

# *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<sup>e</sup> 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**

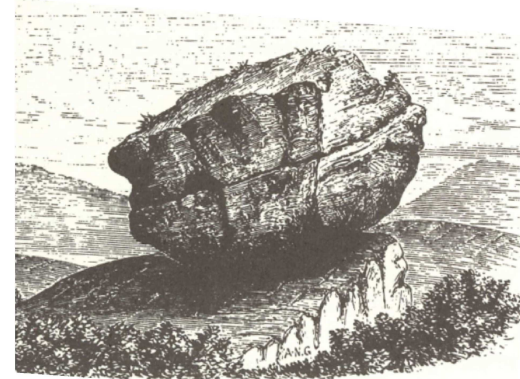
(1768-1830)

# La découverte des variations passées

## Hypothèse des périodes glaciaires (1840-1860)



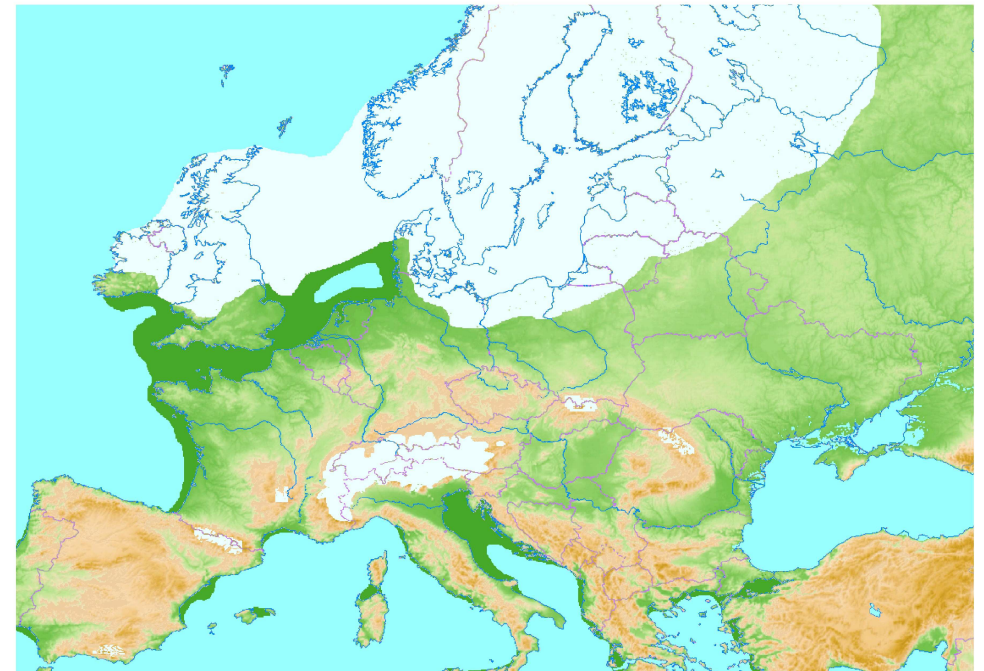
Jean de  
Charpentier



Blocs erratiques



Louis Agassiz





# La découverte des périodes glaciaires

Une période documentée par des peintures



Cosquer

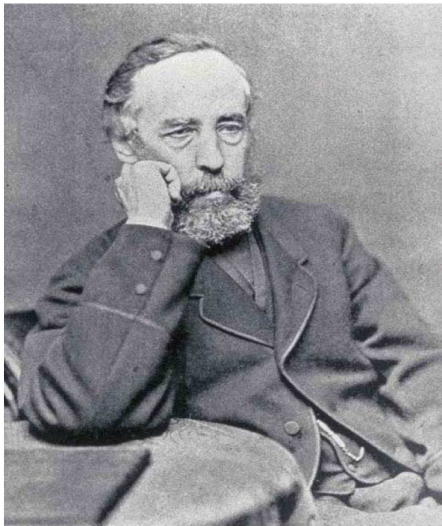


Lascaux



Chauvet

Origine de ces variations : soleil ou  $\text{CO}_2$  (1860-1900) ?



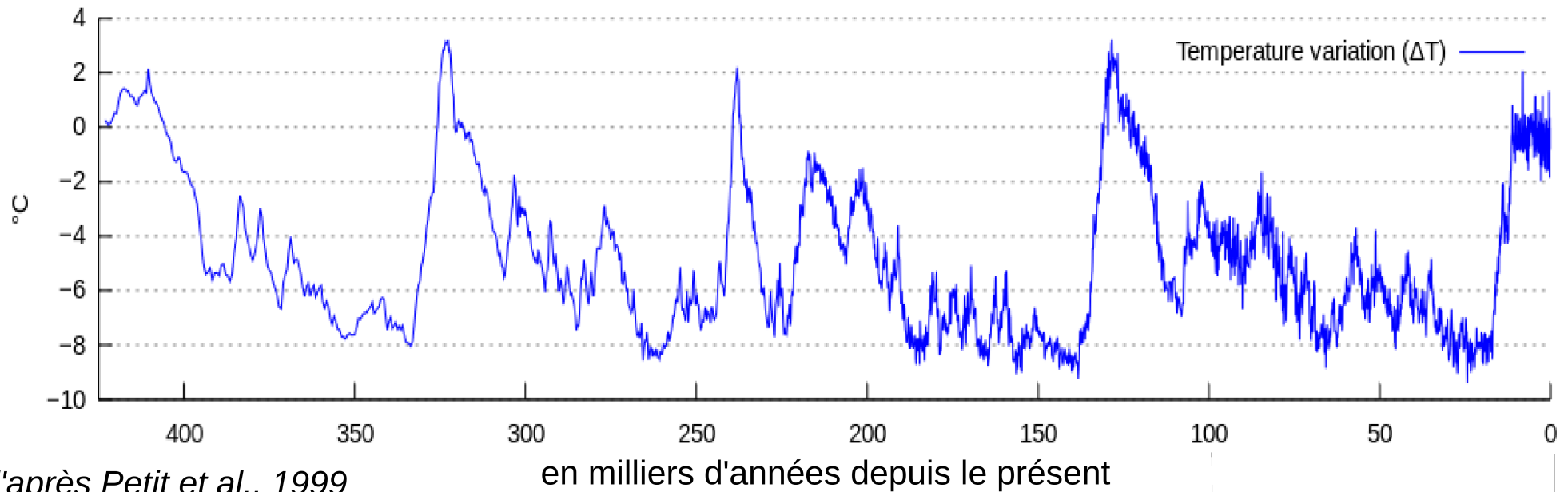
James Croll



Svante Arrhenius

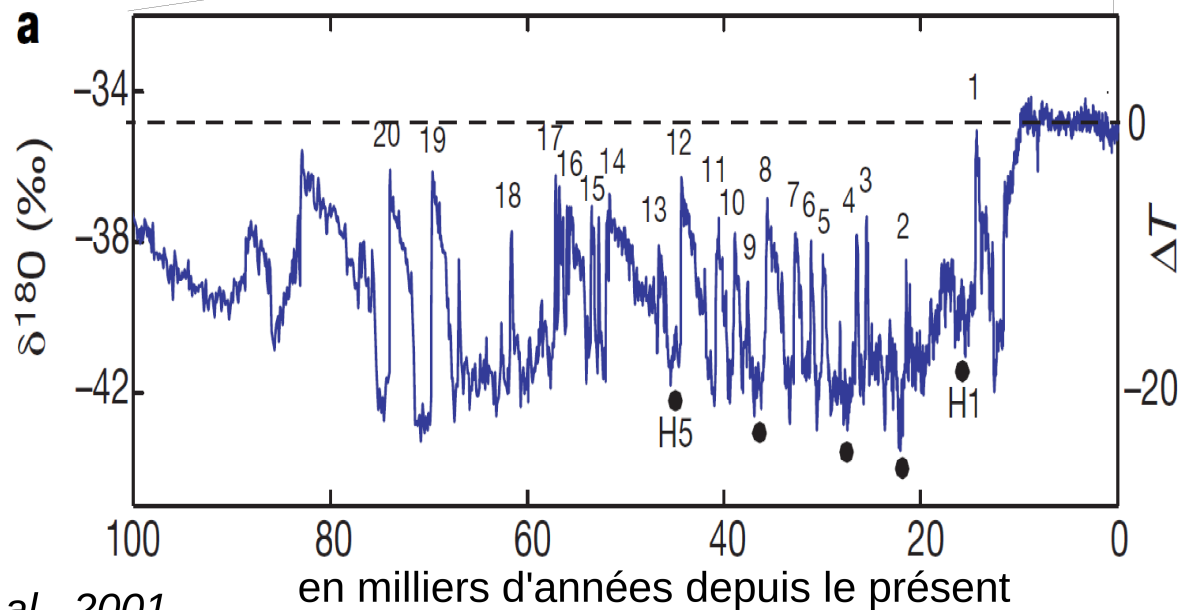
# Périodes glaciaires

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



d'après Petit et al., 1999

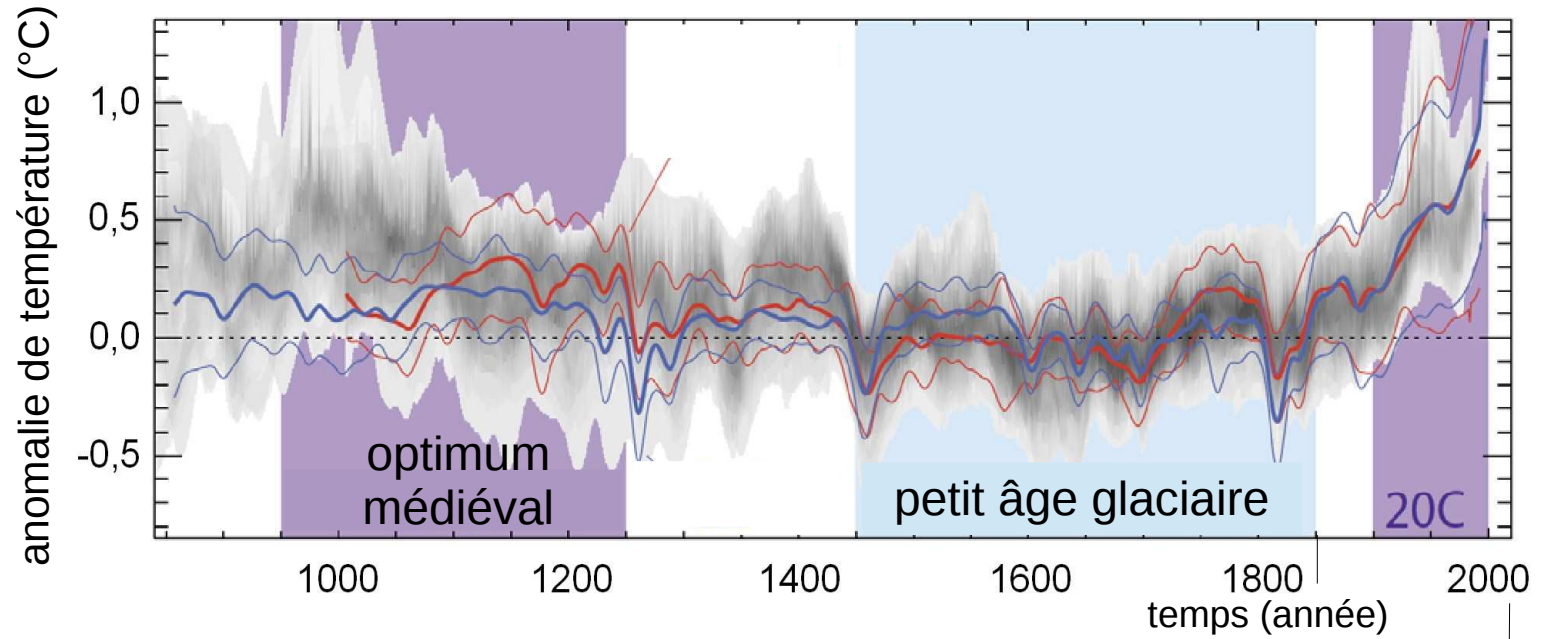
Forages de glace au **Groenland** : des variations très rapides en périodes glaciaires



