthropiques**

Moyenne annuelle et globale

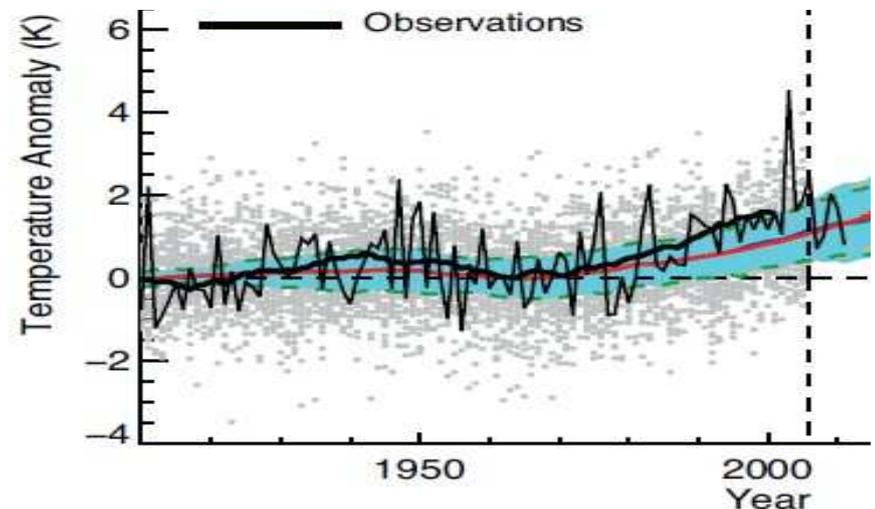


[GIEC, 2013]

