

Changement climatique : en route vers l'inconnu ?

Jean-Louis Dufresne

jean-louis.dufresne@lmd.ipsl.fr

*Laboratoire de Météorologie Dynamique (CNRS, UPMC, ENS, X)
Institut Pierre Simon Laplace.*



UPMC
UNIVERSITÉ PARIS
SAINT-GERMAIN



UNIVERSITÉ DE
VERSAILLES
ST-QUENTIN-EN-YVELINES



Plan

- Les bases physiques du climat et de l'effet de serre
- Les modèles numériques de climat
- Les changements climatiques futurs

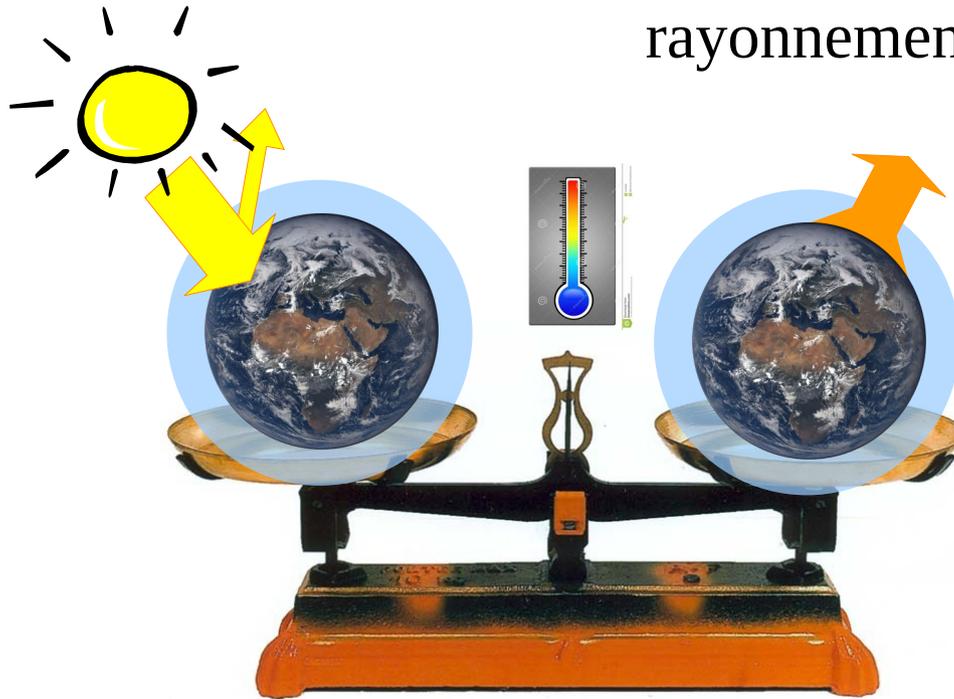
Il était une fois...

Naissance de la physique du climat

La température des planètes résulte de l'équilibre entre

l'énergie gagnée par
absorption du solaire

et l'énergie perdue par
émission de
rayonnement infrarouge



Joseph Fourier
(1768-1830)

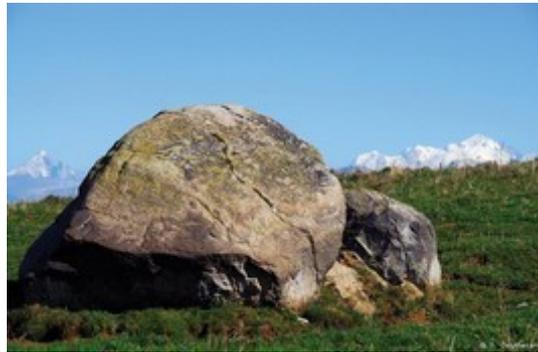
Tout changement du bilan d'énergie modifie la température de la Terre

La découverte des variations passées

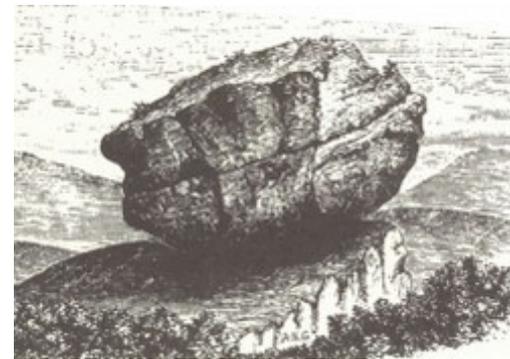
Hypothèse des périodes glaciaires (1840-1860)



Jean de
Charpentier

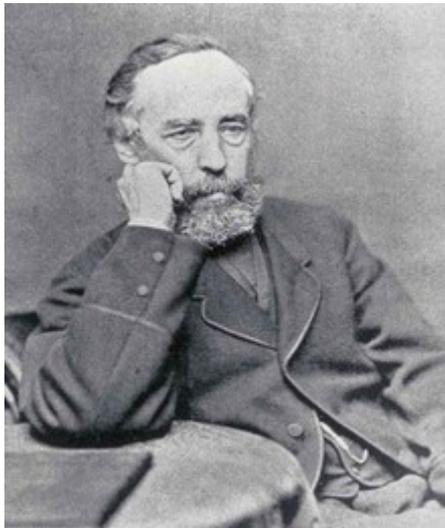


Blocs erratiques



Louis Agassiz

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



James Croll

Svante Arrhenius



1970-1980 : l'homme pourrait changer le climat !

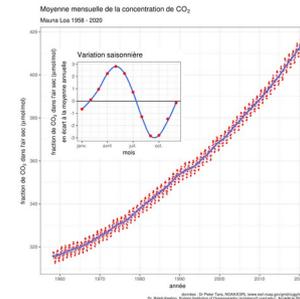
Mesure de la concentration de CO₂ : elle augmente



Roger Revelle



Charles Keeling



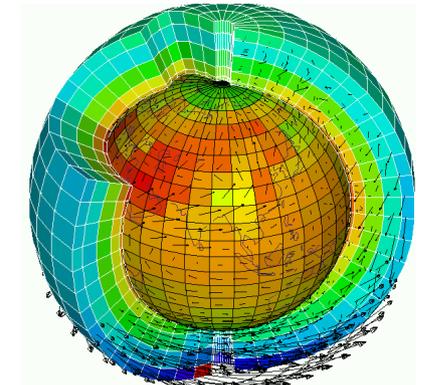
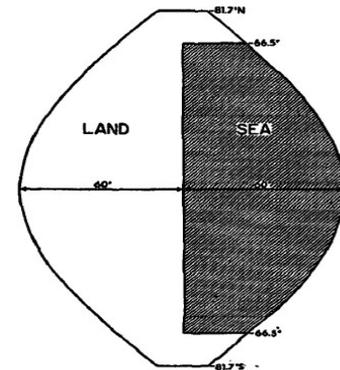
Modélisation numérique du climat : circulation atmosphérique, calcul radiatif...



Jule Charney



Syukuro Manabe



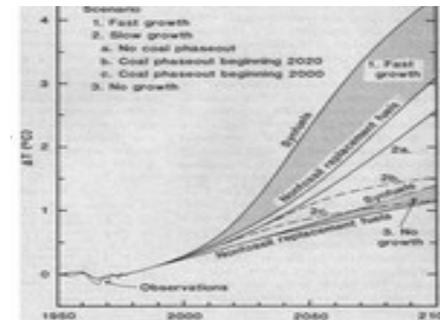
Première projection climat futur



James Hansen



John Mitchell



Qu'est ce qui peut modifier le climat ?

La température des planètes résulte de l'équilibre entre

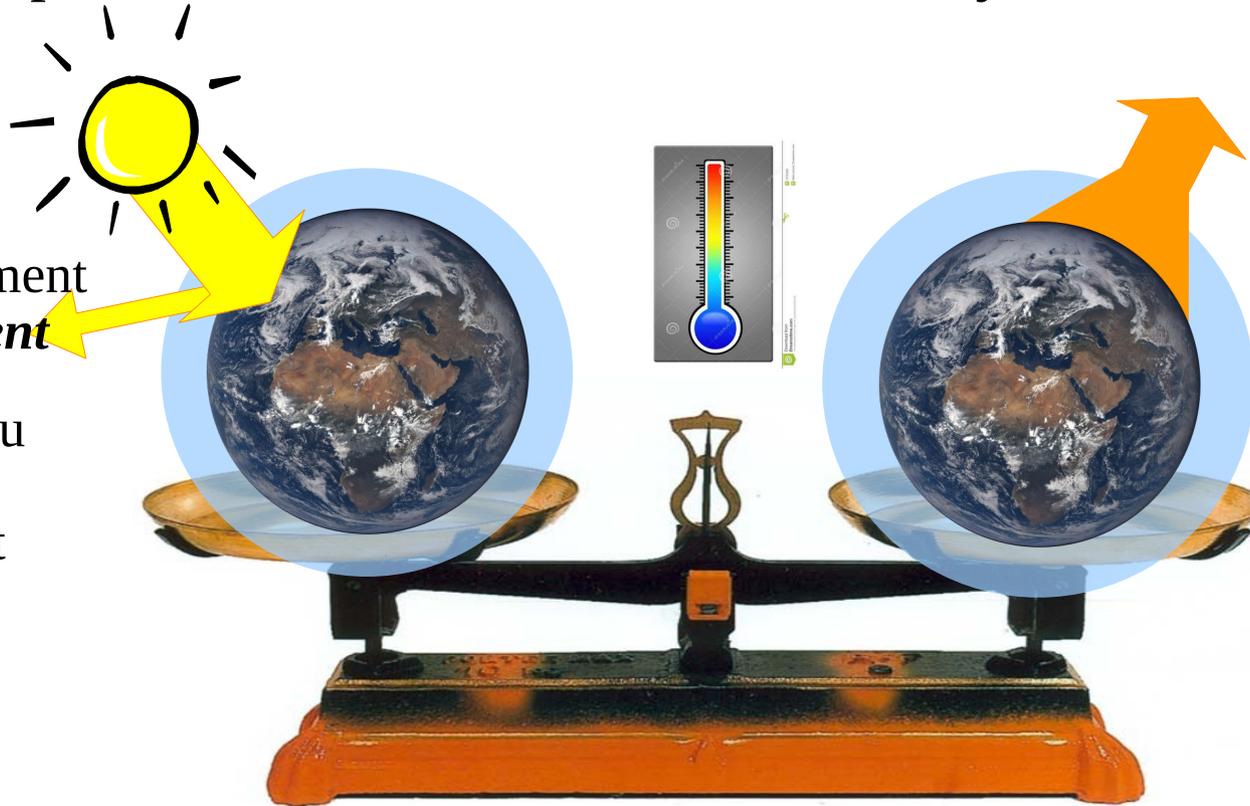
l'énergie gagnée par absorption du solaire

et l'énergie perdue par émission de rayonnement infrarouge

dépend

- du rayonnement **solaire incident**

- la fraction du rayonnement solaire qui est réfléchi : **l'albédo planétaire**

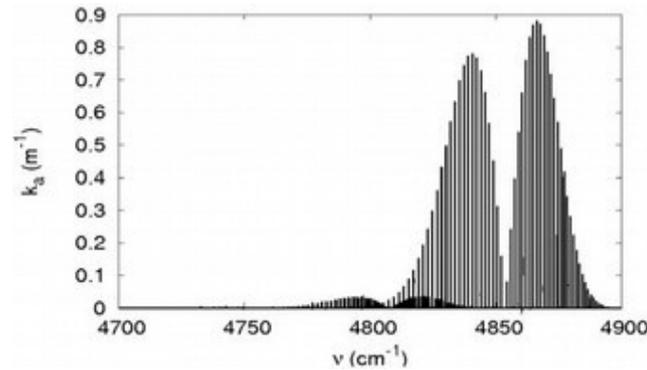
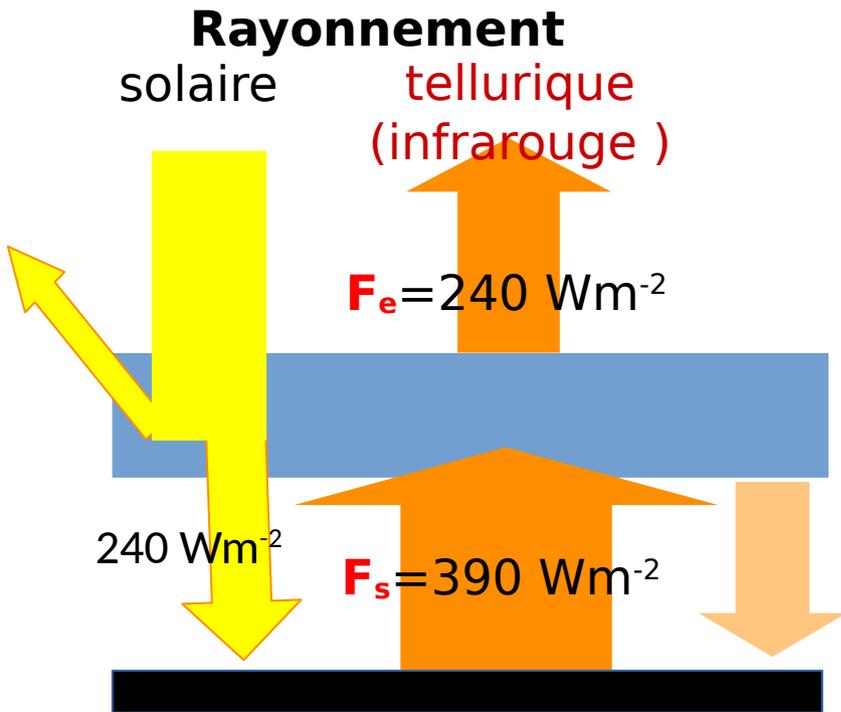


dépend

- du rayonnement infrarouge émit par la surface, donc de **sa température**

- de la différence entre le rayonnement infrarouge émit par la surface et celui perdu vers l'espace : **l'effet de serre**

L'effet de serre sur Terre



Propriétés radiatives

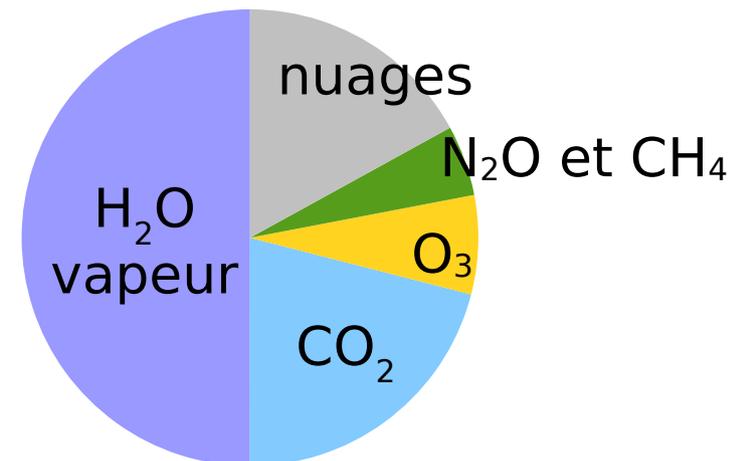


Profils atmosphériques

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

Effet de serre sur Terre : (W.m⁻²) (%)

