



IPSL Climate Modelling Centre



Climat du futur : l'effet de serre et les rétroactions

Jean-Louis Dufresne

jean-louis.dufresne@lmd.jussieu.fr

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

Institut Pierre Simon Laplace



Bureau des Longitudes, Paris, 14 juin 2016

La découverte des périodes glaciaires

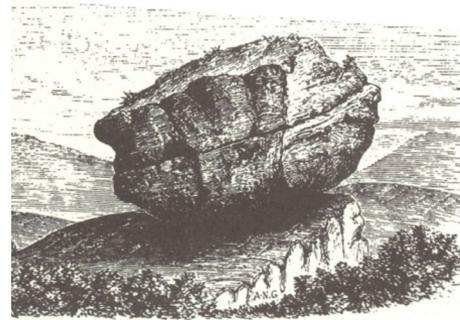
Hypothèse des périodes glaciaires (1840-1860)



Jean de
Charpentier

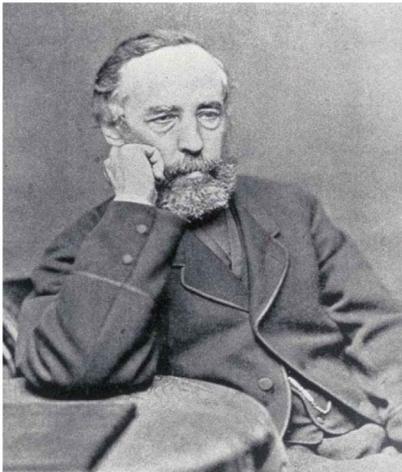


Blocs erratiques



Louis Agassiz

Origine de ces variations : soleil ou CO₂ (1860-1900) ?

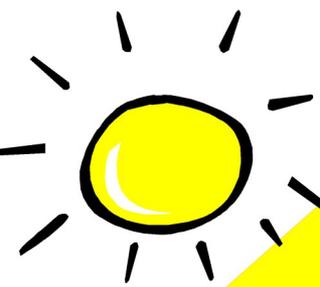


James
Croll



Svante Arrhenius

Température d'équilibre d'une planète



Ray. solaire **incident**
sur un **plan**: $I_0 = 1360 \text{ W.m}^{-2}$

Ray. solaire **incident** moyen sur la **sphère**:
 $I_s = I_0/4 = 340 \text{ W.m}^{-2}$

Ray. solaire
réfléchi AI_s

Ray. solaire
absorbé :
 $(1-A)I_s$

Ray. infrarouge
émis par la planète
 σT_r^4



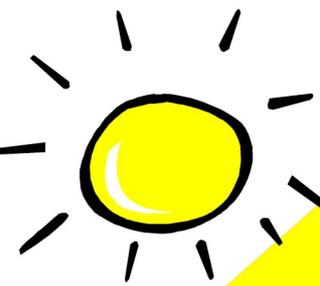
Joseph Fourier
(1768-1830)

A : albédo planétaire

$$\sigma T_r^4 = (1 - A)I_0/4$$

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

Température d'équilibre d'une planète



Ray. solaire **incident**
sur un **plan**: $I_0 = 1360 \text{ W.m}^{-2}$

Ray. solaire **incident** moyen sur la **sphère**:
 $I_s = I_0/4 = 340 \text{ W.m}^{-2}$

Ray. solaire
réfléchi AI_s
 100 W.m^{-2}



Ray. solaire
absorbé :
 $(1-A)I_s$
 240 W.m^{-2}

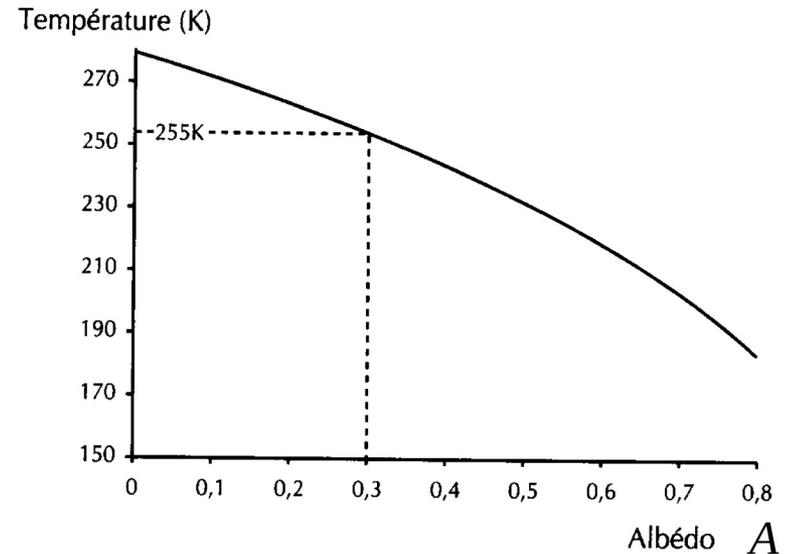
Ray. infrarouge
émis par la planète

$$\sigma T_r^4 = 240 \text{ W.m}^{-2}$$

$$T_r = 255\text{K}$$

$$A = 0.3$$

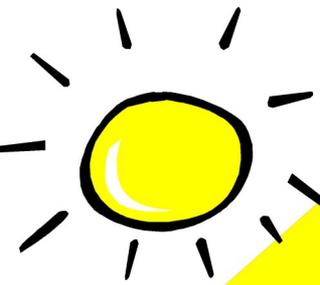
Température radiative



$$\sigma T_r^4 = (1 - A)I_0/4$$

- **T_r très sensible à l'albédo**
- $T_r = 255\text{K}$ (-18°C) pour la valeur observée de l'albédo $A = 0,3$

Température d'équilibre d'une planète



Ray. solaire **incident**
sur un **plan**: $I_0 = 1360 \text{ W.m}^{-2}$

Ray. solaire **incident** moyen sur la **sphère**:
 $I_s = I_0/4 = 340 \text{ W.m}^{-2}$

Ray. solaire
réfléchi AI_s
 100 W.m^{-2}

Temp. de surface $T_s = 288\text{K}$
Ray. Infrarouge **émis**
Par la surface: 390 W.m^{-2}

Ray. infrarouge
émis par la planète

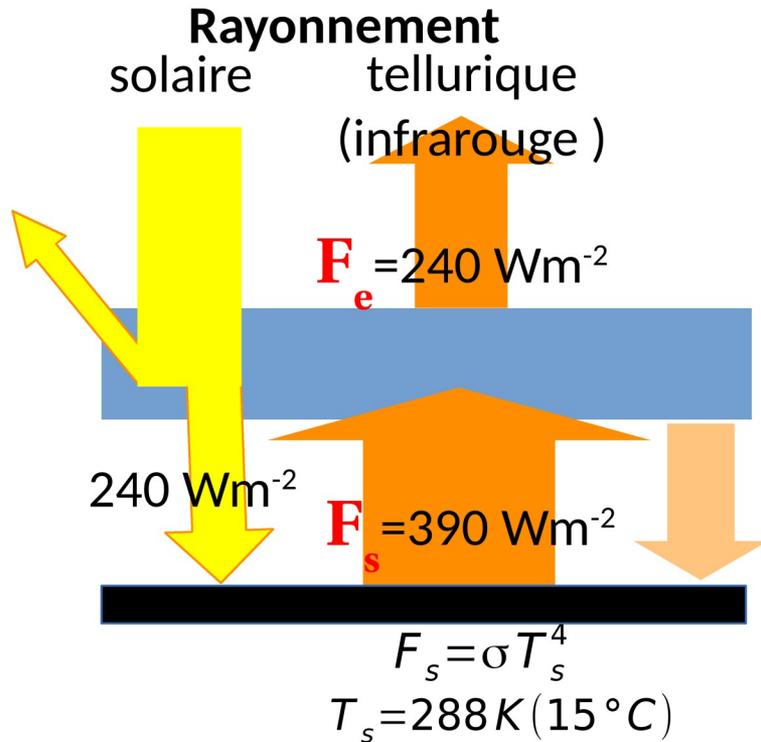
$$\sigma T_r^4 = 240 \text{ W.m}^{-2}$$

$$T_r = 255\text{K}$$

$$A = 0.3$$

- $T_r = 255\text{K}$ (-18°C) pour la valeur observée de l'albédo $A = 0,3$
- $T_s = 288\text{K}$ (15°C) température de surface observée
- Différence de temp. due à **l'effet de serre**

Calcul de l'effet de serre



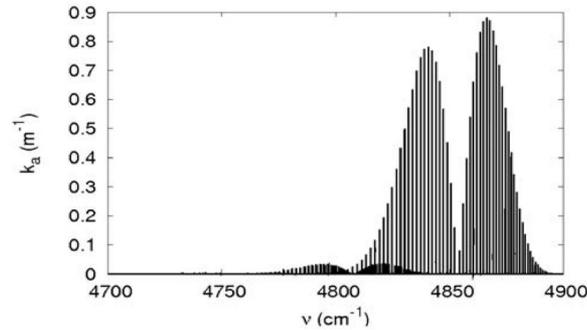
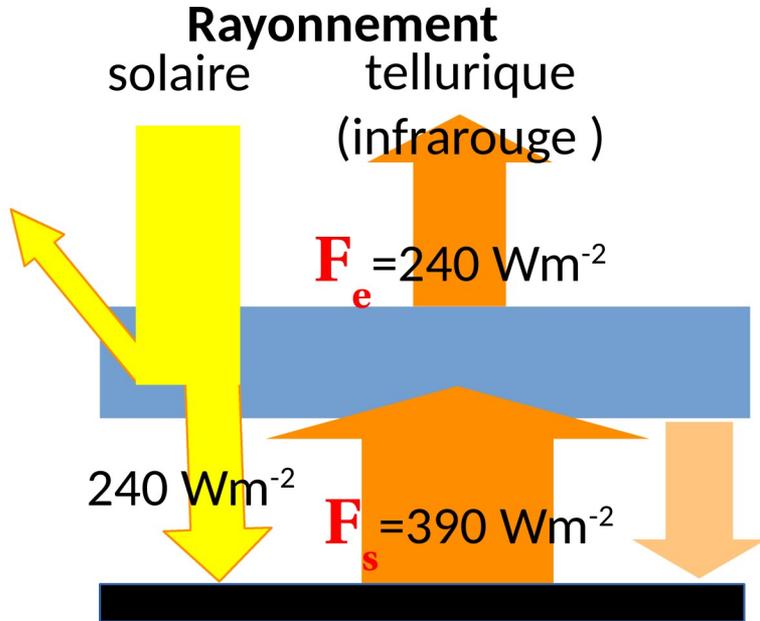
Si tout le rayonnement émis par la surface de la terre était perdu vers l'espace, la Terre perdrait beaucoup plus d'énergie que ce que l'on observe