Hiver sur la France



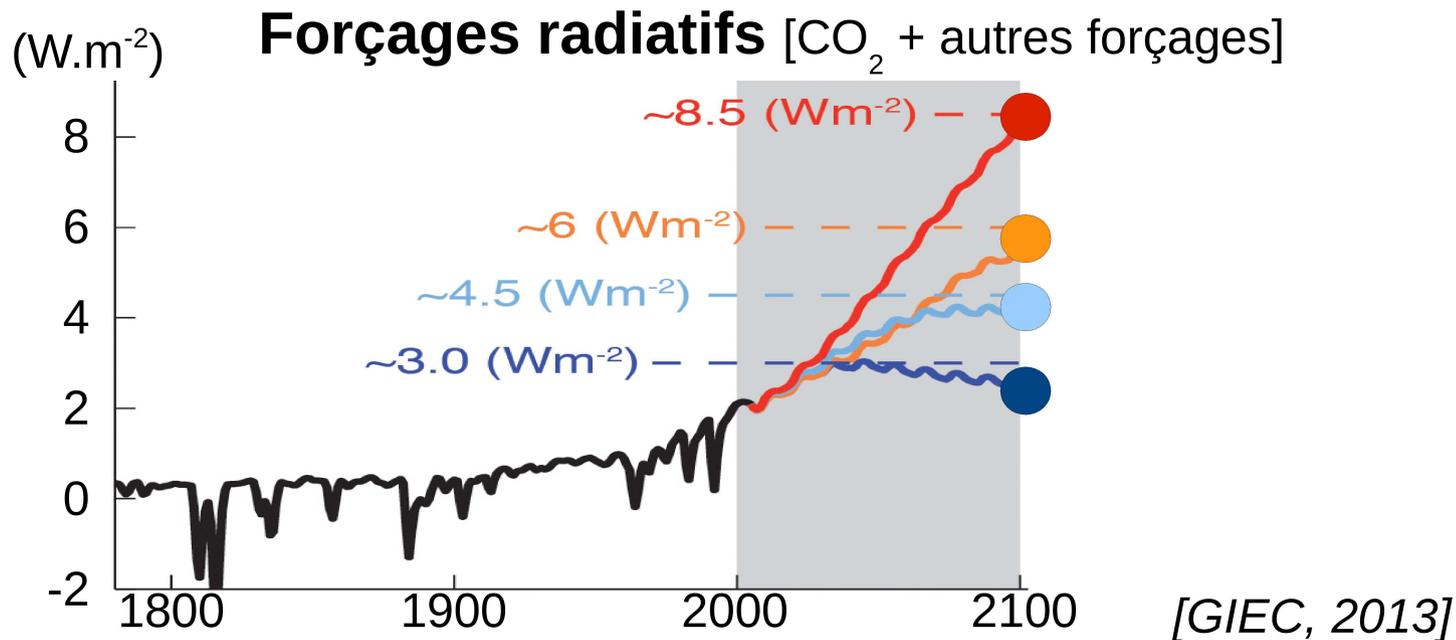
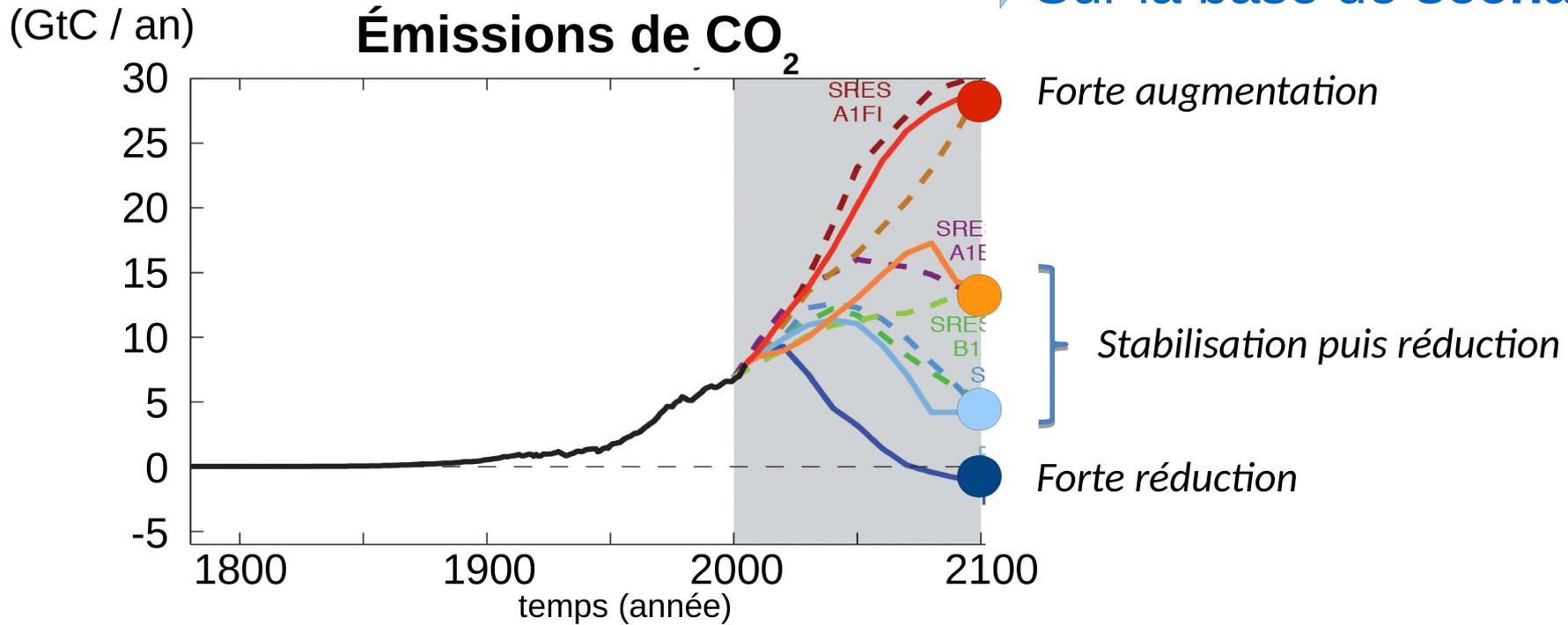
Été sur la France



[Terray et Boé, 2013]