Ganopolski et al., 2001

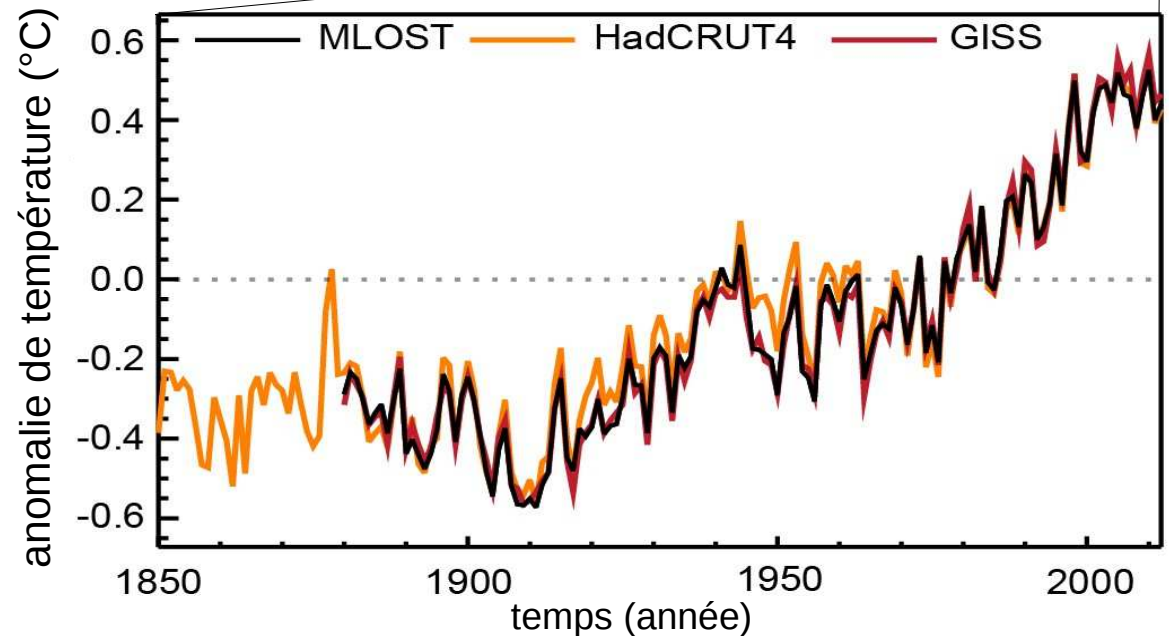
# Dernier millénaire

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



# Dernier centenaire

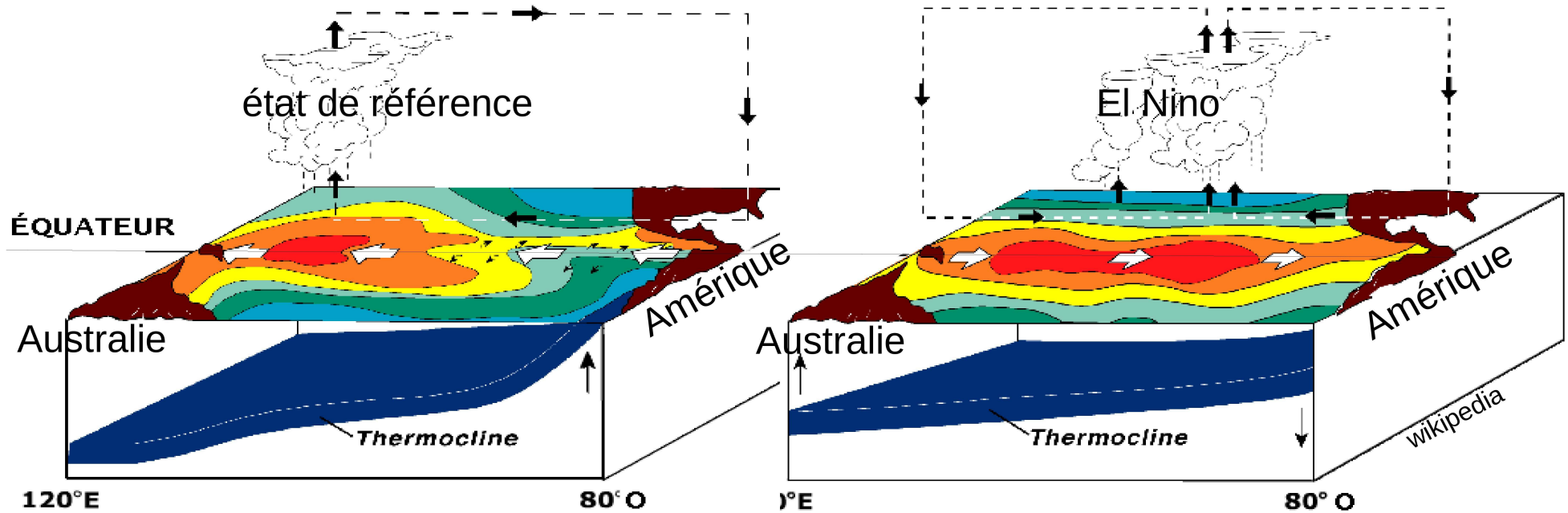
température moyenne globale estimée à partir de mesures directes



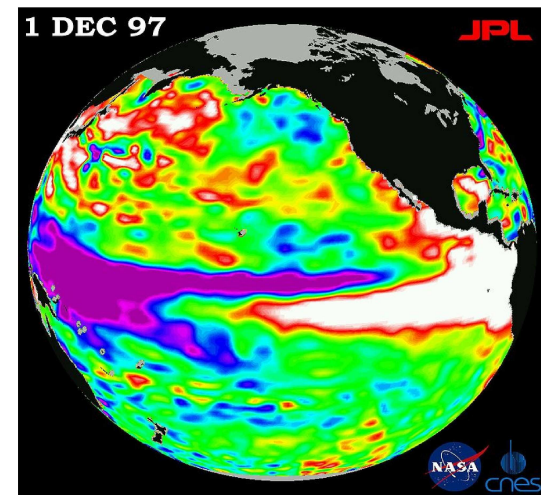
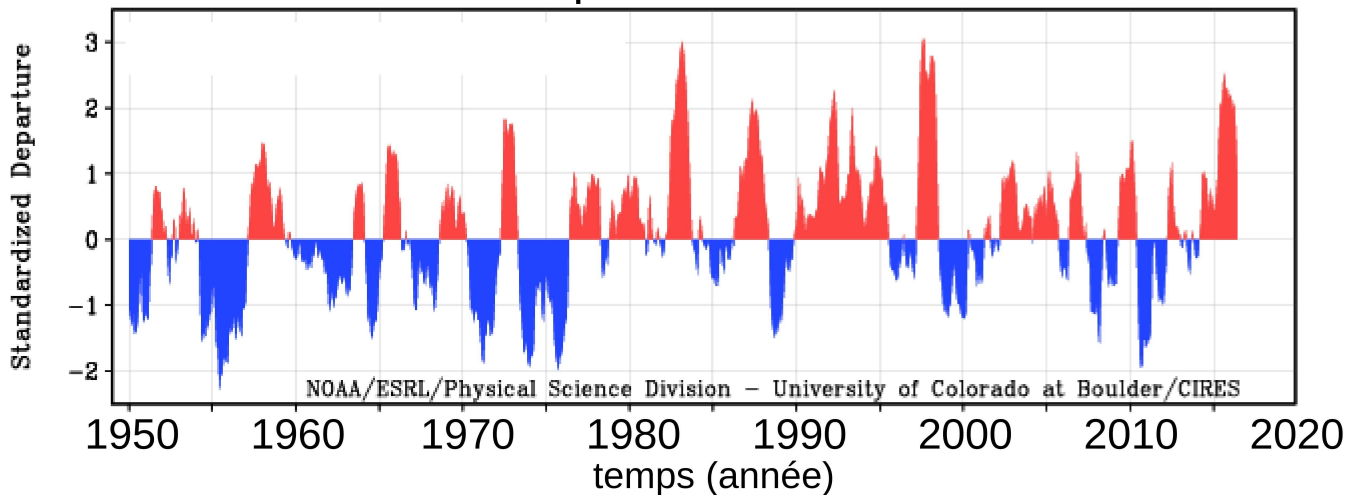


# Variabilité inter-annuelle : El Nino

Principal mode de variabilité tropicale, océan Pacifique



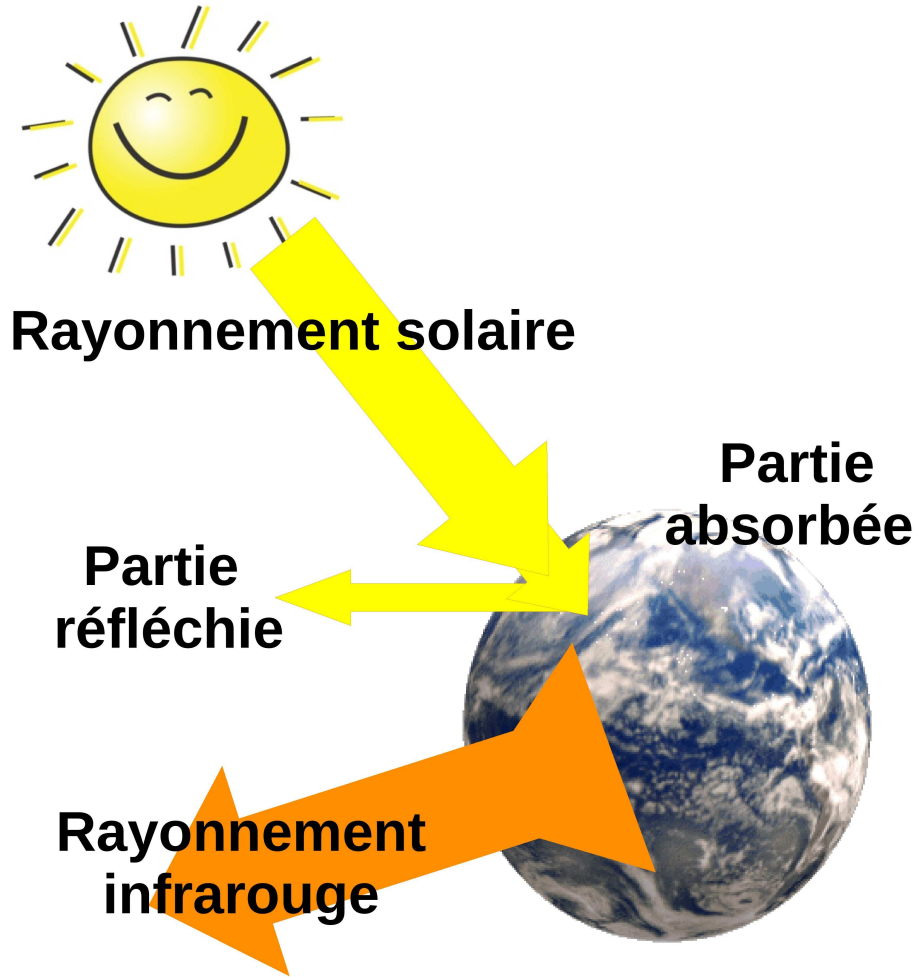
Évolution temporelle d'un indice El Nino