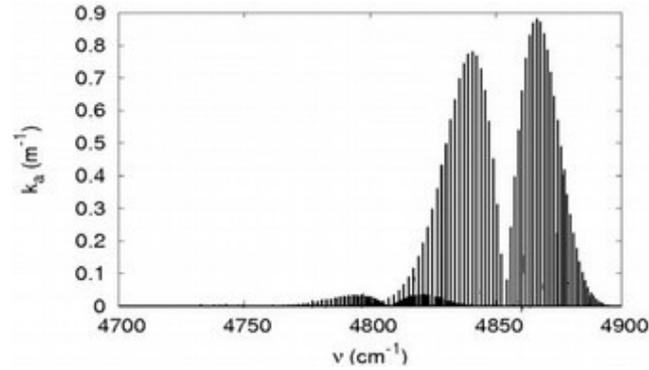
• Total	150	100
• Vapeur d'eau	75	50
• CO ₂	32	21
• Ozone	10	7
• N ₂ O et CH ₄	8	5
• Nuages	25	17



L'effet de serre sur Terre



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



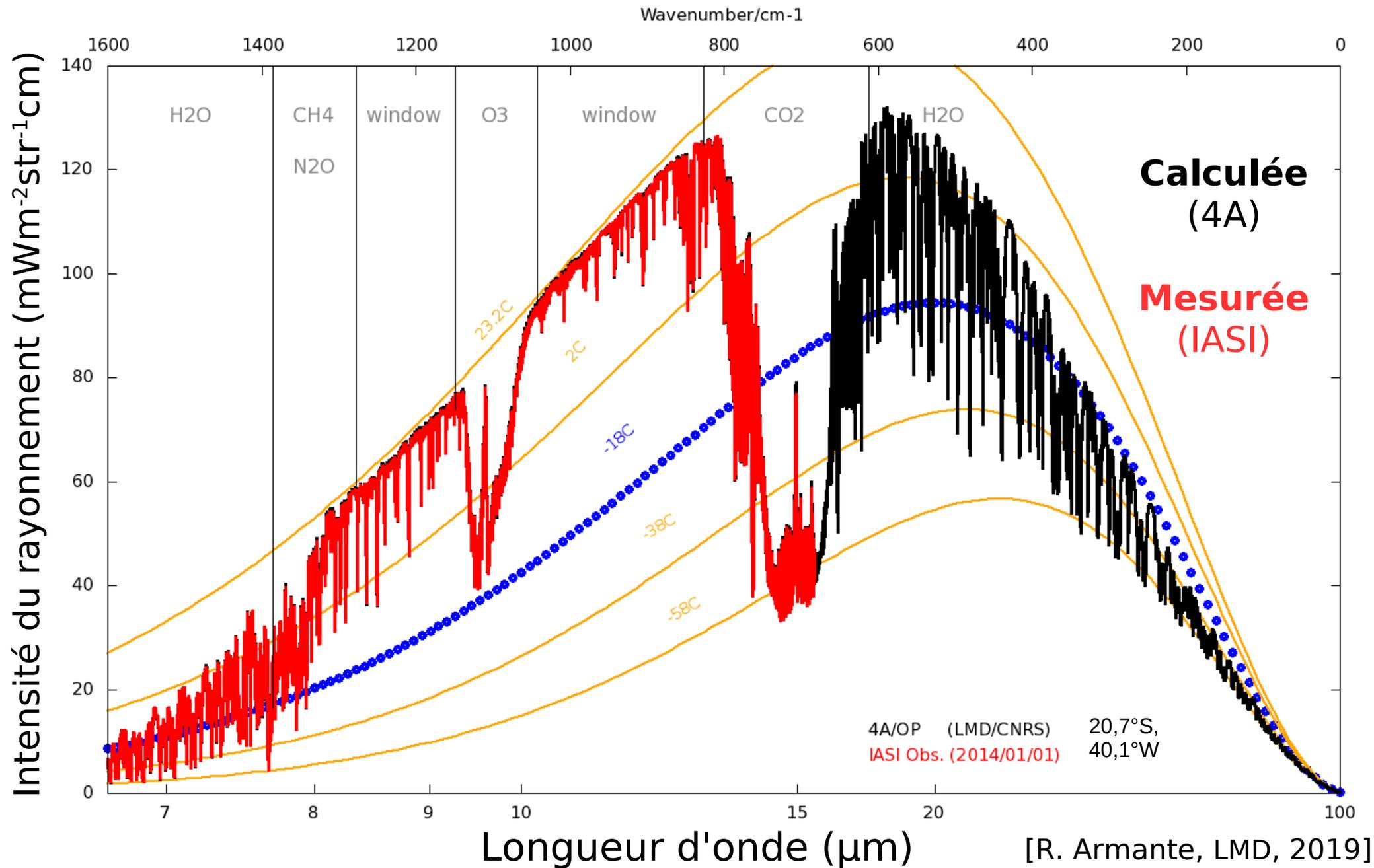
Propriétés radiatives



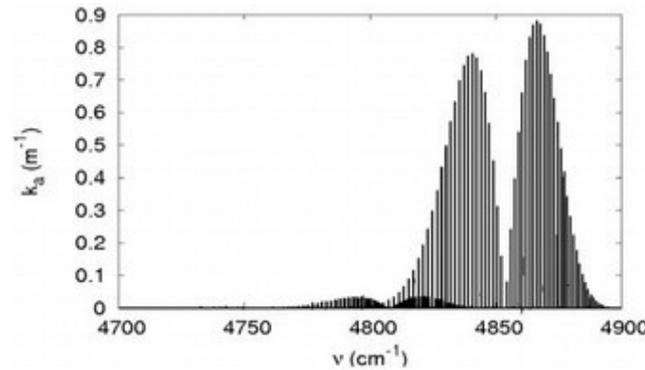
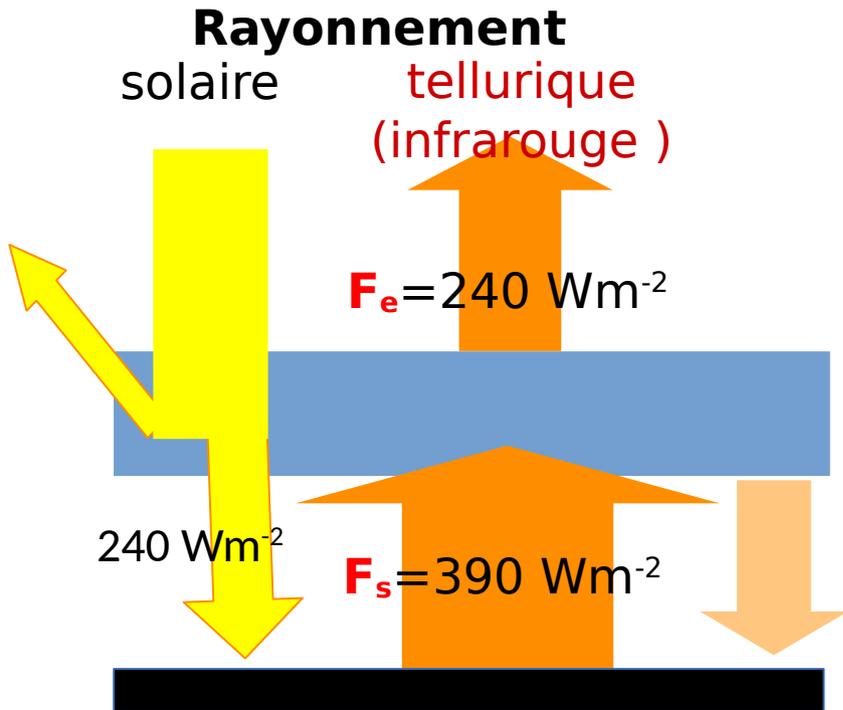
Profils atmosphériques

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

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



L'effet de serre sur Terre



Propriétés radiatives

Profils atmosphériques

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

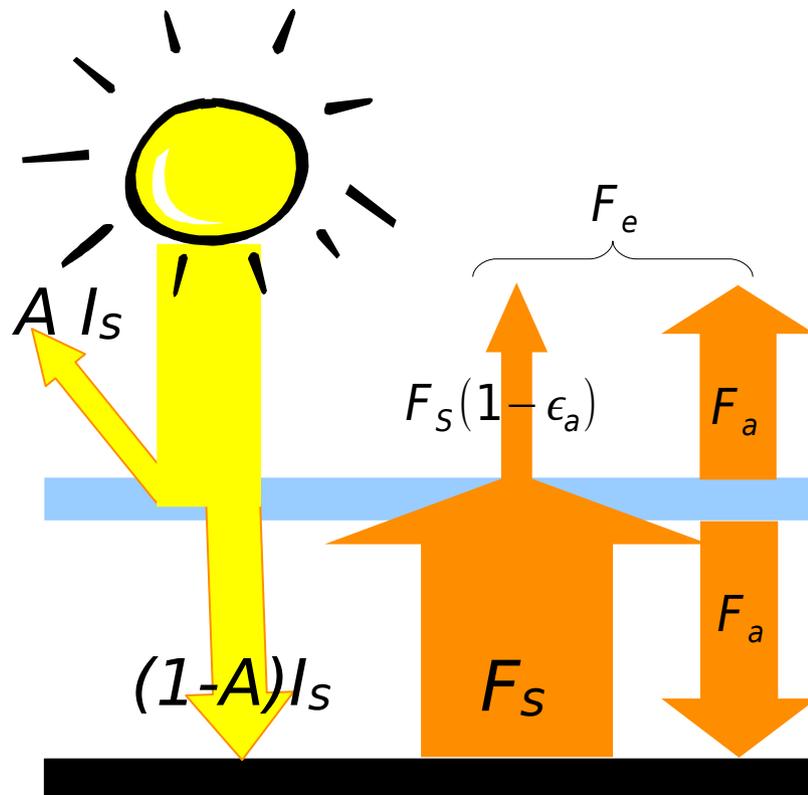
Sur Terre, pour une atmosphère standard:

- H_2O : + 20% $\Rightarrow \Delta G \approx + 3.8 \text{ Wm}^{-2}$
- CO_2 : + 100% $\Rightarrow \Delta G \approx + 2.8 \text{ Wm}^{-2}$

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

CO_2 : + 100% $\Rightarrow \Delta G \approx + 3.7 \pm 0.2 \text{ Wm}^{-2}$

Modèle d'effet de serre à 1 couche



L'atmosphère (\equiv vitre) :

- réfléchit une fraction A du rayonnement solaire
- absorbe une fraction ϵ_a du rayonnement IR émit par le surface
- est isotherme

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

➤ Si la vitre **n'absorbe pas** le rayonnement IR ($\epsilon_a=0$), $G=0$,

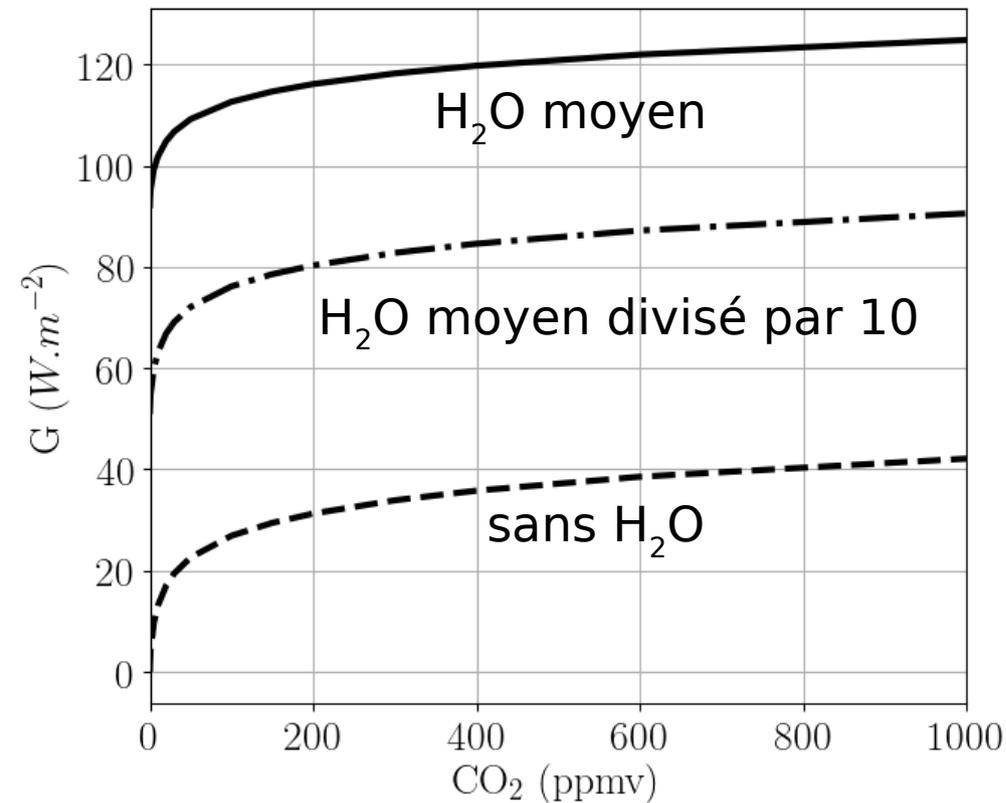
➤ **pas d'effet de serre**

➤ Si la vitre **absorbe tout** le rayonnement IR ($\epsilon_a=1$), $G=(1-A)I_s$

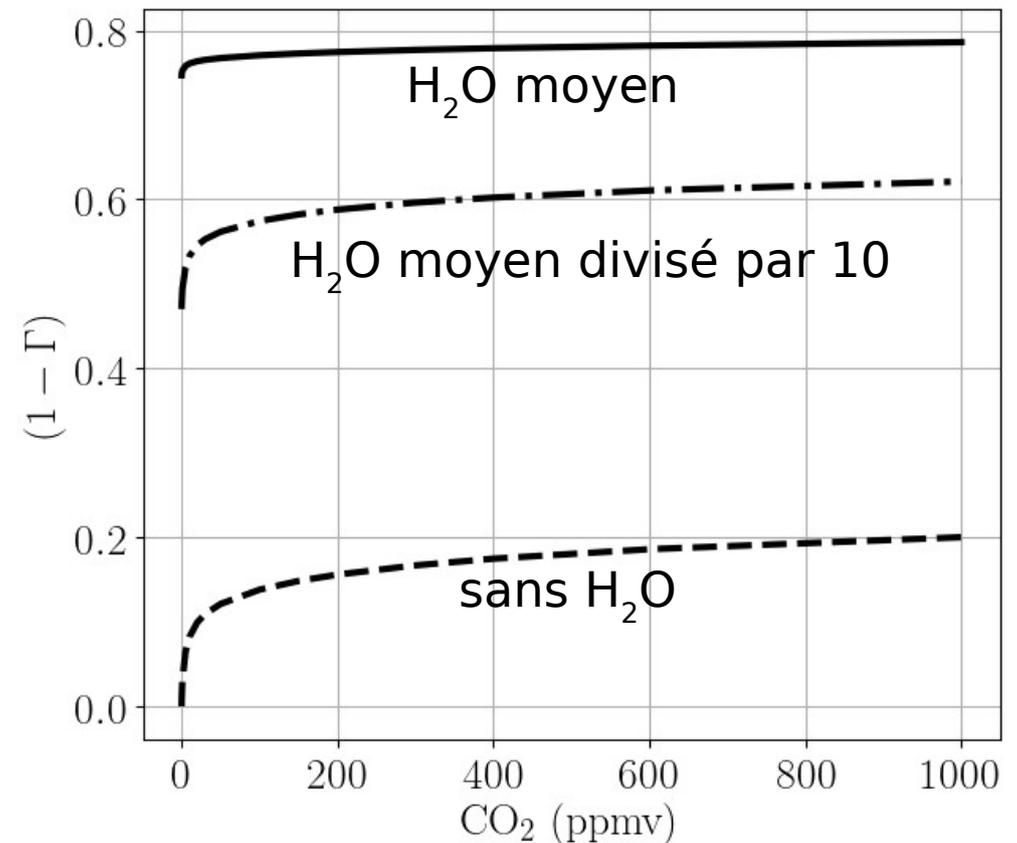
➤ **effet de serre maximum**

Le paradoxe de l'accroissement de l'effet de serre malgré la saturation de l'absorptivité du CO₂