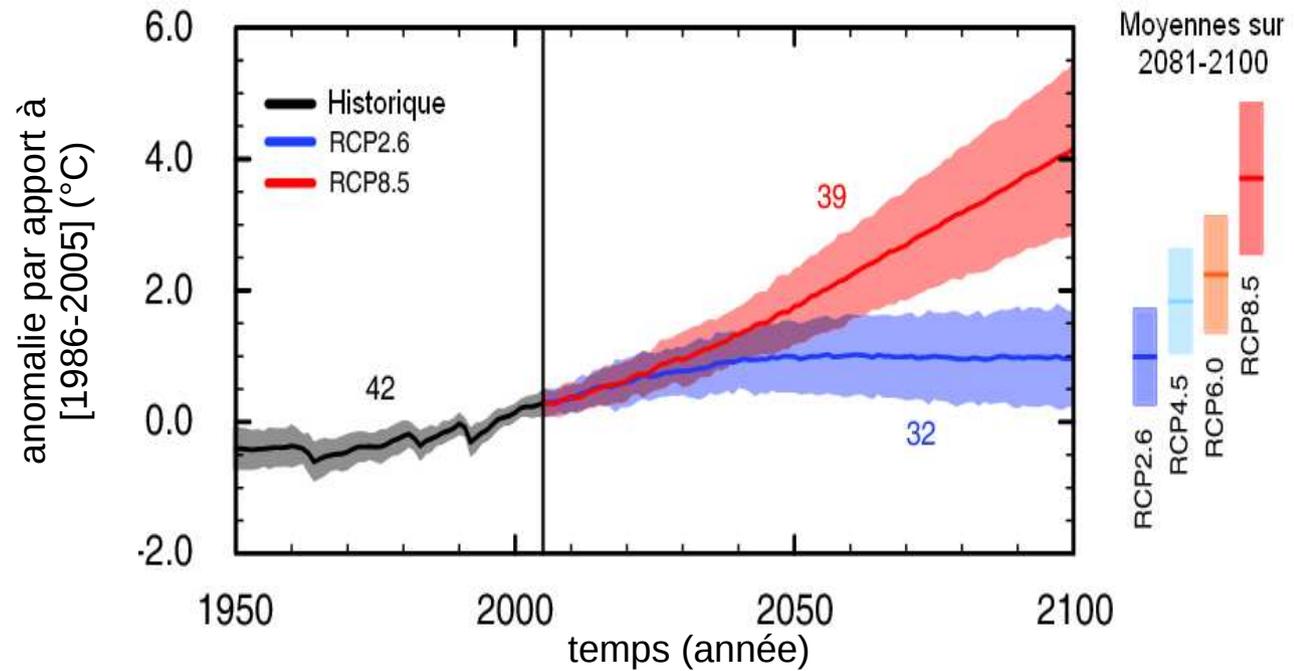
Projections futures

➔ Sur la base de scénarios



Température de surface

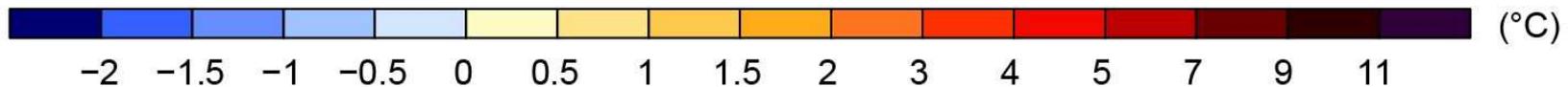
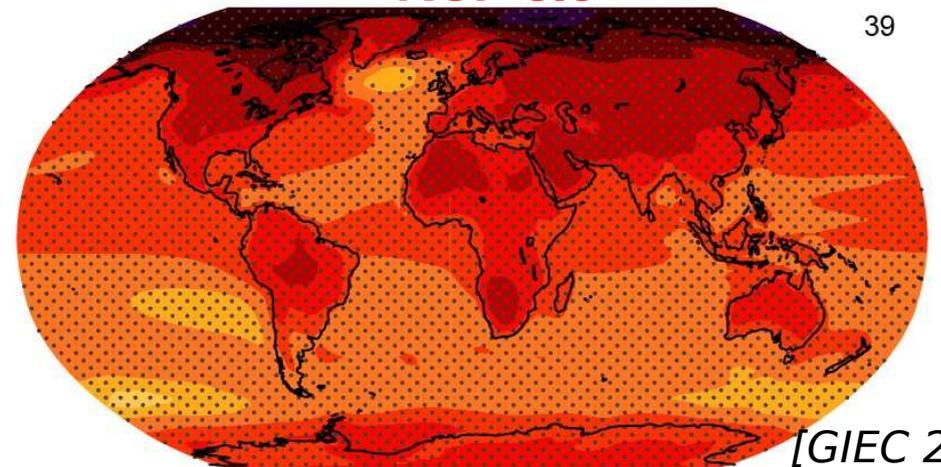
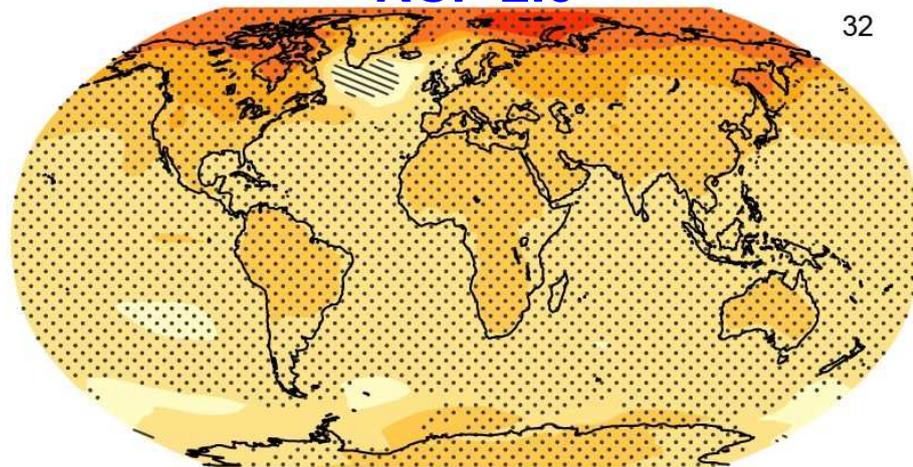
Moyenne globale
1950 à 2100
(40 modèles CMIP5)