# 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

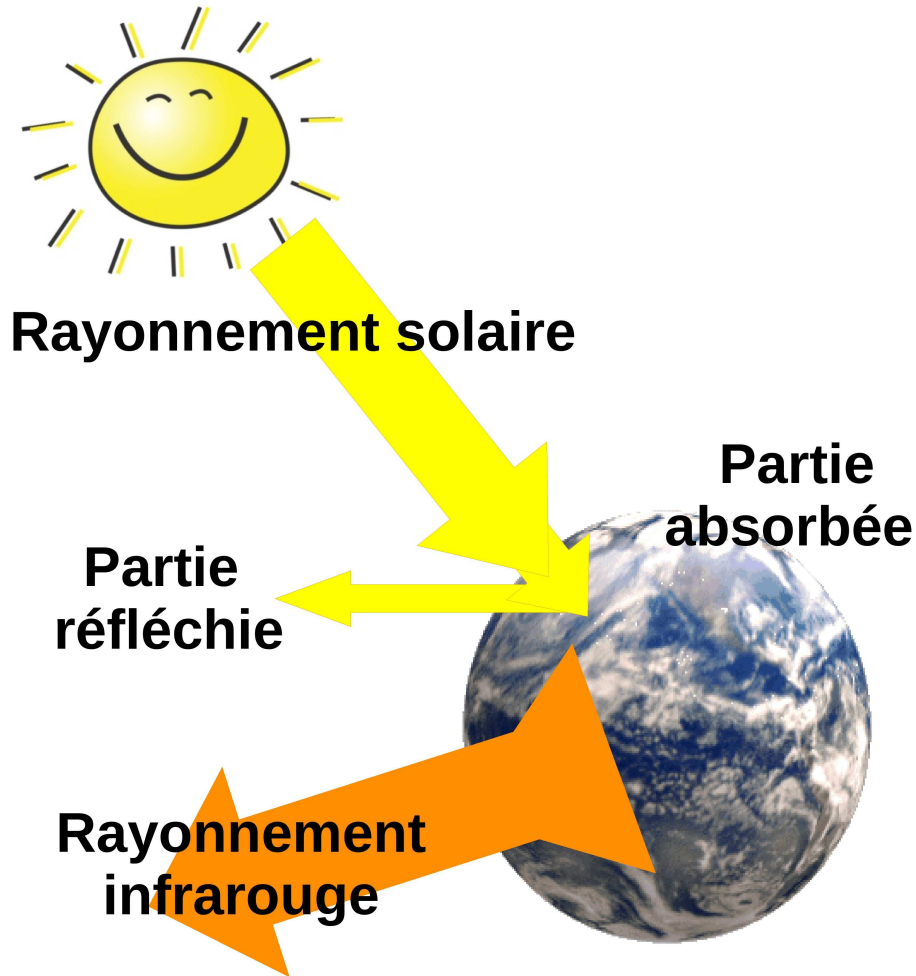


**Joseph Fourier**  
(1768-1830)

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

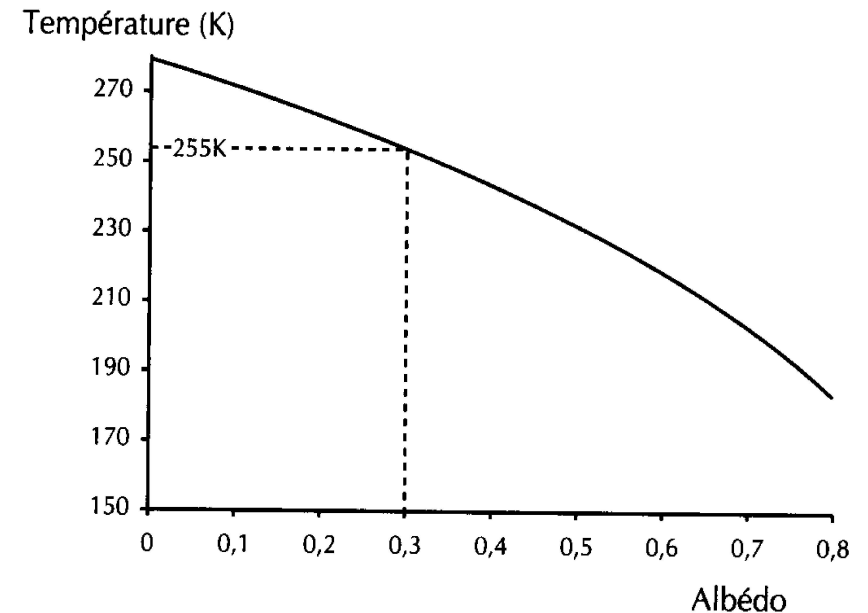


# Température d'équilibre d'une planète



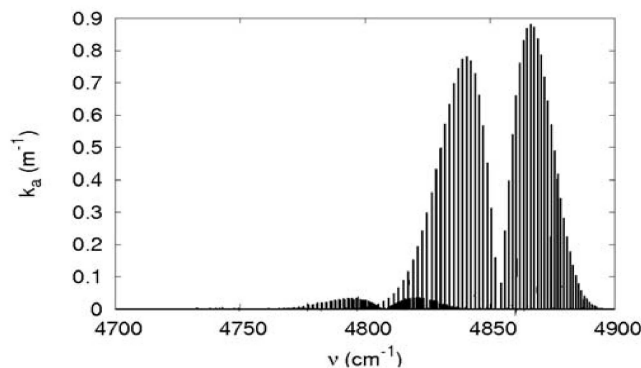
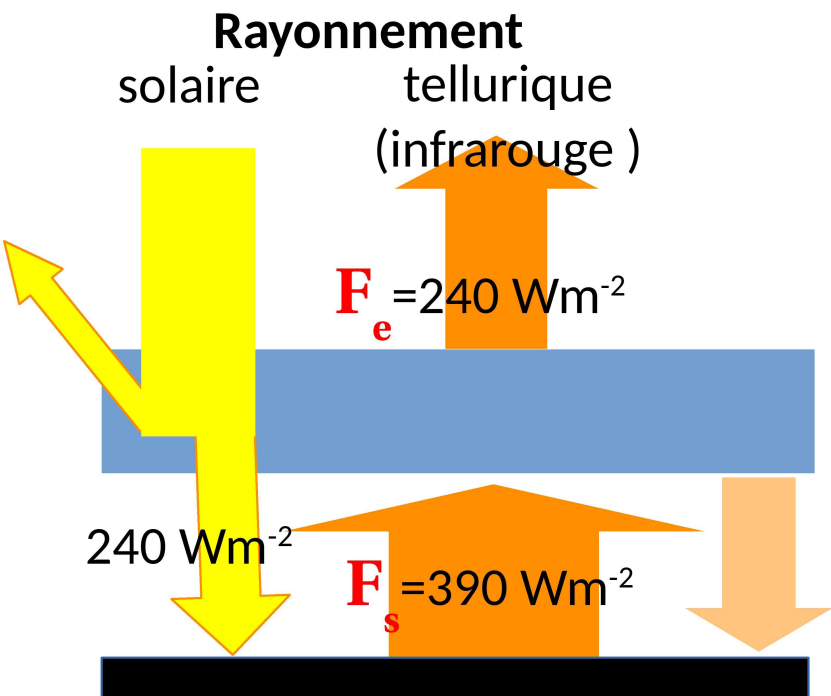
La température de surface moyenne résulte de l'équilibre énergétique:  
flux infrarouge émis = flux solaire absorbé

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

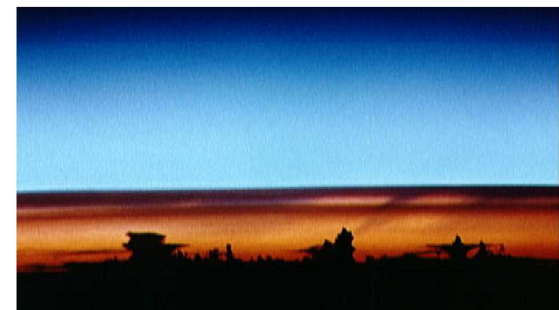


- T très sensible à l'albédo
- T=255K (-18°C) pour la valeur observée de l'albédo (0,3)
- Actuellement T≈ 288K (15°C)
- Différence due à l'effet de serre

# Calcul de l'effet de serre



Propriétés radiatives

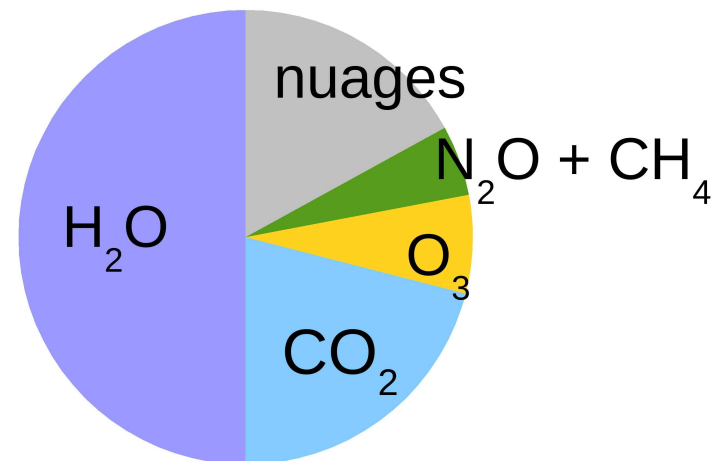


Profils atmosphériques

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

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

Total	150	
Vapeur d'eau	75	50
$\text{CO}_2$	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, CO<sub>2</sub> biosphère continentale, CH<sub>4</sub>, etc.