Effet de serre de l'atmosphère en fonction de sa **concentration en CO₂** pour différentes concentrations en H₂O calculé par un modèle de référence



Absorptivité totale ϵ_a de l'atmosphère en fonction de sa **concentration en CO₂** pour différentes concentrations en H₂O calculé par le même modèle de référence



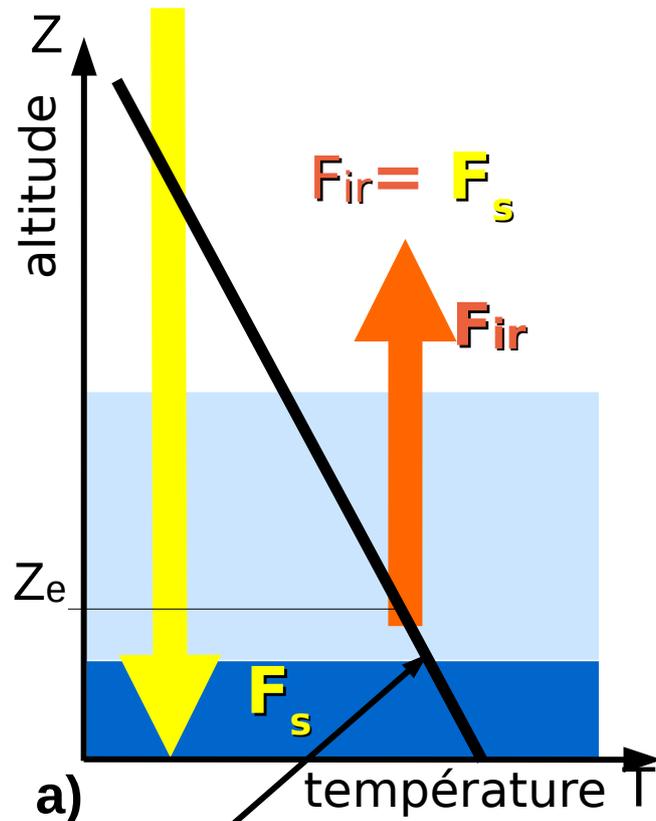
Comment l'effet de serre peut-il augmenter avec la concentration en CO₂ alors que l'absorptivité n'augmente pas ? (on dit qu'elle est saturée)

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



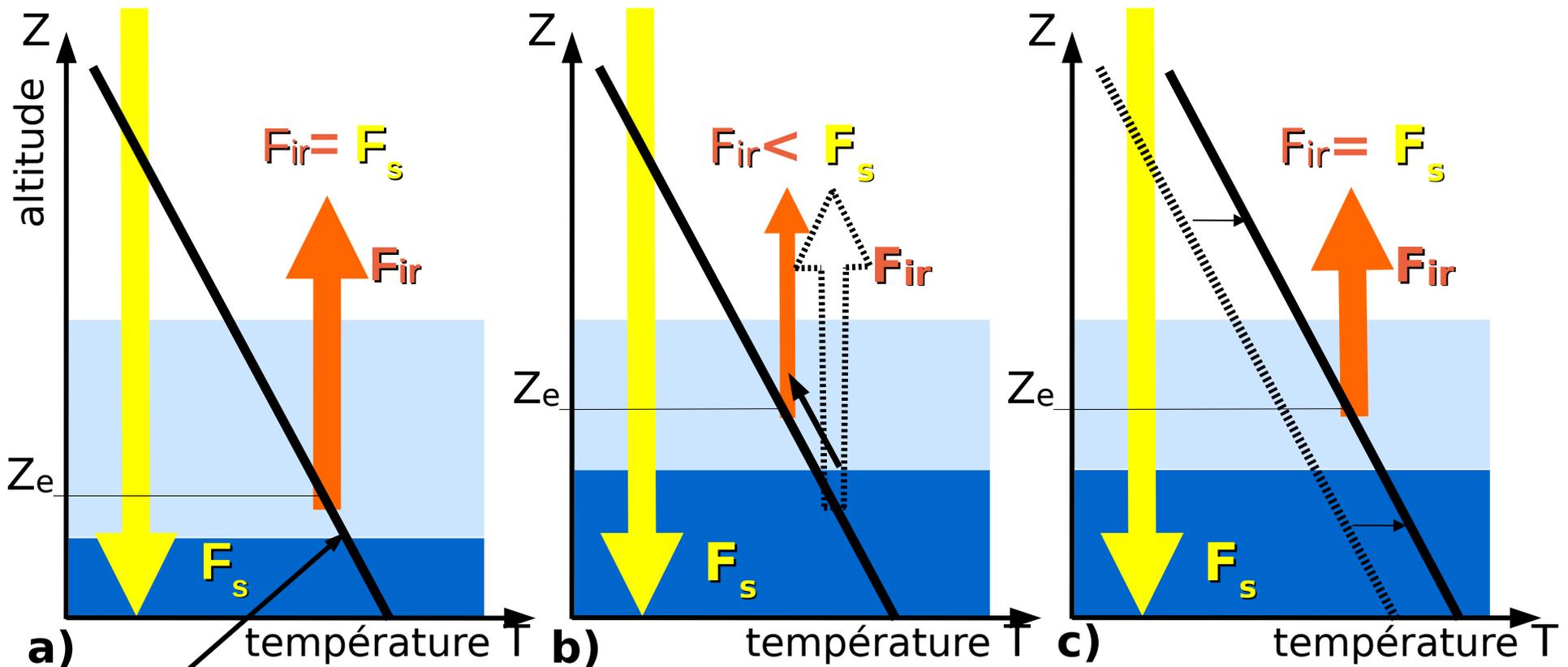
dT/dz fixé
par la convection

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)

Effet de serre dans une atmosphère stratifiée

Augmentation uniforme de la concentration de gaz absorbant

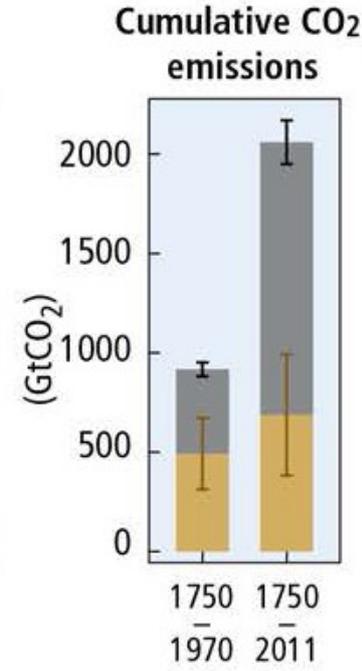
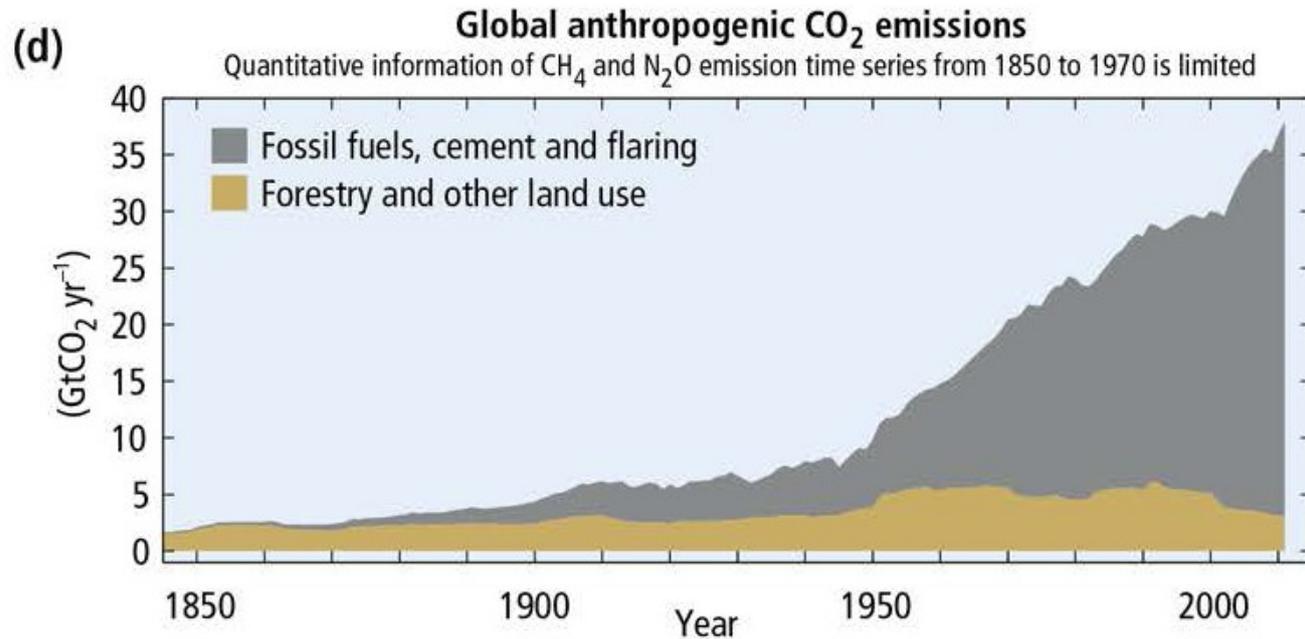
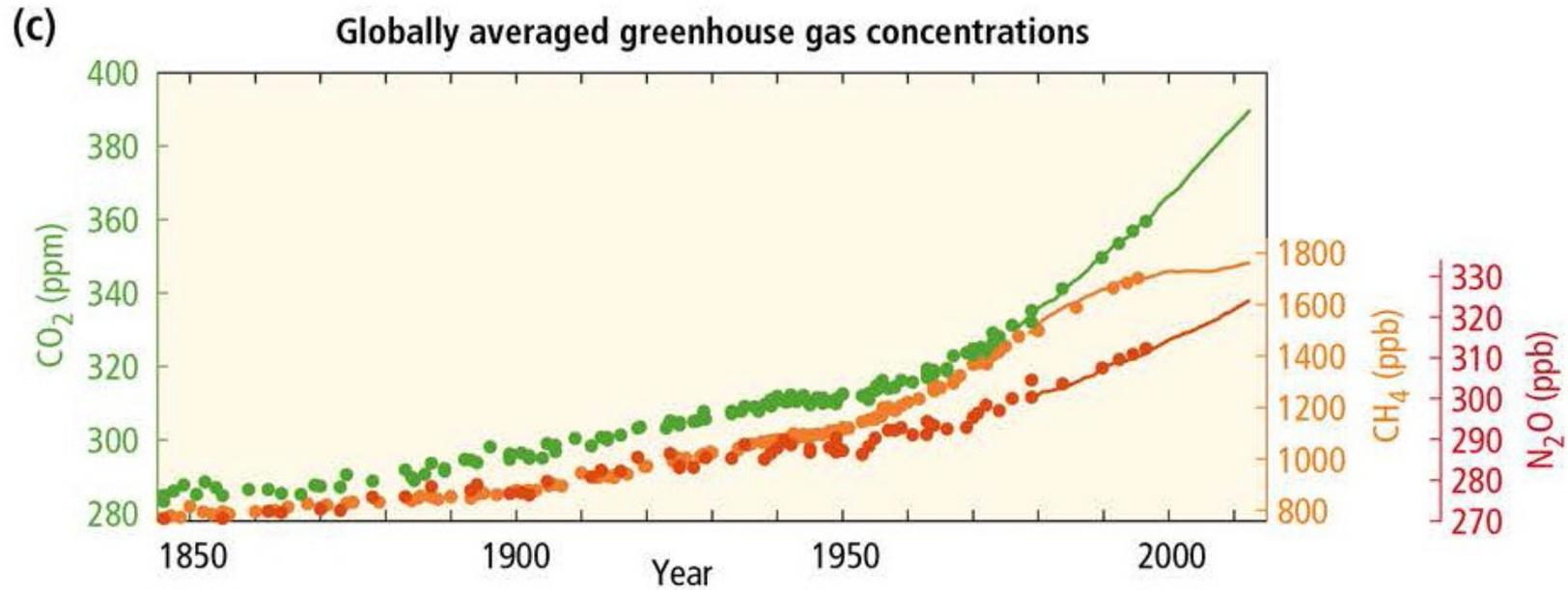


a) dT/dz fixé par la convection

b) CO_2 augmente, Z_e augmente, T_e diminue, F_{ir} diminue

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

Évolution des gaz à effet de serre due aux activités humaines



Émission moyenne de CO₂ (2008-2017)