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

$$G = F_s - F_e$$

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

Calcul de l'effet de serre



Propriétés radiatives

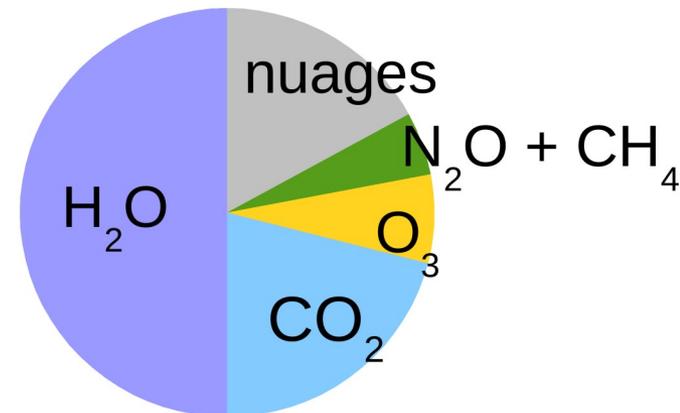


Profils atmosphériques

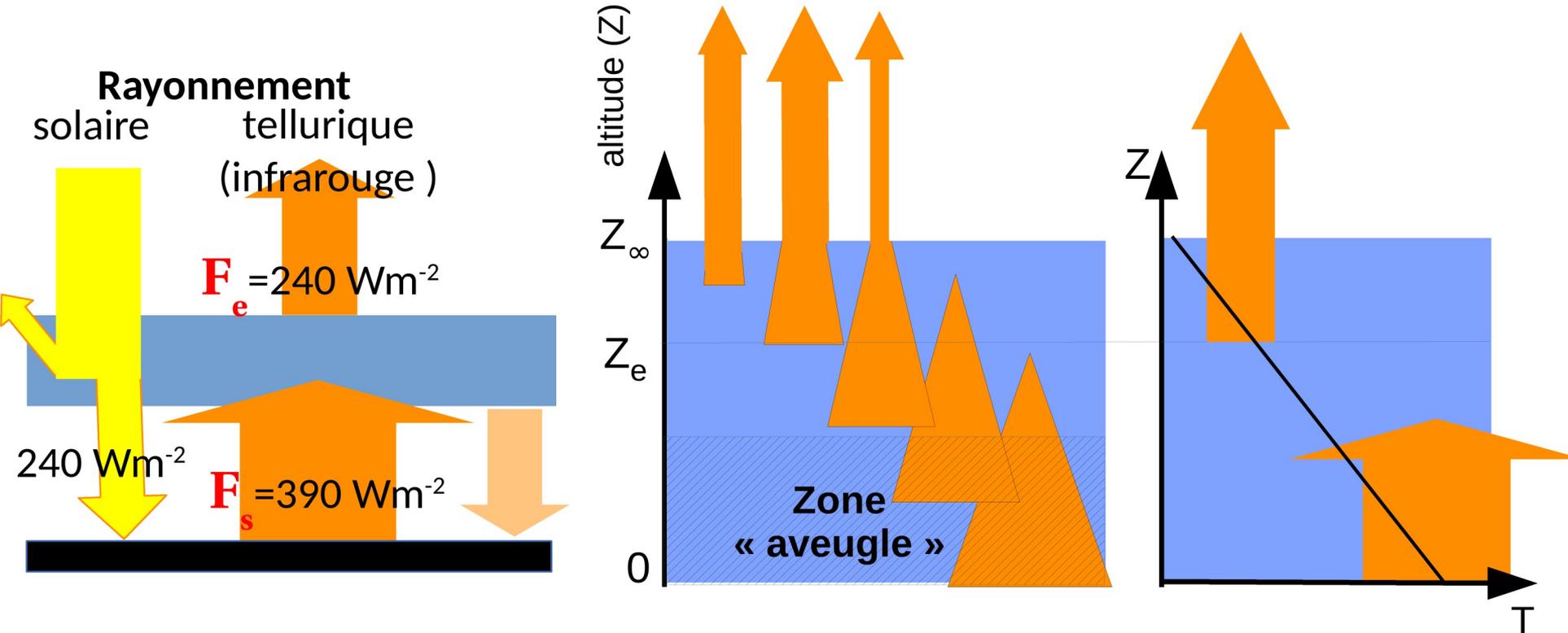
Calcul des flux radiatifs F et de l'effet de serre $G = F_s - F_e$

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

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



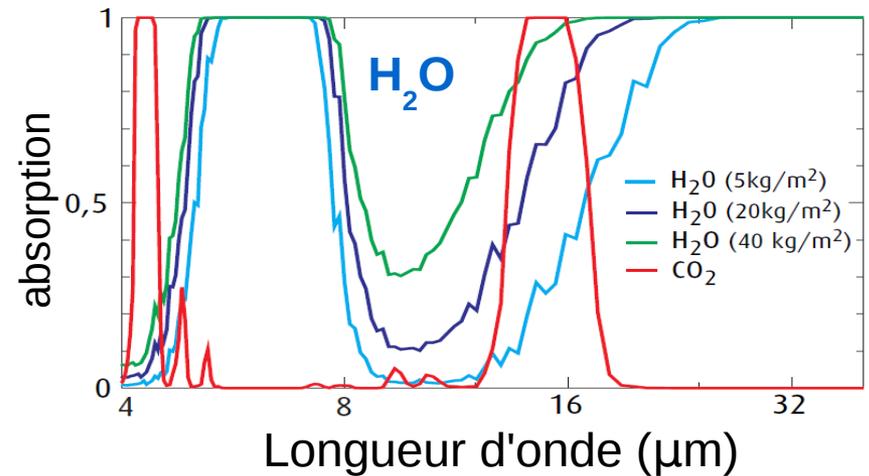
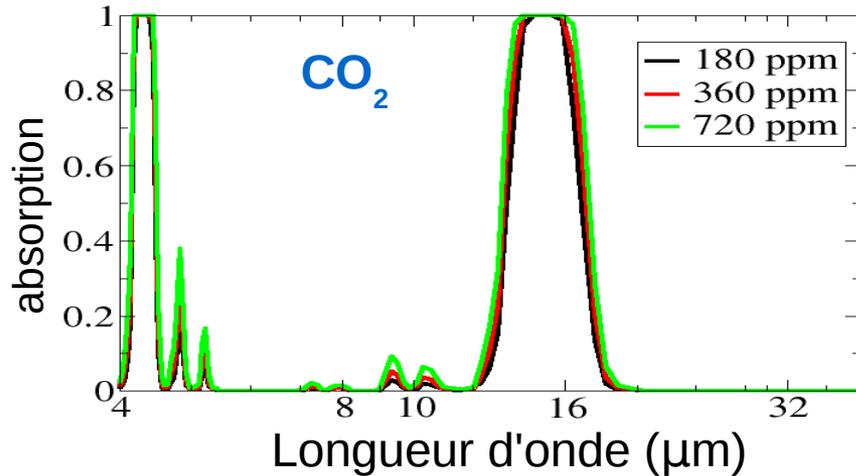
Interprétation de l'effet de serre



- L'effet de serre est dû au fait que le **rayonnement émis vers l'espace** est émis par l'atmosphère qui a une **température plus faible que la surface**
- Plus l'**altitude d'émission est élevée**, plus la température d'émission est faible, plus le **rayonnement émis est faible**, plus l'effet de serre est élevé (tant que l'on reste dans la troposphère)

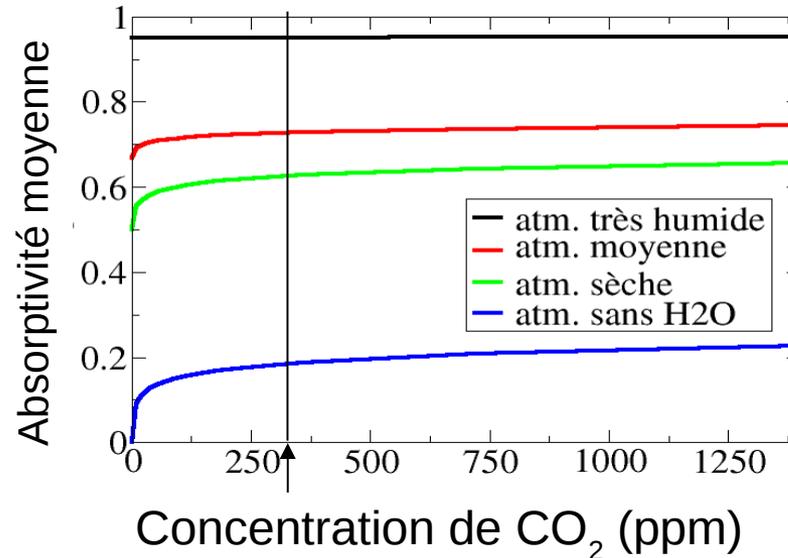
Absorption de l'atmosphère dans l'infrarouge

Absorption monochromatique

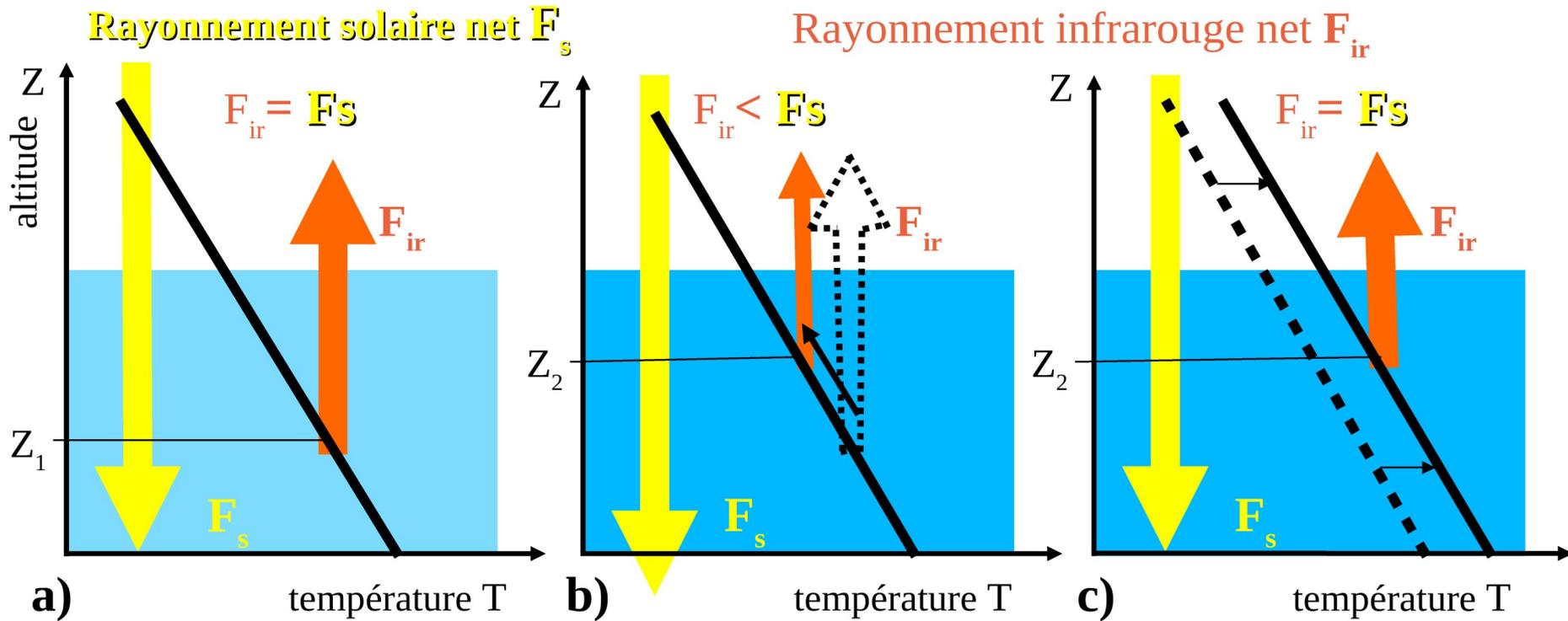


Absorption moyenne dans l'infrarouge

de l'atmosphère en fonction du CO_2 , et pour différentes valeurs de H_2O



Forçage et réponse

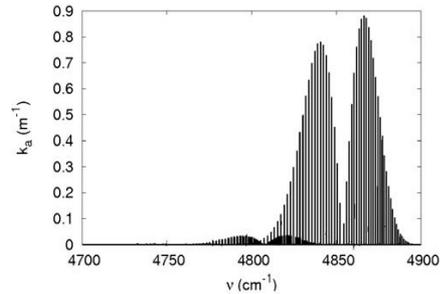


dT/dz fixé
par la convection

GES (CO_2) augmente,
 Z_e augmente, T_e diminue:
rayonnement sortant plus faible
 \Rightarrow **forçage radiatif**

$T(z)$ augmente:
retour à l'équilibre
 \Rightarrow **réponse** du
système climatique