100

- Calottes de glace, CO<sub>2</sub> continental

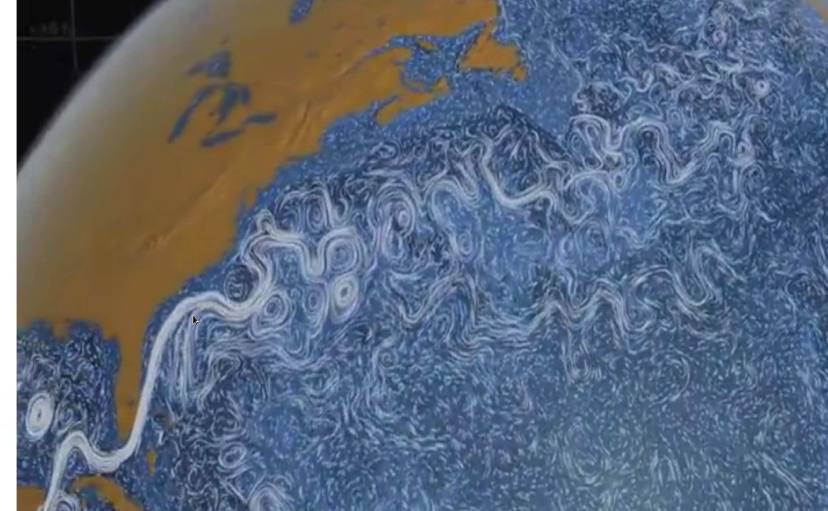
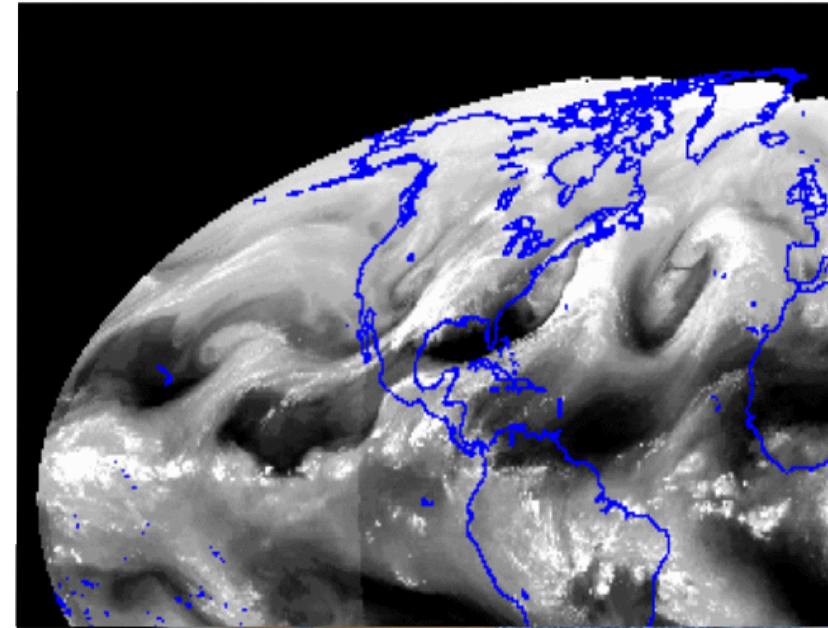
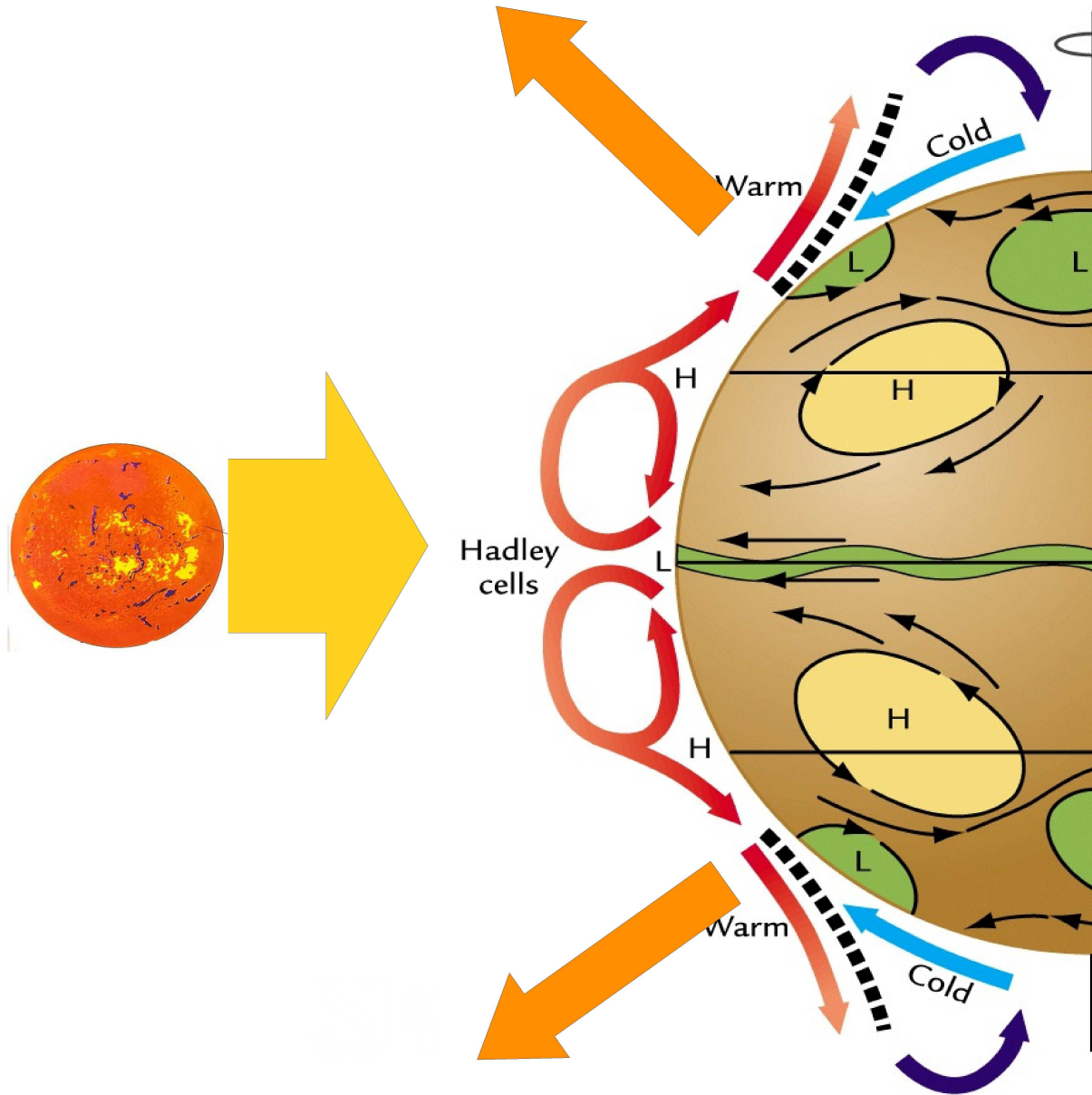
1000

- CO<sub>2</sub> « géologique » (érosion continentale, volcanisme)

>10<sup>6</sup>

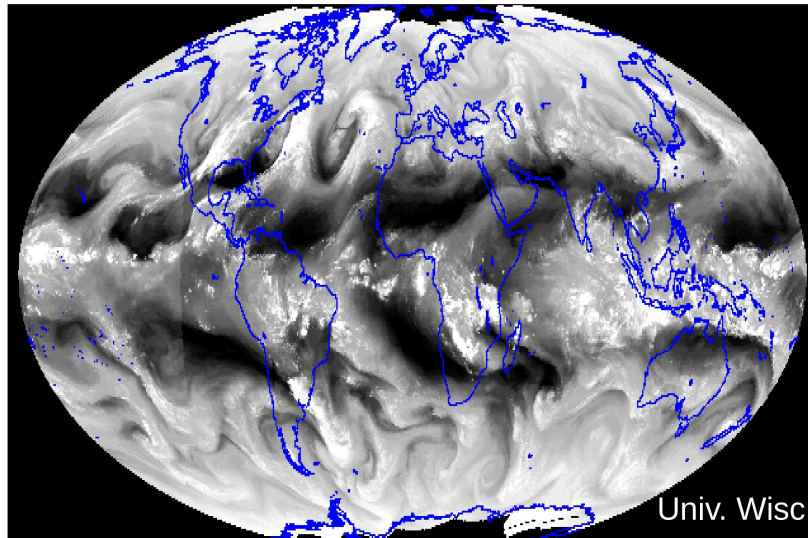


# Circulation grande échelle sous l'effet du transport méridien de chaleur et de la rotation de la Terre

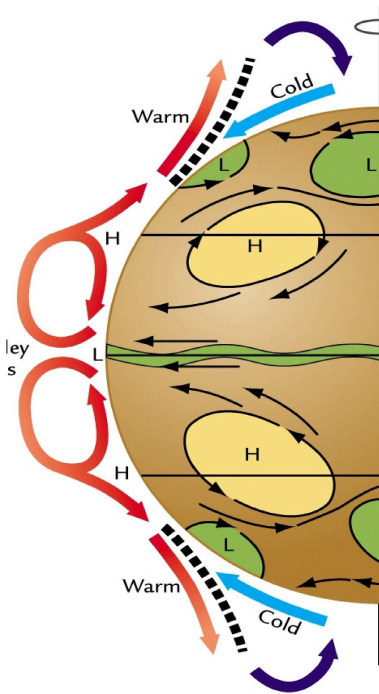
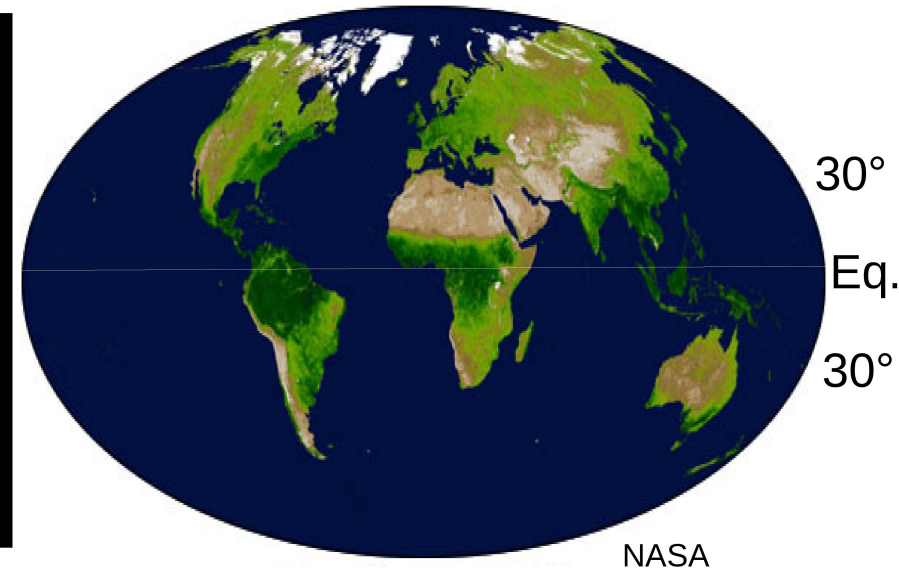


