



IPSL Climate Modelling Centre



# *Les bases physiques du changement climatique*

*Jean-Louis Dufresne*

*jean-louis.dufresne@lmd.jussieu.fr*

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

*Institut Pierre Simon Laplace. Fédération de Laboratoires :*

*CEREA, Geops, LATMOS, LISA, LMD, LOCEAN, LSCE, METIS*



# Plan

- I. Présentation générale
- II. Approfondissement
  - I. L'effet de serre
  - II. La modélisation numérique du climat
- III. Besoins en terme de connaissances

# Naissance de la physique du climat

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

- La Terre est une planète comme les autres
- Le bilan d'énergie pilote la température de surface de la Terre
- Les principaux modes de transferts d'énergie sont
  1. Rayonnement solaire
  2. Rayonnement infra-rouge
  3. Conduction avec le centre de la Terre



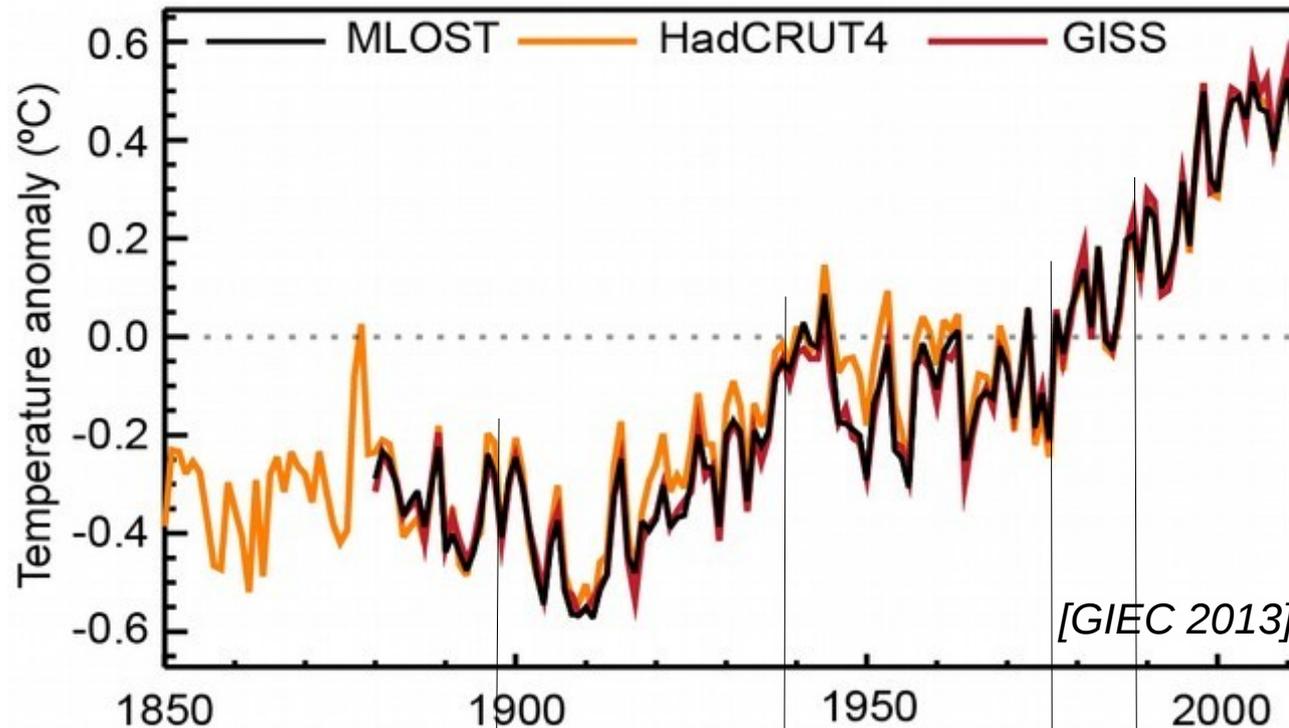
**Joseph Fourier**  
(1768-1830)

- Il pressent l'importance de tout changement d'ensoleillement
- Il envisage 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 »*

# Le réchauffement climatique récent: un phénomène observé qui a été anticipé



**1824, J. Fourier,**  
naissance de  
la physique du  
climat



**1897: S. Arrhenius:**  
première estimation du  
rôle du CO<sub>2</sub>

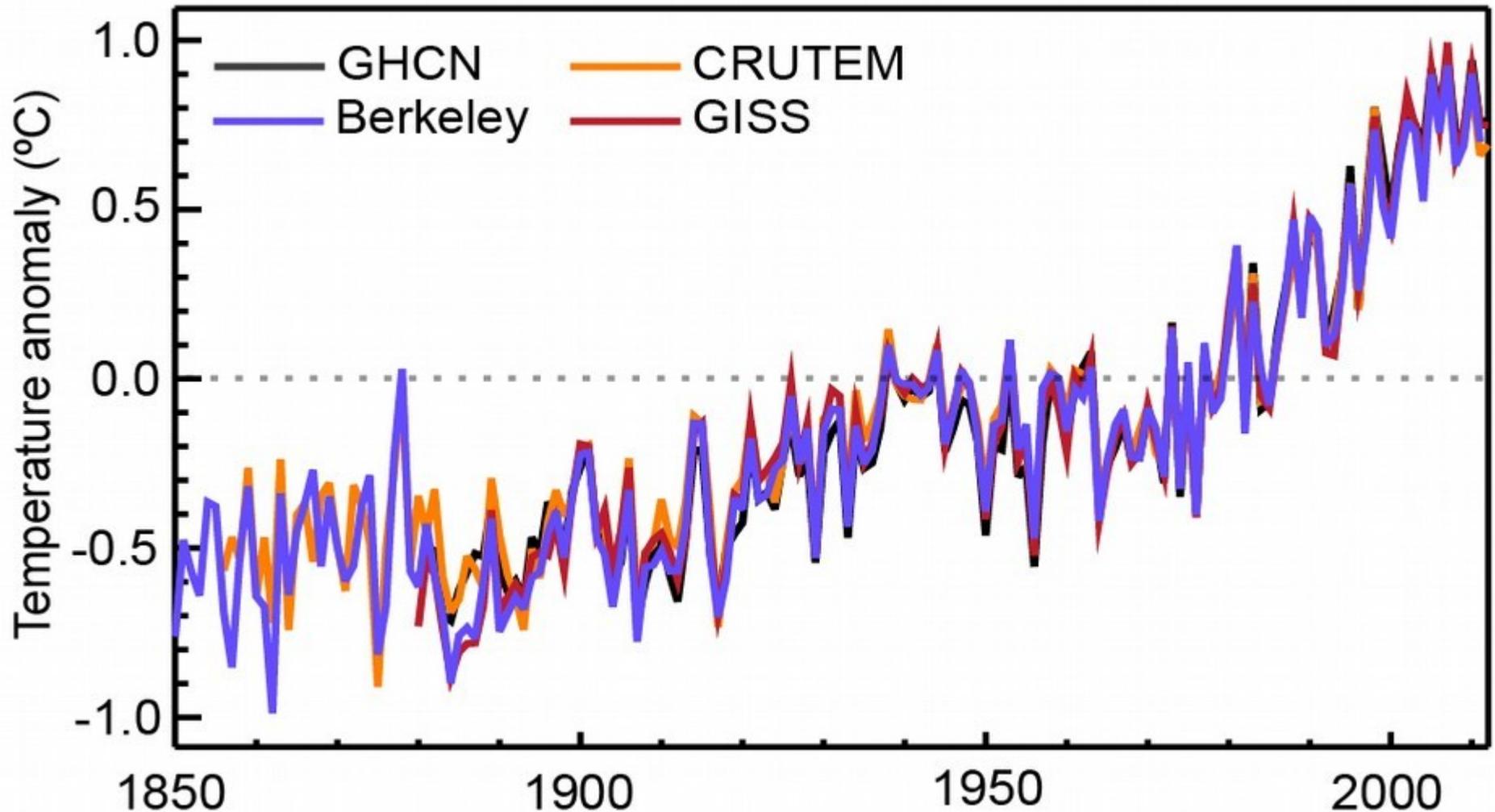
**1937: G. Callendar:**  
nouvelle estimation du  
rôle du CO<sub>2</sub>

**1988:** Création  
du **GIEC**

**1970-1980: Premières  
projections climatiques** avec  
des modèles numériques

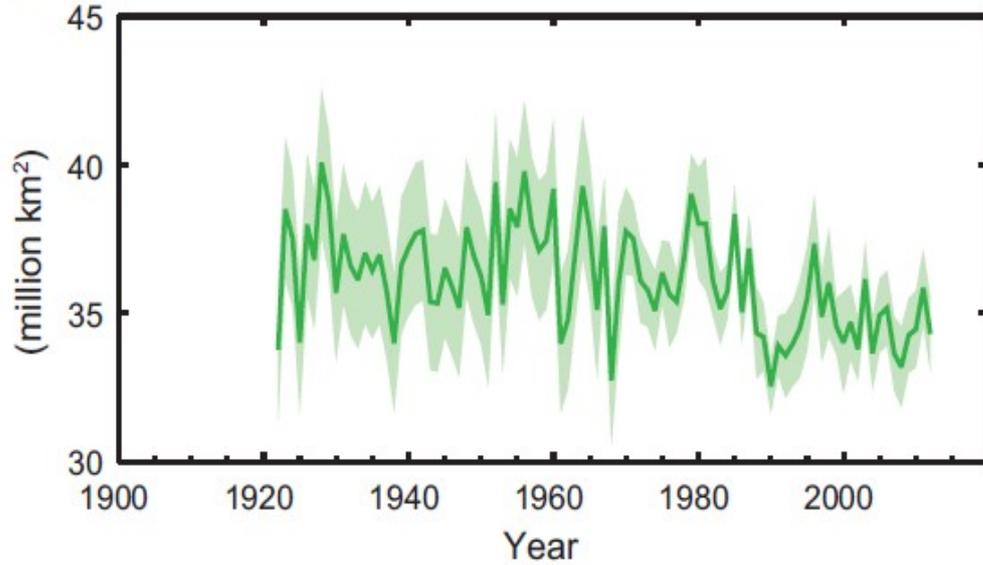
# Le réchauffement climatique récent: confirmé par d'autres scientifiques

Des physiciens de Berkeley ont voulu montrer que les physiciens du climat se trompaient... et ont finalement obtenu les mêmes résultats.

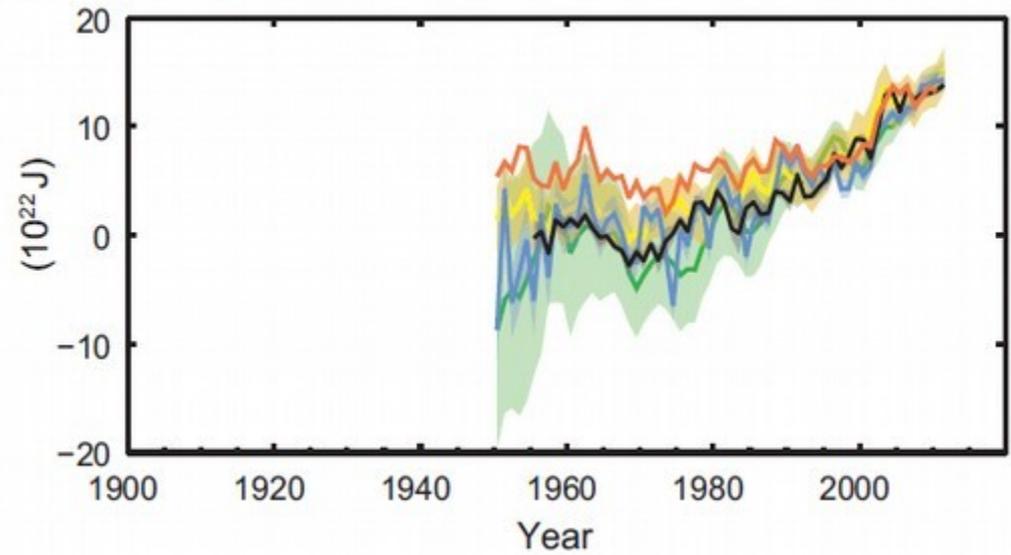


# Le réchauffement récent

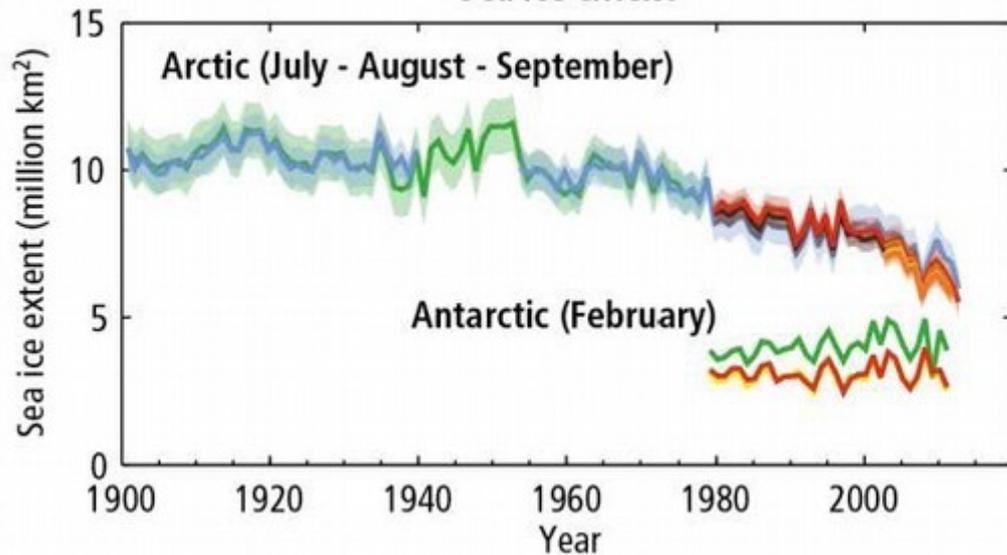
(a) Northern Hemisphere spring snow cover



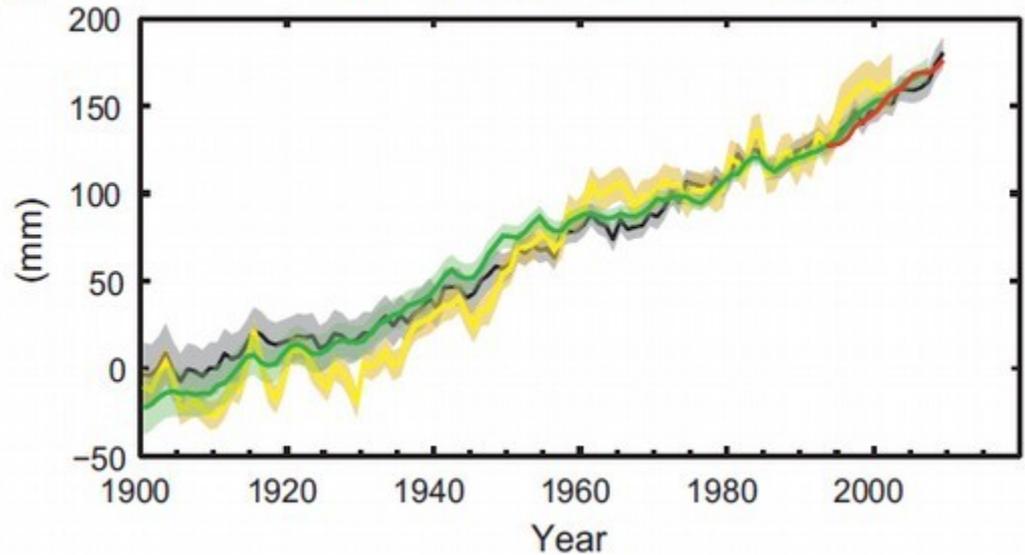
(c) Change in global average upper ocean heat content