Ce que nous apprennent les calculs radiatifs



Propriétés
radiatives des gaz

Caractéristiques
de l'atmosphère

Calcul des flux radiatifs et
de l'effet de serre

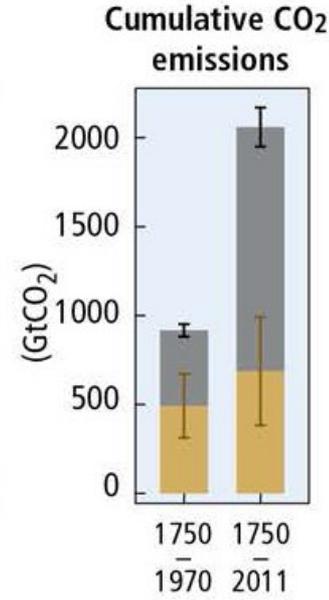
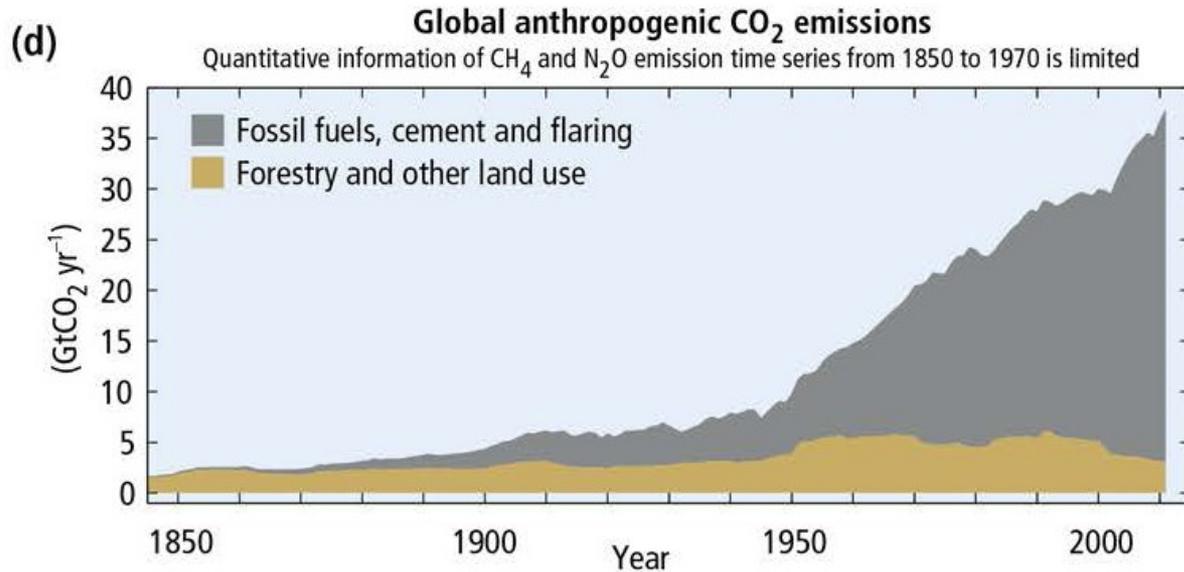
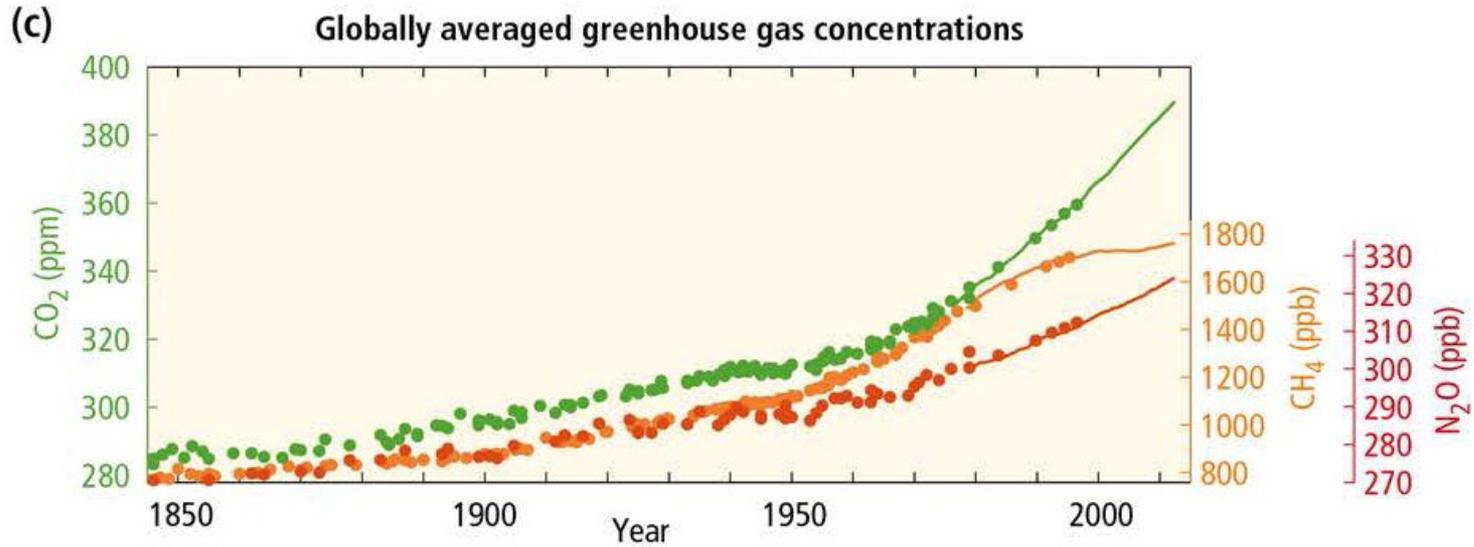
Pour un doublement de la concentration en CO_2 :

- L'effet de serre augmente de $\approx 3.7 \text{ W.m}^{-2}$
- La température augmente de $\approx 1.2 \text{ K}$, si rien d'autre ne change à part la température, si cette variation n'affecte que le rayonnement via la fonction de Planck
- Mais il existe de nombreuses rétroactions...

Plan

- I. Températures des planètes et effet de serre
- II. Simuler et analyser les changements climatiques récents
- III. Les projections futures
- IV. Projections futures au regard des changements passés
- V. Conclusions

Variations du climat et rôle des activités humaines



Emissions moyennes de CO₂ pour 2003-2012

1 GtC = 3.67 GtCO₂

8,6 ± 0,4 GtC y⁻¹



0,8 ± 0,5 GtC y⁻¹



+

4,3 ± 0,1 GtC y⁻¹
45%



2,6 ± 0,5 GtC y⁻¹
27%



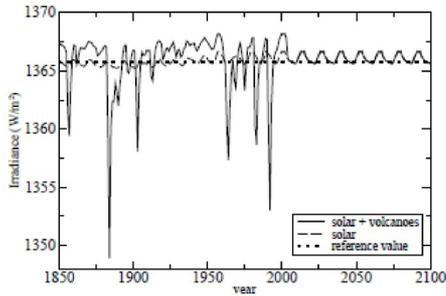
2,6 ± 0,8 PgC y⁻¹
27%



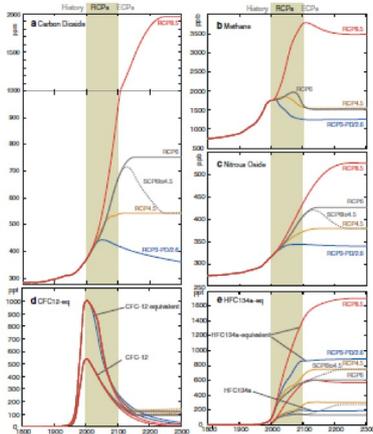
Le modèle couplé "Système Terre" de l'IPSL