# L'empreinte de la circulation générale atmosphérique sur la végétation

Rayonnement infrarouge  
« canal » vapeur d'eau

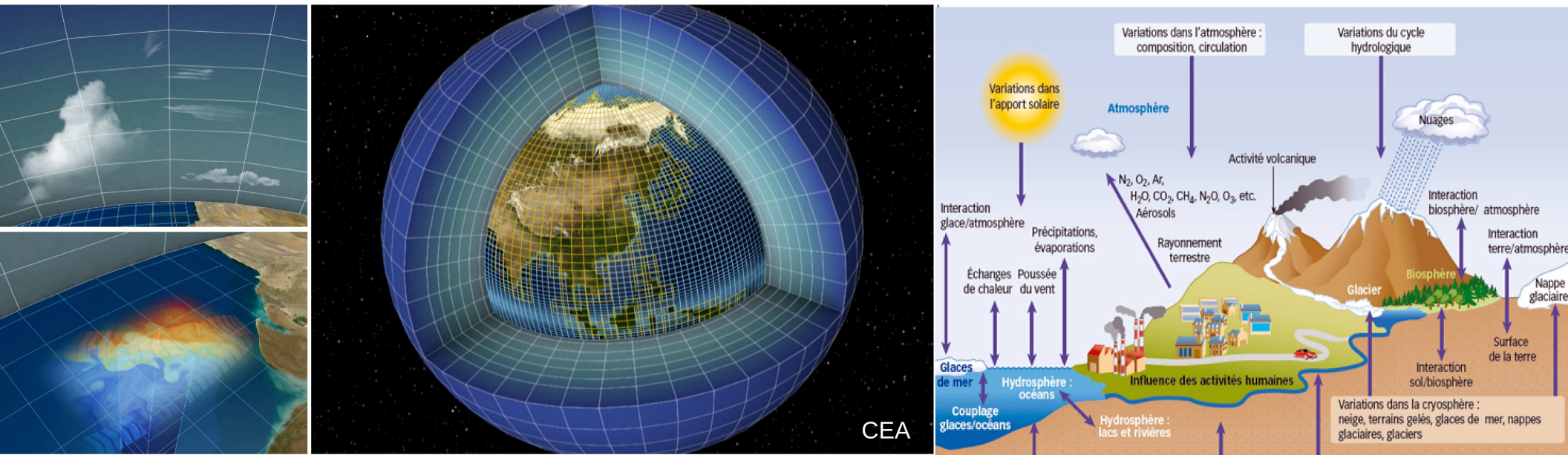


Indice de végétation





# 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:

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

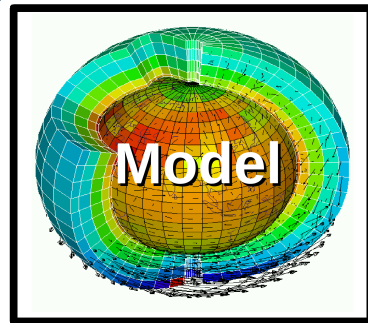
$\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{Variabilité naturelle}}$

- 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

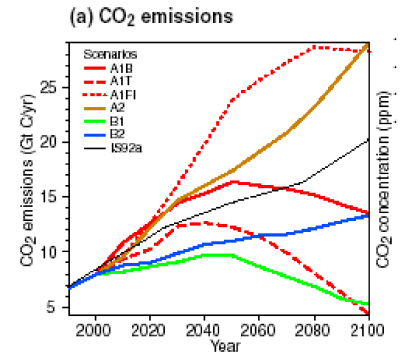
**Conditions initiales:**  
température,  
humidité,  
salinité,  
etc.

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



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

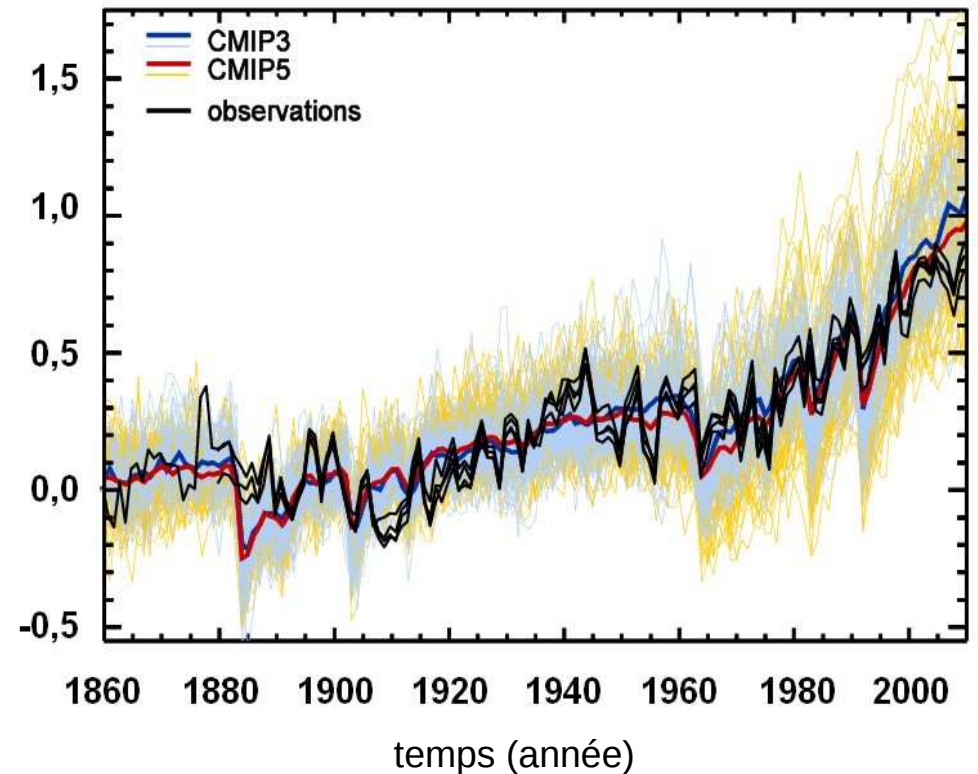
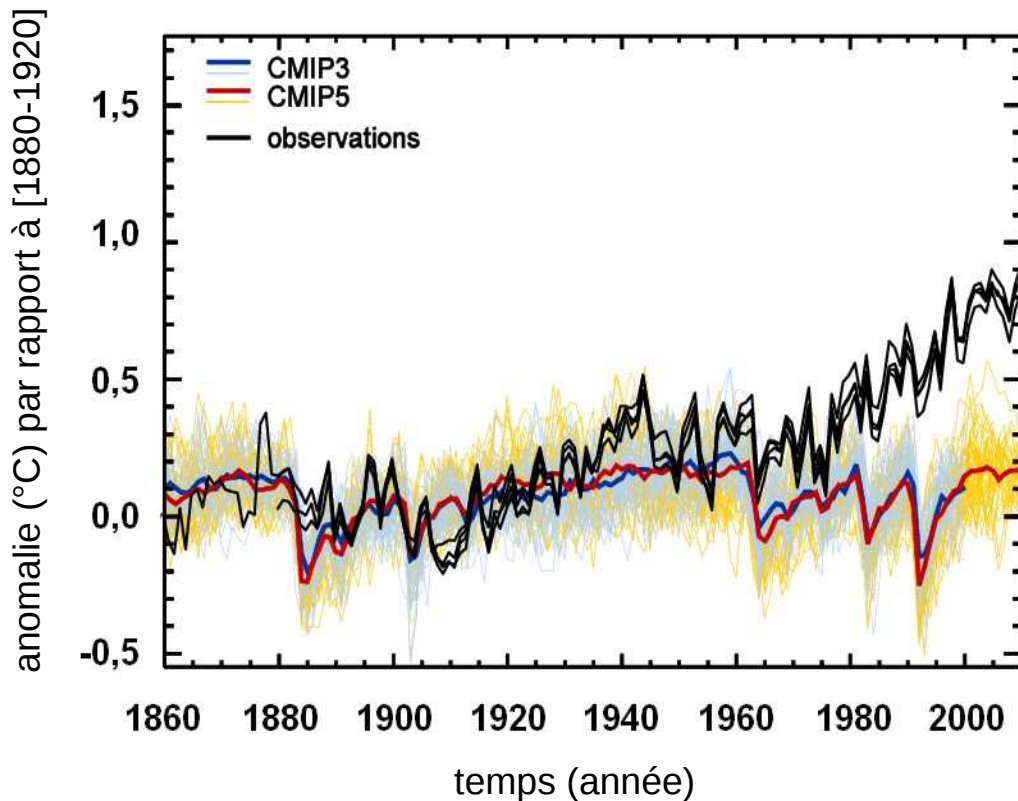
**Analyse  
statistique**



# Évolution récente de la température de surface : observations et simulations

Simulations avec **forçages naturels** seulement

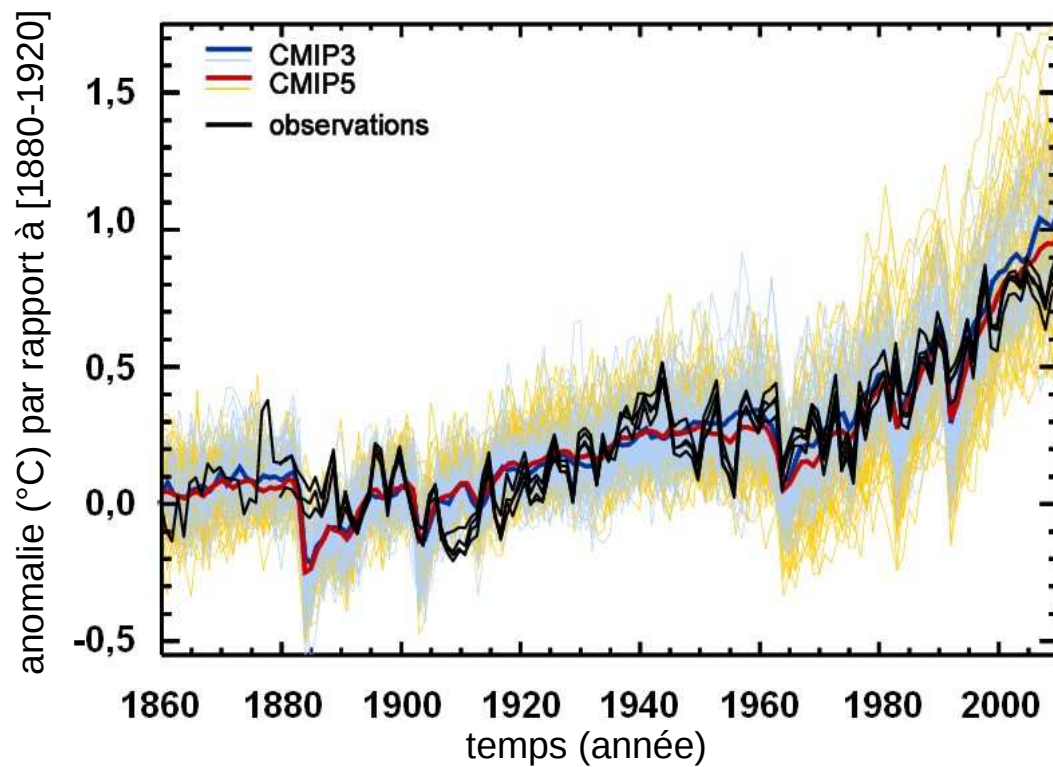
Simulations avec **forçages naturels et anthropiques**



# Évolution récente de la température de surface : observations et simulations

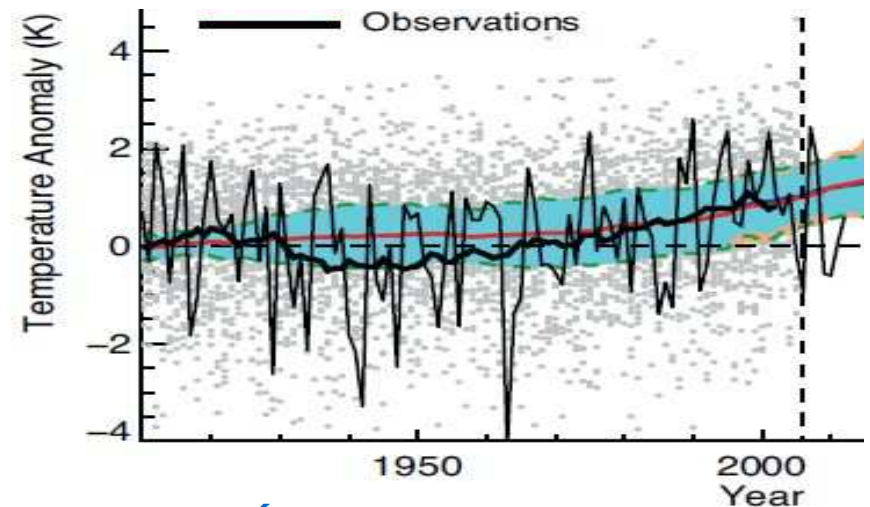
Simulations avec **forçages naturels** et **anthropiques**