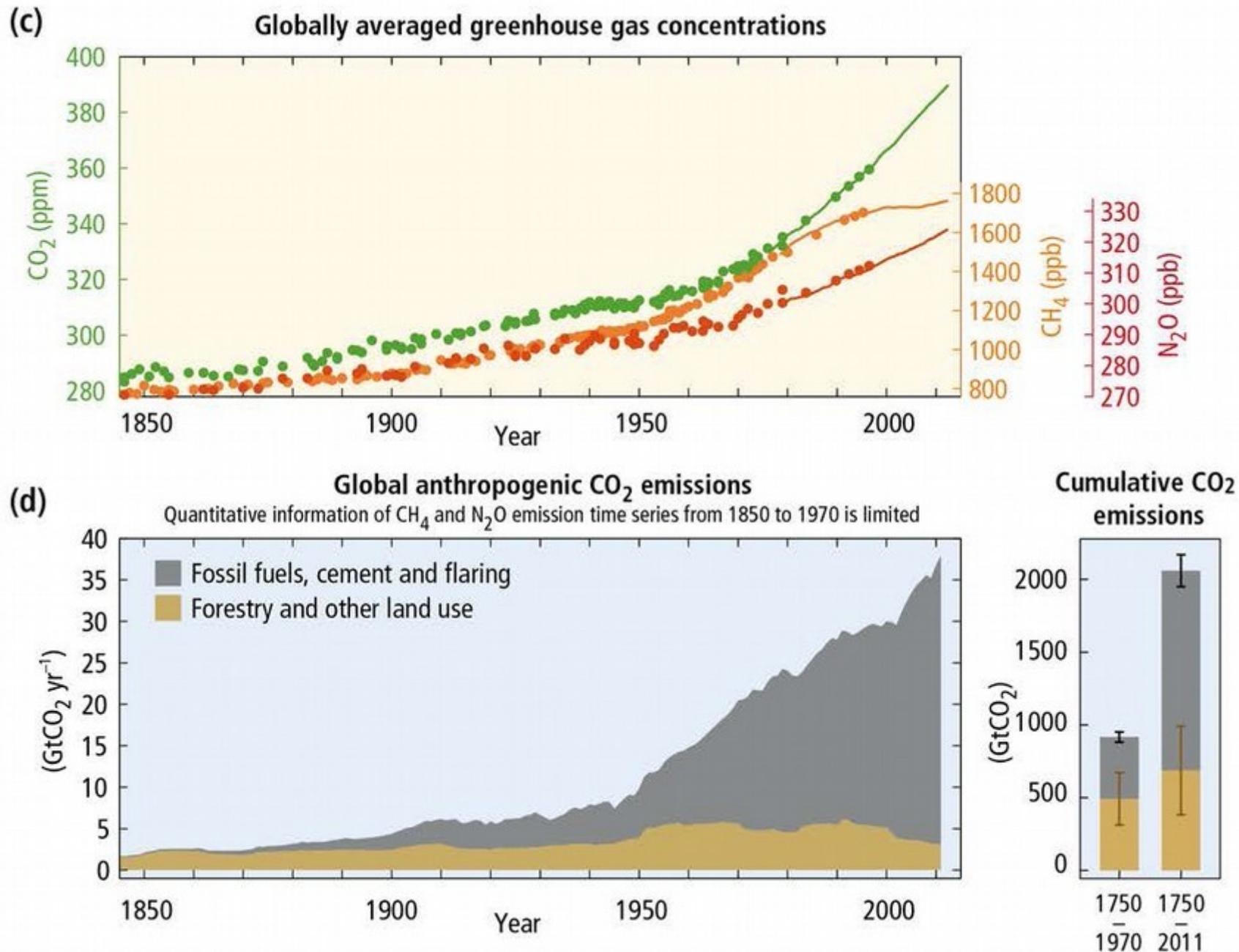
Sea ice extent



(d) Global average sea level change



# Évolution des gaz à effet de serre



# Émission moyenne de CO<sub>2</sub> (2008-2017)

1 GtC = 3.67 GtCO<sub>2</sub>

Sources = Puits



+

34.4 GtCO<sub>2</sub>/yr  
87%

17.3 GtCO<sub>2</sub>/yr

44%

11.6 GtCO<sub>2</sub>/yr

29%

13%  
5.3 GtCO<sub>2</sub>/yr

22%  
8.9 GtCO<sub>2</sub>/yr



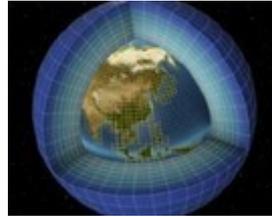
Erreur sur le bilan:

(différence entre l'estimation des puits et des sources)

5%

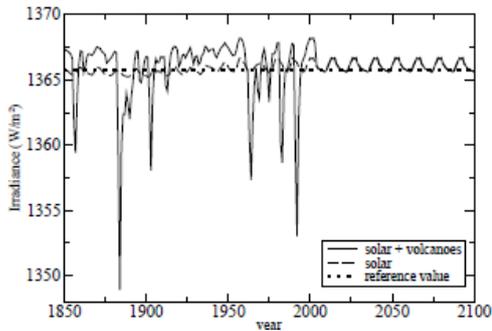
1.9 GtCO<sub>2</sub>/yr

# Le modèle couplé "Système Terre" de l'IPSL

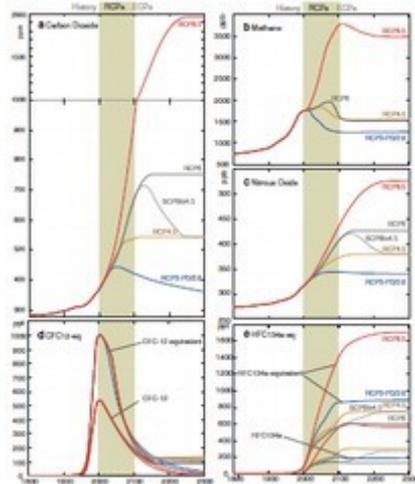


## Forçages naturels et anthropiques

### Soleil et volcans



### Gaz à effet de serre ou chimiquement actifs

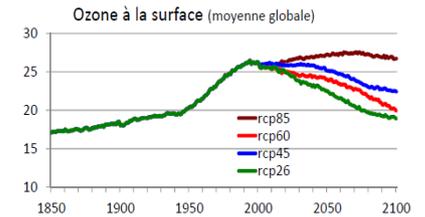


### Concentration de CO<sub>2</sub>

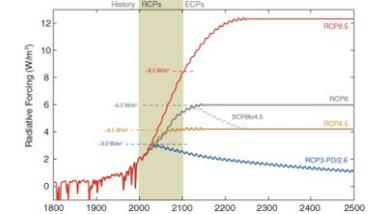
**Modèle de climat**

- Représentation 3D de l'atmosphère l'océan glaces de mer et surfaces continentales (couplages de différents modèles)
- Représentation du couplage avec les cycles biogéochimiques dans l'atmosphère l'océan et le continent

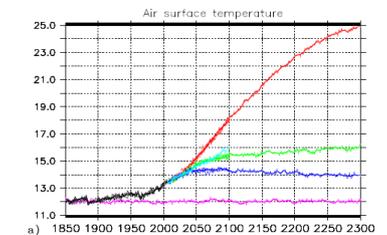
## Composition de l'atmosphère



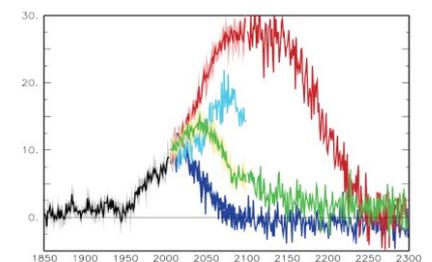
## Forçage radiatif



## Changement climatique



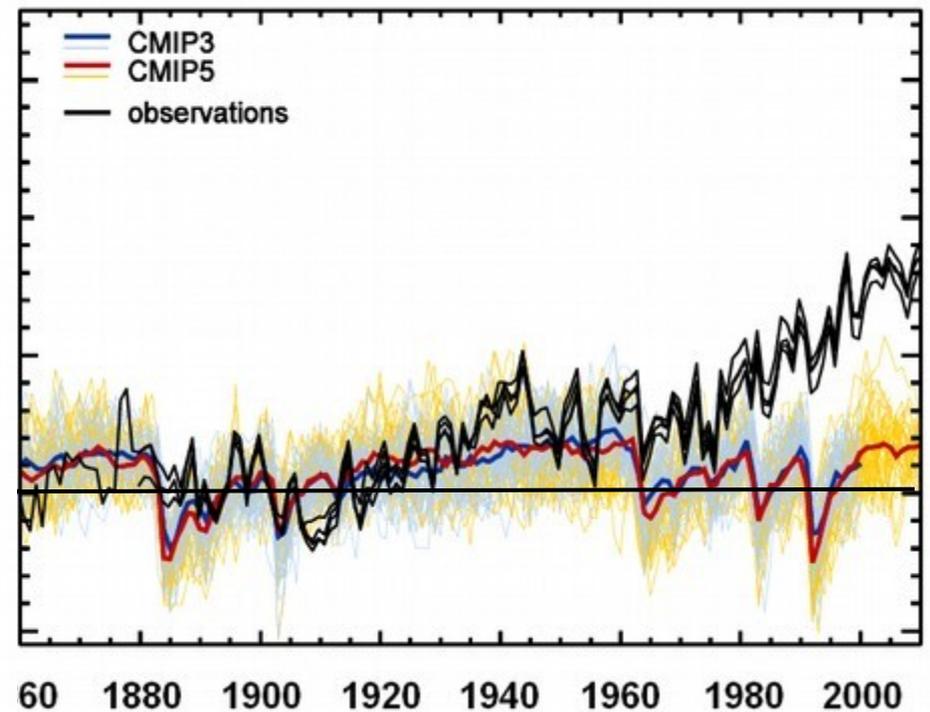
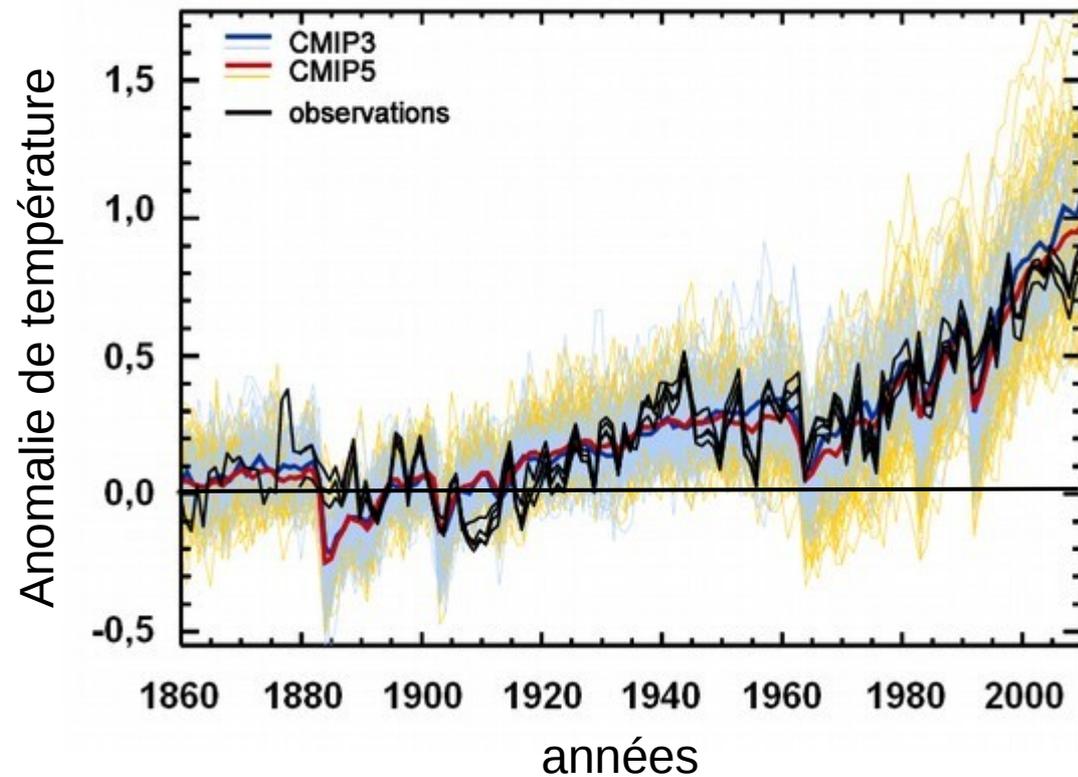
## Émission autorisée de CO<sub>2</sub>



# Évolution récente de la température de surface de la Terre

Simulations avec *forçages naturels et anthropiques*

Simulations avec *forçages naturels seulement*



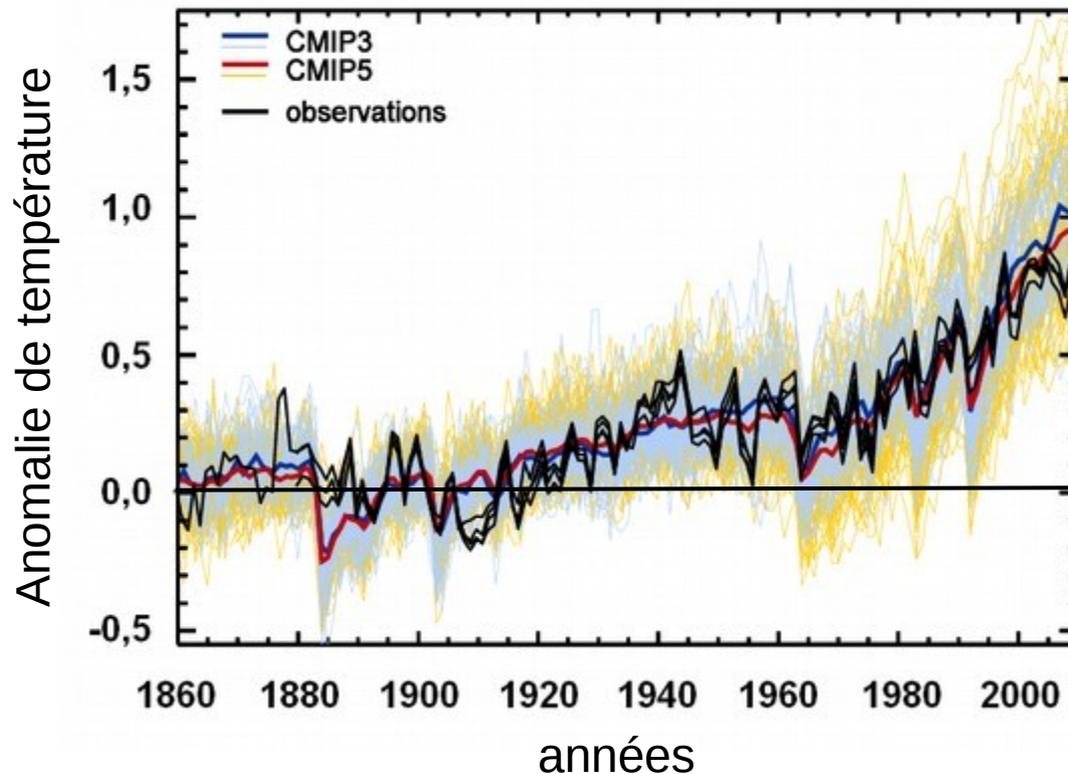
# Variabilité interne et variations dues à des forçages

Les variations climatiques ont plusieurs origines:

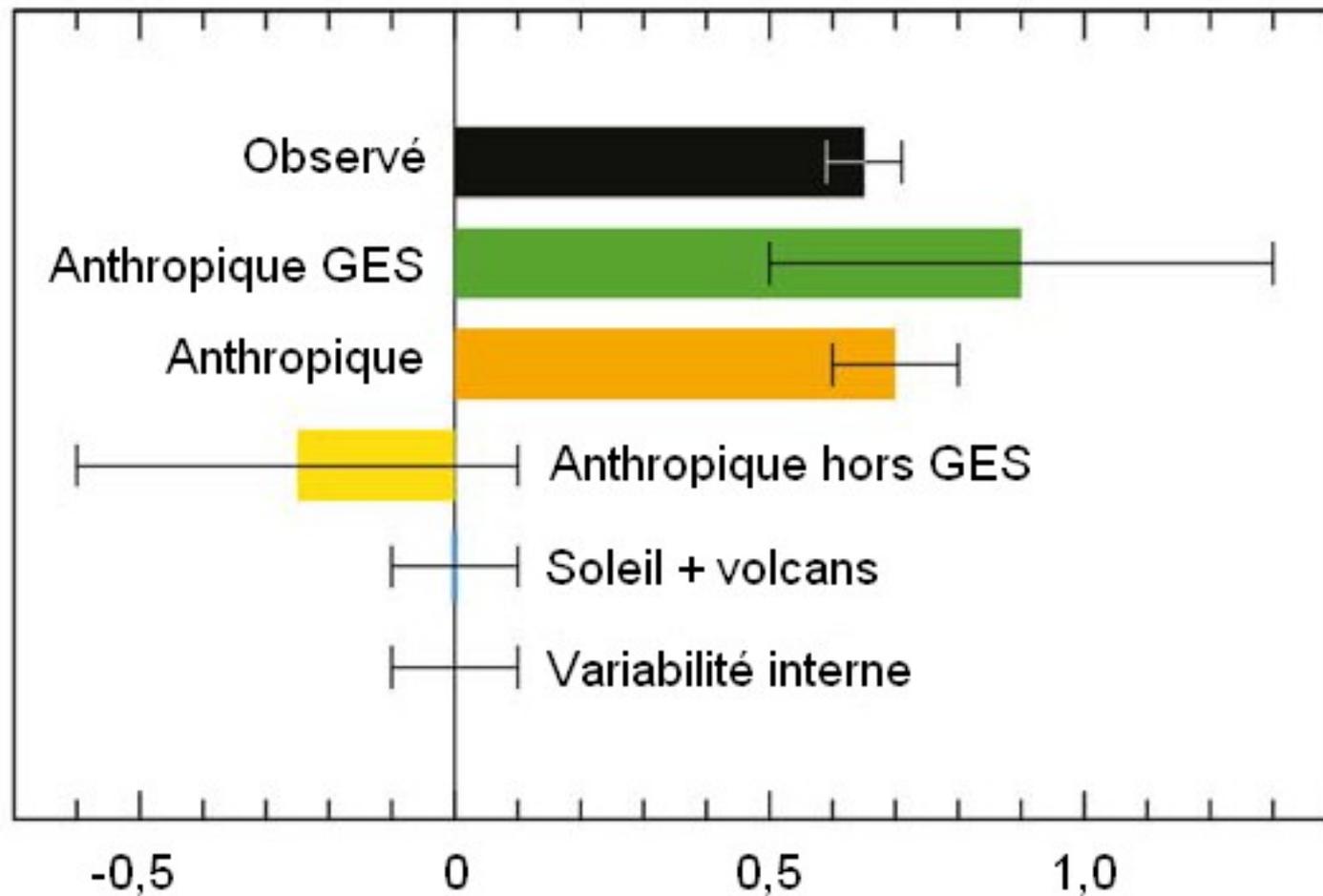
$$\text{Variations} = \boxed{\text{Variabilité interne} + \text{Réponse aux forçages naturels}} + \text{Réponse aux forçages anthropiques}$$

Variabilité naturelle

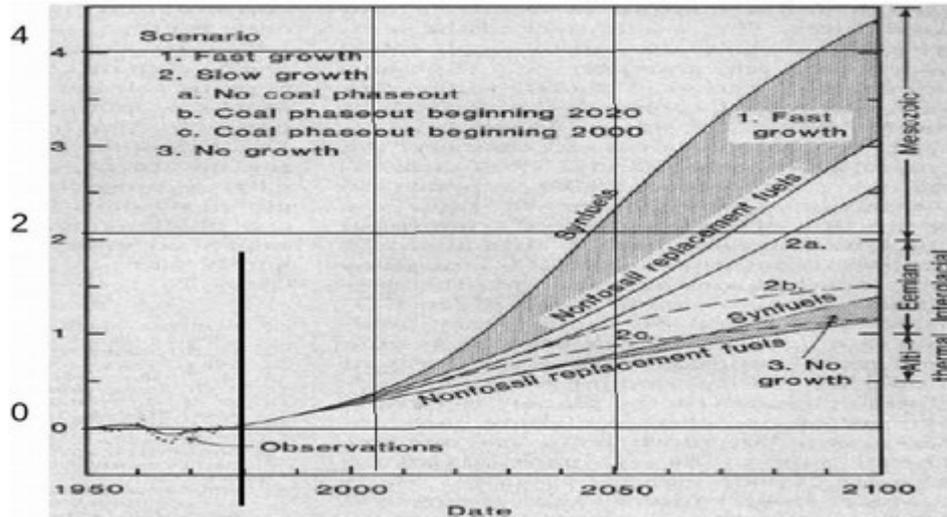
Simulations avec *forçages naturels et anthropiques*



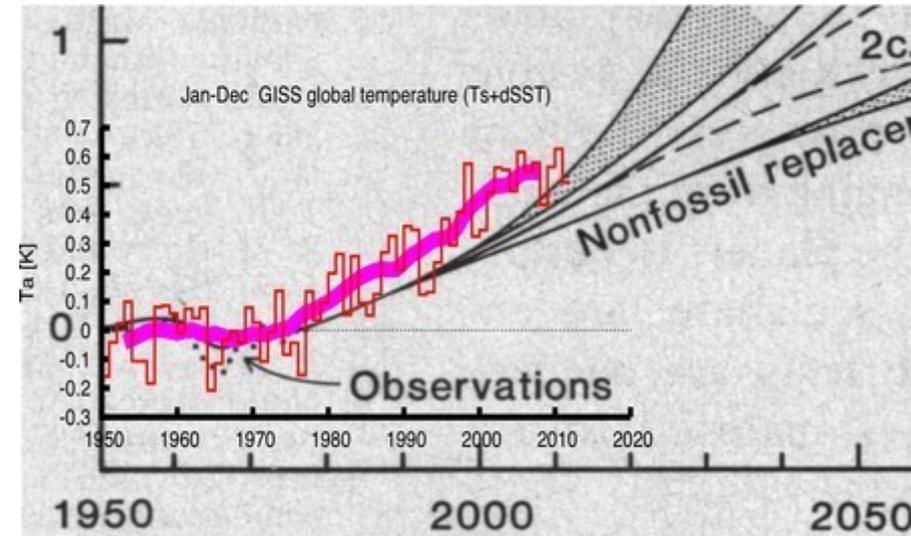
# Attribution des tendances sur 1951-2010 de la température moyenne globale en surface



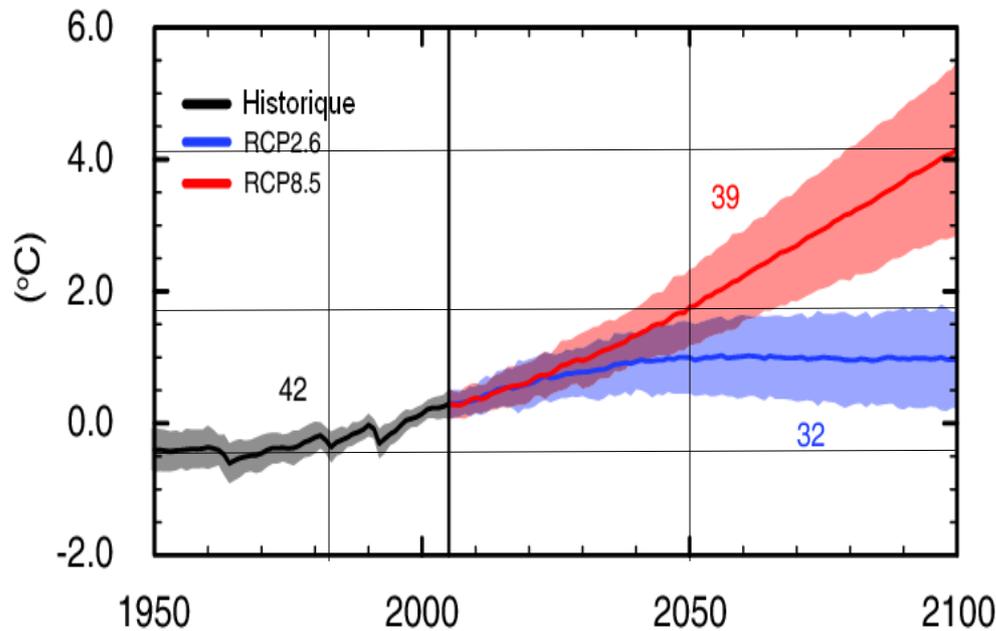
# Premières projections climatiques



[Hansen et al. 1981]

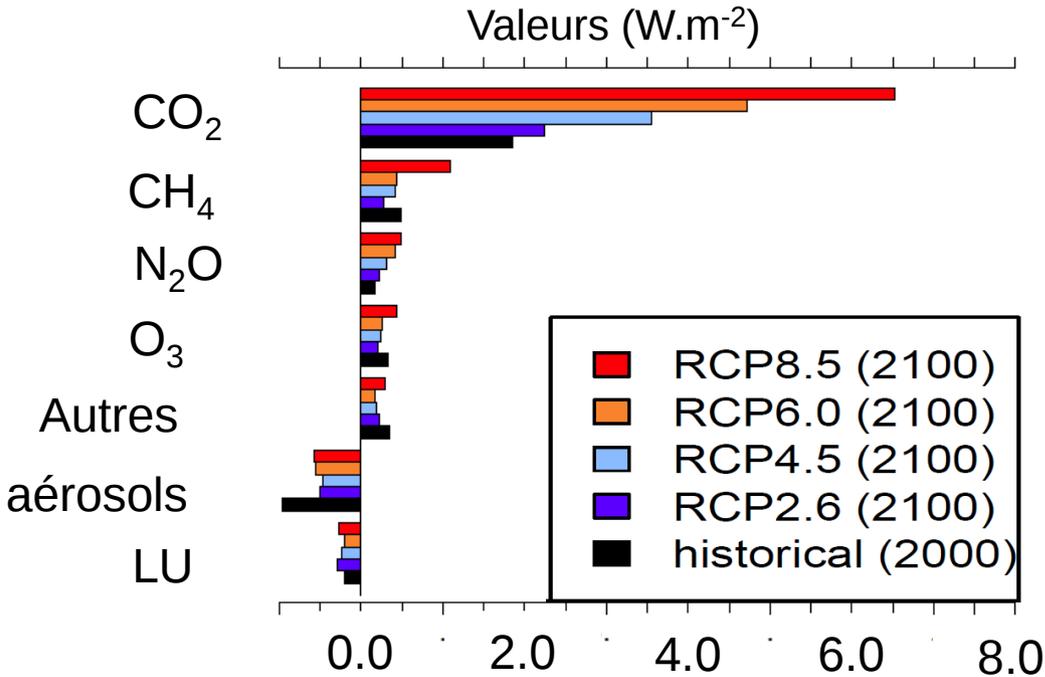
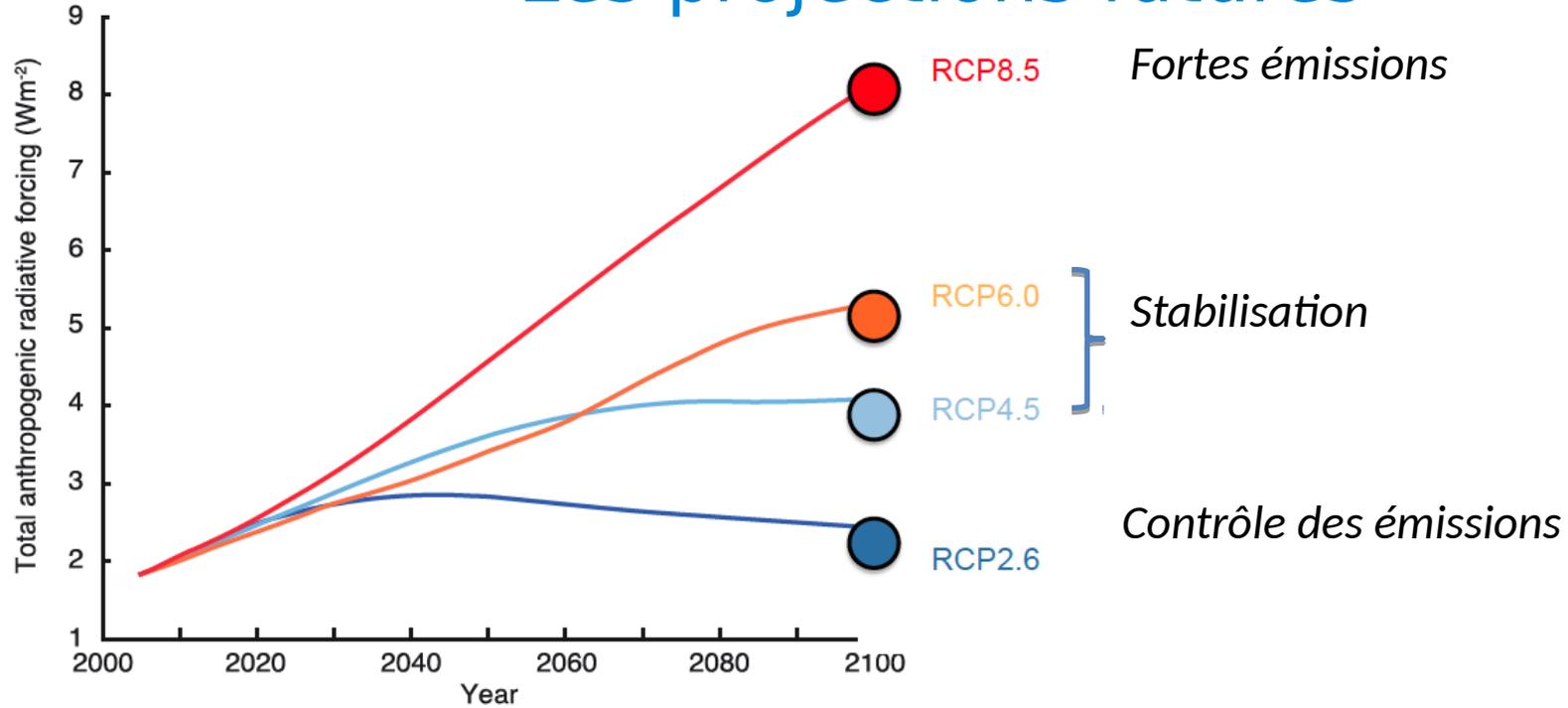


<http://www.realclimate.org>



[GIEC 2013]