Forçages naturels et anthropiques

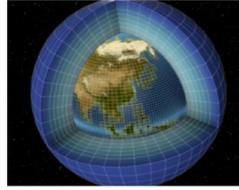
Soleil et volcans



Gaz à effet de serre ou chimiquement actifs



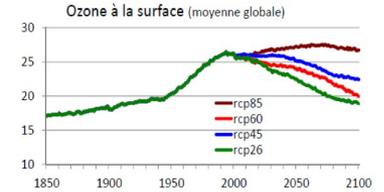
Concentration de CO₂



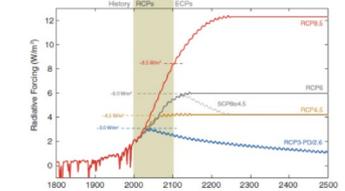
Modèle de climat

- 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

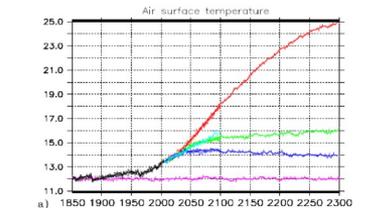
Composition de l'atmosphère



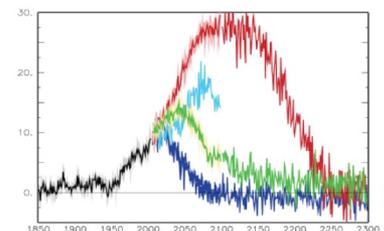
Forçage radiatif



Changement climatique

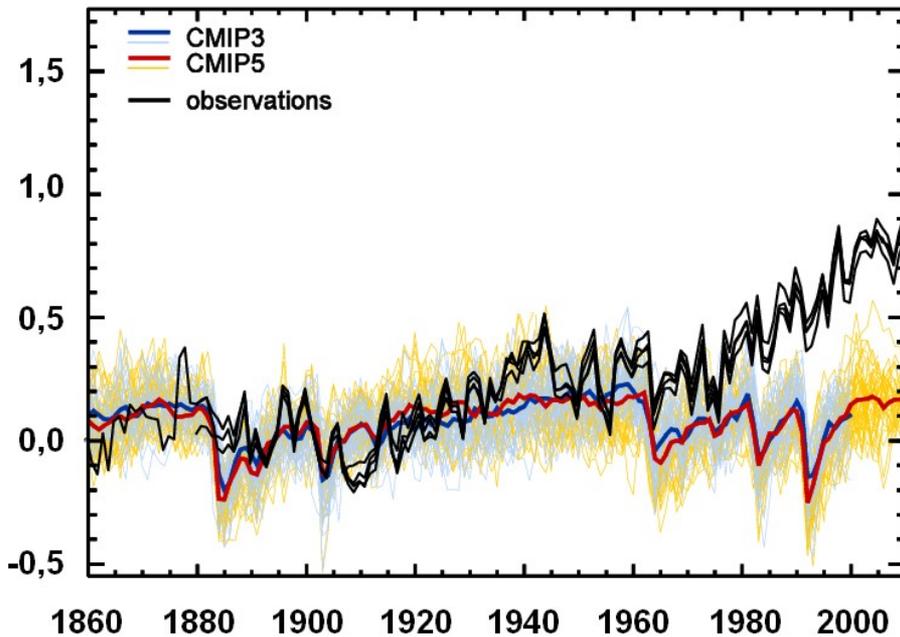


Émission autorisée de CO₂

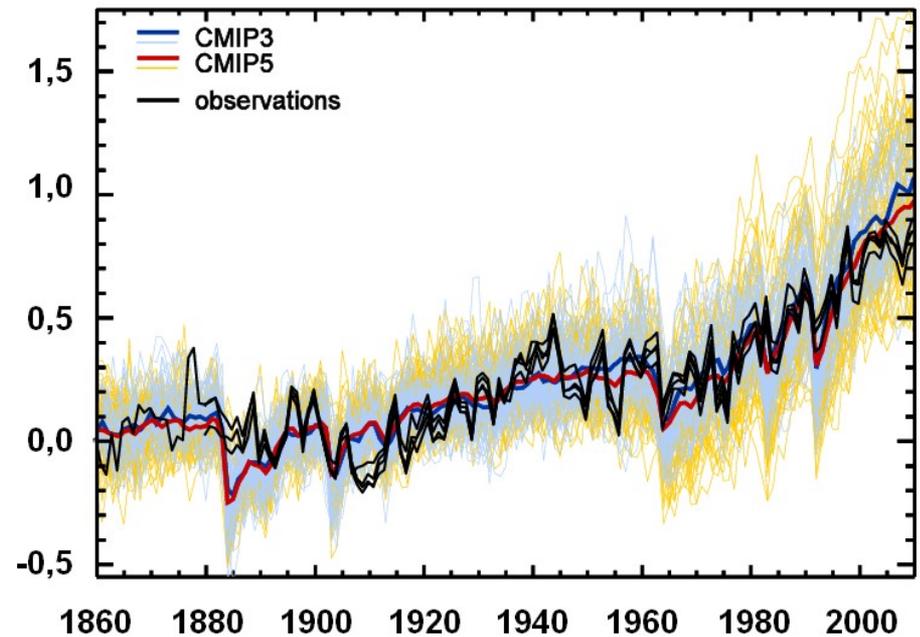


Évolution récente de la température de surface de la Terre

Simulations avec forçages naturels seulement



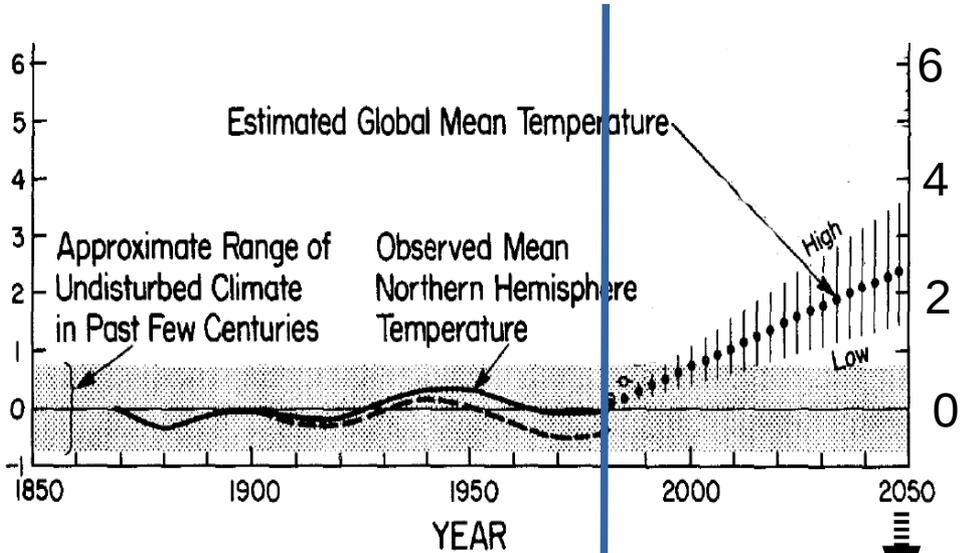
Simulations avec forçages naturels et anthropiques



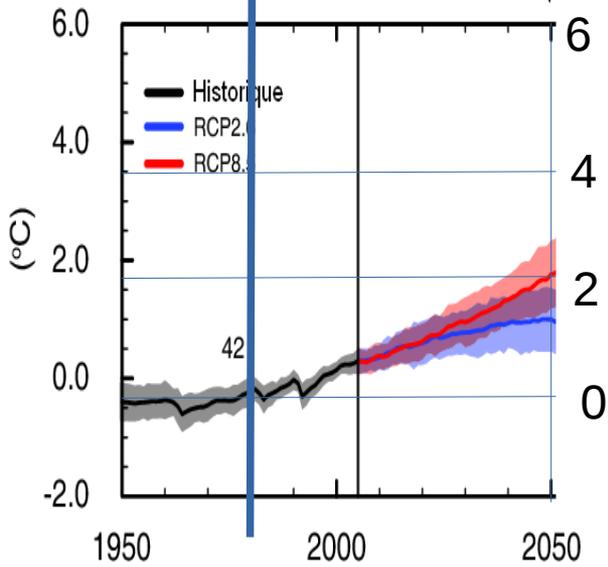
Plan

- I. Températures des planètes et effet de serre
- II. Simuler et analyser les changements climatiques récents
- III. Les projections futures
- IV. Projections futures au regard des changements passés
- V. Conclusions

Premières projections climatiques



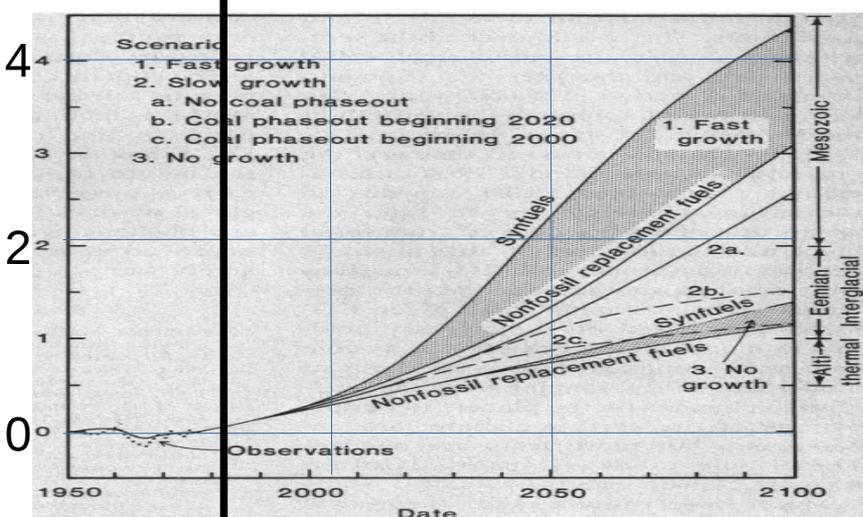
[Kellogg 1977]



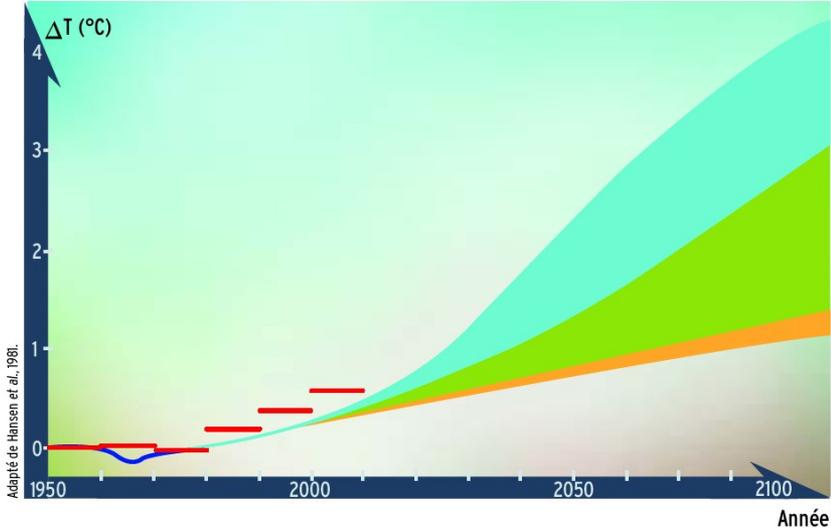
[GIEC 2013]

Premières projections climatiques

Accroissement de temp. (°C)

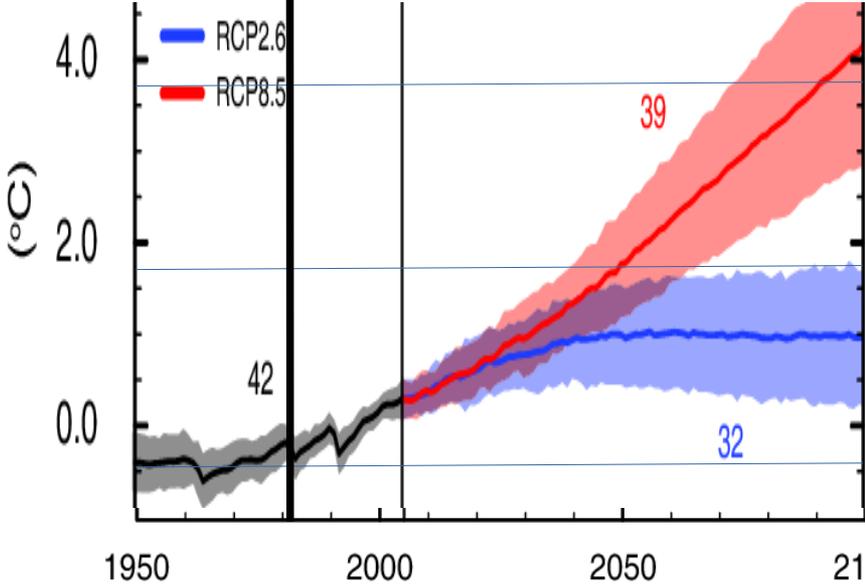


[Hansen et al. 1981]



Adapté de Hansen et al., 1981.

— Observations
(postérieures)
Moyennes sur 10 ans

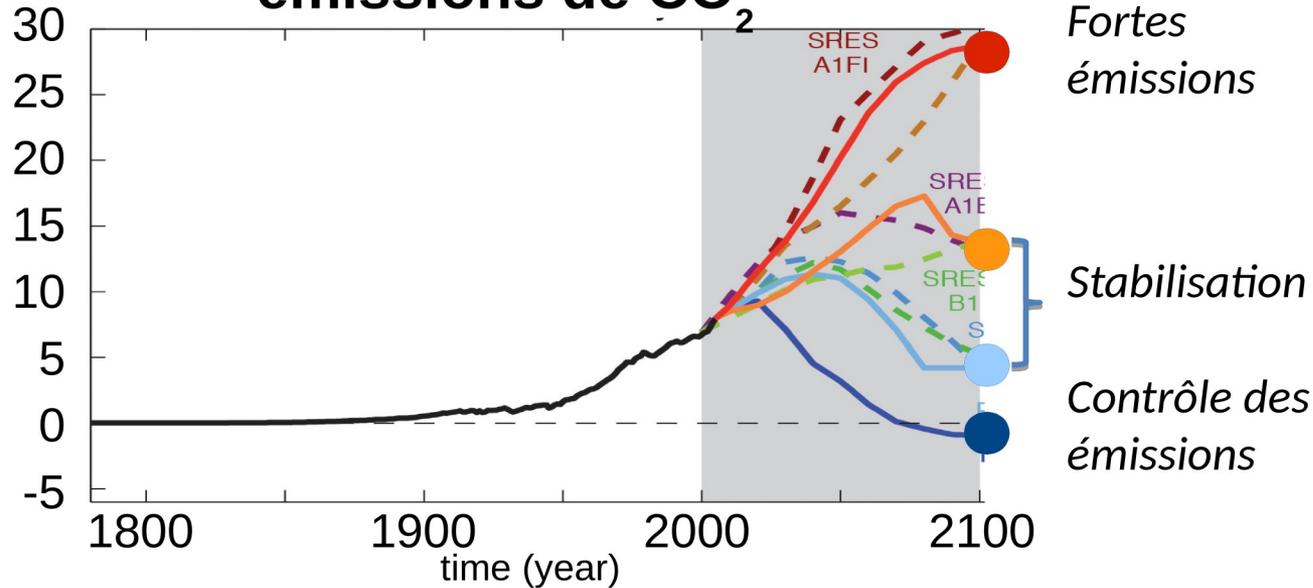


[GIEC 2013]

Projections, basées sur des scénarios

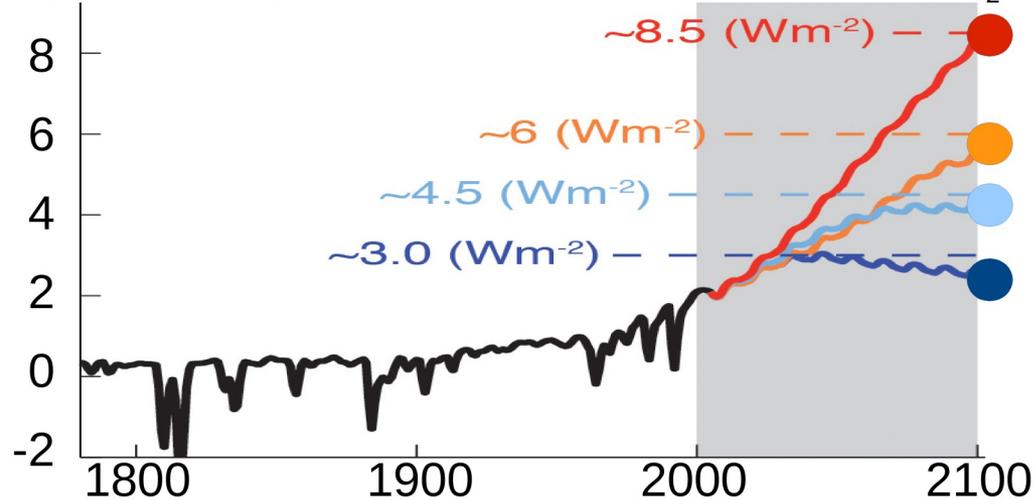
(GtC / an)