Moyenne annuelle et globale

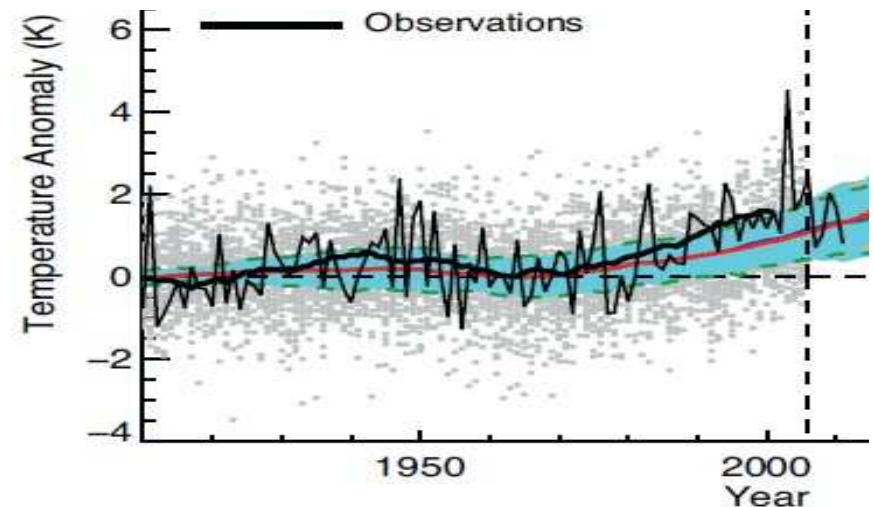


[GIEC, 2013]

Hiver sur la France



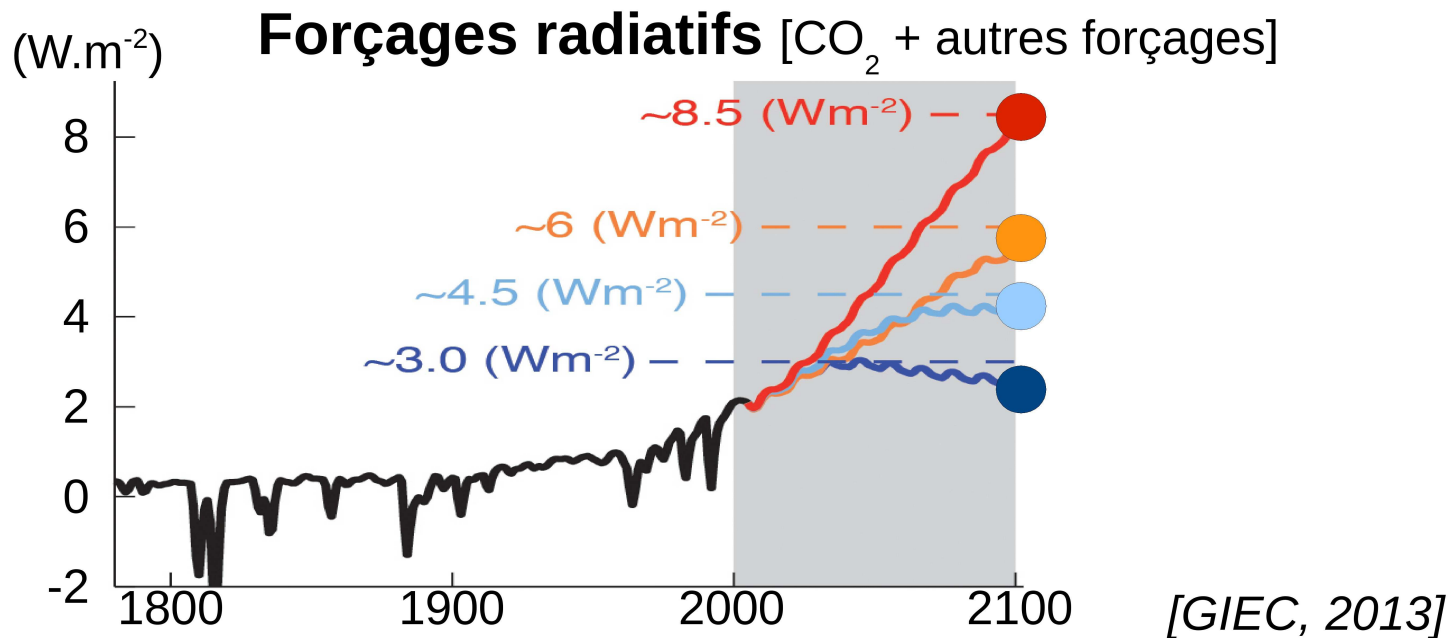
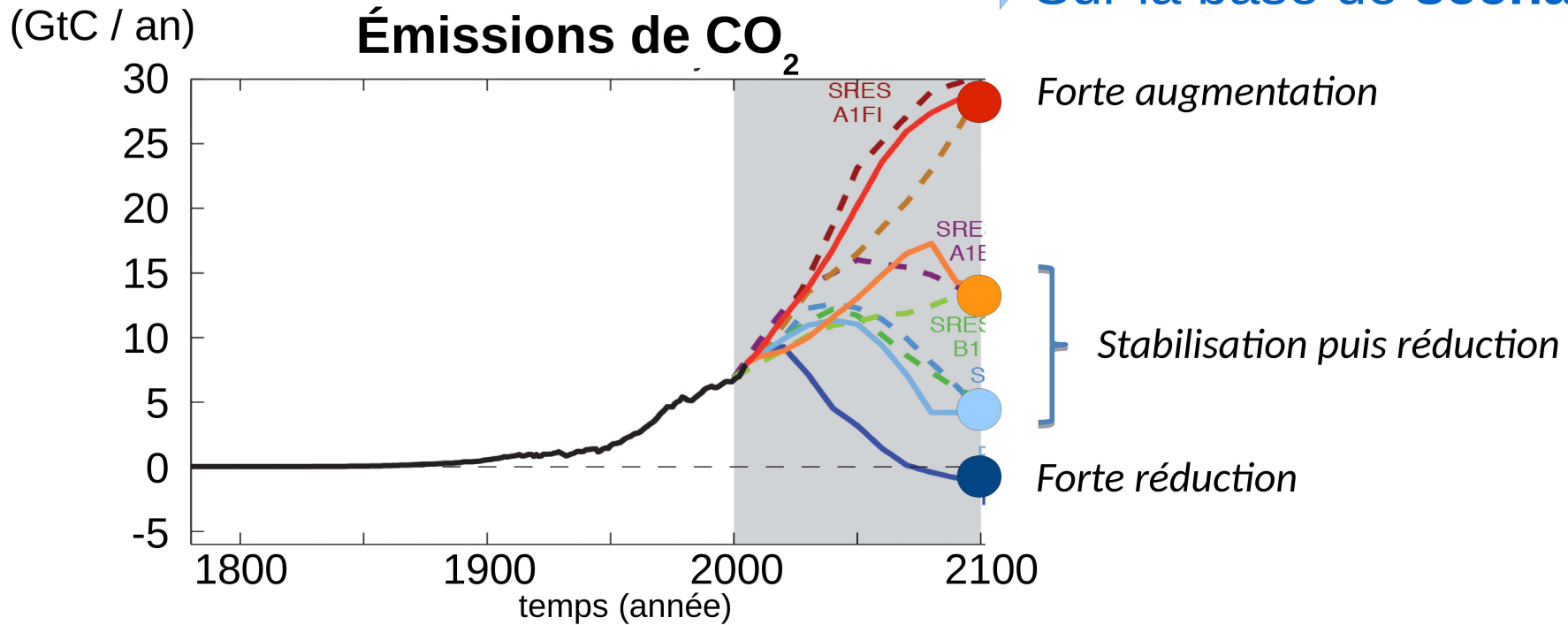
Été sur la France



[Terray et Boé, 2013]