1 GtC = 3.67 GtCO₂

Sources = Puits



+

34.4 GtCO₂/yr
87%

17.3 GtCO₂/yr

44%

11.6 GtCO₂/yr

29%

13%
5.3 GtCO₂/yr

22%
8.9 GtCO₂/yr



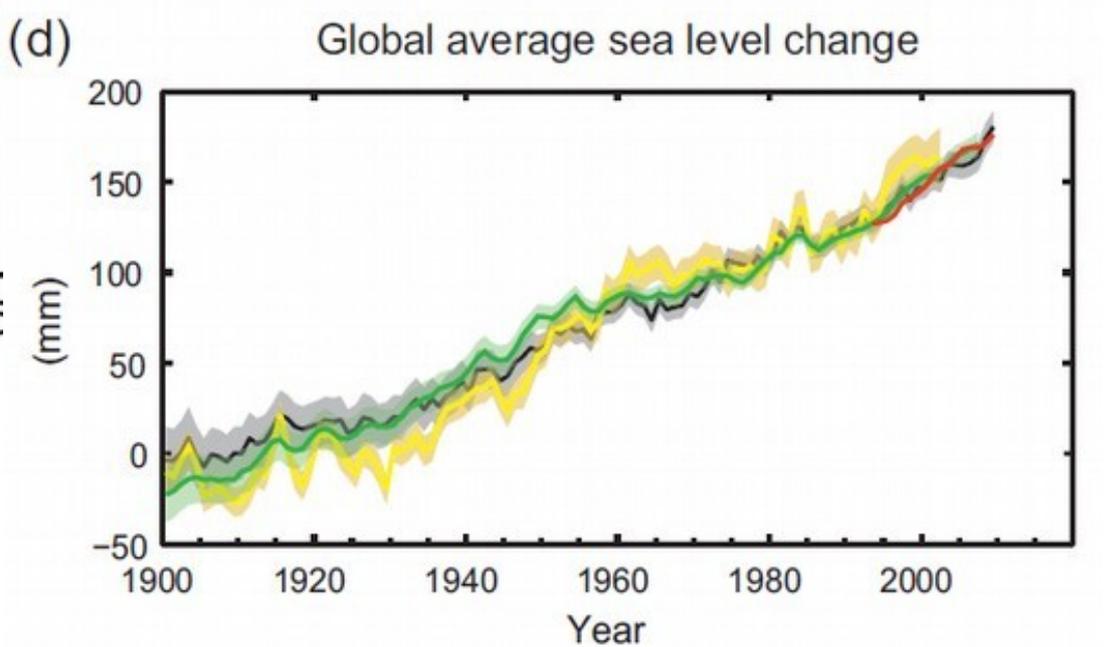
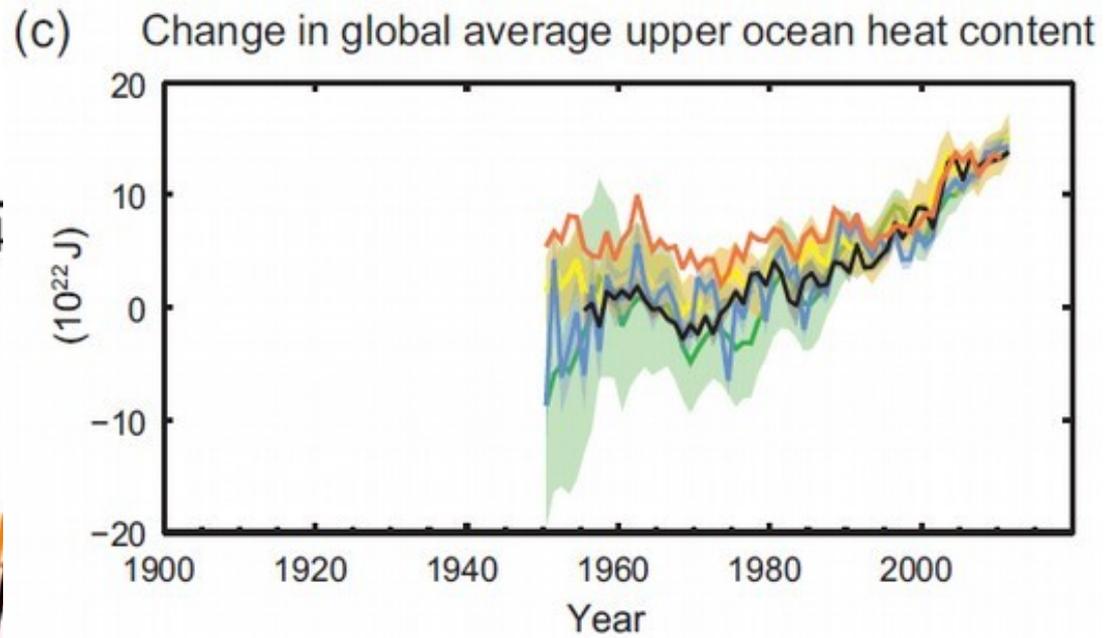
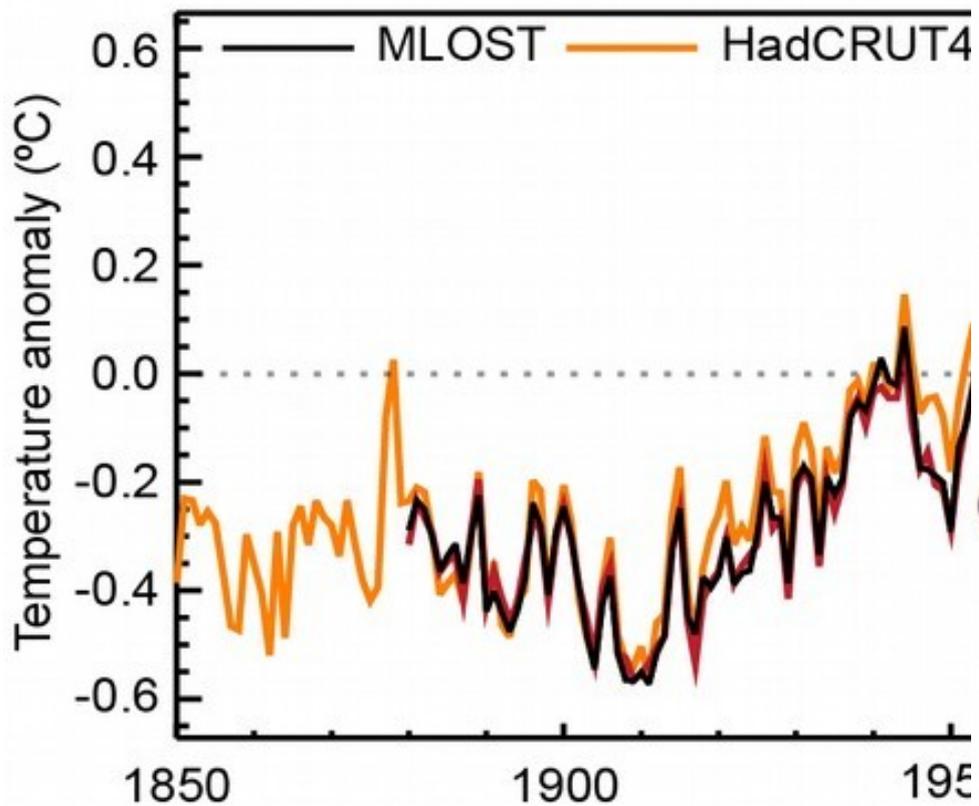
Budget Imbalance:

(the difference between estimated sources & sinks)

5%

1.9 GtCO₂/yr

Le réchauffement climatique récent

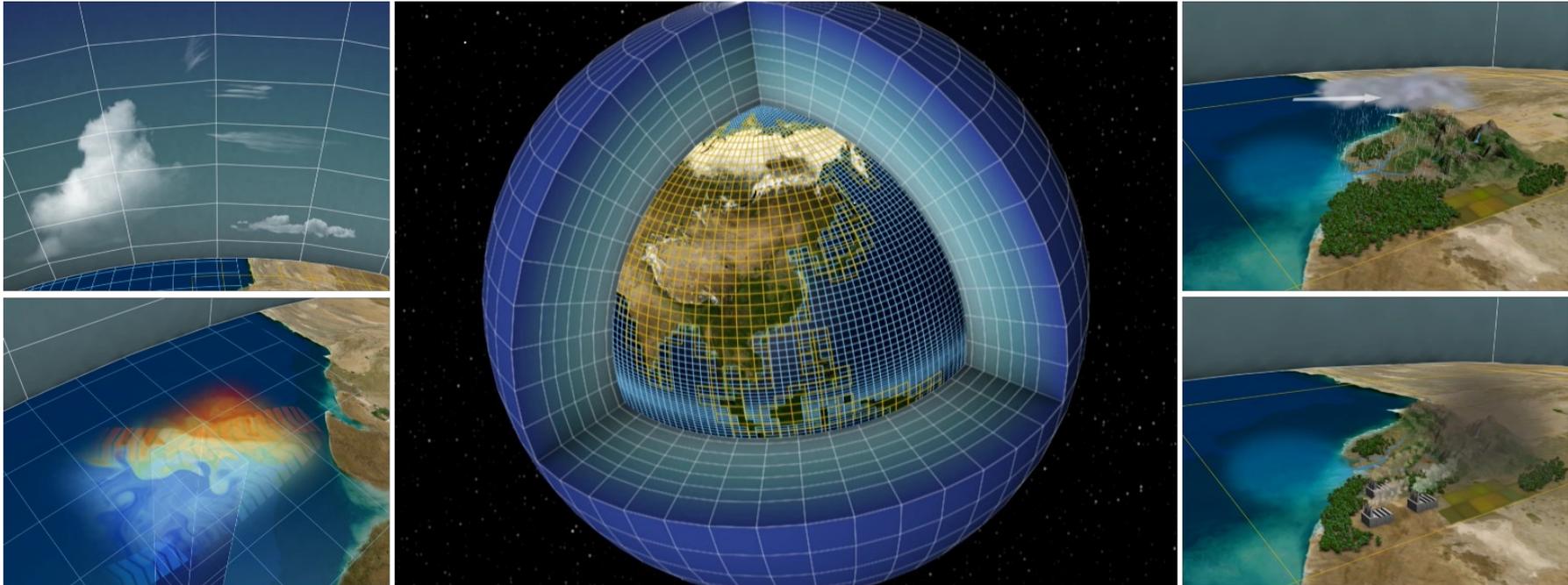


Plan

- Les bases physiques du climat et de l'effet de serre
- **Les modèles numériques de climat**
- Les changements climatiques futurs

Modèle de climat

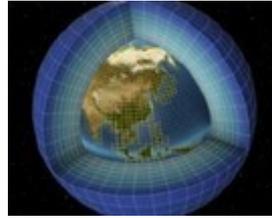
(Modèle de circulation générale)



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

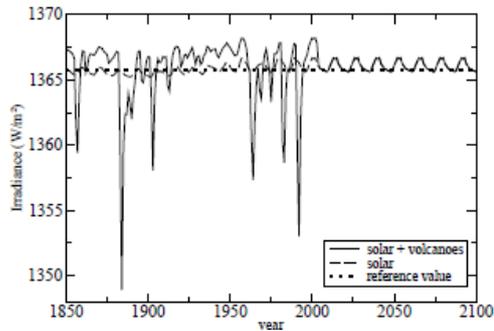
- Une représentation 3D de l'atmosphère l'océan glaces de mer et surfaces continentales (couplages de différents modèles)
- Une représentation du couplage avec les cycles biogéochimiques dans l'atmosphère l'océan et le continent

Le modèle couplé "Système Terre" de l'IPSL

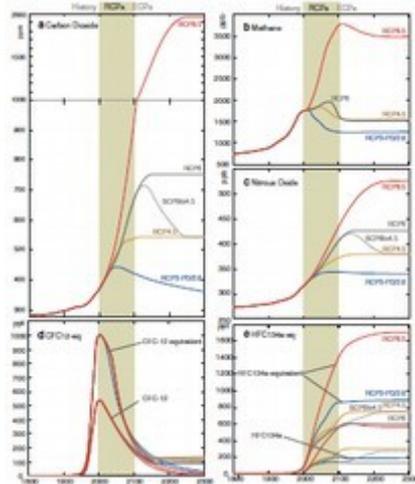


Forçages naturels et anthropiques

Soleil et volcans



Gaz à effet de serre ou chimiquement actifs

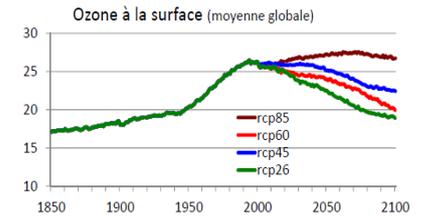


Concentration de CO₂

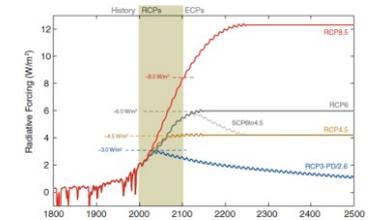
Modèle de climat

- 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

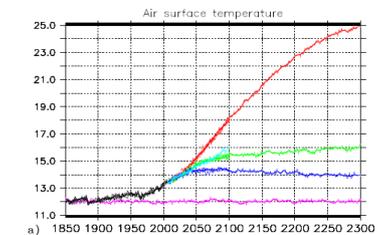
Composition de l'atmosphère



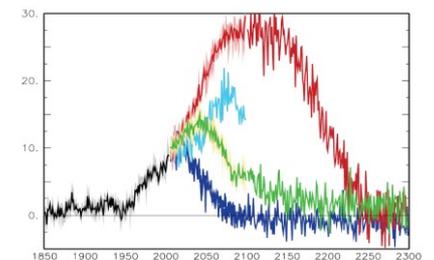
Forçage radiatif



Changement climatique



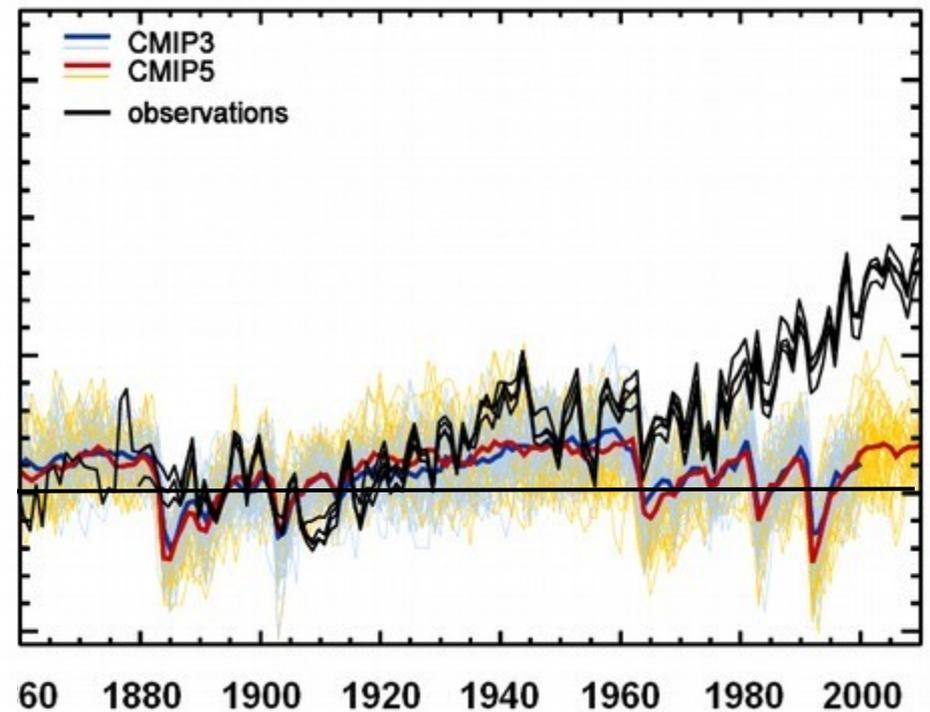
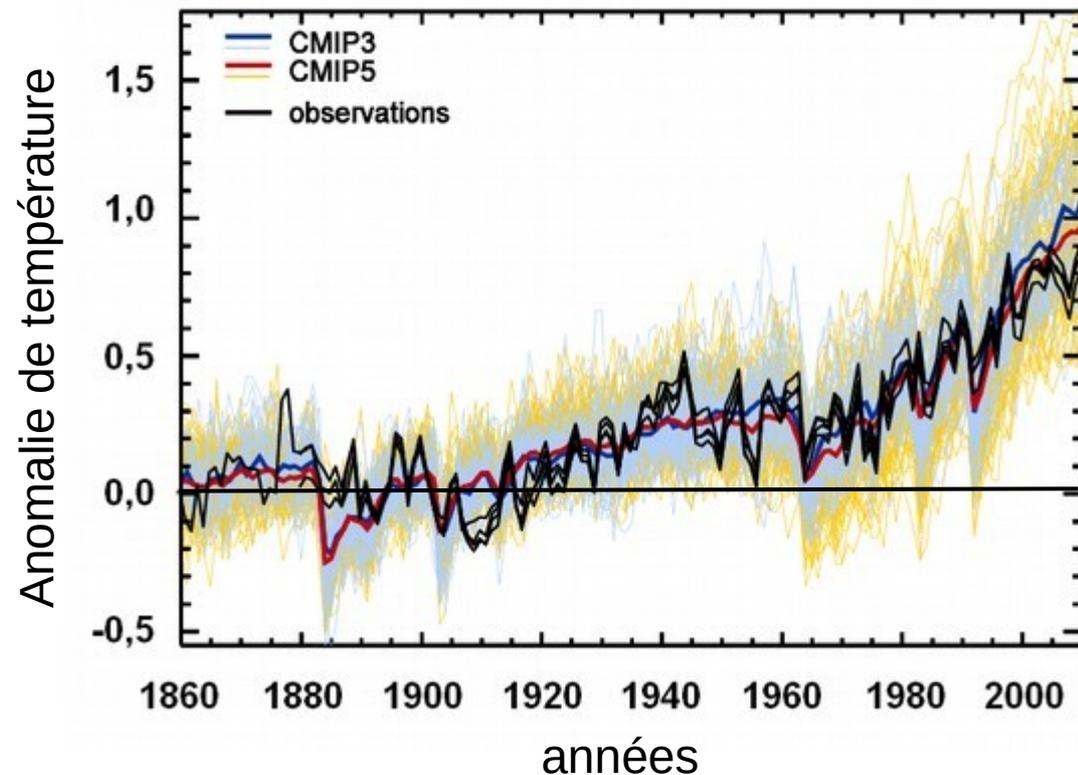
Émission autorisée de CO₂