émissions de CO₂



(W.m⁻²)

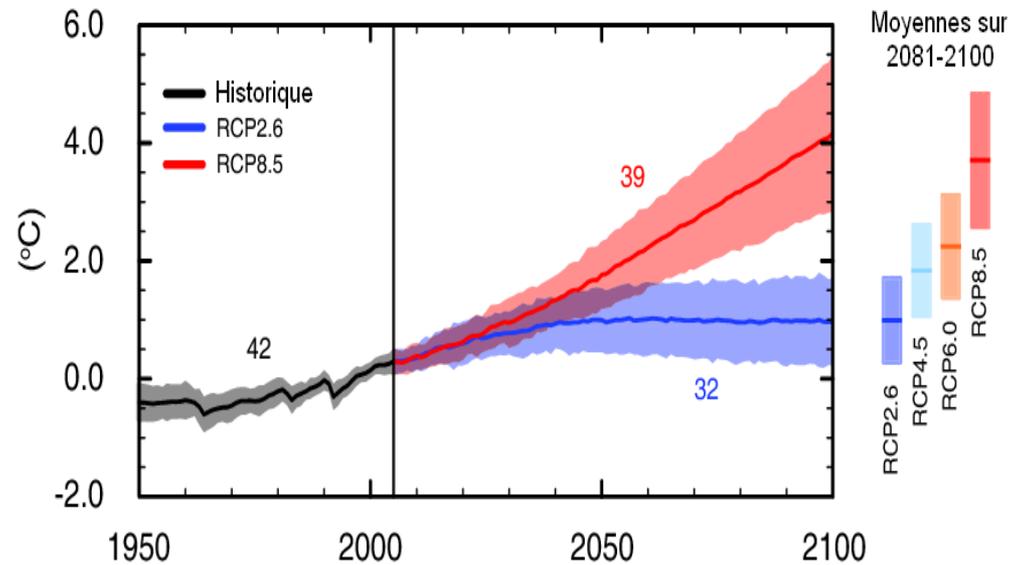
Forçage radiatif approché [CO₂ + autres]



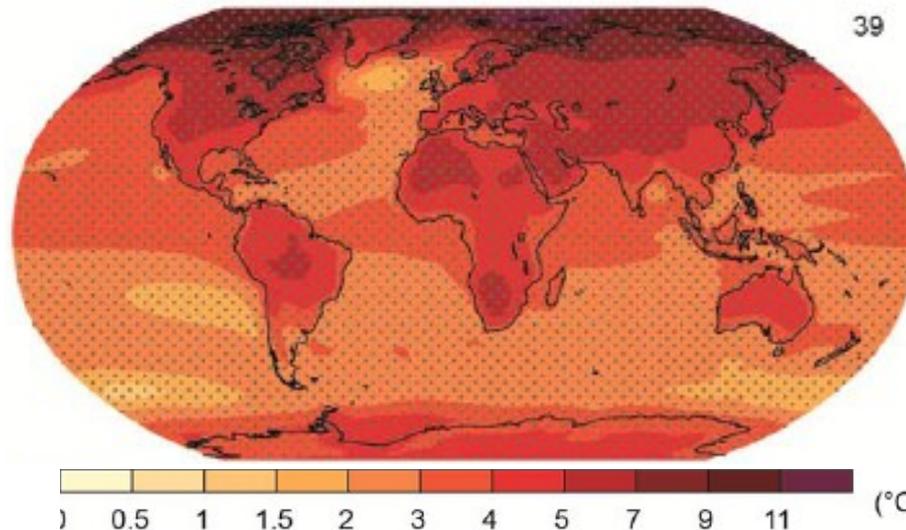
[GIEC, 2013]

Température de surface

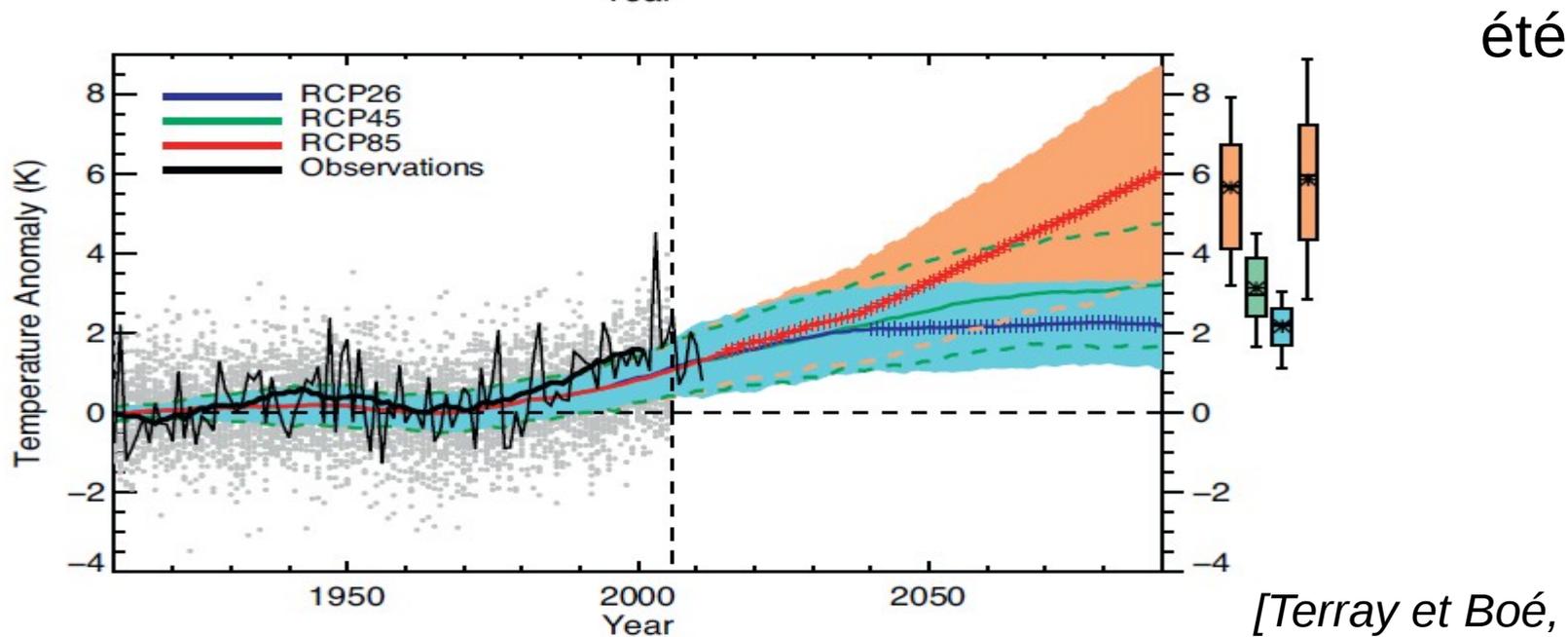
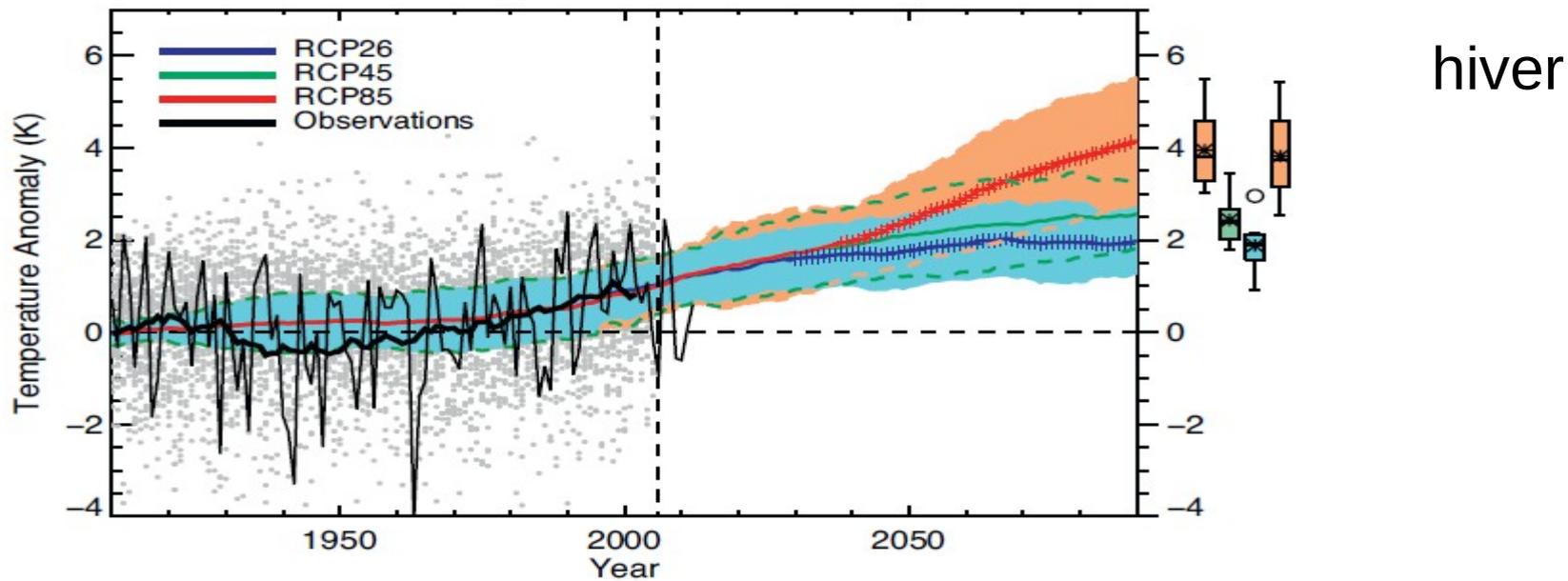
Moyenne globale
1950 à 2100
(40 modèles CMIP5)



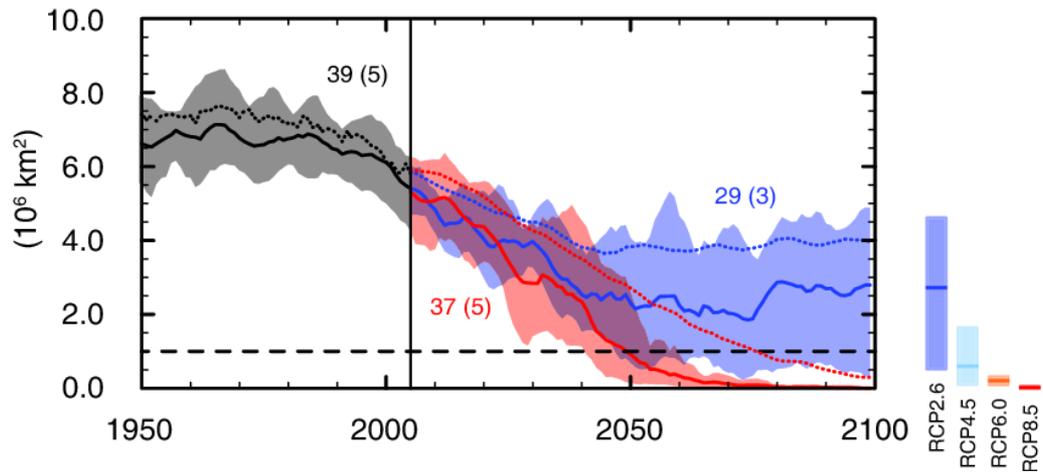
En 2100,
scénario RCP8.5
(39 modèles CMIP5)



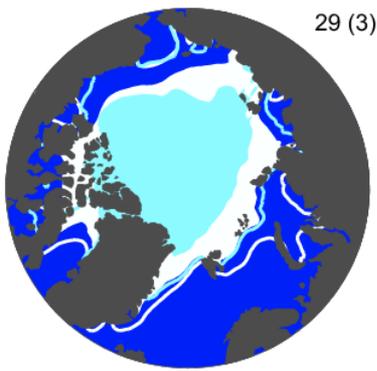
Evolution de la température en France



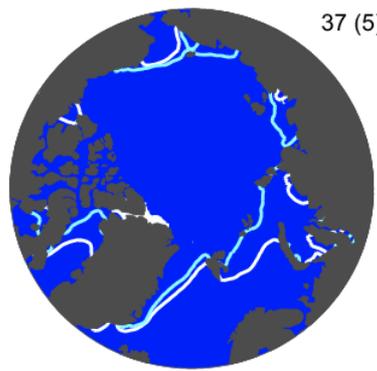
Changements d'extension de la banquise de l'hémisphère nord septembre (minimum d'extension)