# Projections futures

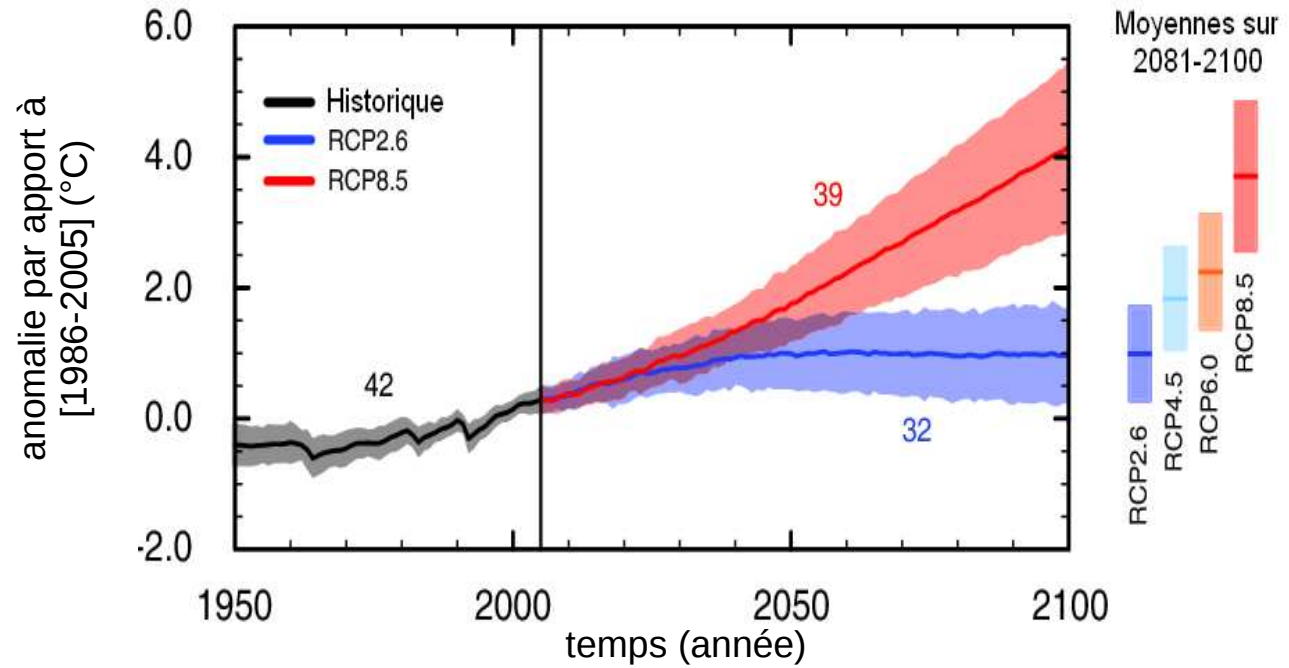
➔ Sur la base de scénarios





# Température de surface

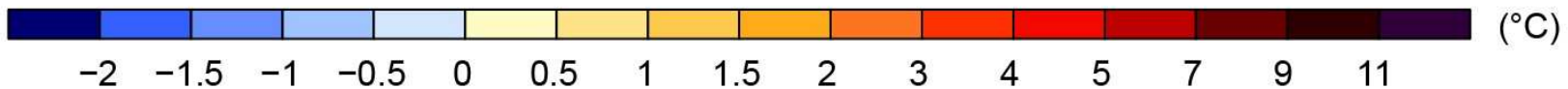
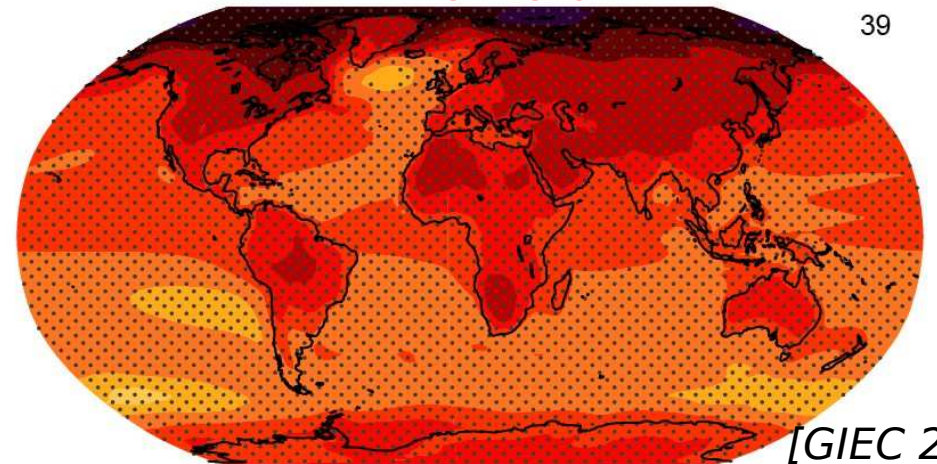
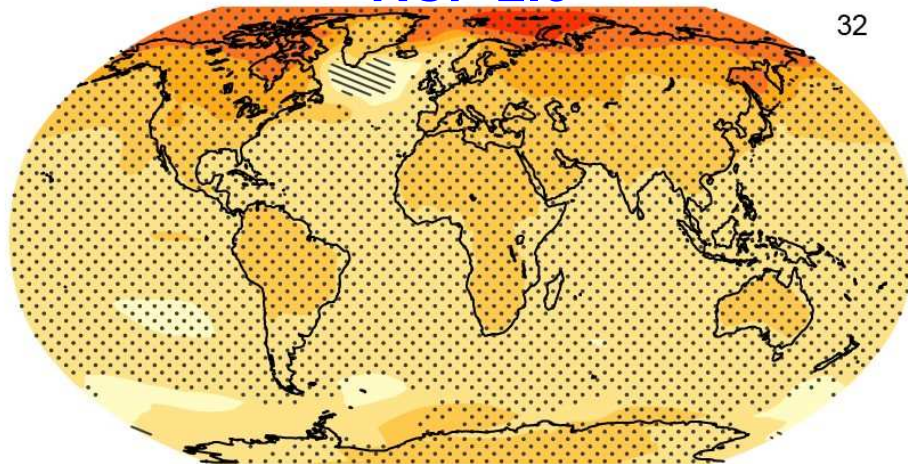
Moyenne globale  
1950 à 2100  
(40 modèles CMIP5)



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

**RCP 2.6**

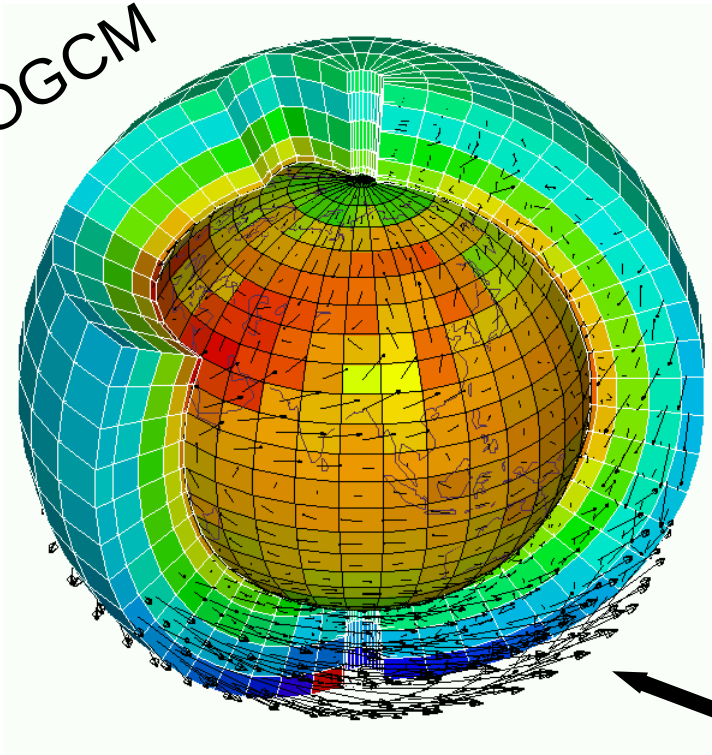
**RCP 8.5**



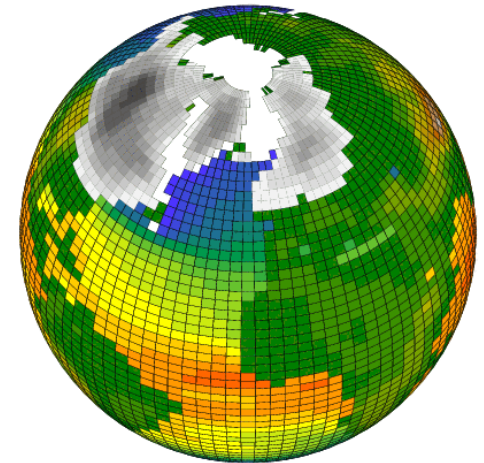
[GIEC 2013]

# Simulation du climat du Dernier Maximum Glaciaire

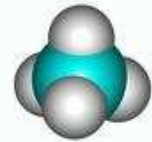
AOGCM



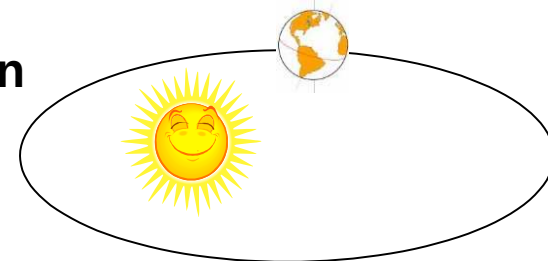
Calottes  
glaciaires



Composition  
atmosphérique  
CO<sub>2</sub>: 185 ppm  
CH<sub>4</sub>: 350 ppb...