Différence entre les périodes [1986-2005] et [2081-2100]

RCP 2.6

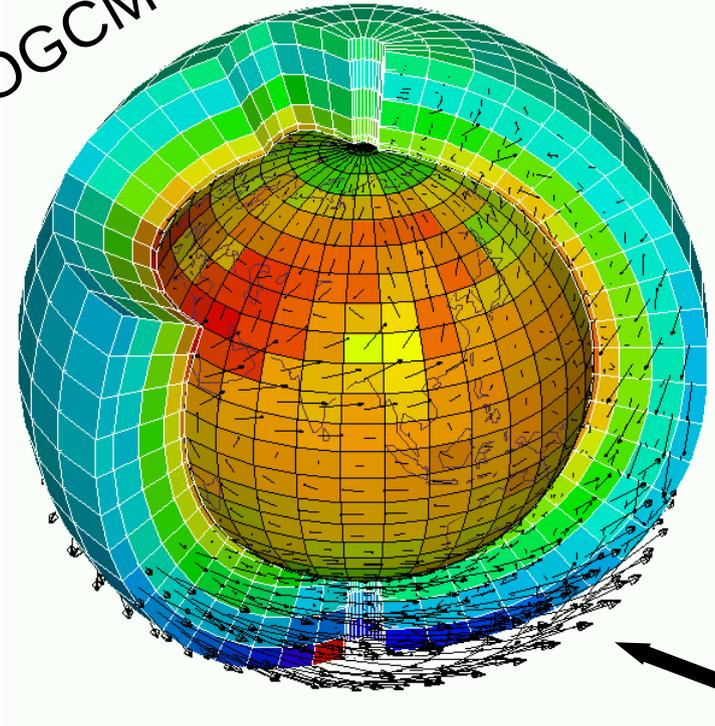
RCP 8.5



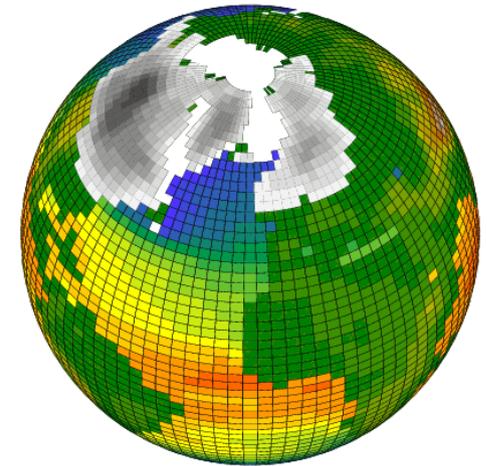
[GIEC 2013]

Simulation du climat du Dernier Maximum Glaciaire

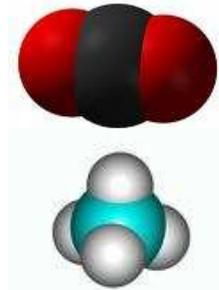
AOGCM



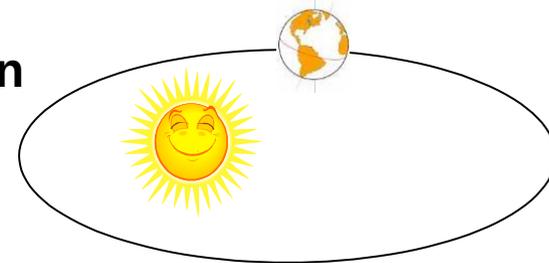
Calottes
glaciaires



Composition
atmosphérique
CO₂: 185 ppm
CH₄: 350 ppb...