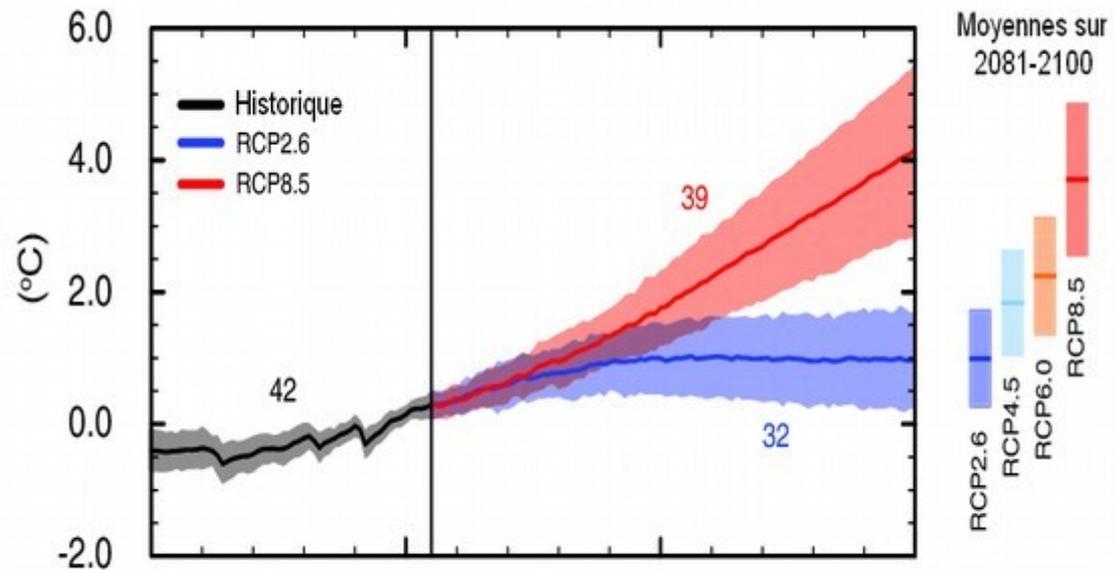
# Les projections futures



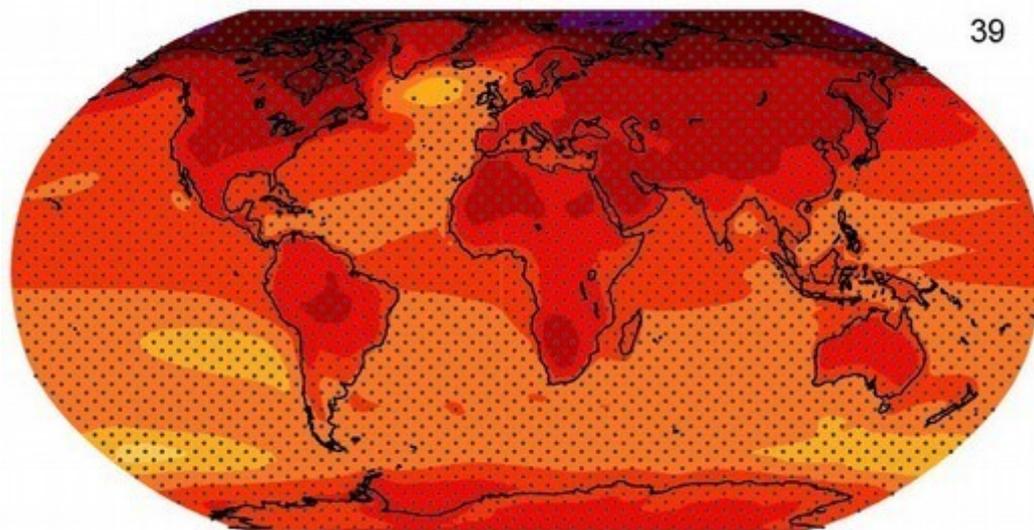
*Contribution des forçages individuels au forçage total (référence 1850)*

# Température de surface

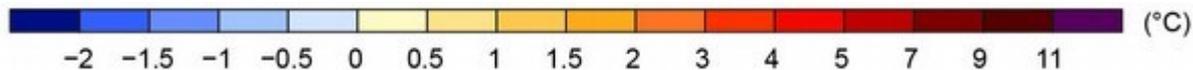
Moyenne globale  
1950 à 2100  
(40 modèles CMIP5)



En 2100,  
scénario RCP8.5  
(39 modèles CMIP5)

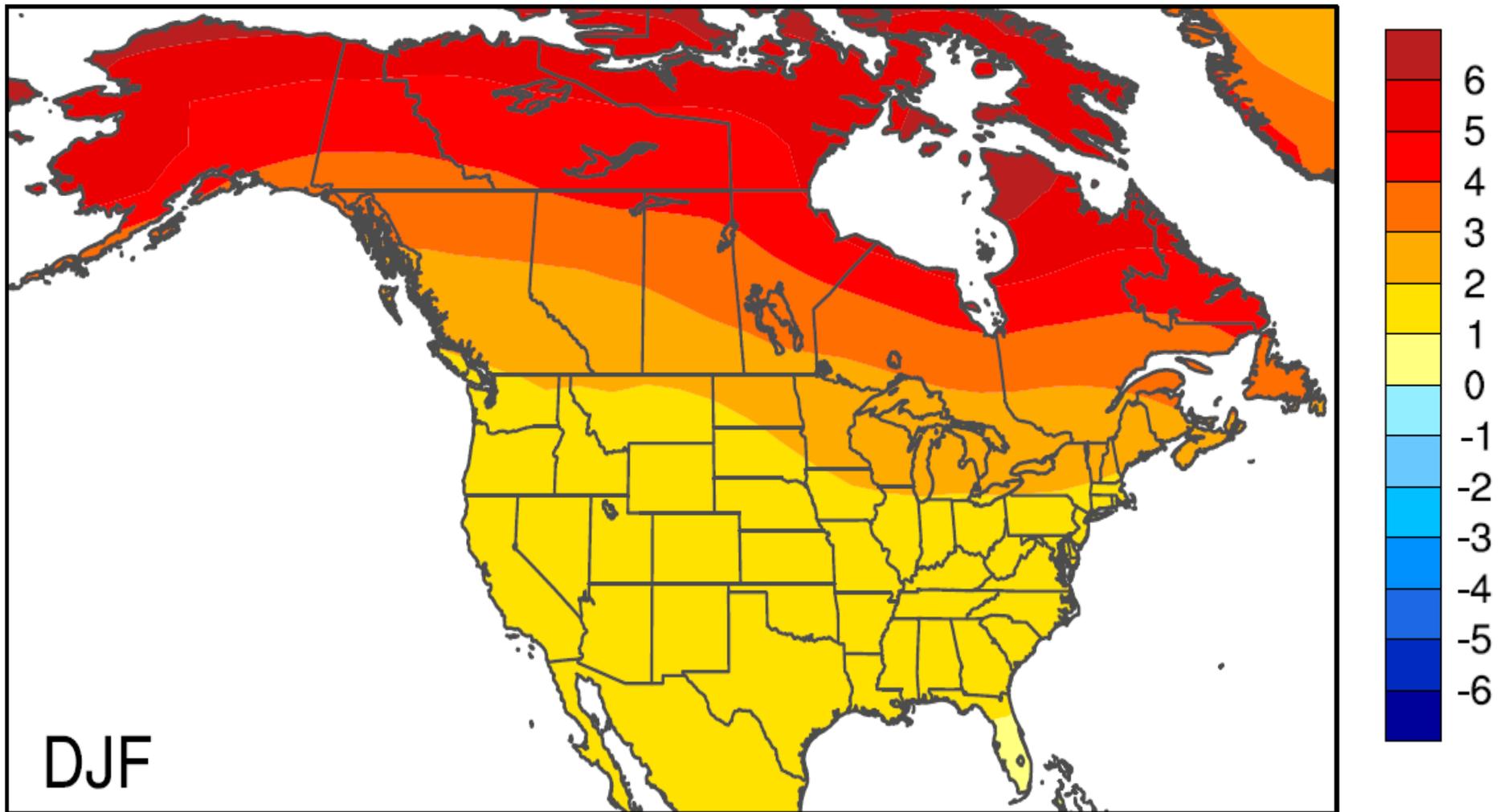


[GIEC, 2013]



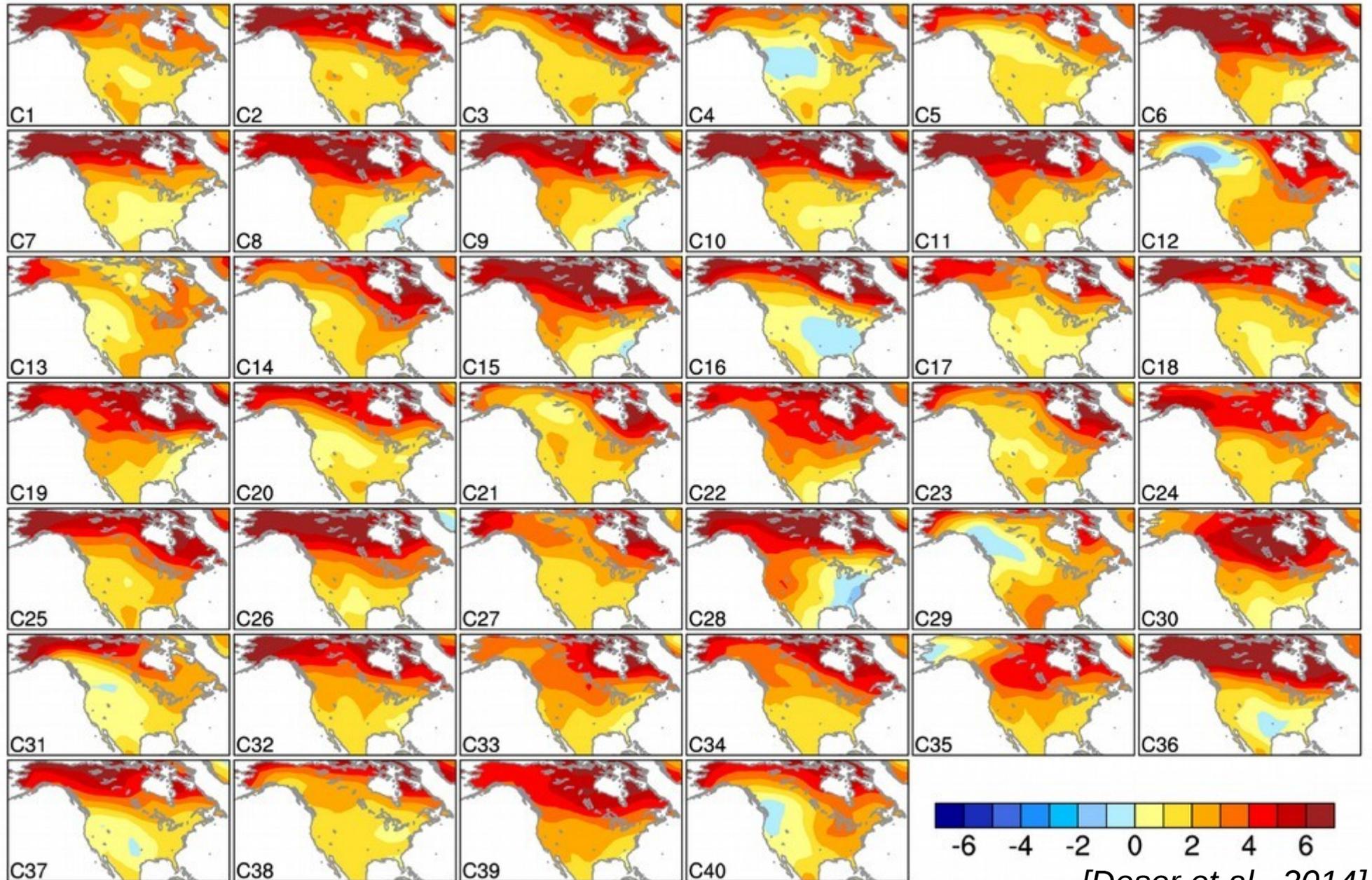
# Changement climatique et variabilité interne

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



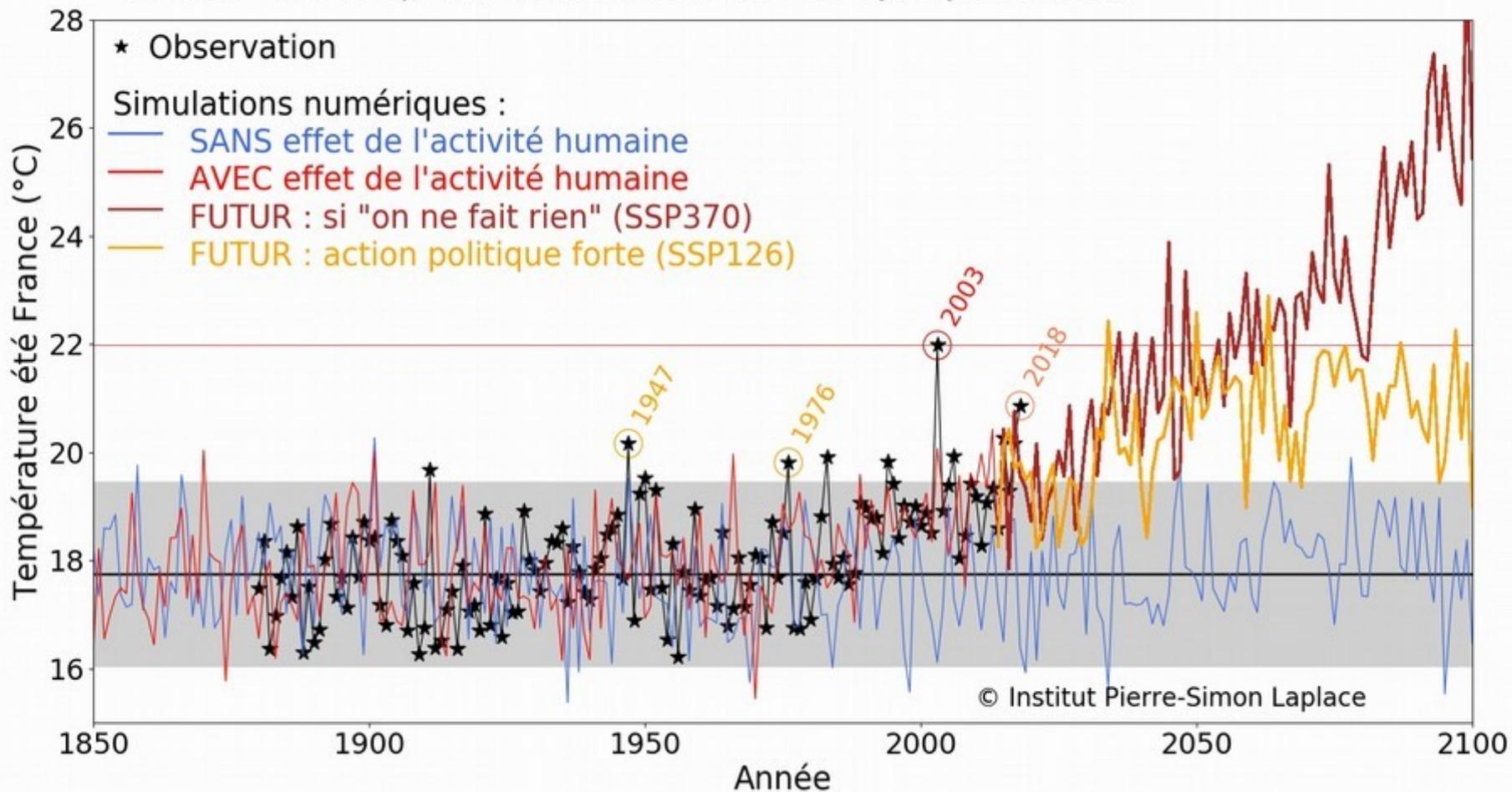
# Changement climatique et variabilité interne