RCP2.6

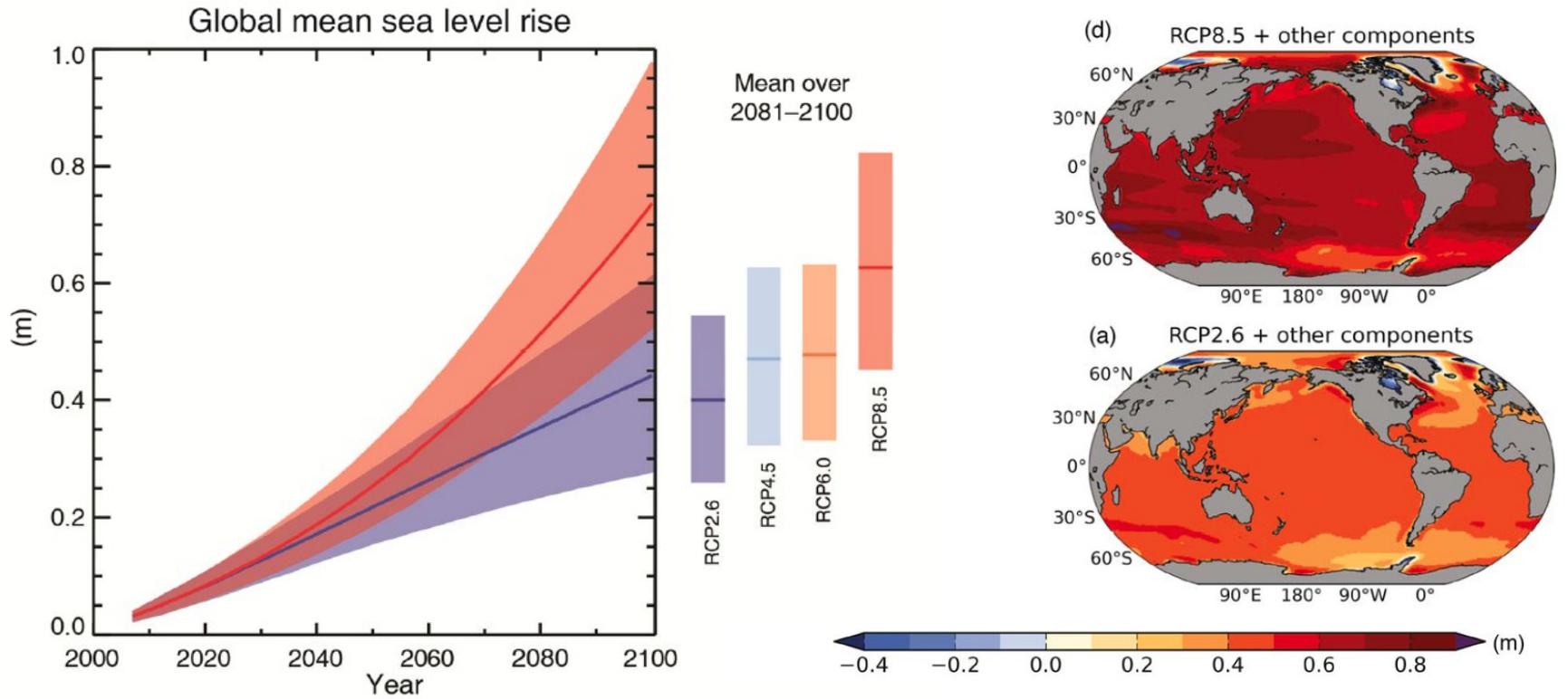


- CMIP5 multi-model average 1986–2005
- CMIP5 multi-model average 2081–2100
- CMIP5 subset average 1986–2005
- CMIP5 subset average 2081–2100



RCP8.5

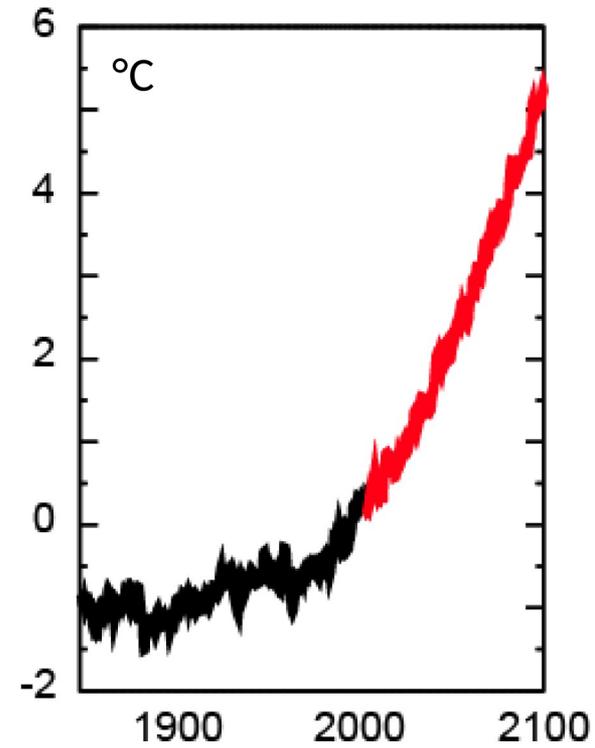
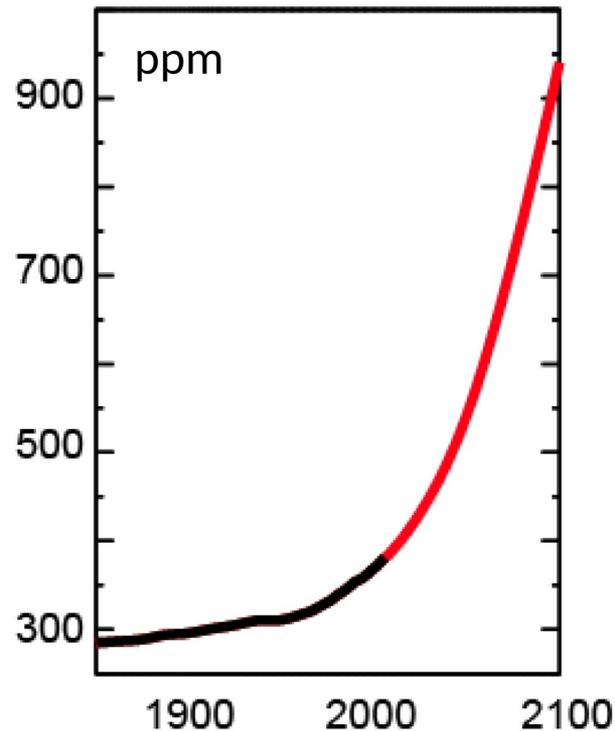
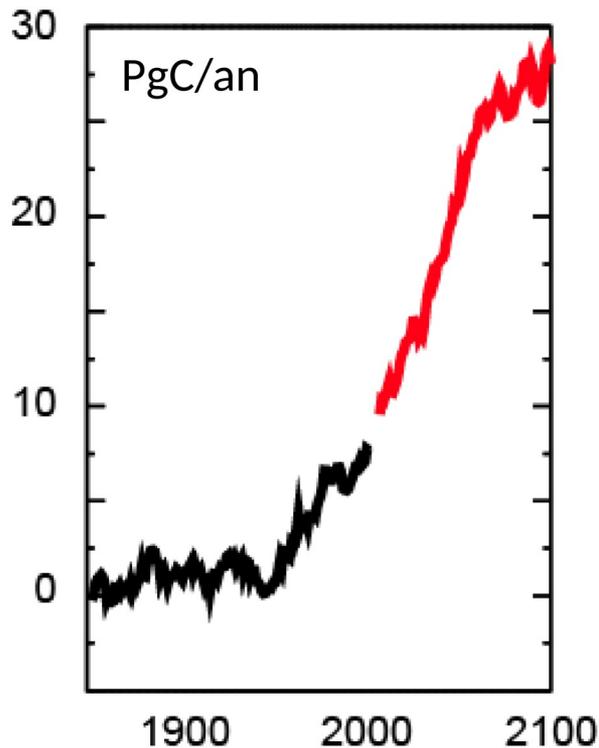
Changement du niveau des mers



[GIEC, 2013]

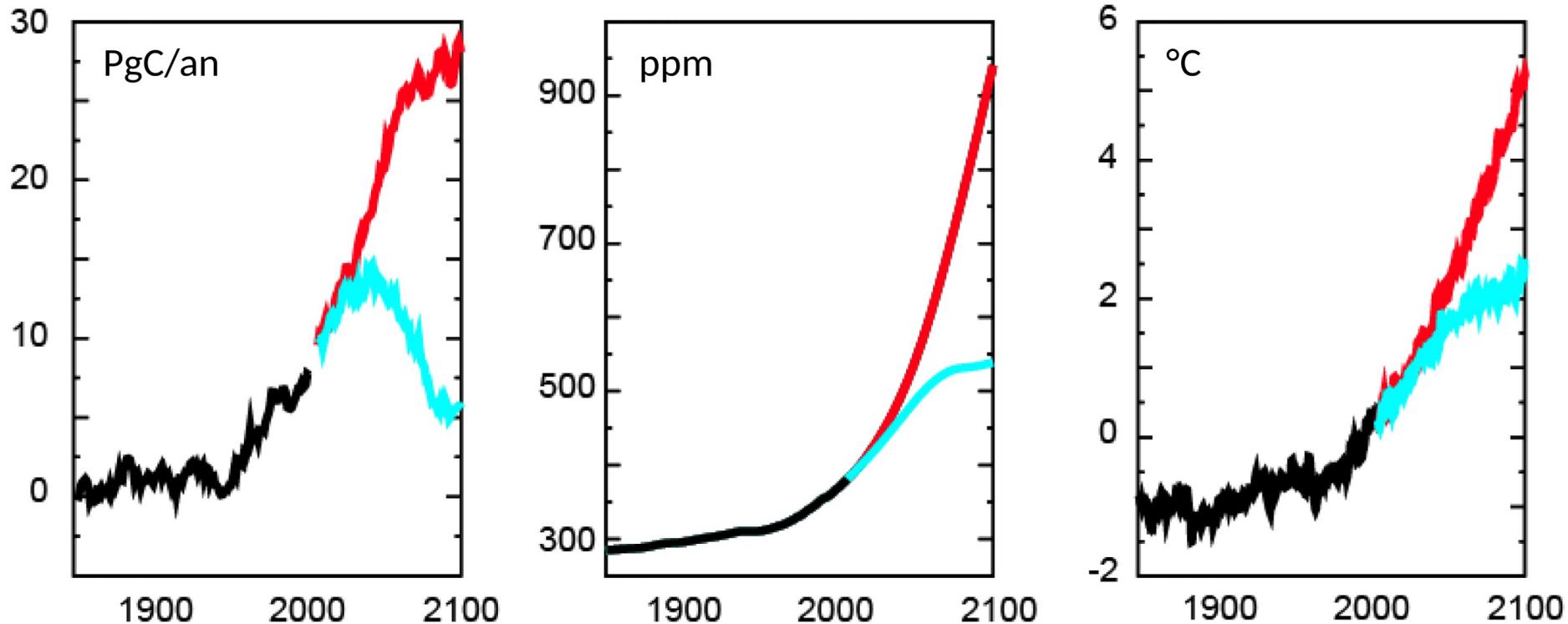
Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO₂, Température moyenne