Insolation
21ky BP



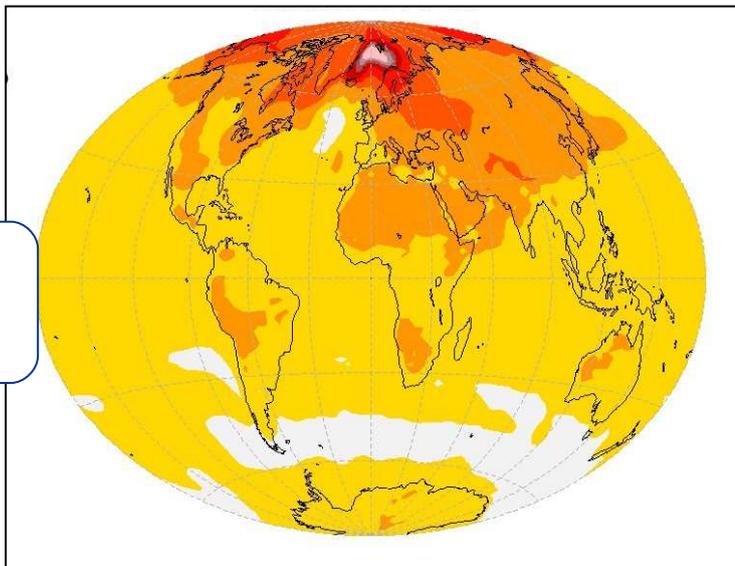
Forçage en gaz à effet de serre ~ climat futur
Autre forçage majeur: calottes glaciaire