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

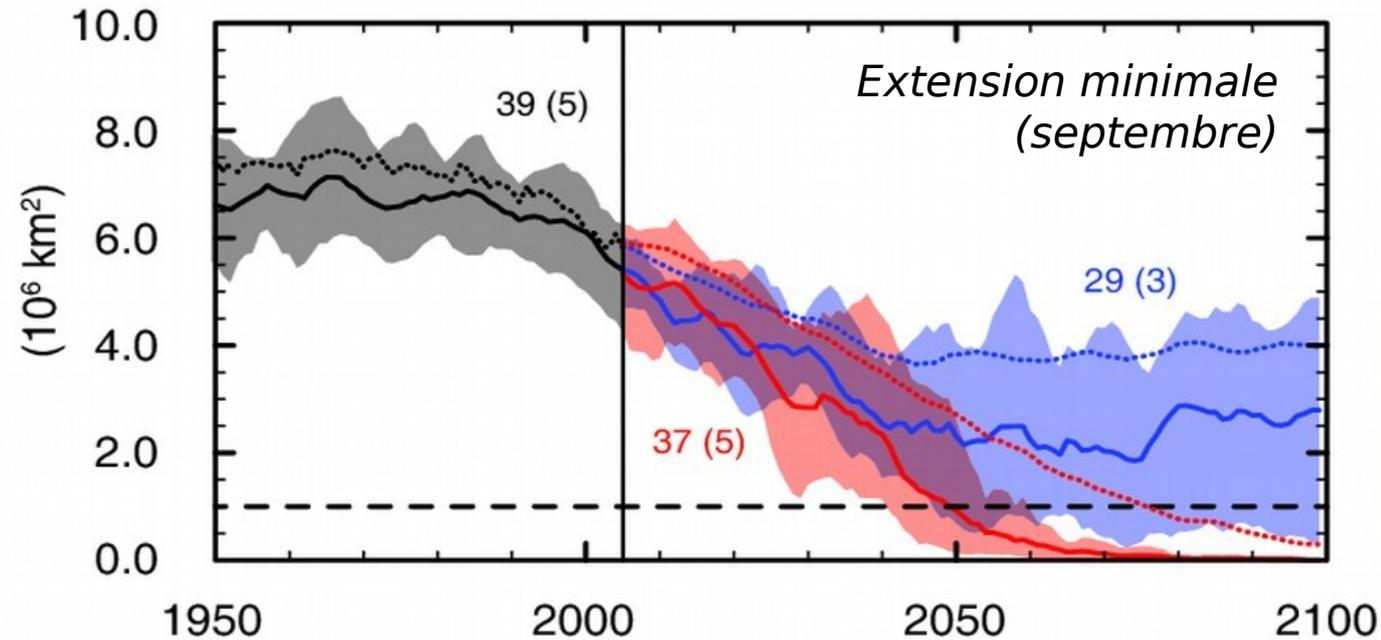


[Deser et al., 2014]

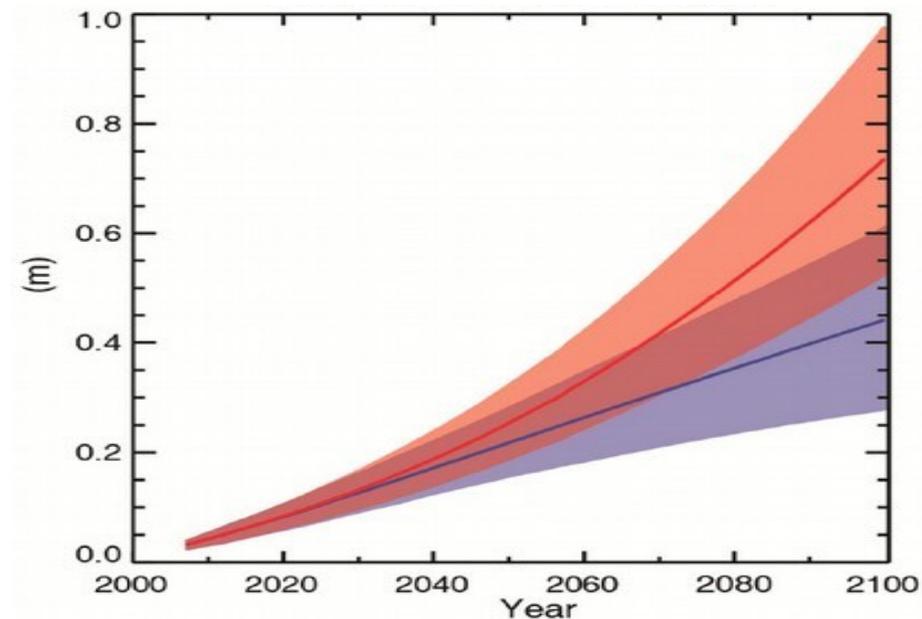
## Evolution des températures estivales en France (Juin-Juillet-Août)



# Diminution de l'extension de la banquise arctique



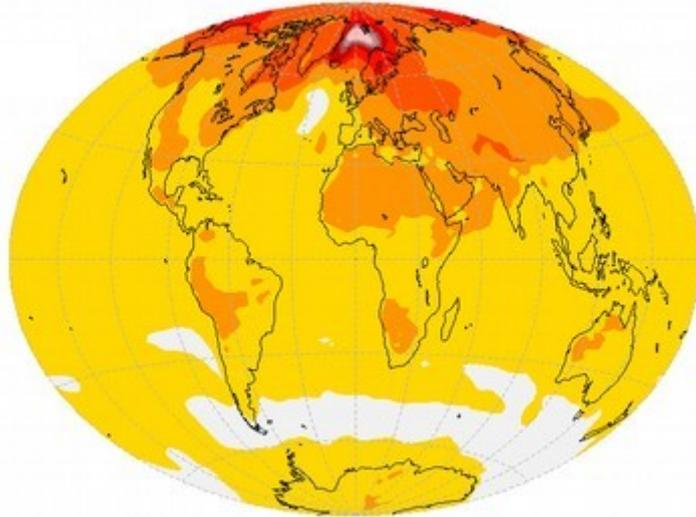
# Augmentation du niveau des mers



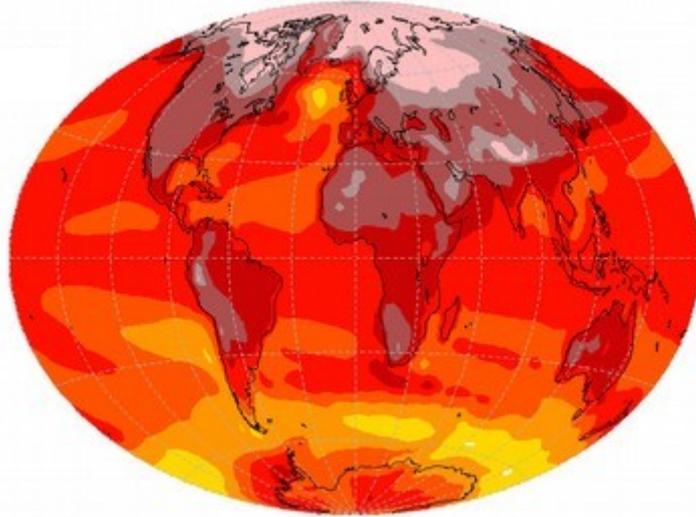
# Comparaison futures - paléoclimats

Différence entre **2100** et **1990**

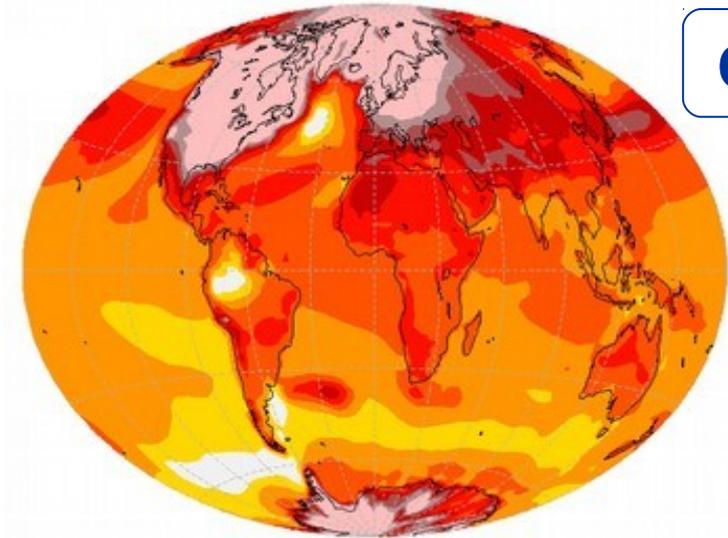
**RCP2.6**



**RCP8.5**

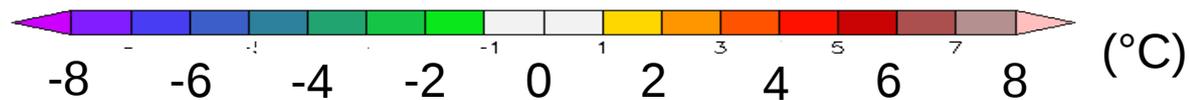


Différence entre la période **actuelle** et celle **dernier maximum glaciaire**



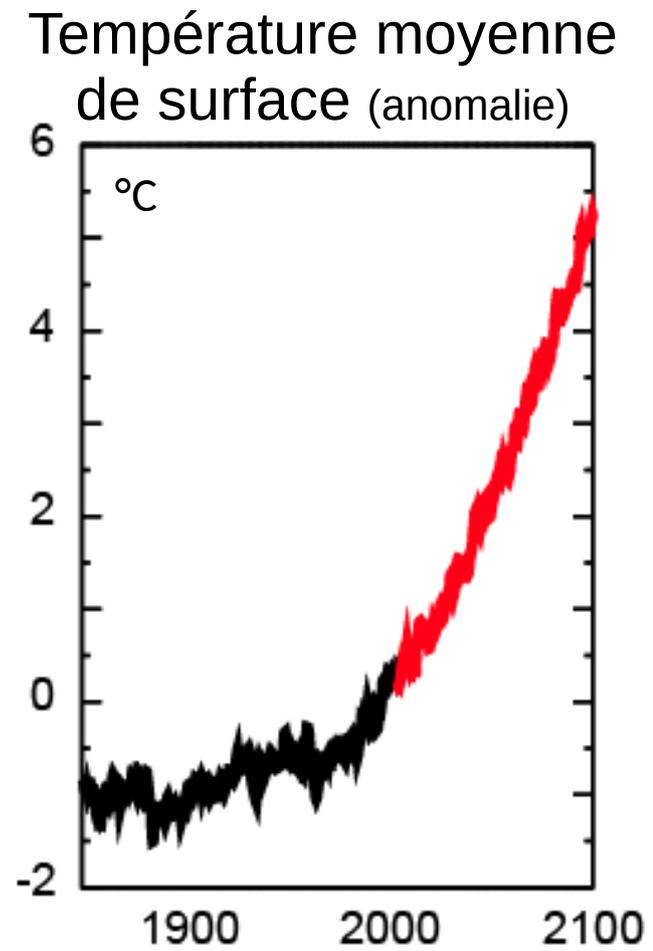
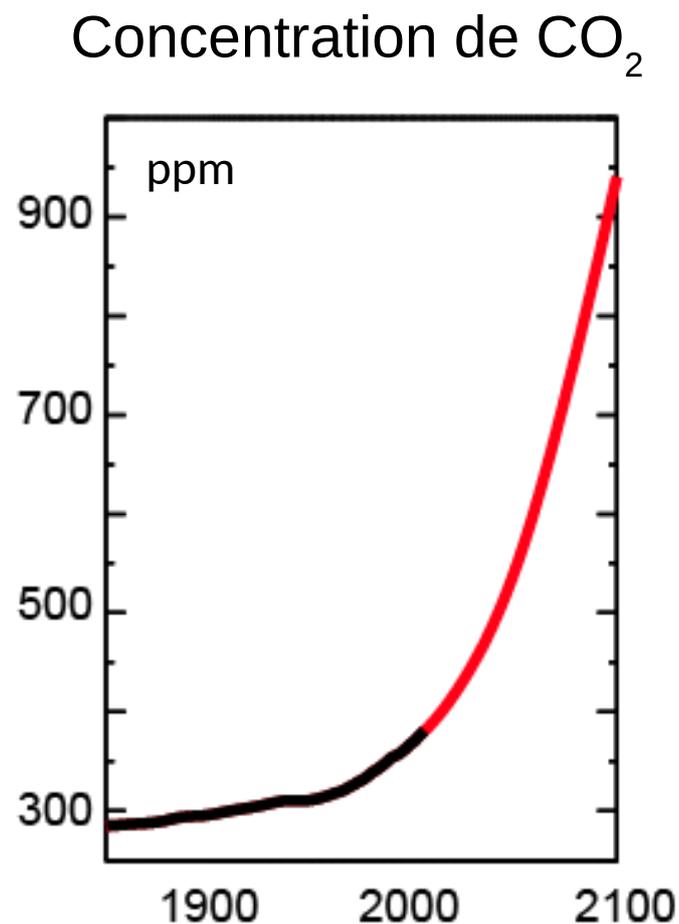
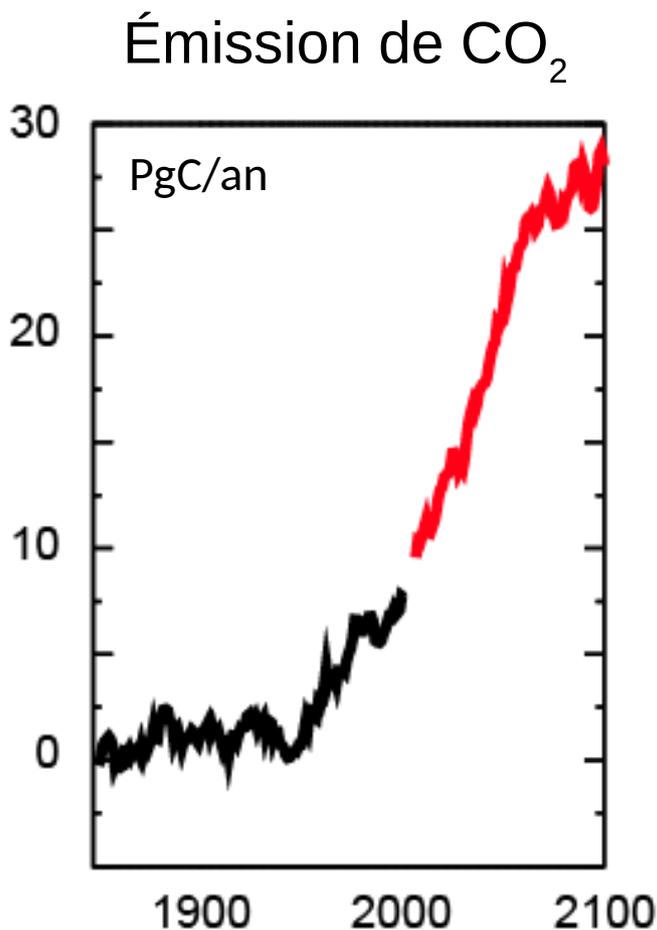
**Glaciaire**