Insolation  
21ky BP



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

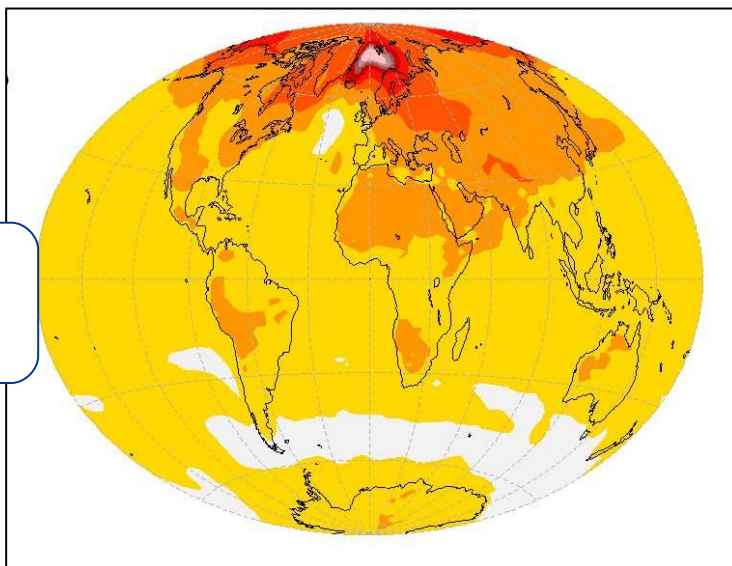


# Changement de la température de surface

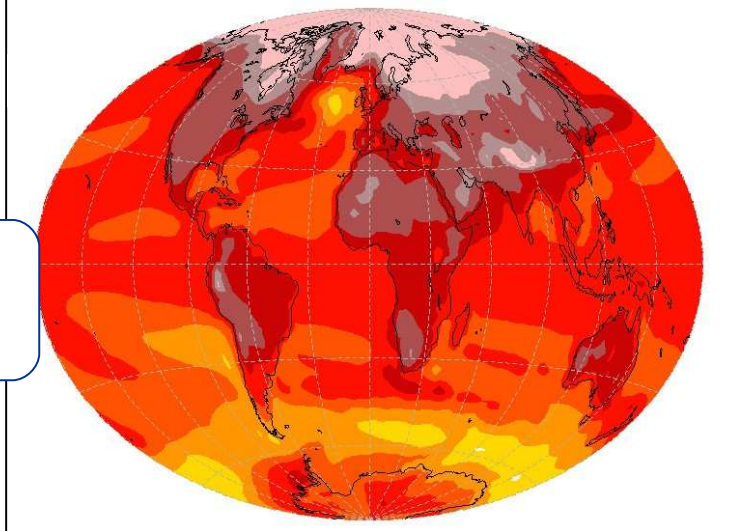
Différence entre **2100** et **1990**

IPSL-CM5A-LR

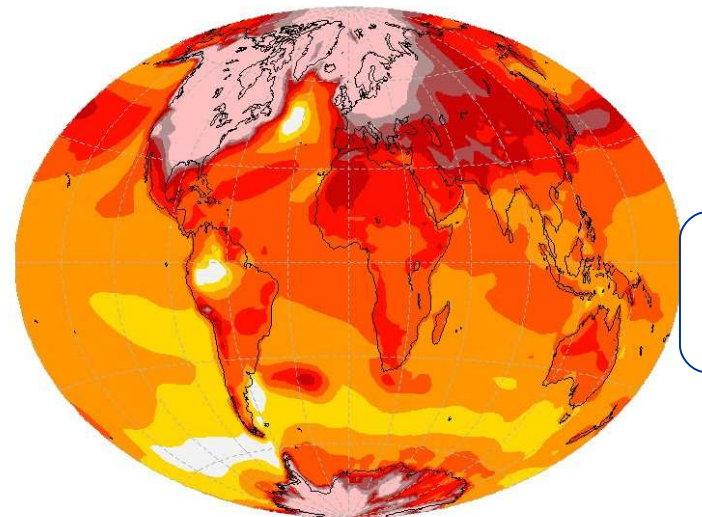
**RCP2.6**



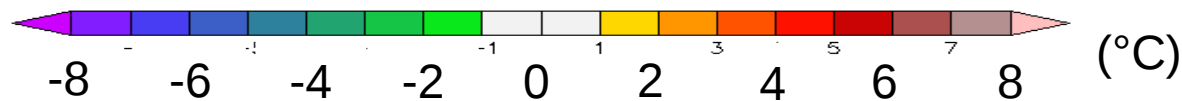
**RCP8.5**



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



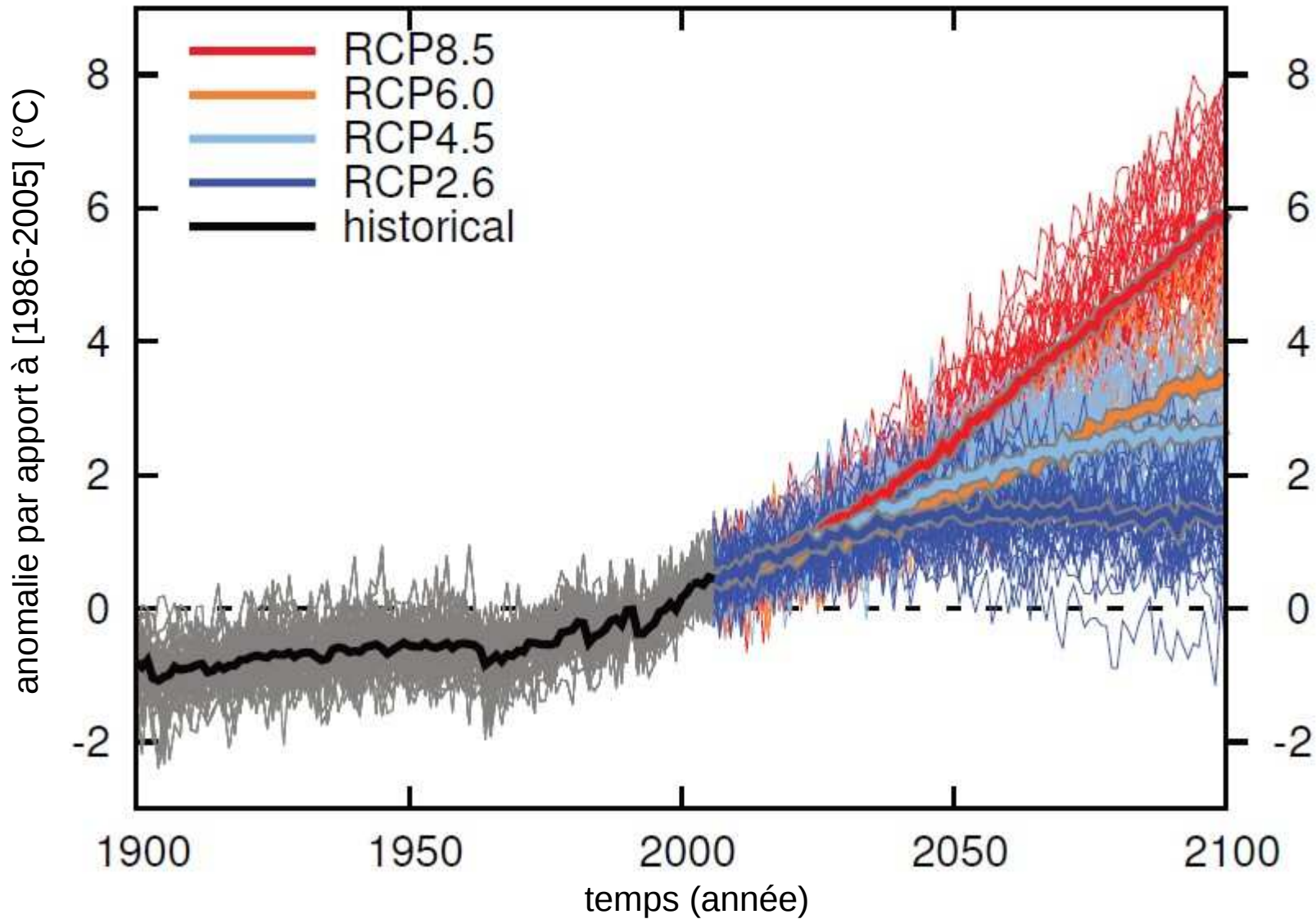
**Glaciaire**





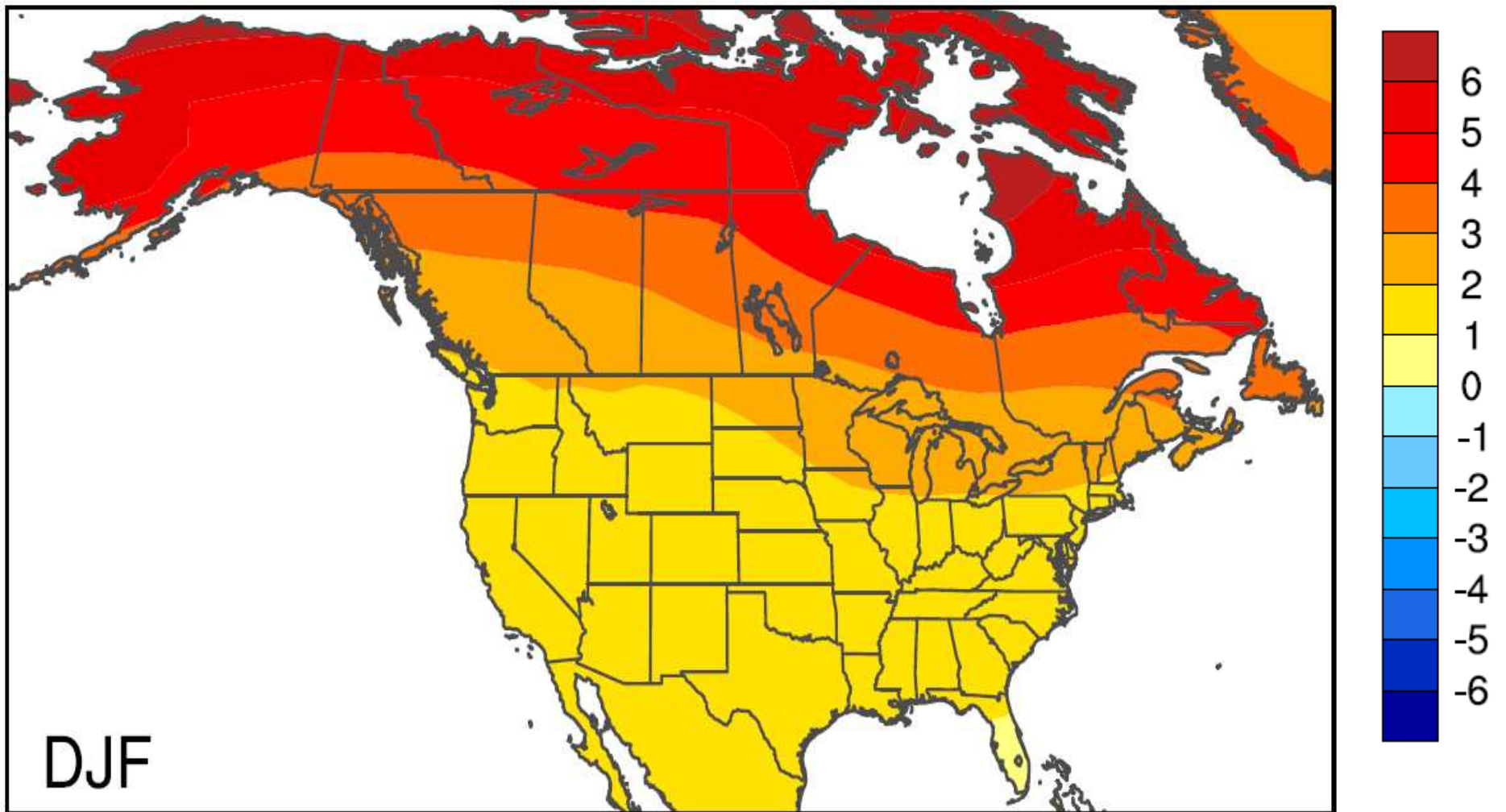
# Changement climatique et variabilité interne

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



# Changement climatique et variabilité interne

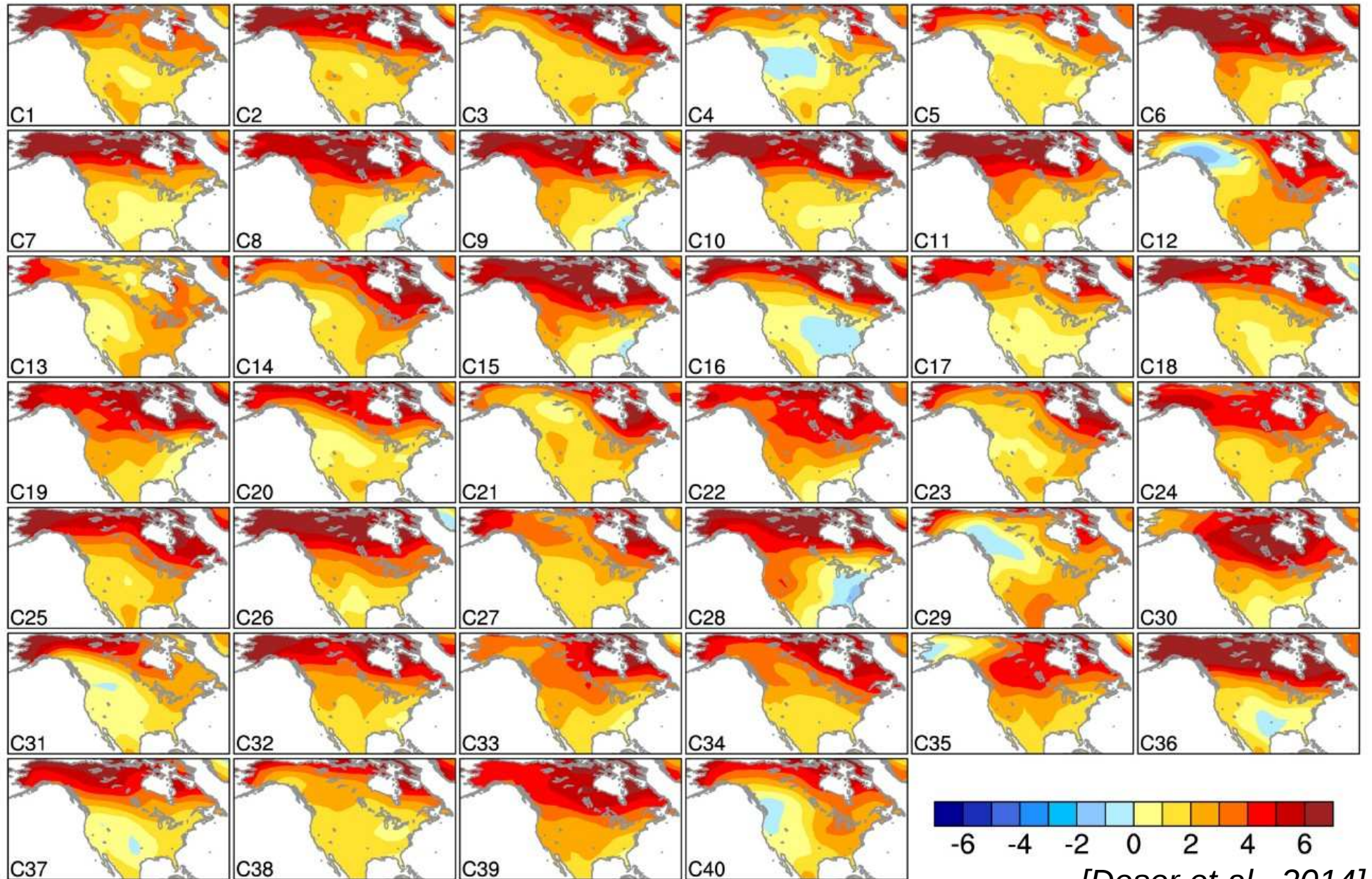
Tendance sur 50 ans de la température hivernale ( $^{\circ}\text{C}/50$  ans)  
pour un scénario « intermédiaire - haut »





# 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 thick white snow, with deep valleys and ridges. The sky is a clear, deep blue. In the lower-left quadrant, a faint rainbow is visible, its colors blending into the snowy landscape. The text "Merci de votre attention" is centered in the middle of the image.

Merci de votre attention