Changement de la température de surface

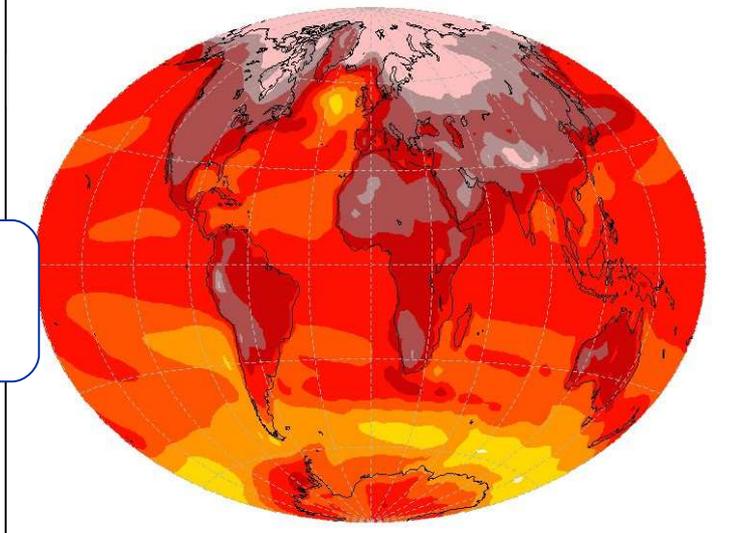
Différence entre **2100** et **1990**

IPSL-CM5A-LR

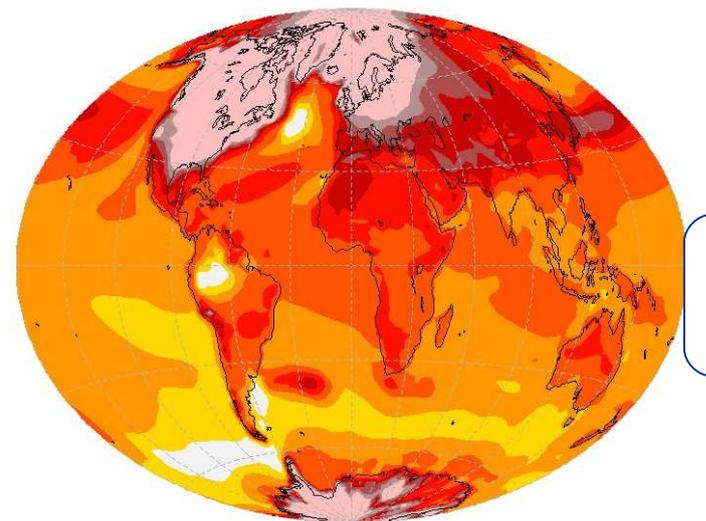
RCP2.6



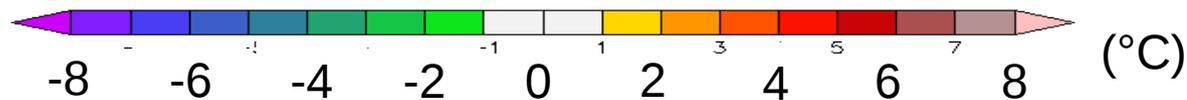
RCP8.5