Modèle : IPSL-CM5A-LR



# Des temps de réponses longs. Les raisons de l'objectif du zéro émission

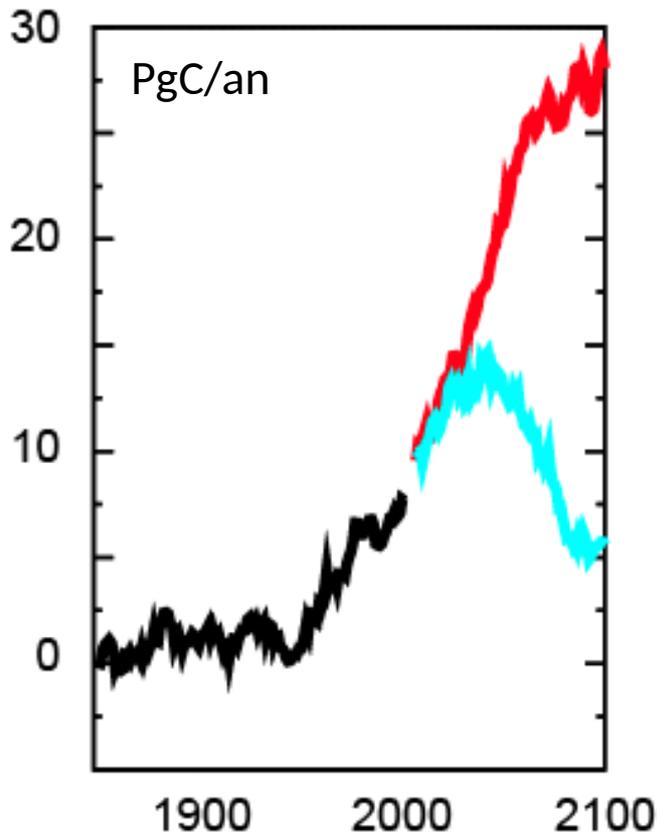
>> **Scénario Haut** : les émissions, les concentrations et les températures augmentent



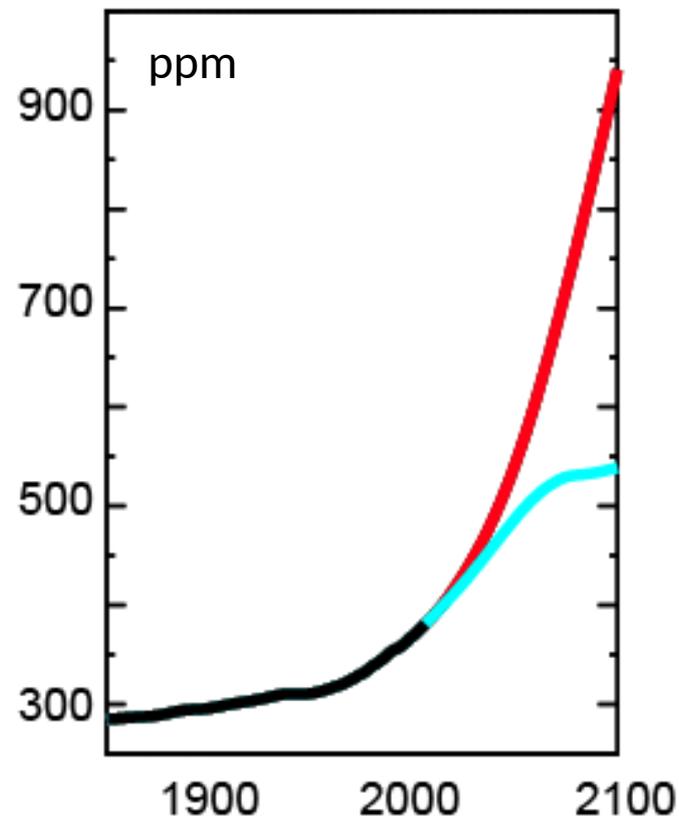
# Des temps de réponses longs. Les raisons de l'objectif du zéro émission

- >> **Scénario Haut** : les émissions, les concentrations et les températures augmentent
- >> **Scénario Médian** : pour stabiliser les concentrations à 550 ppm, il faut décroître fortement les émissions. Mais les températures continuent à augmenter

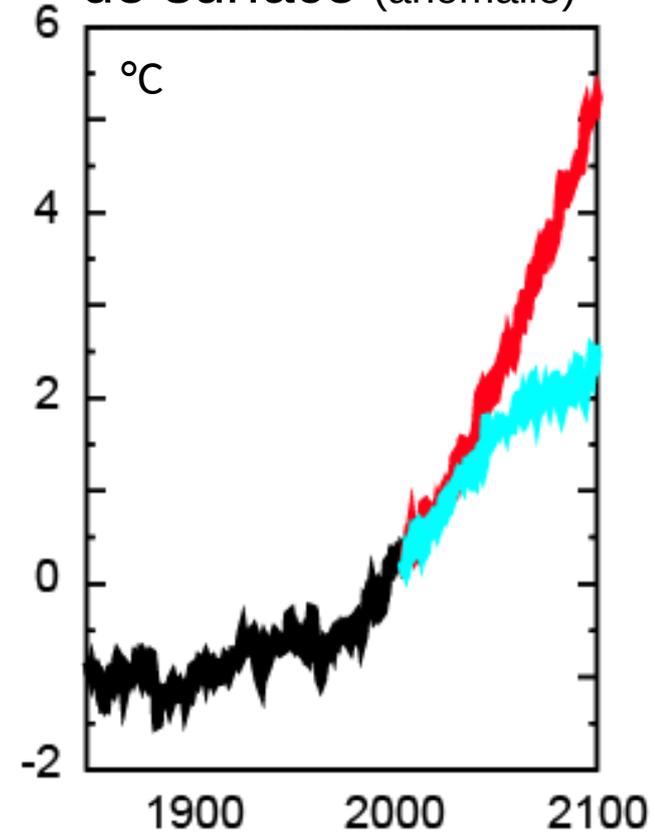
Émission de CO<sub>2</sub>



Concentration de CO<sub>2</sub>



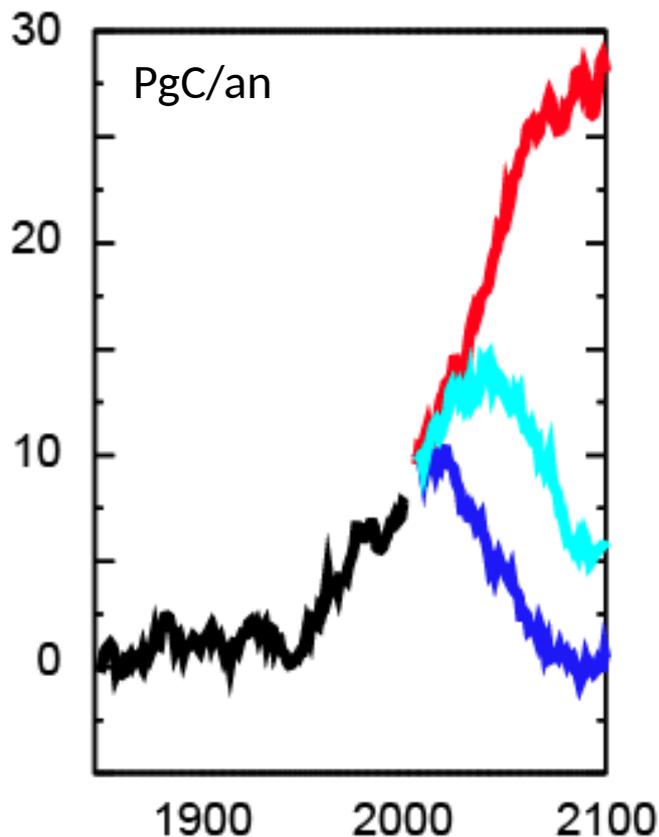
Température moyenne de surface (anomalie)



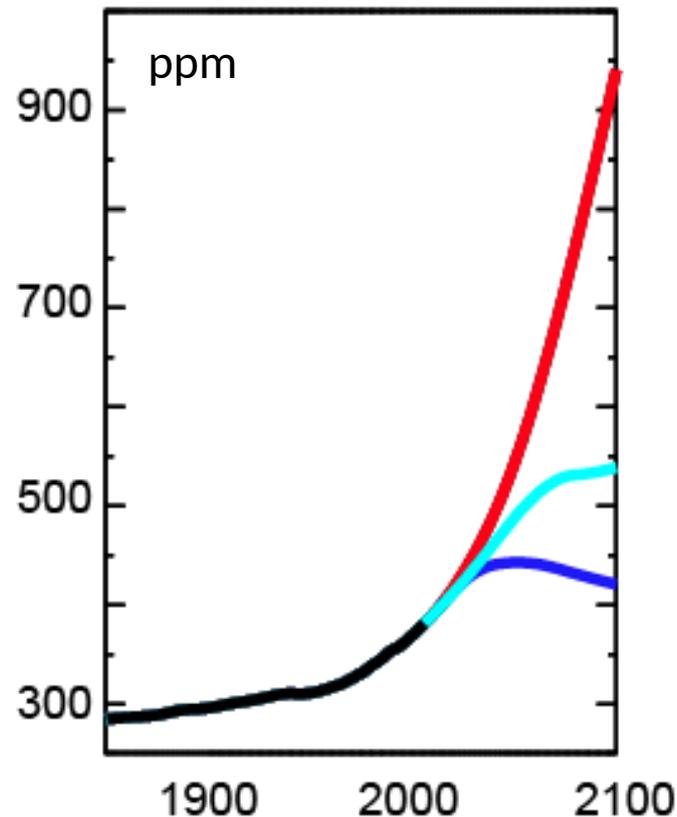
# Des temps de réponses longs. Les raisons de l'objectif du zéro émission

- >> **Scénario Haut** : les émissions, les concentrations et les températures augmentent
- >> **Scénario Médian** : pour stabiliser les concentrations à 550 ppm, il faut décroître fortement les émissions. Mais les températures continuent à augmenter
- >> **Scénario Bas** : pour limiter le réchauffement à 2°, il faut limiter la concentration à moins de 450 ppm et amener les émissions à 0 avant la fin du siècle.

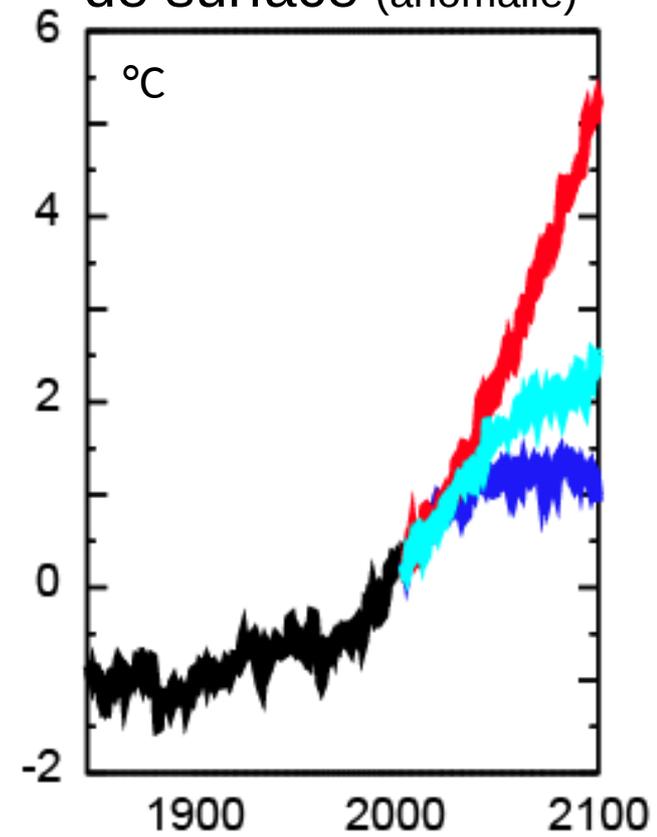
Émission de CO<sub>2</sub>



Concentration de CO<sub>2</sub>



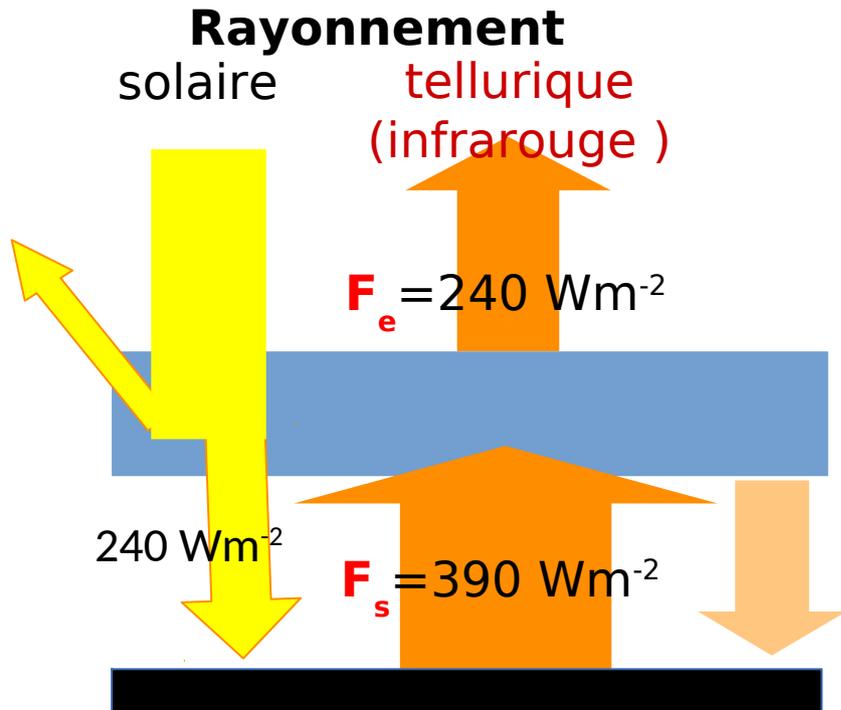
Température moyenne de surface (anomalie)



# Plan

- I. Présentation générale
- II. Approfondissement
  - I. L'effet de serre
  - II. La modélisation numérique du climat
- III. Besoins en terme de connaissances

# L'effet de serre sur Terre



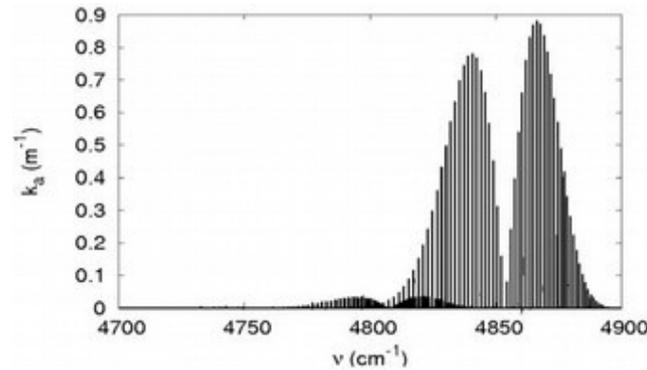
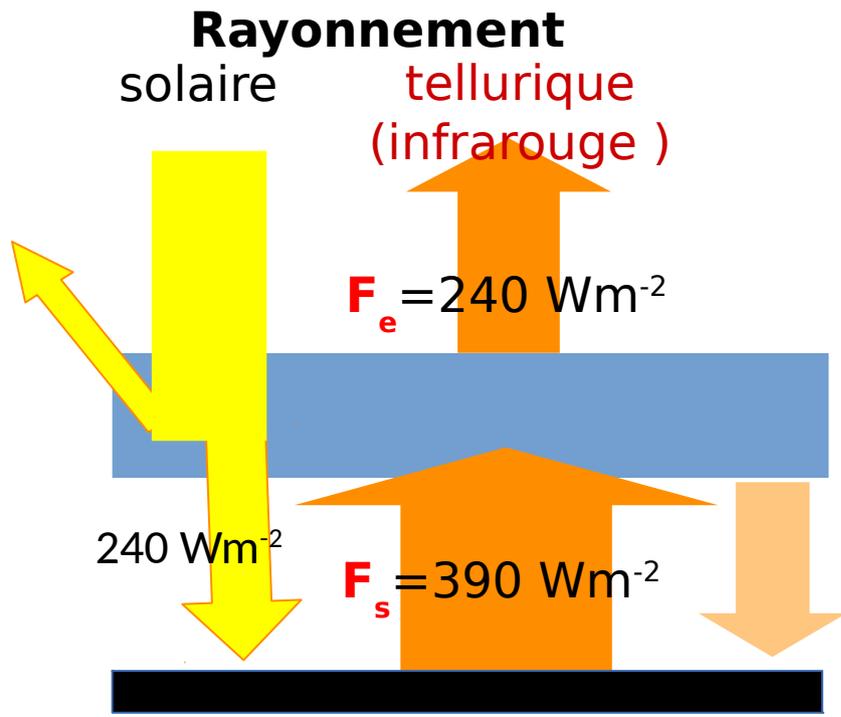
**Effet de serre:** différence entre le flux émis par la surface et celui perdu vers l'espace