Évolution récente de la température de surface de la Terre

Simulations avec *forçages naturels et anthropiques*

Simulations avec *forçages naturels seulement*



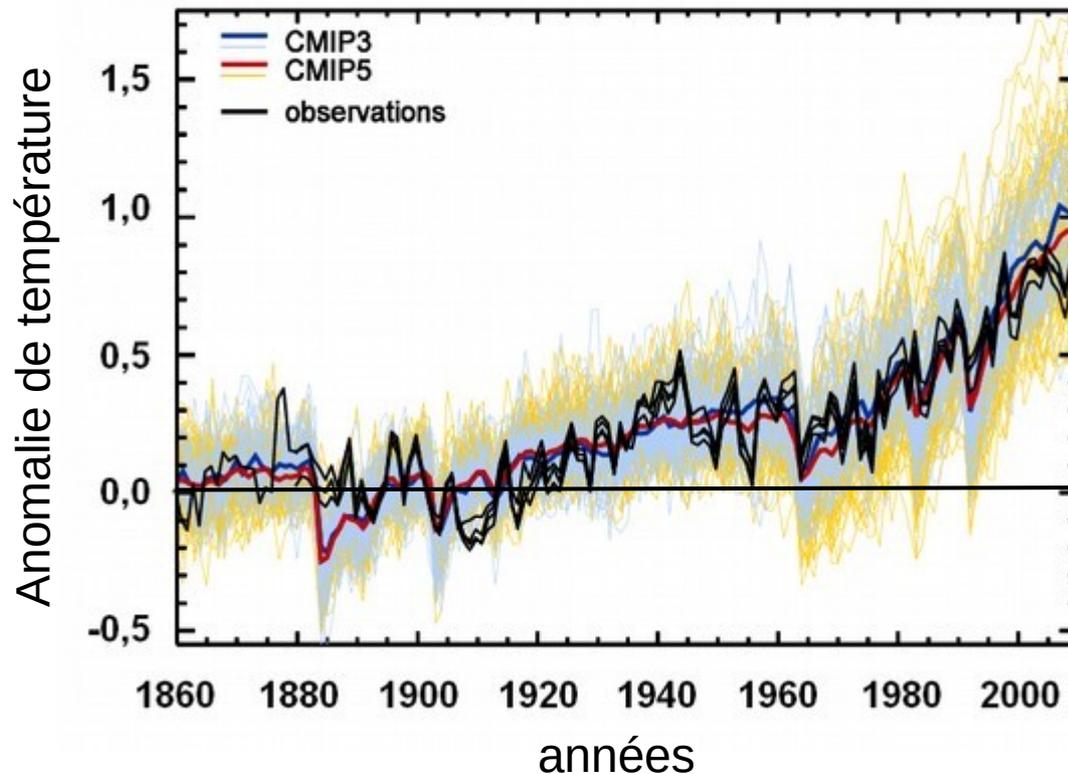
Variabilité interne et variations dues à des forçages

Les variations climatiques ont plusieurs origines:

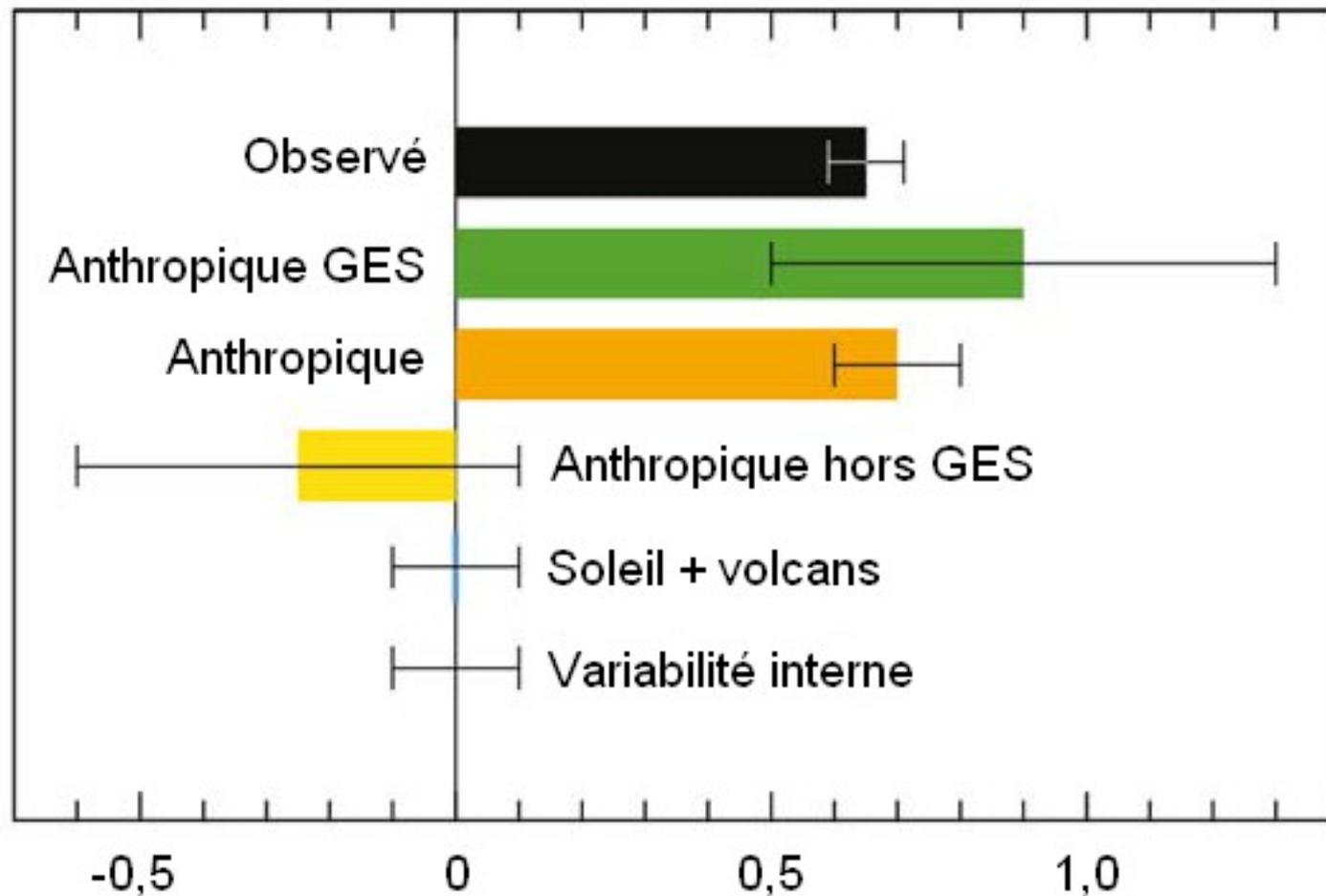
$$\text{Variations} = \boxed{\begin{array}{l} \text{Variabilité} \\ \text{interne} \end{array}} + \begin{array}{l} \text{Réponse aux} \\ \text{forçages} \\ \text{naturels} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Réponse aux} \\ \text{forçages} \\ \text{anthropiques} \end{array}$$

Variabilité naturelle

Simulations avec *forçages naturels et anthropiques*

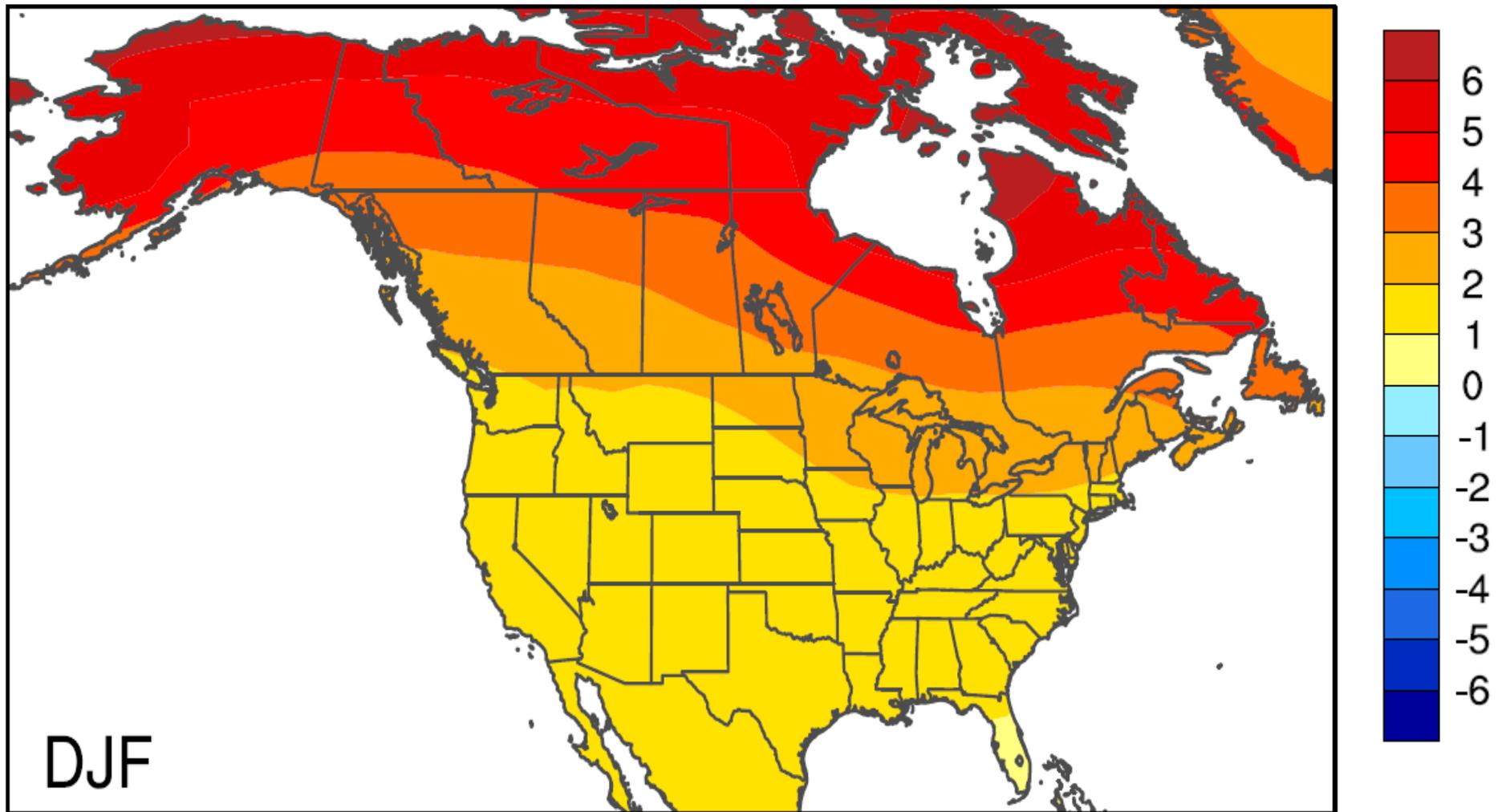


Attribution des tendances sur 1951-2010 de la température moyenne globale en surface