Différence entre la période **actuelle** et celle dernier maximum **glaciaire**

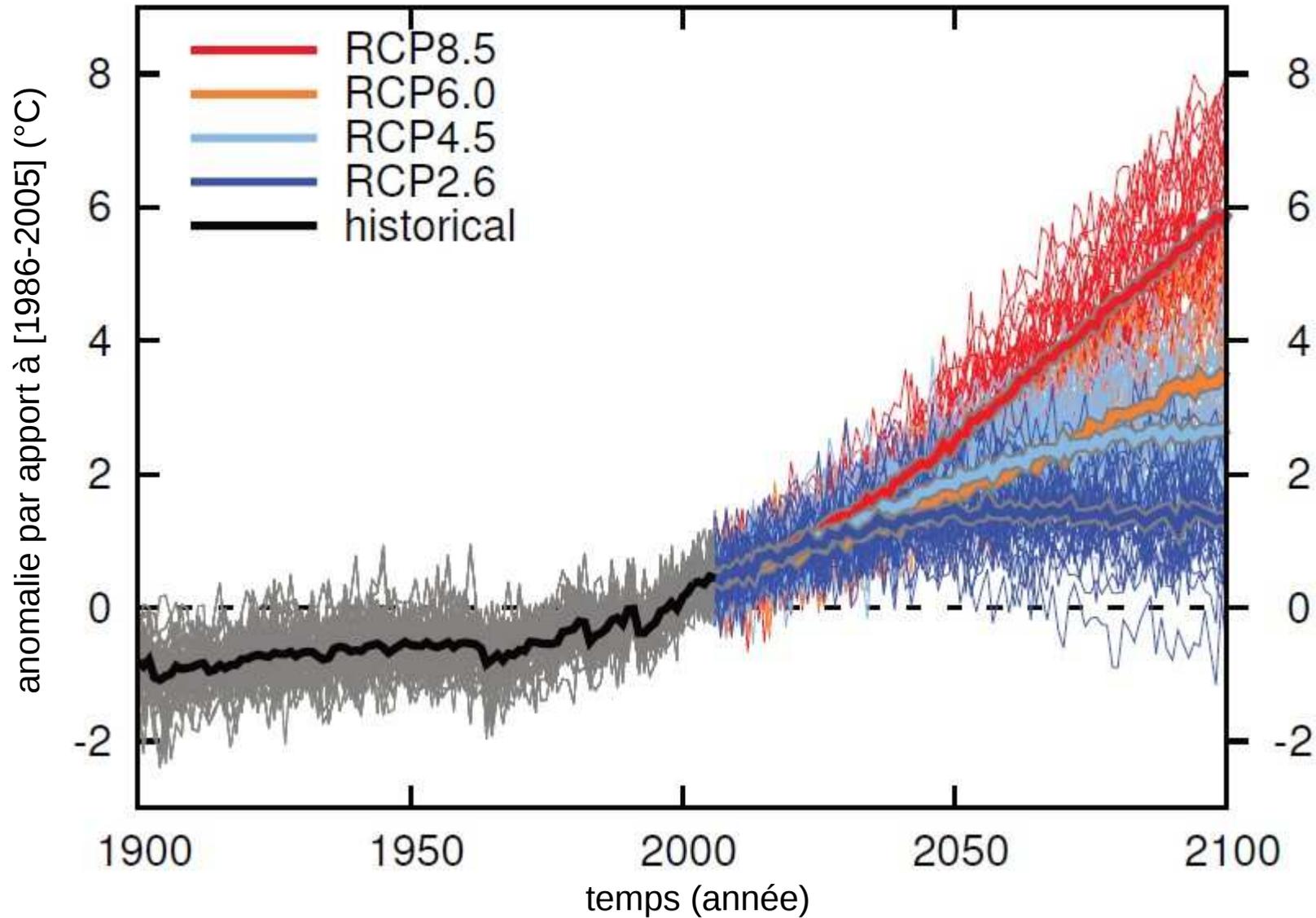


Glaciaire



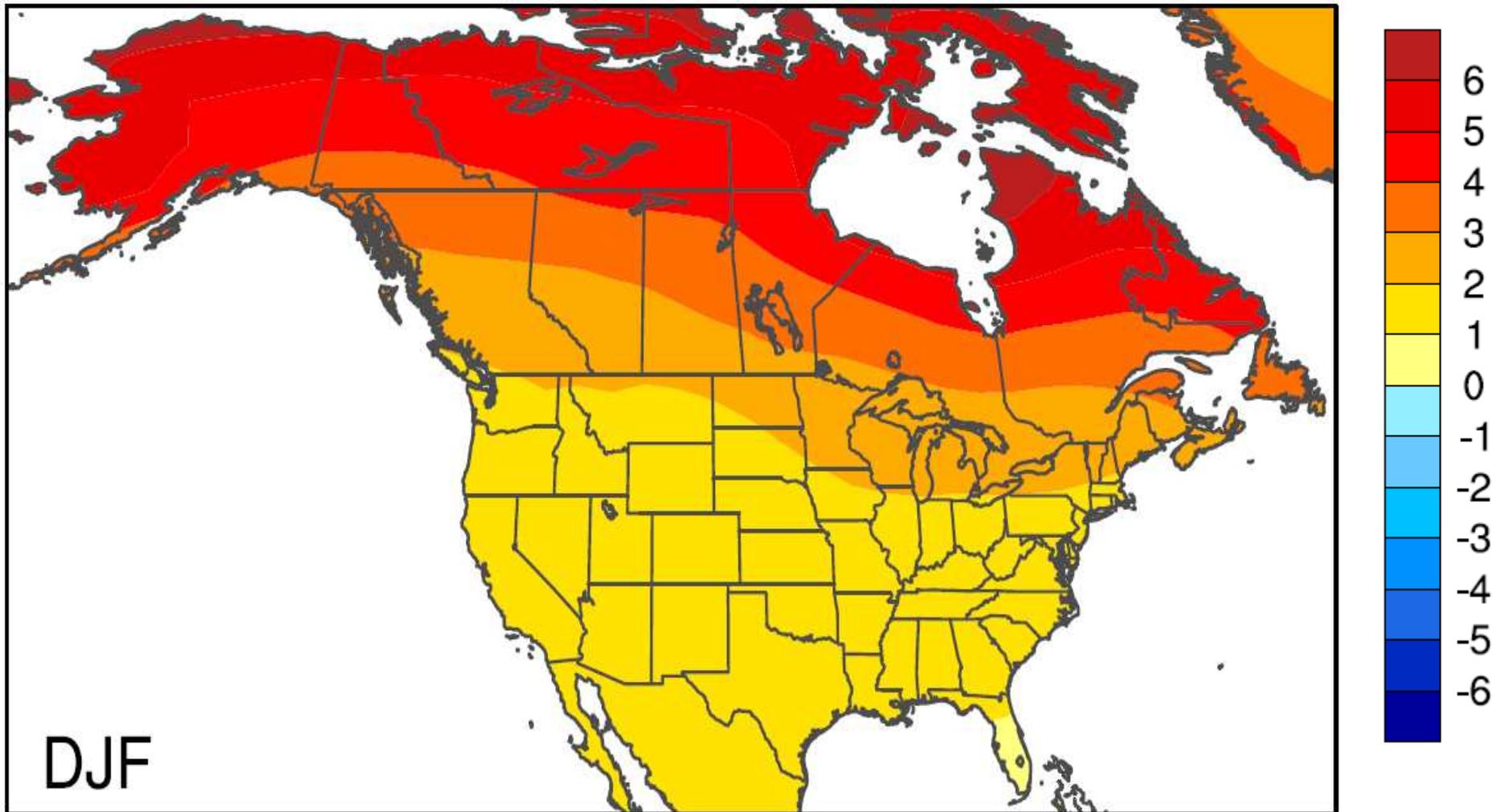
Changement climatique et variabilité interne

Température moyenne au dessus des continents,
en hiver boréal (dec.-fev.)