**Sur Terre :**  $150 \text{ Wm}^{-2}$



Les flux radiatifs au sommet de l'atmosphère sont mesurés par satellites

# L'effet de serre sur Terre



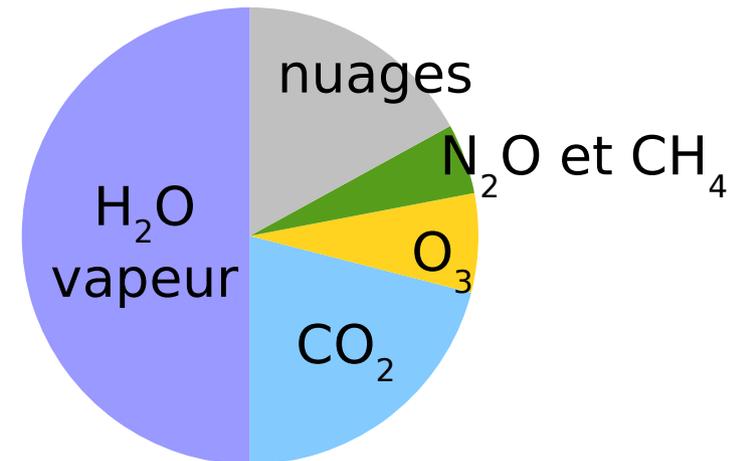
Propriétés radiatives

Profils atmosphériques

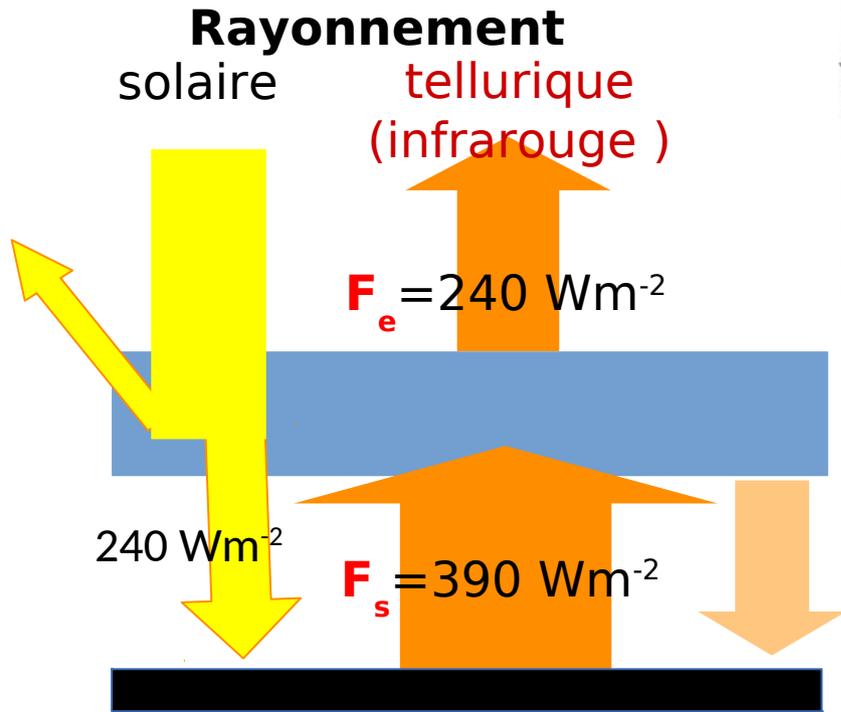
Calcul des flux radiatifs  $F$  et de l'effet de serre  $G = F_s - F_e$

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

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

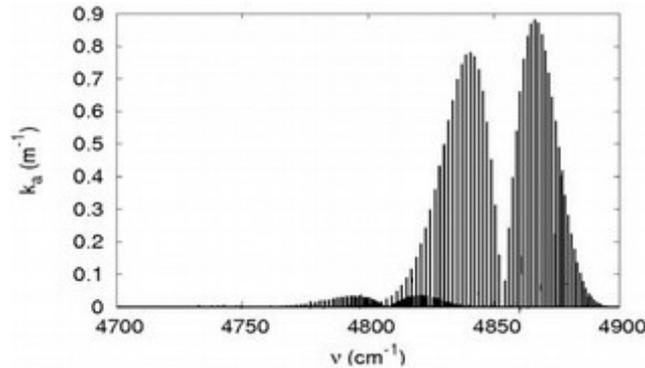


# L'effet de serre sur Terre



**Effet de serre:** différence entre le flux émis par la surface et celui perdu vers l'espace

Sur Terre :  $150 \text{ Wm}^{-2}$



Propriétés d'absorption des gaz

Profils verticaux de la température et de la composition

Calcul des flux radiatifs  $F$  et de l'effet de serre  $G$

Sur Terre, pour une atmosphère standard:

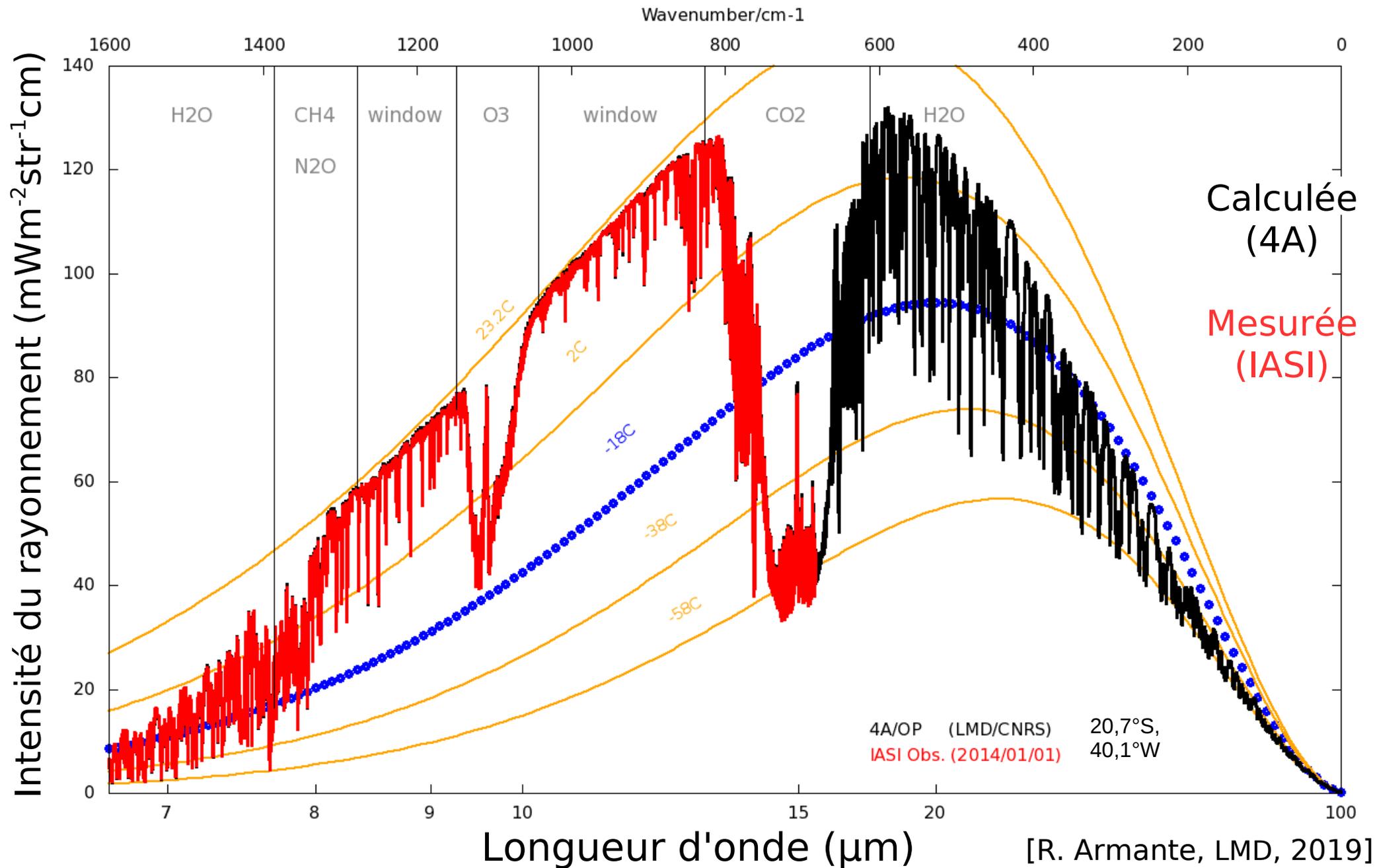
- $\text{H}_2\text{O}$ : + 20%  $\Rightarrow \Delta G \approx + 3.8 \text{ Wm}^{-2}$
- $\text{CO}_2$ : + 100%  $\Rightarrow \Delta G \approx + 2.8 \text{ Wm}^{-2}$

[Collins et al., 2006]

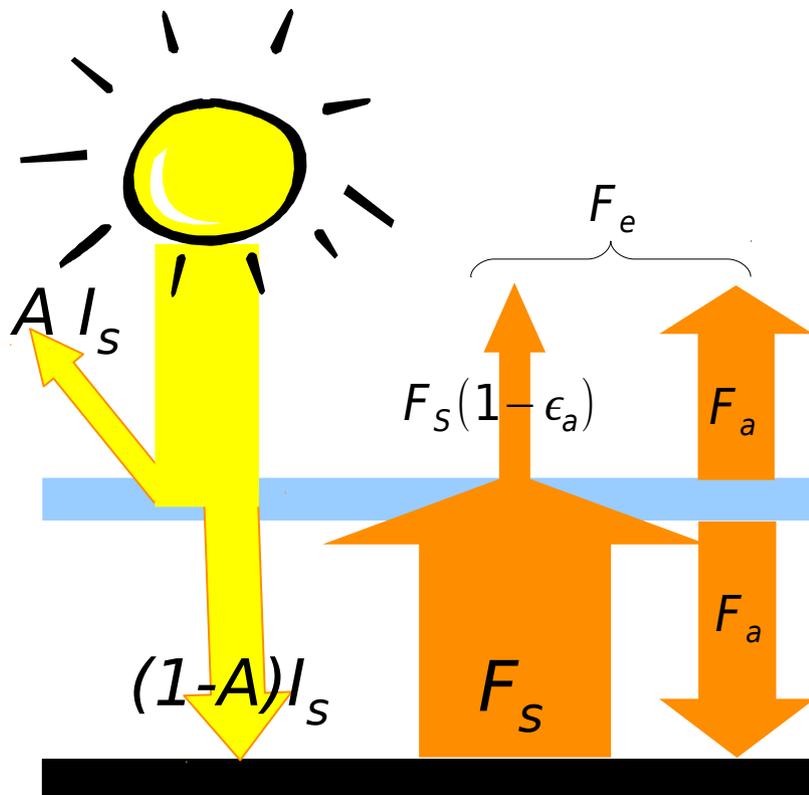
En tenant compte des nuages et de l'ajustement stratosphérique :

$\text{CO}_2$ : + 100%  $\Rightarrow \Delta G \approx + 3.7 \pm 0.2 \text{ Wm}^{-2}$

# Profil spectral du rayonnement infrarouge émis par la Terre vu depuis l'espace



# Modèle d'effet de serre à 1 couche



**L'effet de serre**  $G = F_s - F_e = (1-A) I_s \left( \frac{1}{1-\epsilon_a/2} - 1 \right)$  varie entre

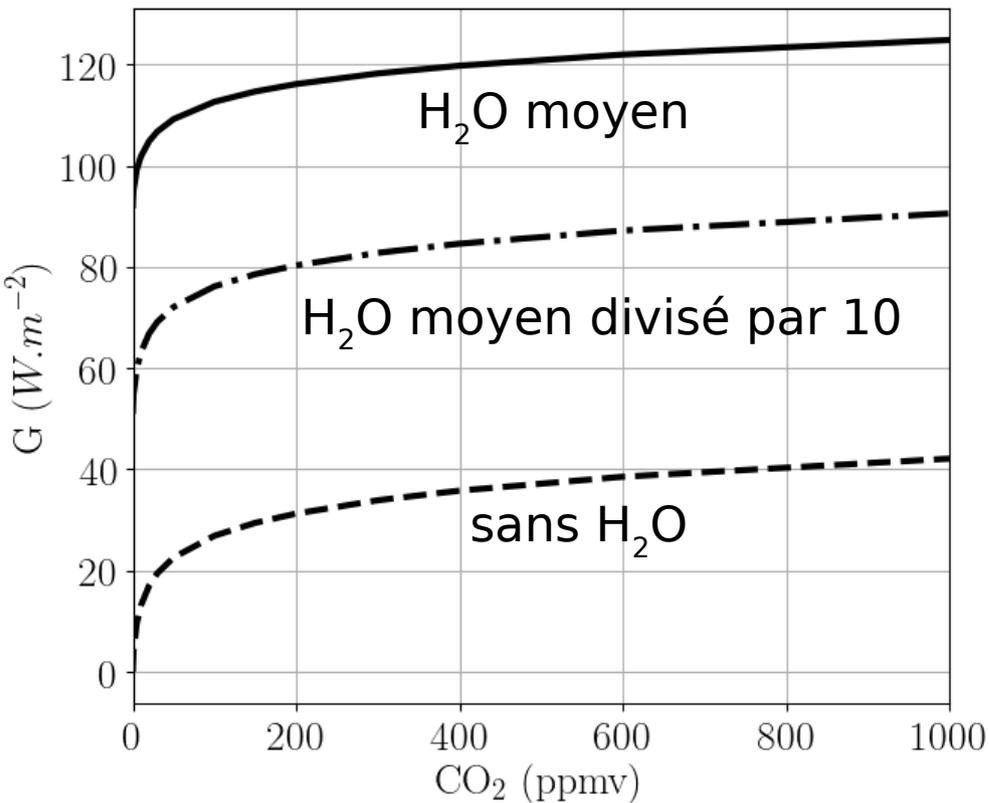
➤  **$G=0$**  quand la vitre est parfaitement transparente au ray IR,  $\epsilon_a=0$

➤  **$G=(1-A) I_s$**  quand la vitre est parfaitement opaque au ray IR,  $\epsilon_a=1$ , **il**