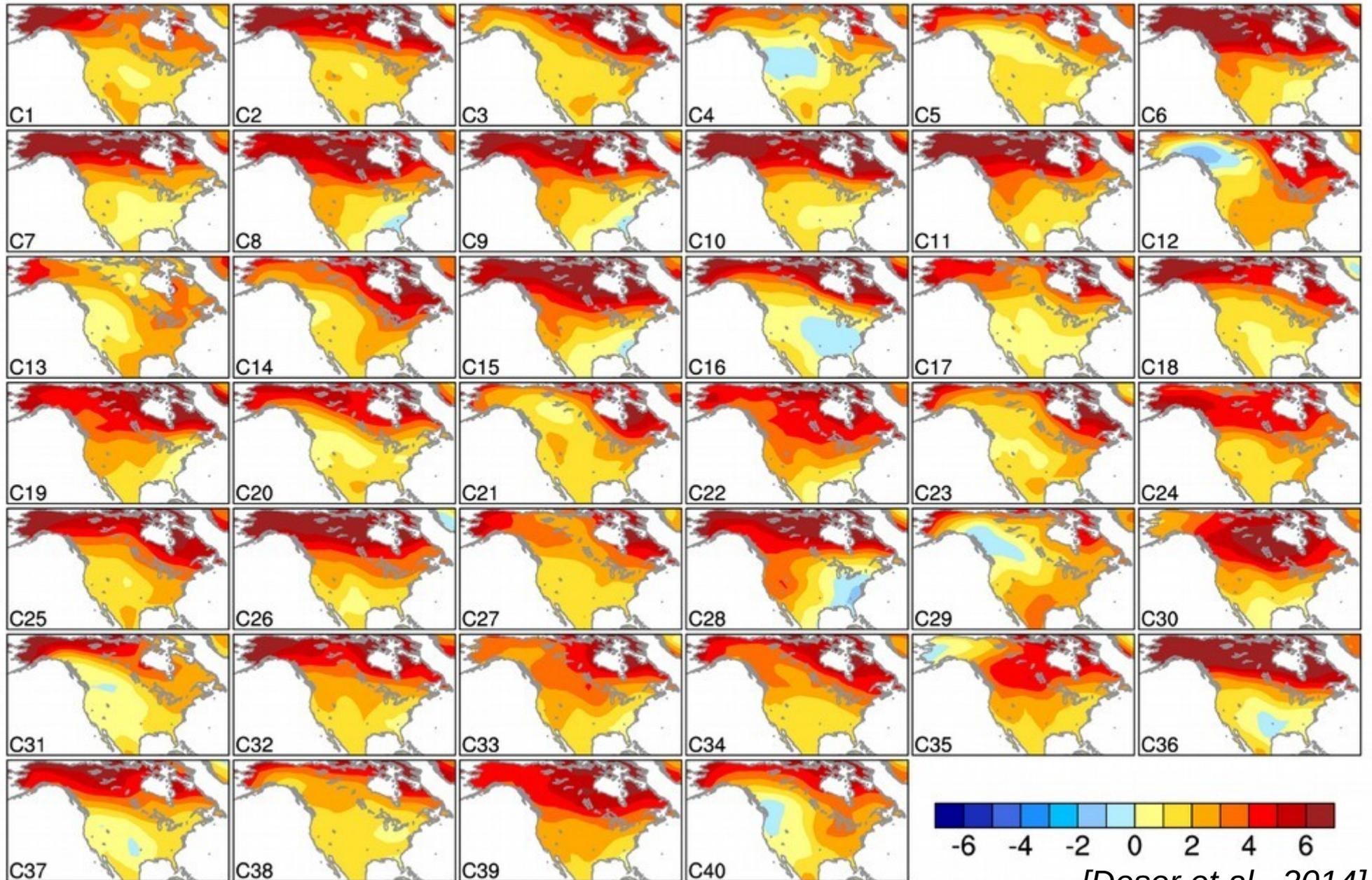
Changement climatique et variabilité interne

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)

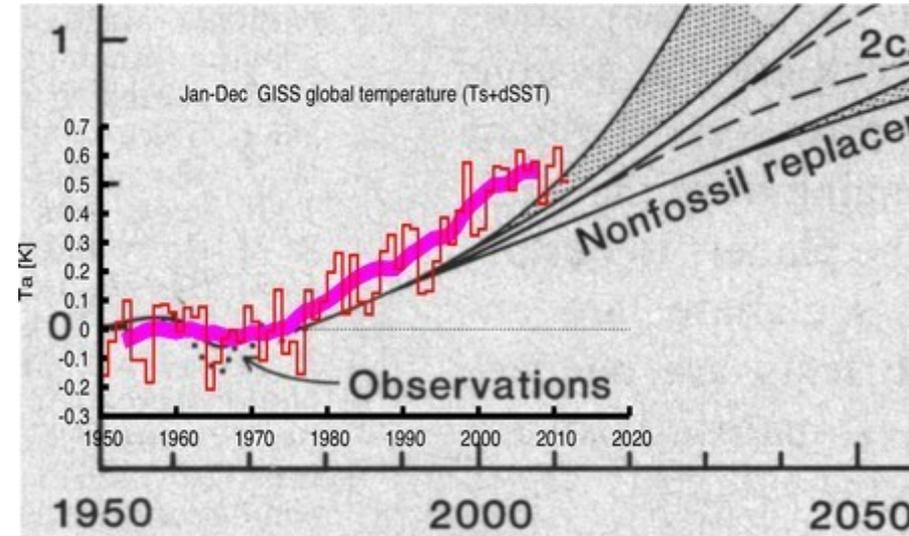
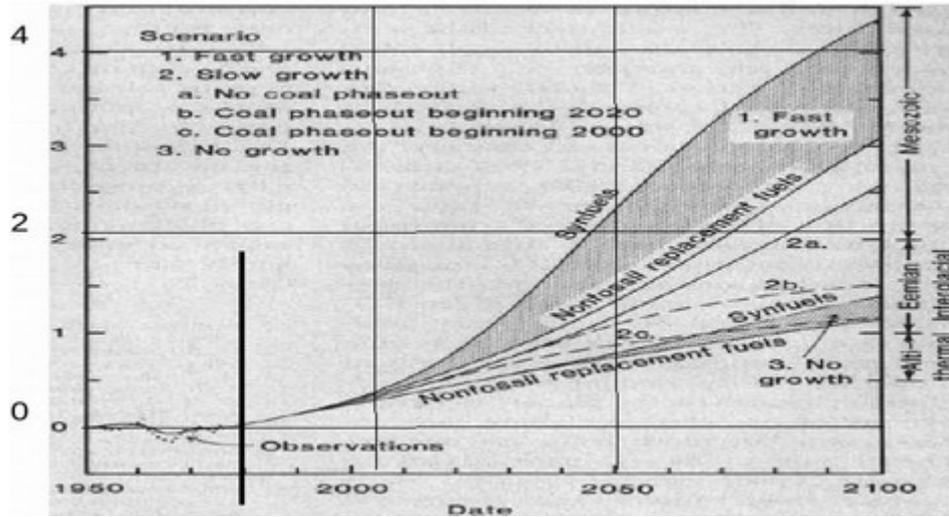


[Deser et al., 2014]

Plan

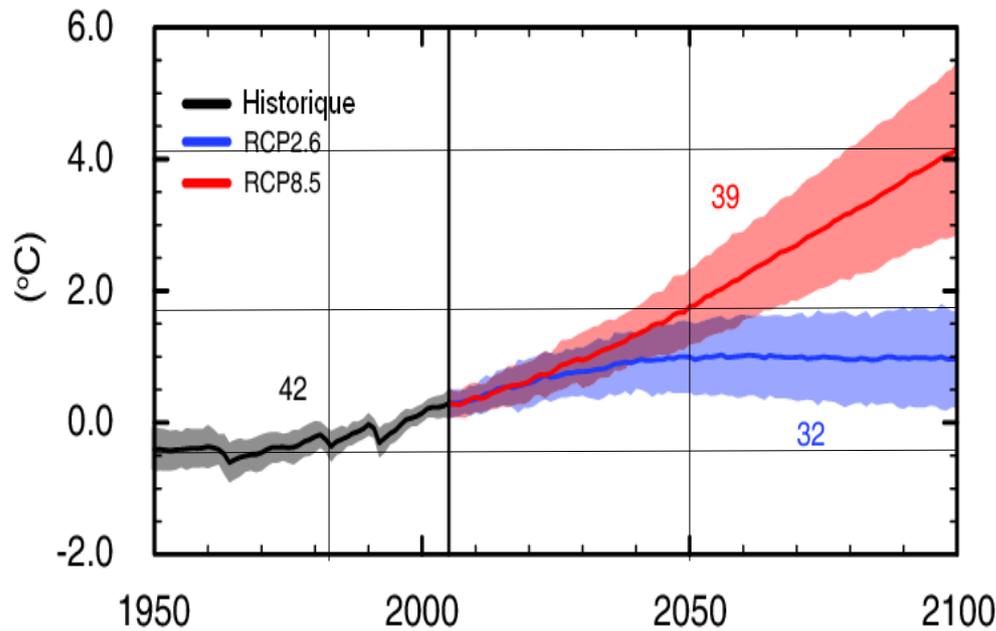
- Les bases physiques du climat et de l'effet de serre
- Les modèles numériques de climat
- **Les changements climatiques futurs**

Premières projections climatiques



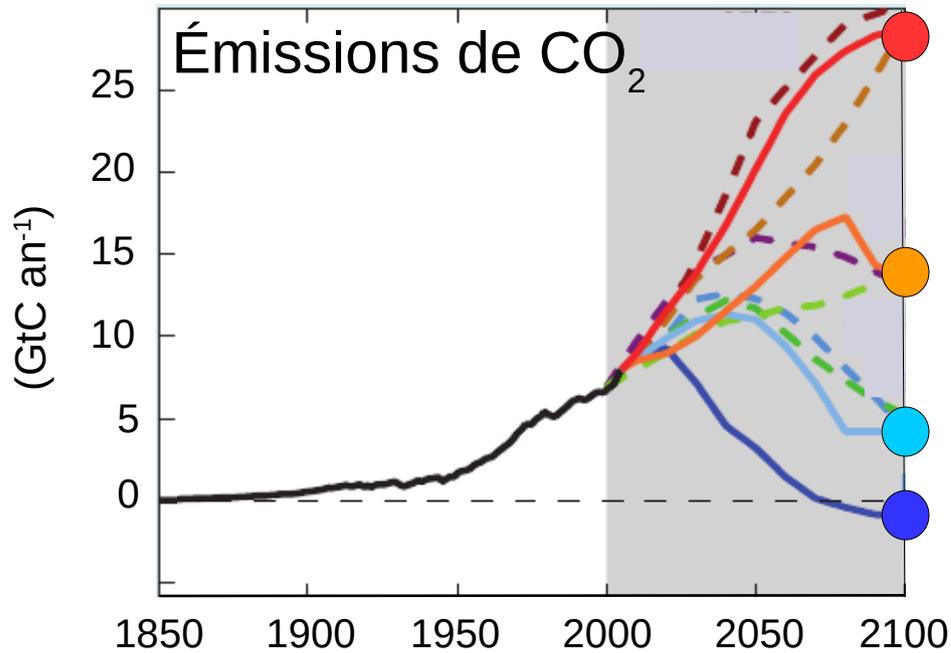
[Hansen et al. 1981]

<http://www.realclimate.org>



[GIEC 2013]

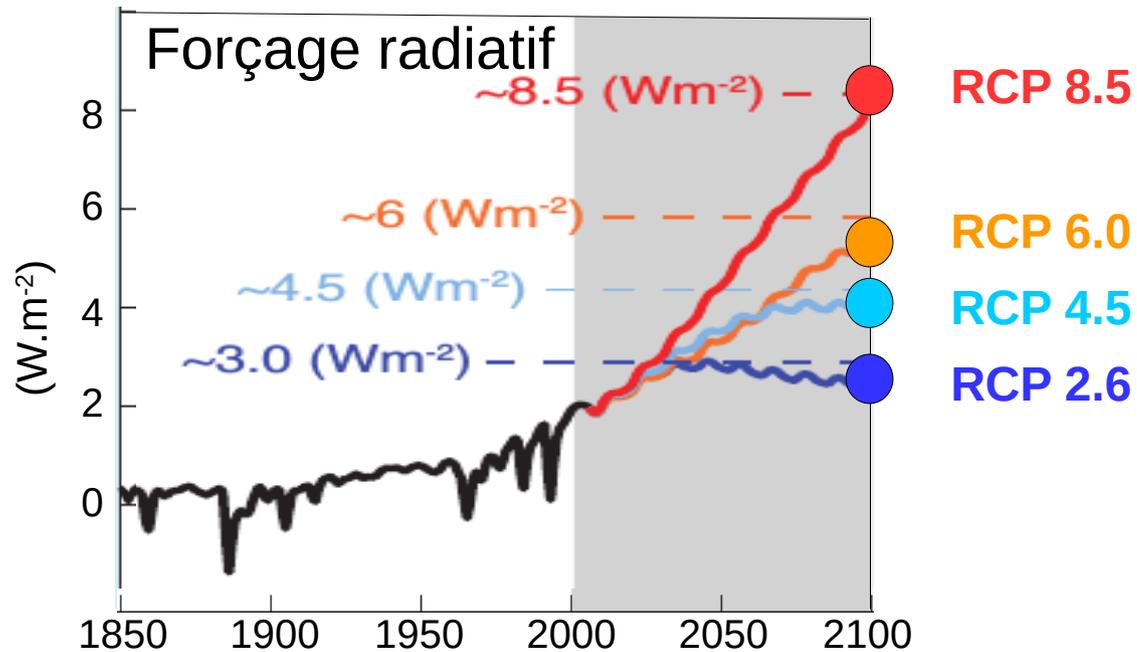
Les projections futures



Émissions continuent à augmenter

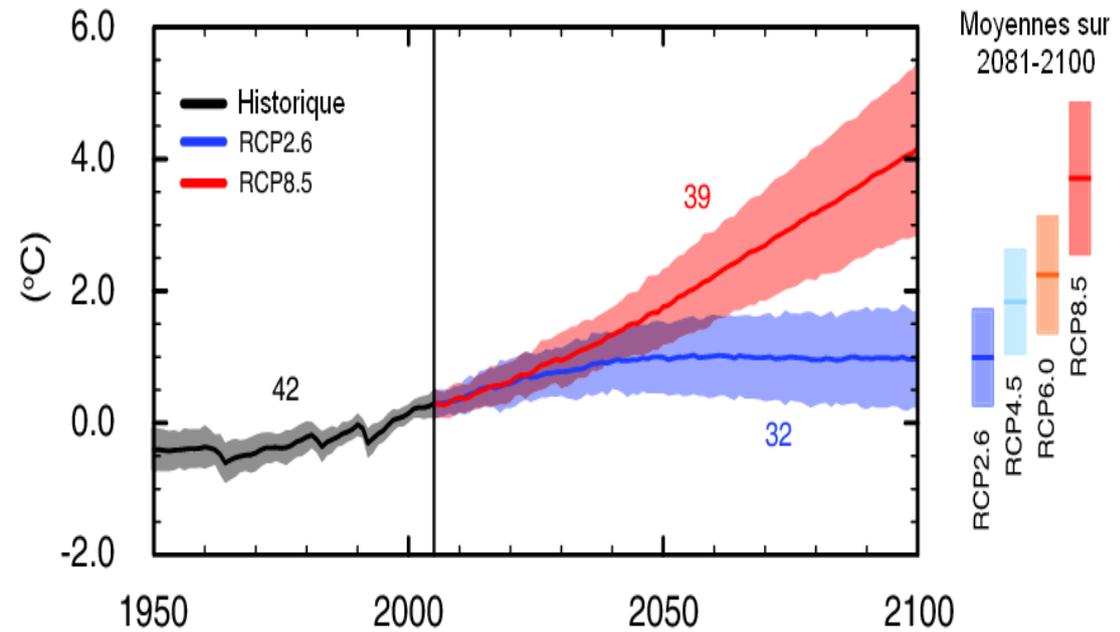
On se base sur des scénarios

Émissions diminuent rapidement

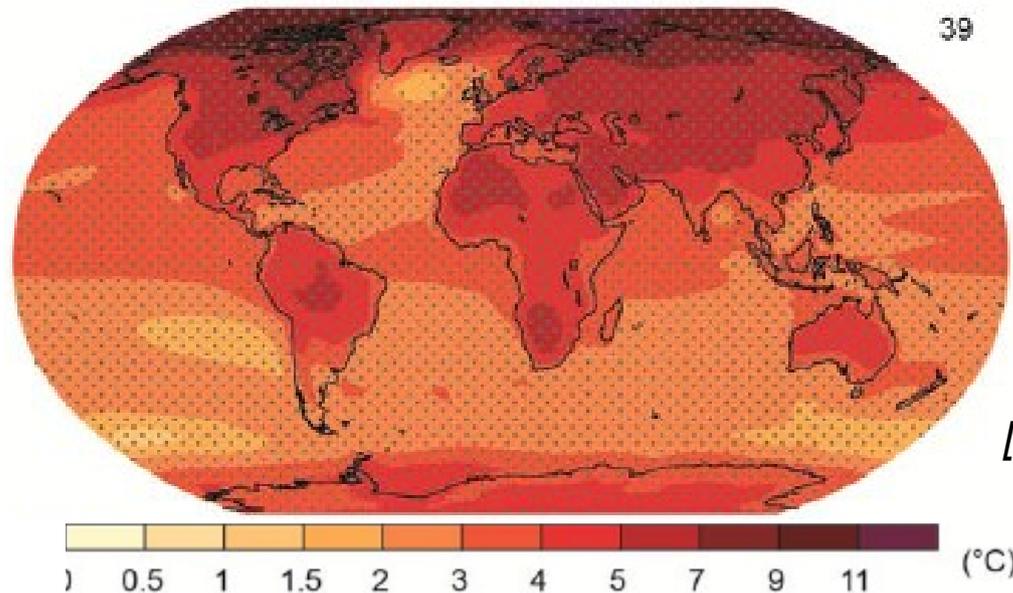


Température de surface

Moyenne globale
1950 à 2100
(40 modèles CMIP5)