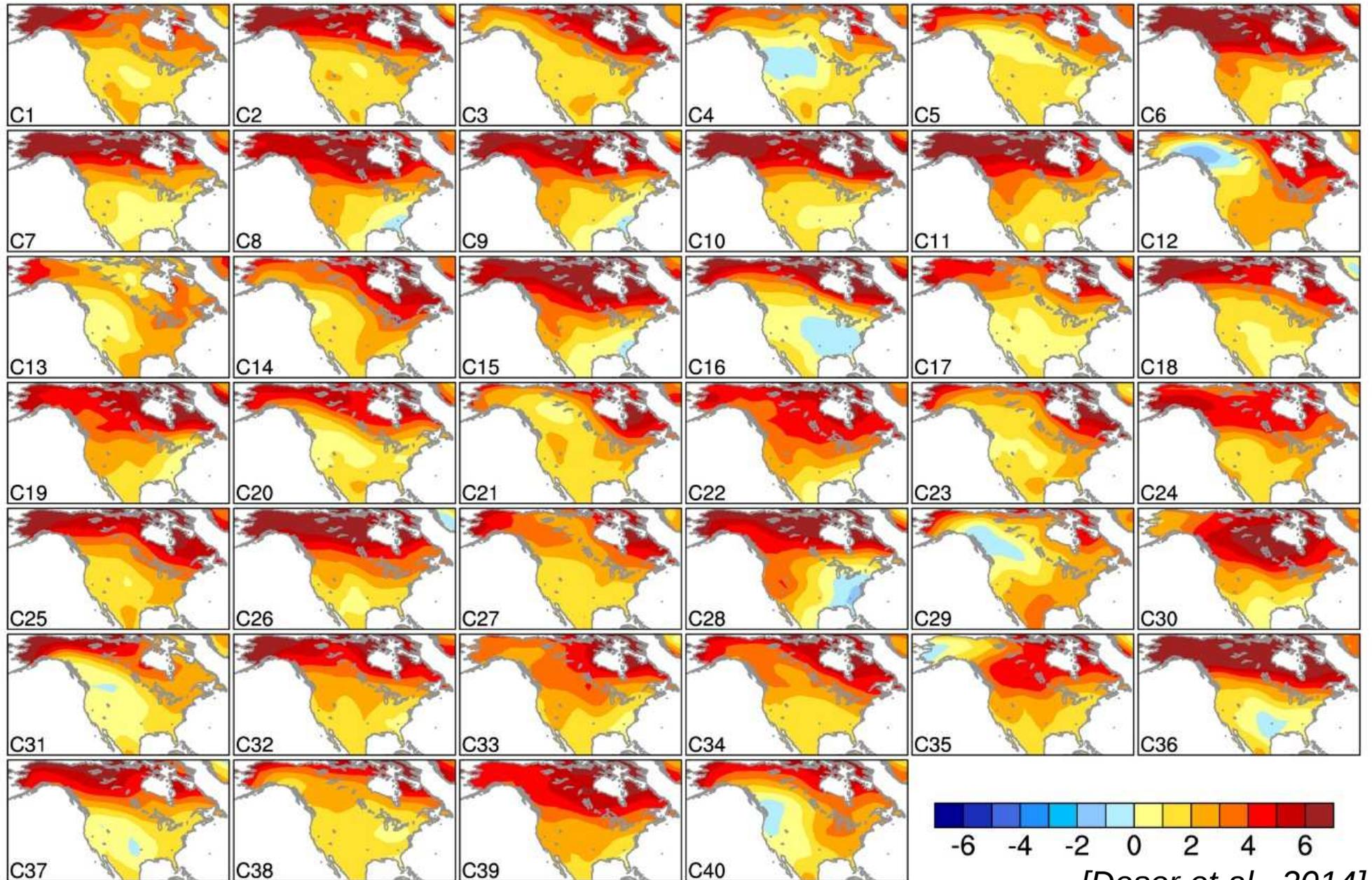
Changement climatique et variabilité interne

Tendance sur 50 ans de la température hivernale ($^{\circ}\text{C}/50$ ans)
pour un scénario « intermédiaire - haut »



Changement climatique et variabilité interne

Tendance sur 50 ans de la température hivernale ($^{\circ}\text{C}/50$ ans)



[Deser et al., 2014]

Épilogue

- Les caractéristiques des conditions météorologiques varient dans le temps (pas uniquement les températures)
- Il en est de même pour le **climat, qui a varié dans le passé**, parfois de façon brutale
- La **stabilité du climat a varié**. Basculement d'un état climatique à un autre ?
- Les changements climatiques passés ont entraîné des **changements environnementaux majeurs** (niveau des mers, faunes, flores..)
- La **température** globale de la Terre et **le climat sont remarquablement stables depuis la dernière déglaciation** (15 000 ans env.)... même s'ils ont varié (« Sahara vert », petit âge glaciaire médiéval, etc.)
- On sait que le climat n'est pas immuable mais qu'il varie, qu'il existe des cohérences dans ses variations, mais **on ne sait pas définir un éventuel « ordre climatique »**

Épilogue

- Les **changements climatiques futurs** dus aux activités humaines pourront être de **grande amplitude** au regard de ceux du passé
- Ces **changements seront radicaux** par rapports à ceux ayant existé depuis 15 000 ans.
- Il n'y a pas eu de variation de la température moyenne de la Terre de plus de 2°C plus durant le dernier million d'années. **On va vers l'inconnu.**
- Le basculement éventuel du fonctionnement du système climatique est une question ouverte
- Le **climat conditionne très fortement** l'environnement naturel, notre environnement et nos sociétés
- Il est difficile de parler de **désordre climatique** sans ordre, mais le risque de **désordre en conséquence des changements climatiques** futurs est bien réel

An aerial photograph of a vast, snow-covered mountain range. The terrain is rugged and covered in a thick layer of white snow, with some rocky outcrops visible. The sky is a deep, clear blue. In the lower-left quadrant, a faint rainbow is visible, adding a touch of color to the scene. The overall atmosphere is serene and majestic.

Merci de votre attention