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



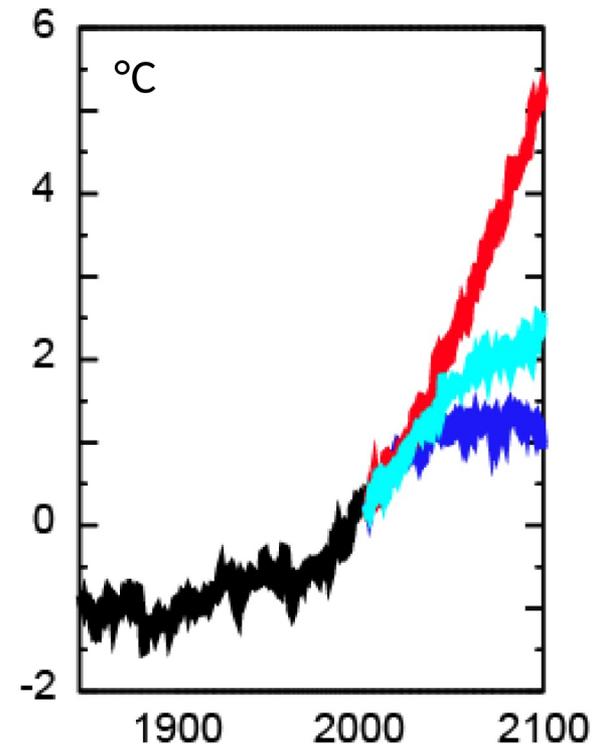
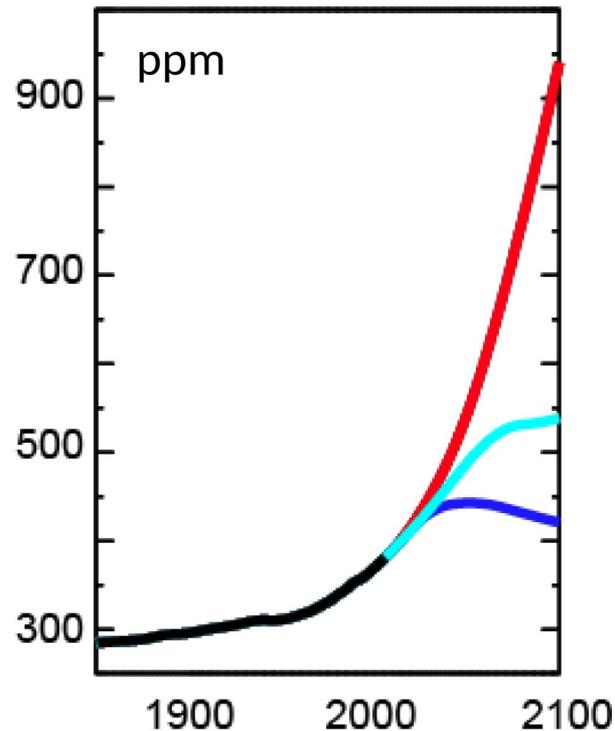
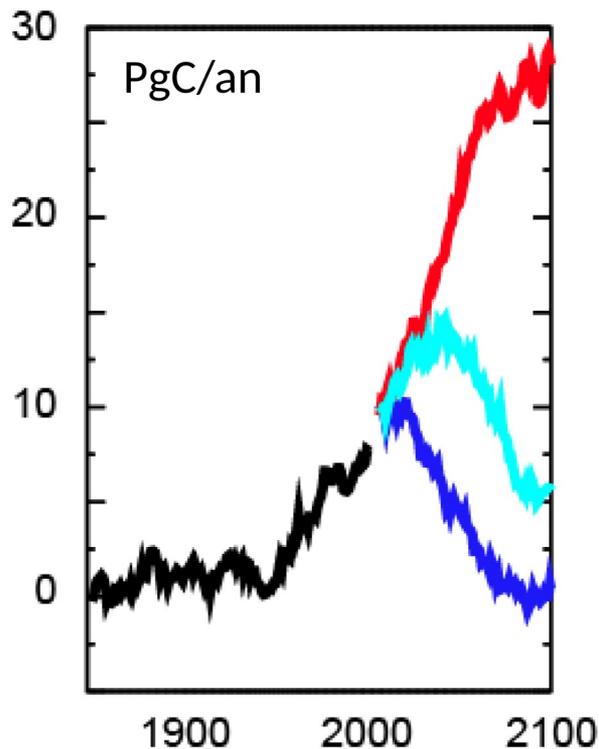
Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO₂, Température moyenne

- >> **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 continent à augmenter



Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO₂, Température moyenne

- >> **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 continent 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.

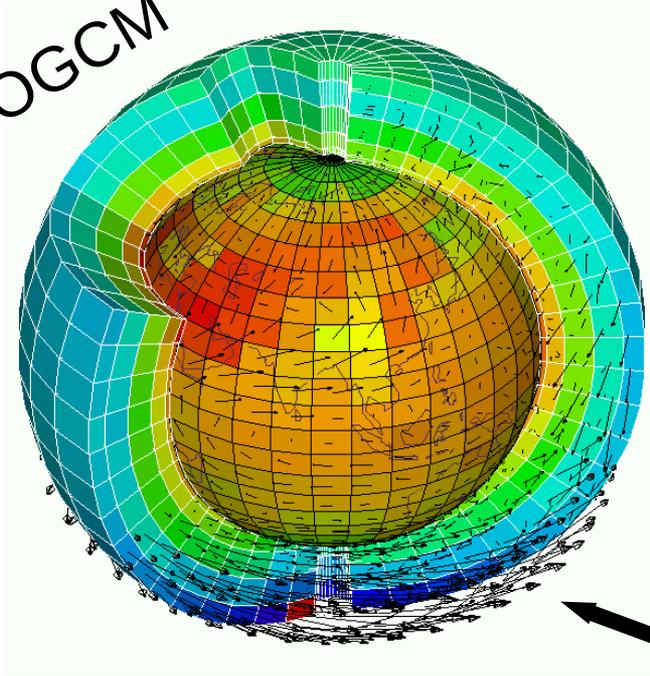


Plan

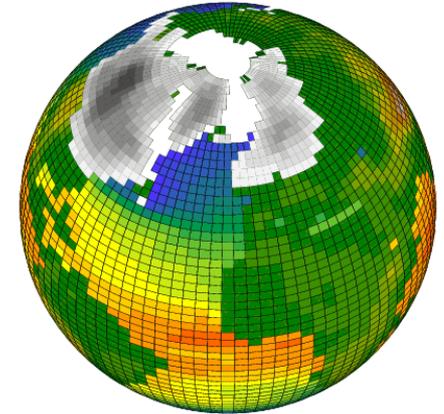
- I. Températures des planètes et effet de serre
- II. Simuler et analyser les changements climatiques récents
- III. Les projections futures
- IV. Projections futures au regard des changements passés
- V. Conclusions

Simulation du climat du Dernier Maximum Glaciaire

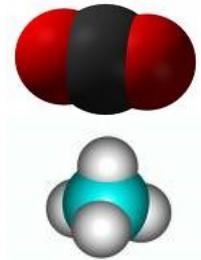
AOGCM



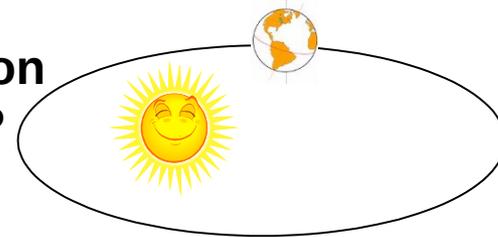
Calottes
glaciaires



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



Insolation
21ky BP



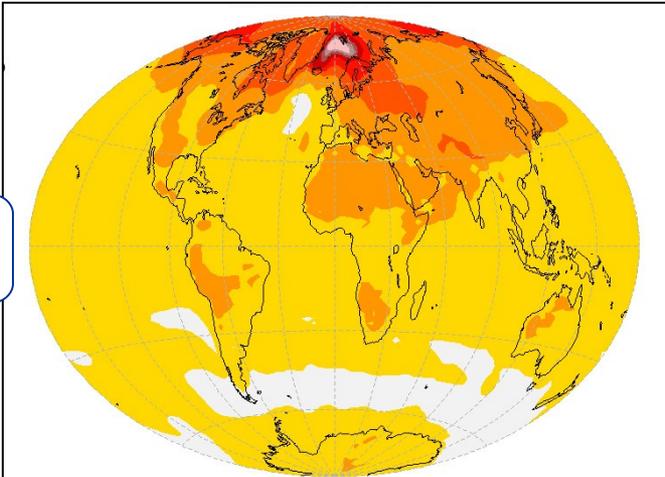
Forçage en gaz à effet de serre ~ climat futur
Autre forçage majeur: calottes glaciaire

Changement de température de surface

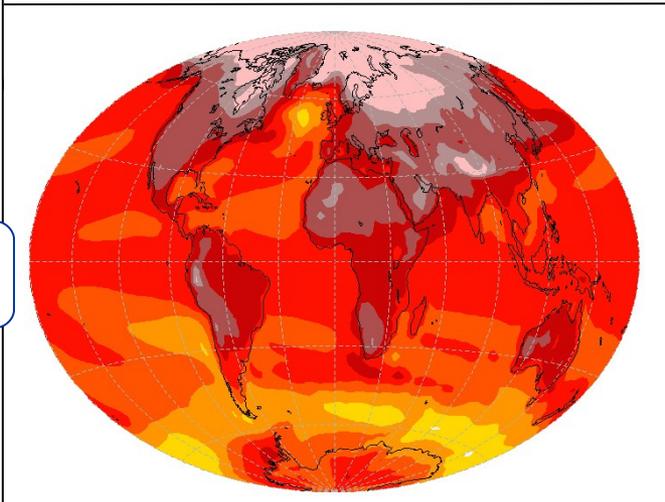
Différence entre **2100** et **1990**

IPSL-CM5A-LR

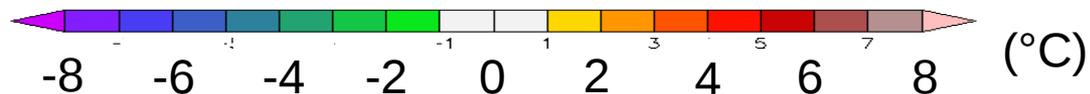
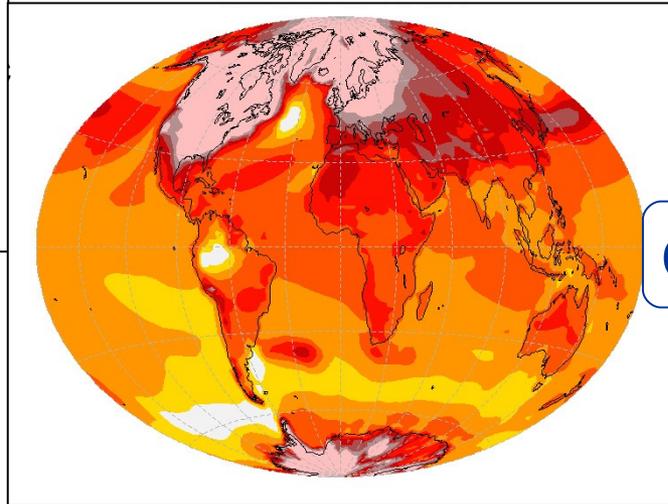
RCP2.6