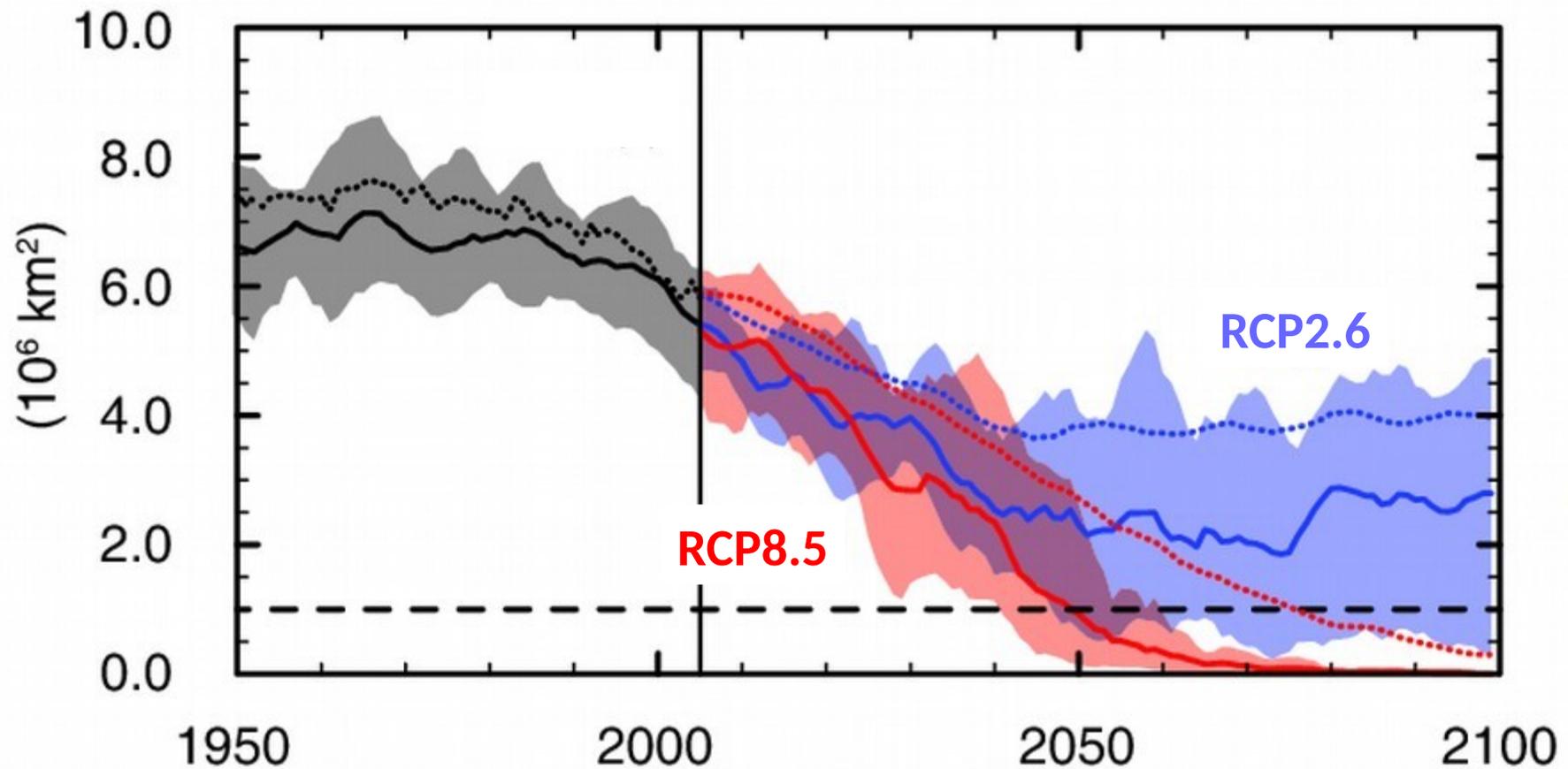


En 2100,
scénario RCP8.5
(39 modèles CMIP5)

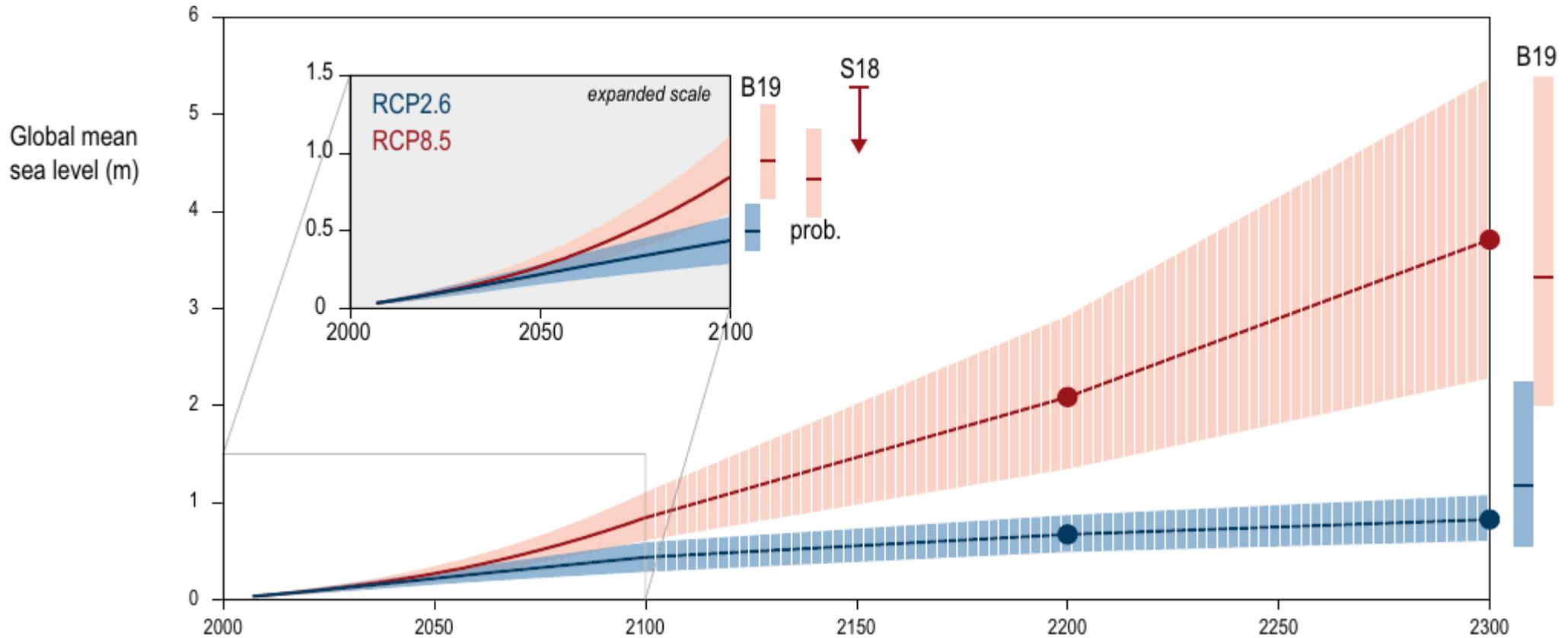


[GIEC, 2013]

Diminution de la banquise arctique en septembre (minimum d'extension)



Augmentation du niveau des mers

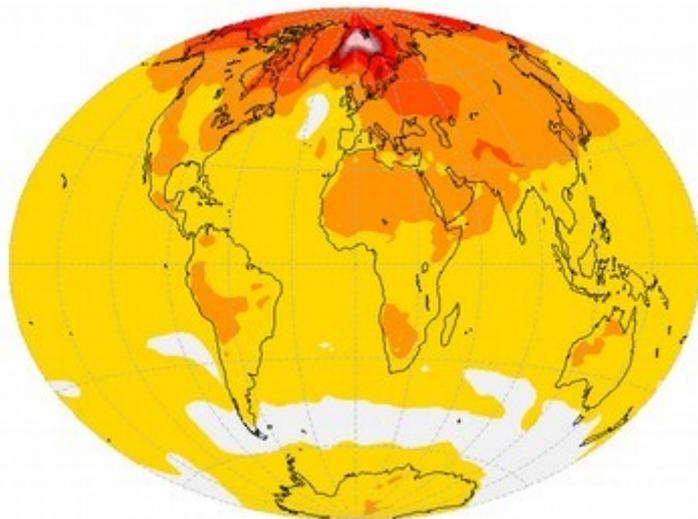


[GIEC, SROC, 2019]