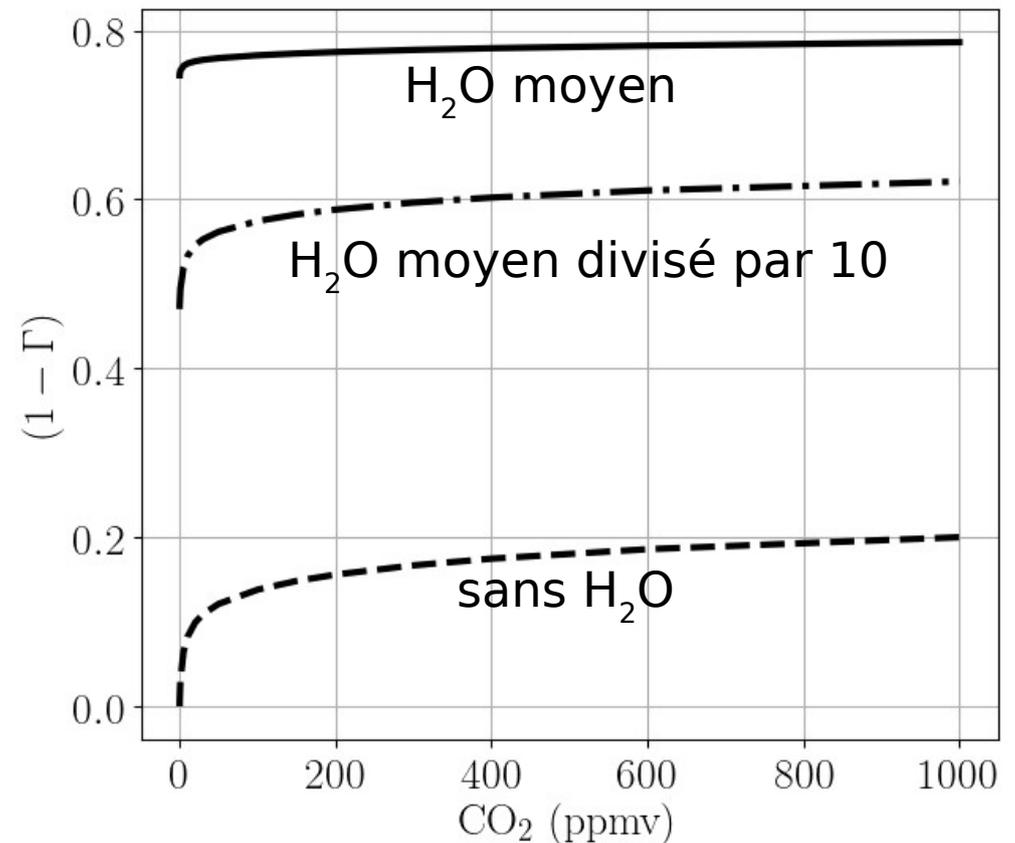
**alors maximum**

# Le paradoxe de l'accroissement de l'effet de serre malgré la saturation de l'absorptivité du CO<sub>2</sub>

**Effet de serre** de l'atmosphère en fonction de sa **concentration en CO<sub>2</sub>** pour différentes concentrations en H<sub>2</sub>O calculé par un modèle de référence



**Absorptivité totale  $\epsilon_a$**  de l'atmosphère en fonction de sa **concentration en CO<sub>2</sub>** pour différentes concentrations en H<sub>2</sub>O calculé par le même modèle de référence



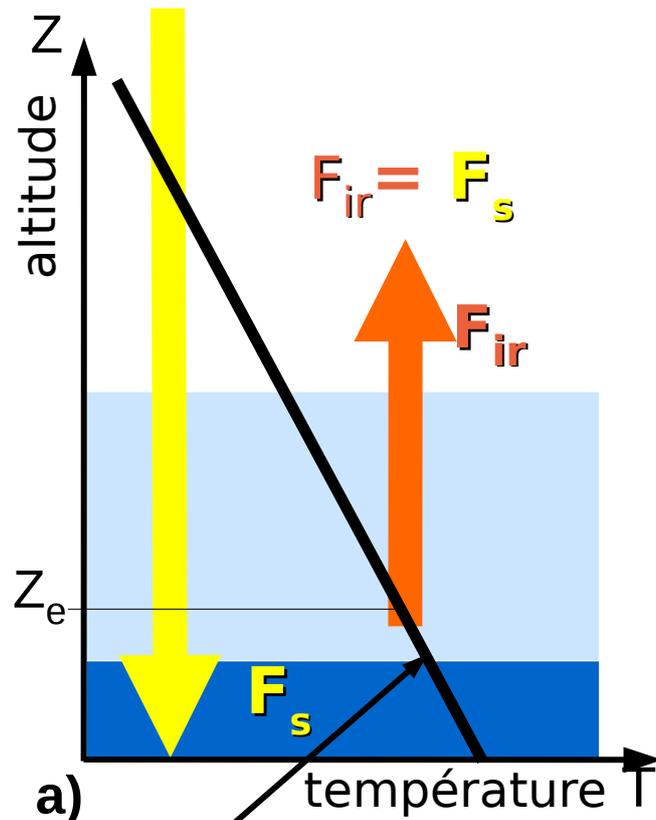
**Comment l'effet de serre peut-il augmenter avec la concentration en CO<sub>2</sub> alors que l'absorptivité n'augmente pas ? (on dit qu'elle est saturée)**

# Effet de serre dans une atmosphère *stratifiée*

$F_s$  Rayonnement solaire net

$F_{ir}$ : Rayonnement IR sortant

$Z_e$ : Altitude d'émission vers l'espace



La concentration de gaz absorbant est uniforme.

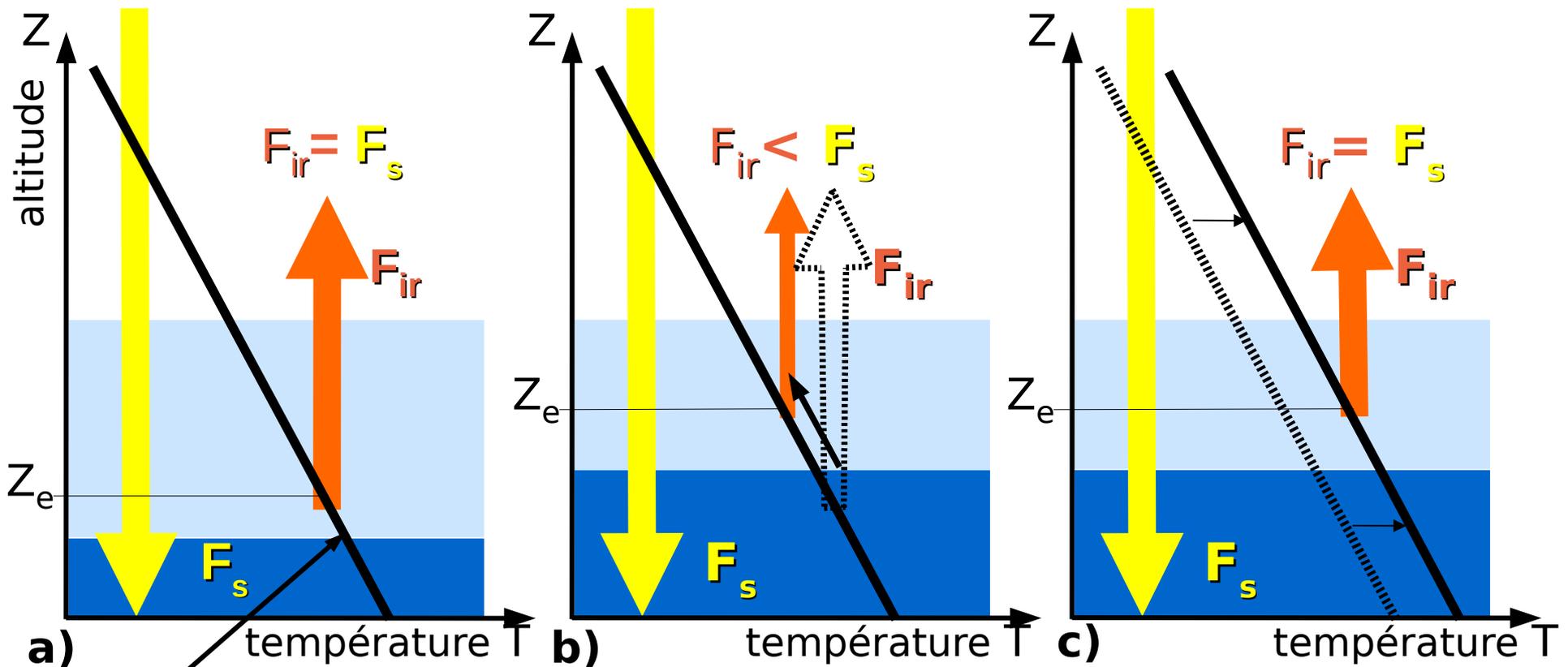
 Zone visible (les photons émis vers le haut atteignent l'espace)

 Zone cachée (les photons émis vers le haut sont absorbés et n'atteignent pas l'espace)

$dT/dz$  fixé  
par la convection

# Effet de serre dans une atmosphère stratifiée

Augmentation uniforme de la concentration de gaz absorbant



$dT/dz$  fixé  
par la convection

$CO_2$  augmente,  $Z_e$   
augmente,  $T_e$  diminue,  $F_{ir}$   
diminue

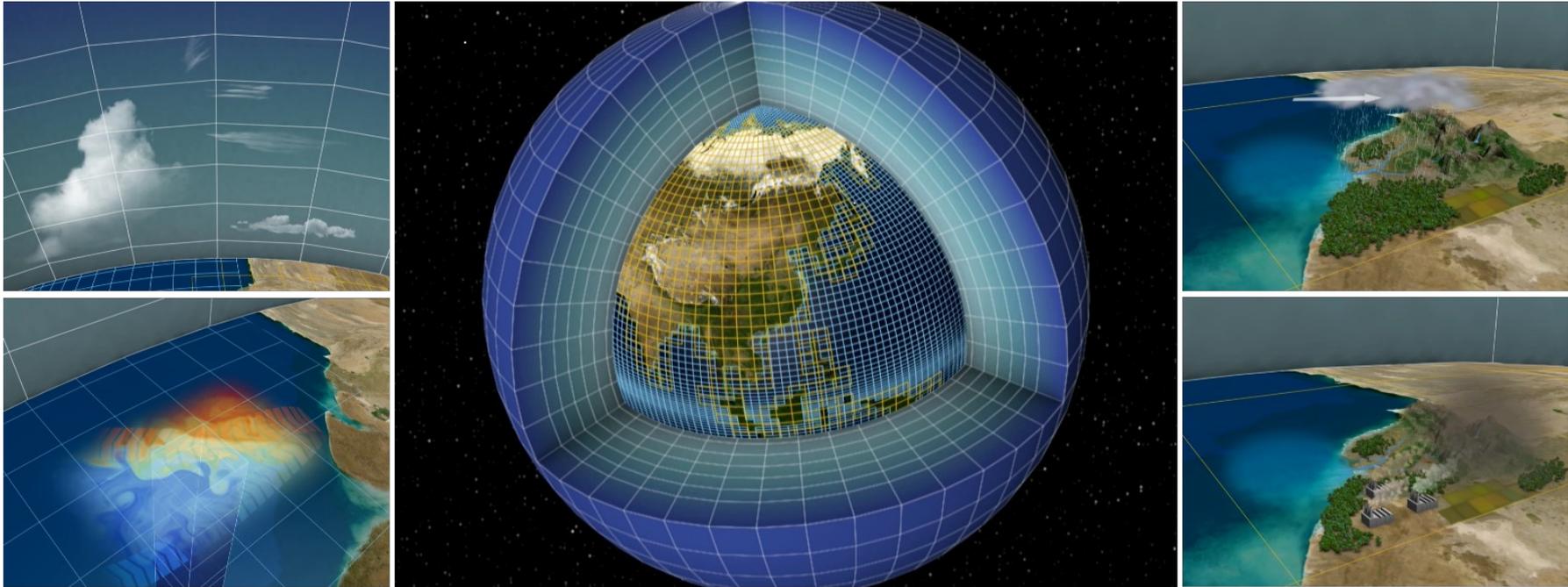
$T(z)$  augmente:  
retour à l'équilibre

# Plan

- I. Présentation générale
- II. Approfondissement
  - I. L'effet de serre
  - II. La modélisation numérique du climat
- III. Besoins en terme de connaissances

# Modèle de climat

(Modèle de circulation générale)



Images issues d'un film présentant la modélisation du climat. Copyright CEA

- Une représentation 3D de l'atmosphère l'océan glaces de mer et surfaces continentales (couplages de différents modèles)
- Une représentation du couplage avec les cycles biogéochimiques dans l'atmosphère l'océan et le continent

# Plan

- I. Présentation générale
- II. Approfondissement
  - I. L'effet de serre
  - II. La modélisation numérique du climat
- III. Besoins en terme de connaissances

# 1- Les bases de la physique du climat

- Le climat est directement lié au bilan radiatif de la terre
- Peut se décliner dans de nombreuses disciplines et thématiques:
  - Géométrie : variation saisonnières, latitudinales, orbite de la Terre...
  - Thermodynamique : profil vertical de température et de vapeur d'eau
  - Thermiques et mécanique des fluides: convection, conduction, turbulence...
  - Spectroscopie et rayonnement
  - Chimie : composition de l'atmosphère (méthane, ozone, aérosols...)
  - Mathématique

# 2- En route vers l'inconnu !

- Le climat se caractérise par les statistiques du temps qu'il fait (pas seulement la moyenne)
- Changement climatique => déplacement de ces statistiques, exploration de situations inconnues
- Toutes les méthodes de travail reposant sur une base historique (infrastructures, habitat, etc.) doivent être revues
- Il est difficile de connaître l'inconnu...

## 3- Confiance dans les résultats et analyse de risques

- Nos connaissances sur les phénomènes climatiques sont très incomplètes et très différents selon les questions
- La confiance dans les résultats est un long processus, cette confiance peut être très variables d'une question à l'autre
- Besoin de considérer à la fois la probabilité et la sévérités des différents risques associés aux changements climatiques

## 4- Modélisation numérique du climat, éventail de modèles

- La modélisation numérique du climat partage de nombreux concepts et pratiques avec la modélisation numérique en générale
- Quelques spécificités :
  - Exigence de conservation de grandeurs fondamentales (energie, masse...) pour un très grand nombre de pas de temps ( $10^7$ )
  - Système complexe, couplage de modèles très variés, sensibilité aux conditions initiales..
- Il est en général fait appel à un éventail de modèle (en terme de complexité), emboîtement de modèles...

## 5- Tendances climatiques versus variabilités climatiques

- Le climat est un système chaotique (la prévision du temps est limitée à quelques jours)
- Les variations du climat sont en partie forcées, en partie « libres »
- Impossibilité d'attribuer une cause certaine à un phénomène climatique particulier
- Besoin d'approches statistiques
- Réalisation d'ensemble de simulations, avec des configurations de modèle différentes, ...

## 6- Quantifier les perturbations anthropiques de nature très différente

- Les perturbations peuvent être très différentes par leur nature (gaz à effet de serre, aérosols, usages de sols et conditions de surface...), par la durée de leur effet (de l'heure au millier d'années)...
- Des indicateurs agrégés existent, de domaine de validité limité, orientés par des questions particulières

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 otherwise monochromatic scene. The text "Merci de votre attention" is centered over the middle of the image.

Merci de votre attention

# Connaissances

- 1- Les bases de la physique du climat. Le climat, résultat du bilan radiatif de la terre. Effet de serre. Effet d'albédo.
- 2- En route vers l'inconnu ! Toutes les méthodes d'estimations incluant une base historique doivent être revues. Exemple des étés plus chauds, des pluies plus intenses, niveau des mers +1m, etc...
- 3- Confiance des résultats et analyse de risques. L'éventail dans la confiance des résultats: de ceux robustes à ceux possibles
- 4- Modélisation numérique du climat, éventail de modèles
- 5- Tendances climatiques versus variabilité climatiques
- 6- Les perturbations anthropiques : amplitude et effets. L'estimation de l'amplitude des perturbations et de leurs réponses sur le climat
- 7-