RCP8.5



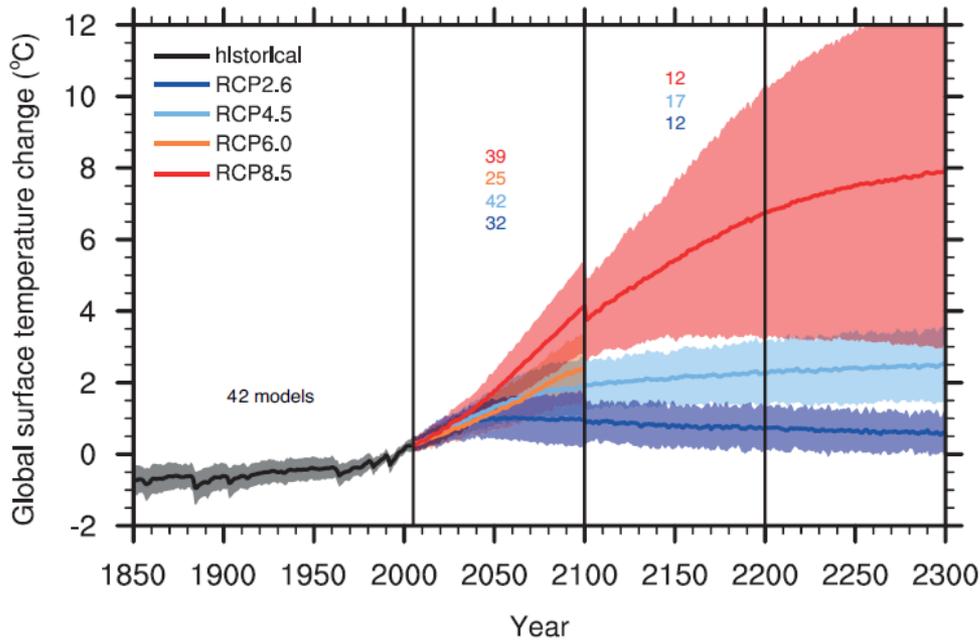
Glaciaire



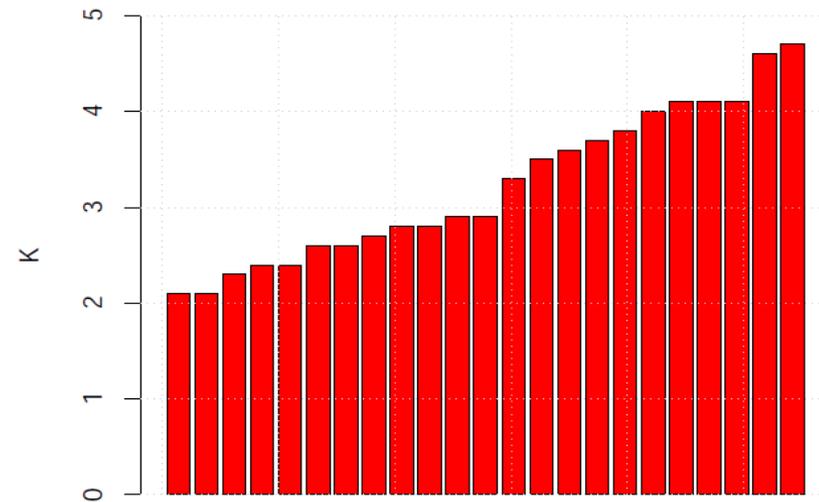
Amplitude du réchauffement Sensibilité climatique

Accroissement de la moyenne des températures de surface

Pour des scénarios « réalistes »

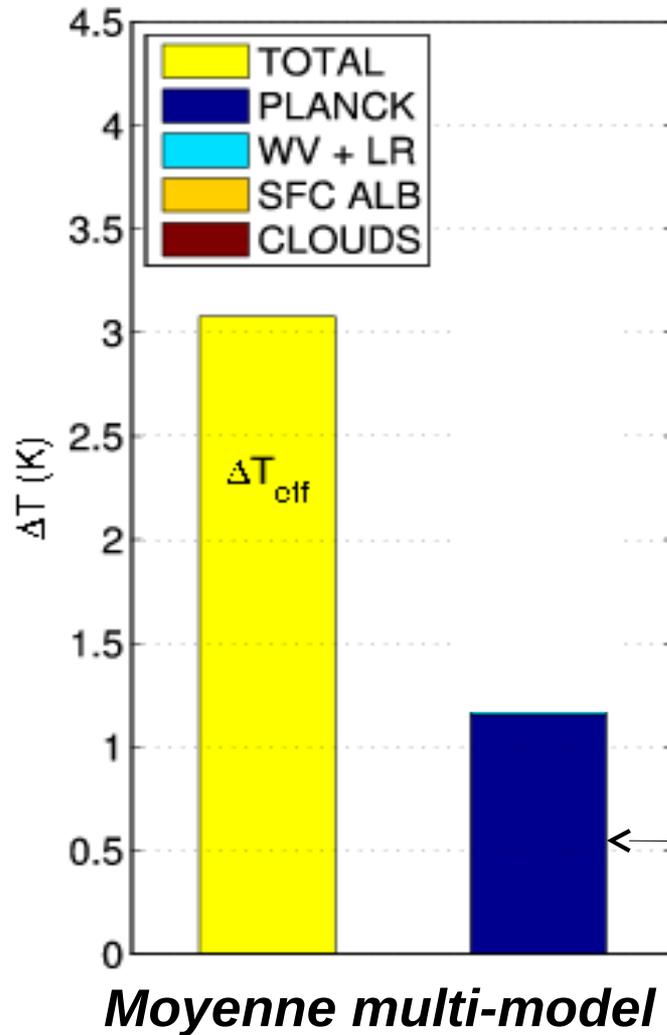


Pour un doublement de CO₂



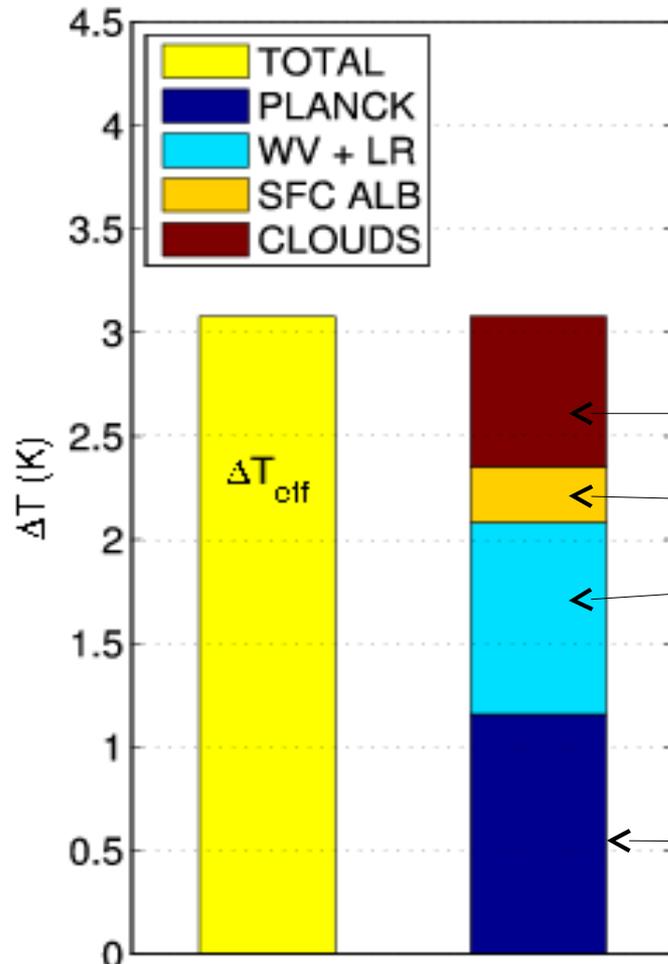
CMIP5 models

Changement de température à l'équilibre pour un doublement de CO₂



Réponse directe au forçage
(réponse de Planck)

Changement de température à l'équilibre pour un doublement de CO₂



Moyenne multi-model

Rétroactions climatiques:
Réponses indirectes aux forçages

- Nuages (fortes sources d'**incertitude**)
- Neige et glace (albédo de surface)
- Vapeur d'eau

Réponse directe au forçage
(réponse de Planck)

Contraindre les bornes de la sensibilité climatique

Applying reasoning by refutation to storylines for high and low sensitivities

Storylines for low sensitivities

Time (advancement of knowledge)

Storylines for high sensitivities

- ✘ Implausible
- ? Unclear
- ✓ Plausible

ECS <1.0 K

Near zero AF and negligible present day PE
 LGM tropics only slightly (~1K) cooler than present
 PETM temperature reconstructions erroneously warm
 Atmosphere dries and becomes cloudier with warming

ECS <1.5 K

Modest AF (-0.5 Wm^{-2}) and small present day PE
 LGM tropics not much (1.5 K) cooler than present
 Feedback decreases with warming or large PETM forcing
 Negative cloud feedback

ECS <2.0 K

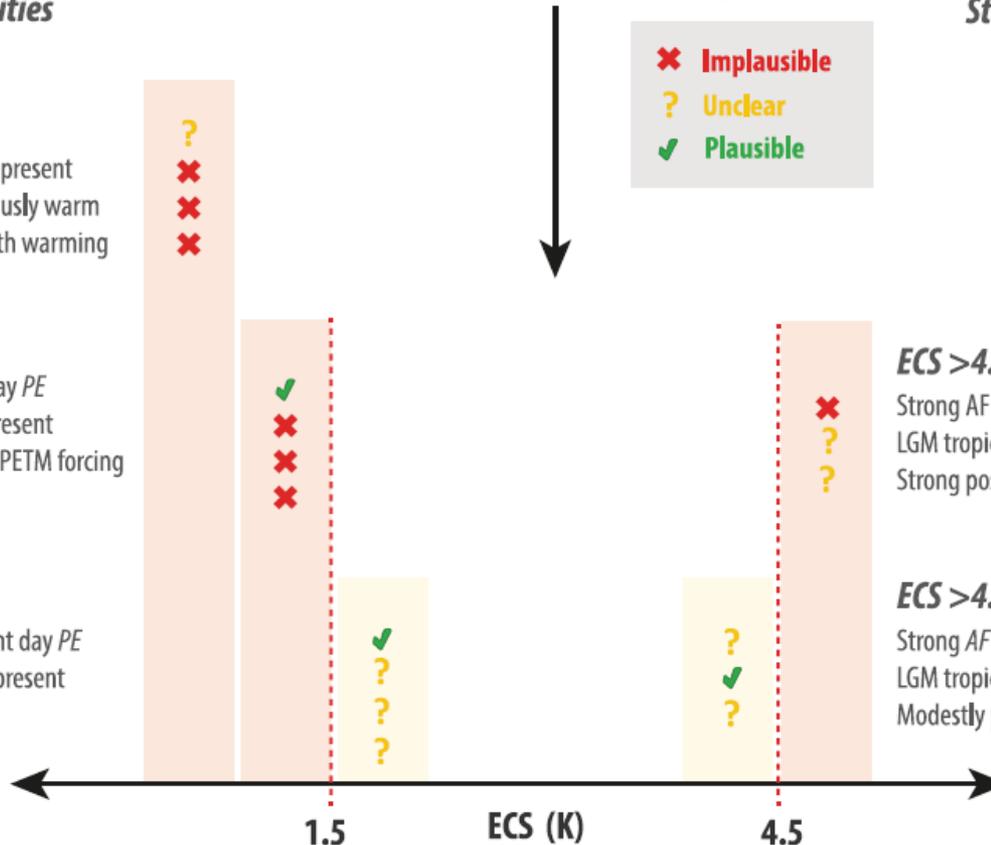
Modest AF and only modest (<50%) present day PE
 LGM tropics not more than 2 K cooler than present
 Very large PETM forcing
 Cloud feedback near zero but positive

ECS >4.5 K

Strong AF ($<-1.5 \text{ Wm}^{-2}$) and strong (>50%) present day PE
 LGM tropics more than 3 K cooler than present
 Strong positive cloud feedback

ECS >4.0 K

Strong AF and modest present day PE
 LGM tropics more than ~ 2.5 K cooler than present
 Modestly positive cloud feedback



AF (Aerosol Radiative Forcing); PE (Pattern Effect); LGM (Last glacial maximum, 21 kya; PETM (Paleocene Eocene Thermal Maximum)

[Stevens et al., EF, 2016]

Conclusion

- L'**accroissement de la température** globale et le **rôle dominant des activités humaines** sont maintenant bien établis, compris
- Les **changements climatiques futures seront de grandes amplitudes**, aux regard des changements climatiques passés, si on « laisse faire »
- Le **forçage radiatif** et les **rétroactions** permettent de comparer des perturbations différentes ainsi que la réponse du système climatique
- Ce sont des **propriétés émergentes** des modèles climatiques. Elles ne sont pas prescrites à priori
- Les forçages **sont en général amplifiés** par rapport à un calcul radiatif simple du fait des **rétroactions climatiques**
- Les **rétroactions positives amplifient** les perturbations mais ne produisent pas forcément des effets d'emballement
 - Des **sensibilités climatiques, trop faibles** ($< 1.5^{\circ}\text{C}$) ou **trop fortes** ($>4.5^{\circ}\text{C}$) **ne sont pas compatibles** avec nos connaissances actuelles

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, and there are several large, white, billowing clouds scattered across the upper half of the frame. The overall scene is serene and majestic.

Merci de votre attention