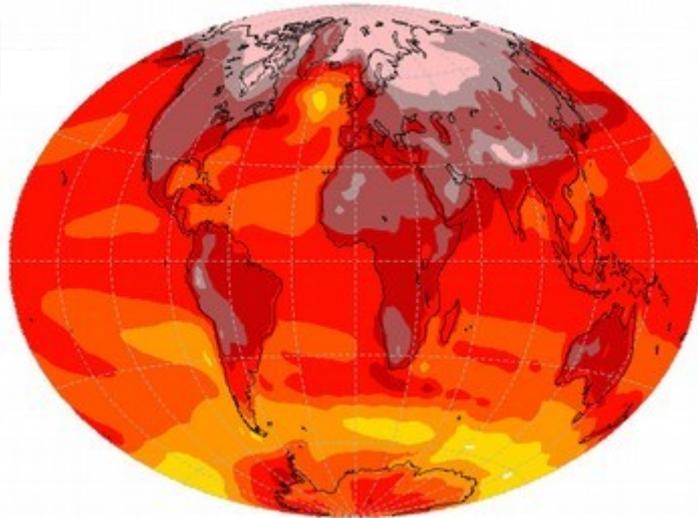
Comparaison futures - paléoclimats

Différence entre **2100** et **1990**

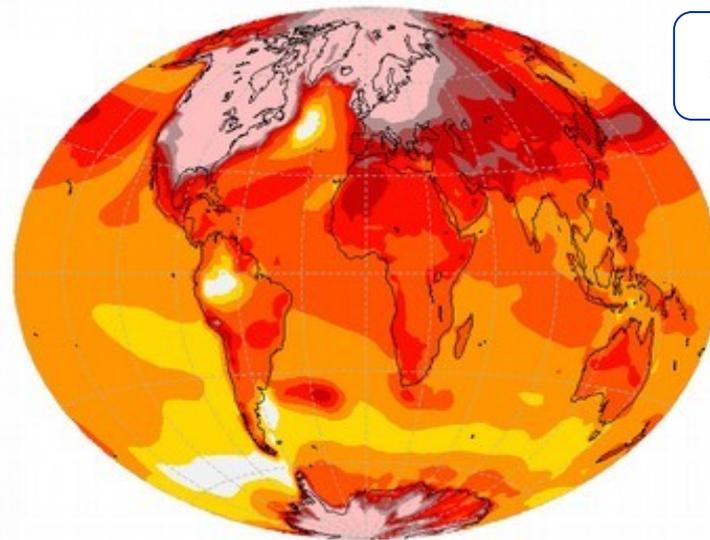
RCP2.6



RCP8.5

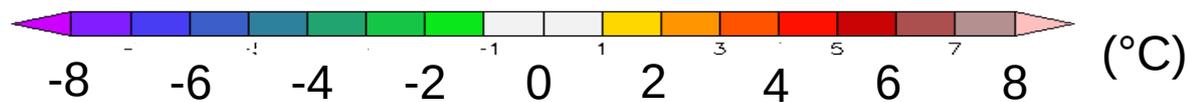


Différence entre la période **actuelle** et celle **dernier maximum glaciaire**

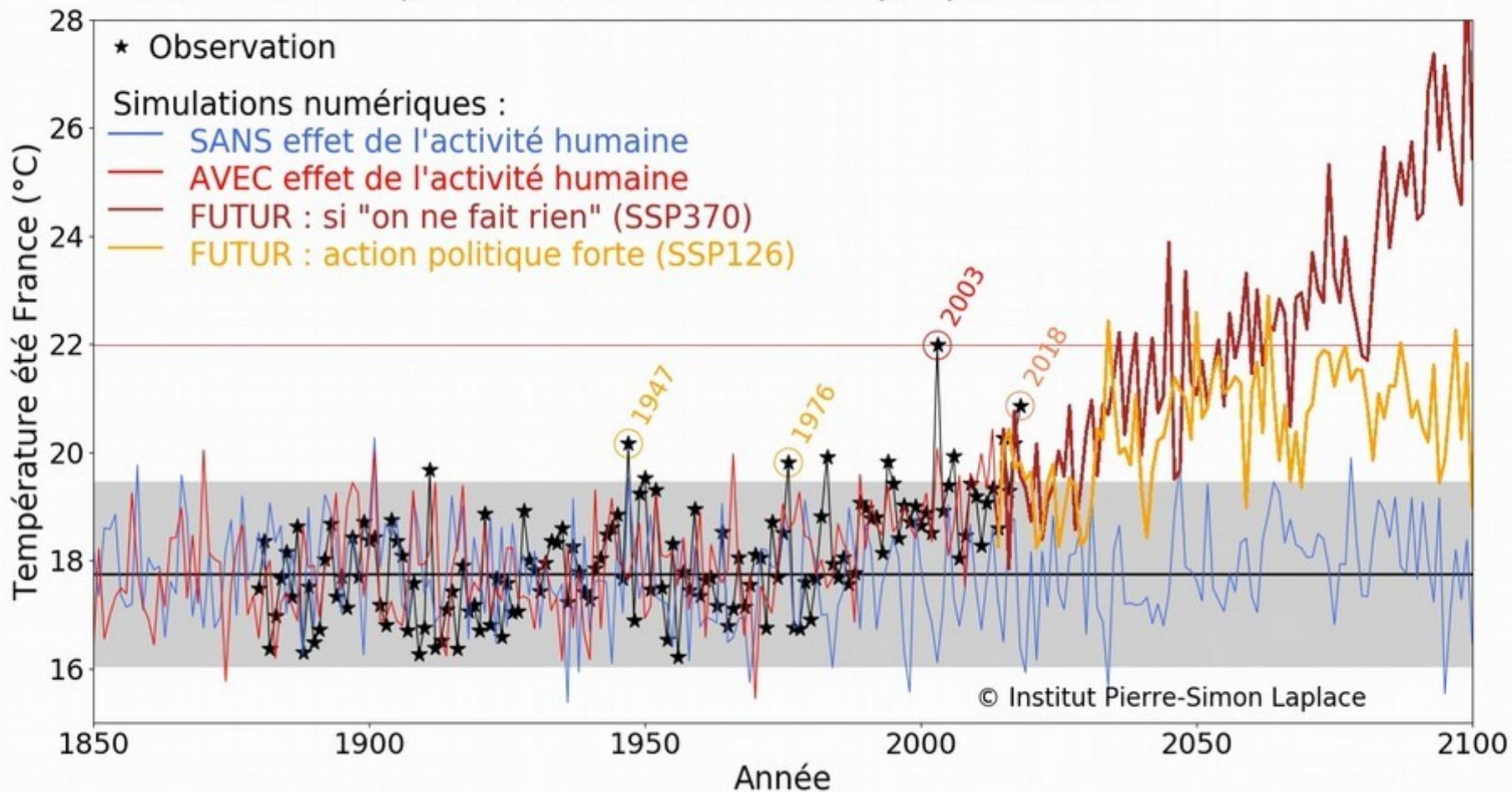


Glaciaire

Modèle : IPSL-CM5A-LR

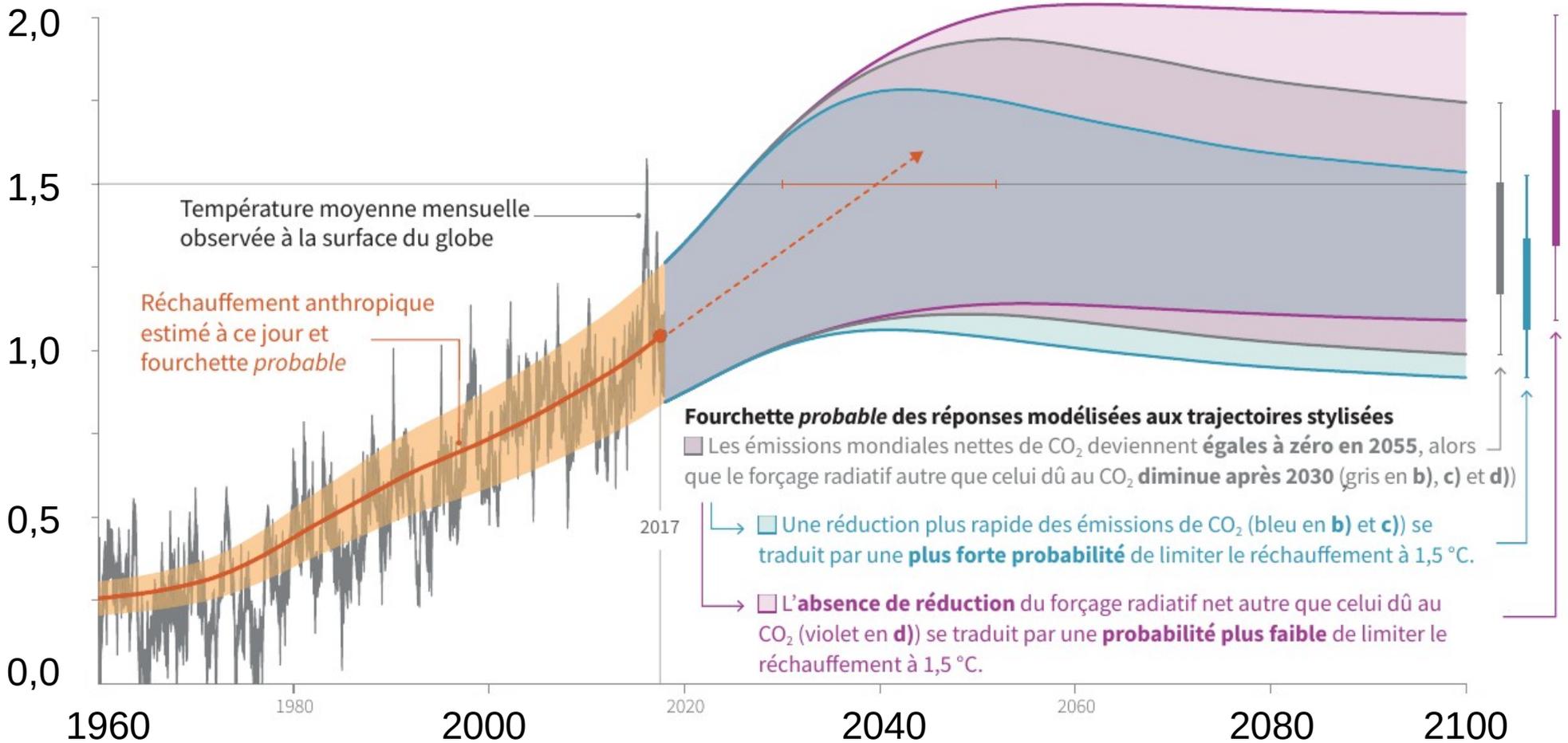


Evolution des températures estivales en France (Juin-Juillet-Août)



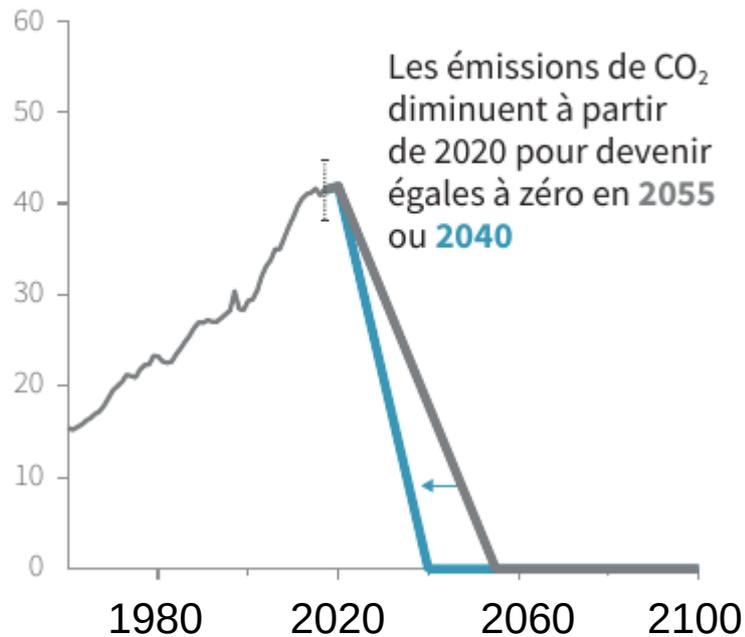
Limiter le réchauffement en dessous de 2°C nécessite d'agir vite...

Réchauffement planétaire par rapport à 1850-1900



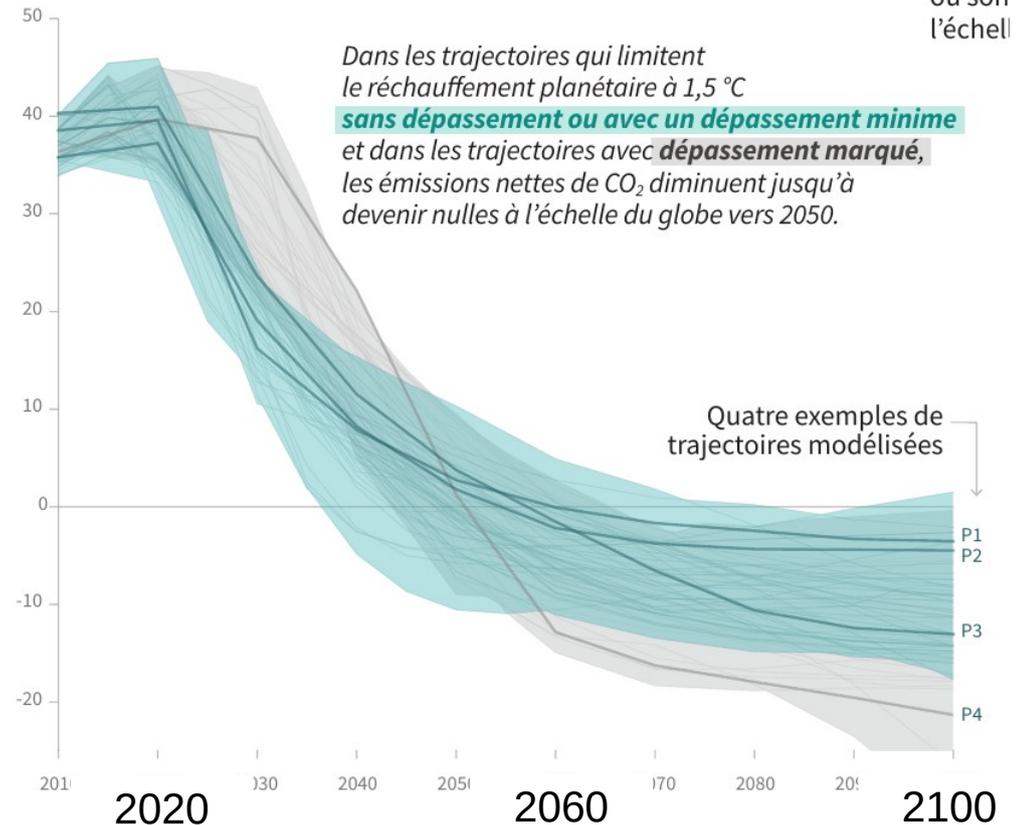
limiter le réchauffement en dessous de 2°C nécessite d'agir vite...

b) Trajectoires stylisées des émissions mondiales nettes de CO₂ en milliards de tonnes de CO₂ par an (GtCO₂/an)



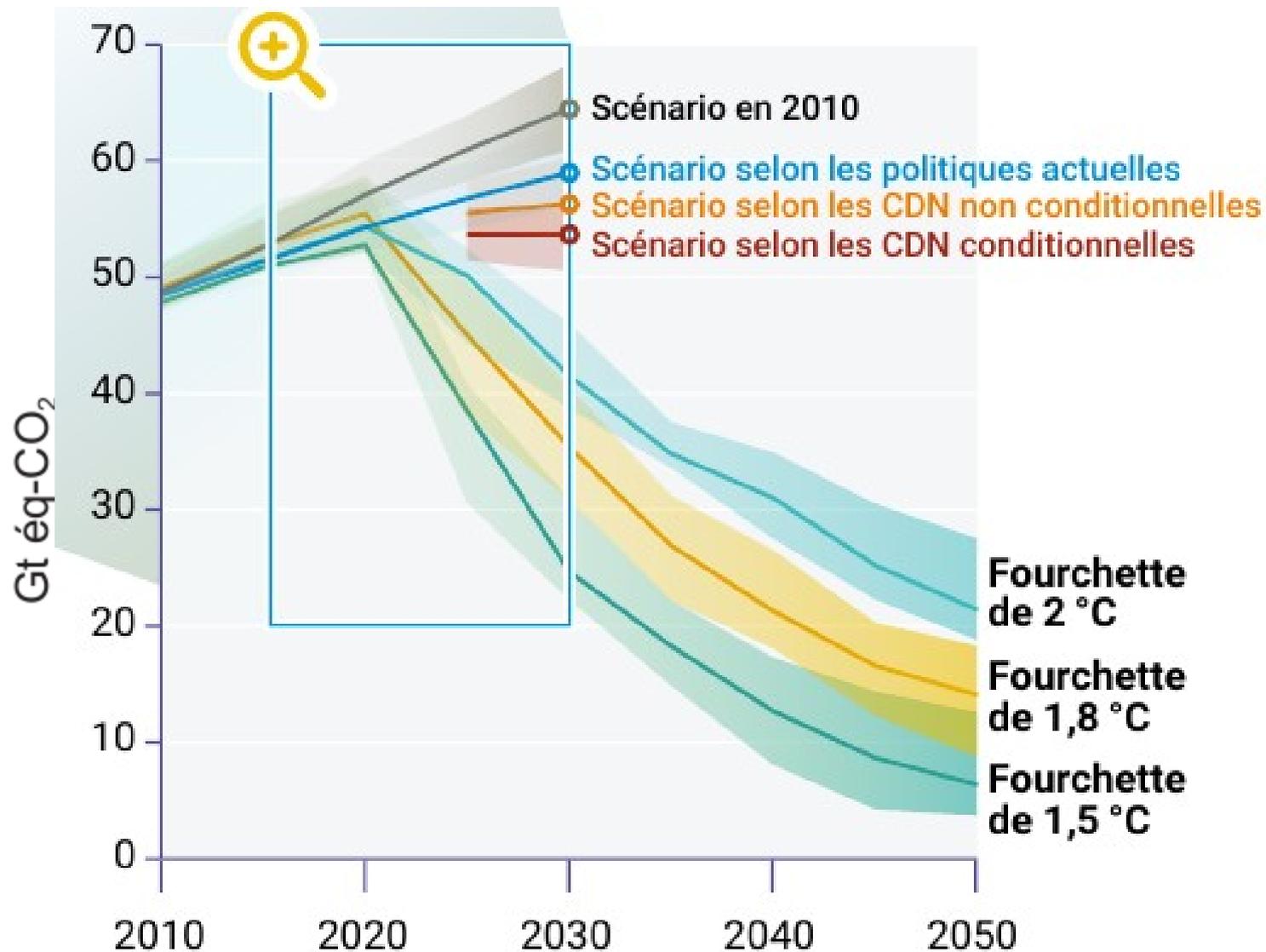
Total des émissions mondiales nettes de CO₂

Milliards de tonnes de CO₂ /an



Dans le
sans d
émissi
ou son
l'échell

Évolution des émissions



Conclusion

Le fait que les **activités humaines** ont déjà et vont continuer à **changer le climat n'est plus une questions scientifiques ouvertes**. Questions qui demeurent : Quelles en seront l'amplitudes, les effets, et comment les limiter ?

Les systèmes climatiques et socio-économiques ont des constantes de temps longues. => **Besoin d'anticiper**

Un réchauffement global de **quelques degrés** entraîne un **changement radical du climat et de l'environnement**. Si les émissions de CO₂ continuent de croître, la température de la Terre sera plus élevée que toutes celles que homo sapiens a connues

Le **changement climatique est en cours** et nécessitera des adaptations d'autant plus importantes que le réchauffement sera élevé.

Limiter l'amplitude du réchauffement nécessite une **réduction radicale et rapide** des émissions de CO₂ et une « neutralité carbone » à l'échelle de 30 ans => Tous les pays, tous les secteurs, toutes les classes sociales sont concernées.

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, 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