



IPSL Climate Modelling Centre



Changements climatiques : certitudes, incertitudes et enjeux.

Jean-Louis Dufresne

jean-louis.dufresne@lmd.jussieu.fr

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

Institut Pierre Simon Laplace.



Arras, 18 mai 2015

Plan

- I. Contexte et historique
- II. Variations du climat et rôle des activités humaines
- III. Projections des climats futurs
- IV. Paléoclimats et variabilité naturelle
- V. Retour sur la modélisation et sur quelques questions

La **Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques** (CCNUCC); adoptée au cours du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro en 1992 (ratifiée par 189 pays)

Conférence des parties (COP). Composée de tous les États parties, elle se réunit tous les ans pour analyser les avancées de la convention et prend des décisions pour atteindre les objectifs de lutte contre les changements climatiques.

1997: COP 3. **Signature du protocole de Kyoto**. Engagement de limitation de l'accroissement de gaz à effet de serre pour les pays industrialisés pour la période 2005-2012.

2009: **échec de la Conférence de Copenhague** (COP15) qui devait déboucher sur un accord global

COP21 Conférence Paris Climat 2015; trouver un accord qui permette de tenir l'objectif d'un réchauffement limité à 2 degrés.



Qu'est-ce que le GIEC ?

- **GIEC** : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (en anglais IPCC)
- Créé en 1988 par l'**Organisation météorologique mondiale** (OMM) et le **Programme des Nations Unies pour l'environnement** (PNUE)
- A pour mission d'établir **l'état des connaissances scientifiques** sur les changements climatiques et leurs possibles incidences sur l'environnement et les activités socio-économiques
- Ne **fait pas** ni organise la **recherche**



Qu'est-ce que le GIEC ?

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (en anglais IPCC)

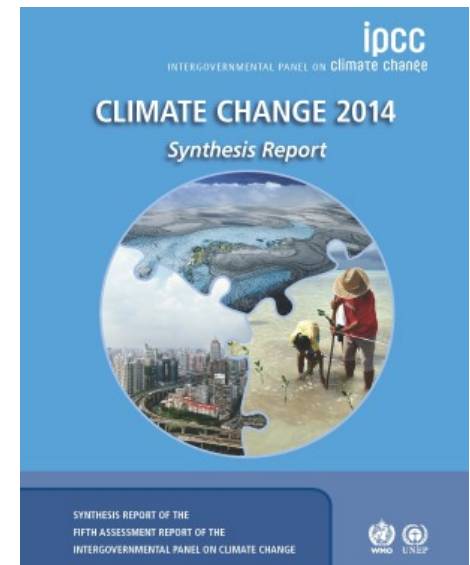
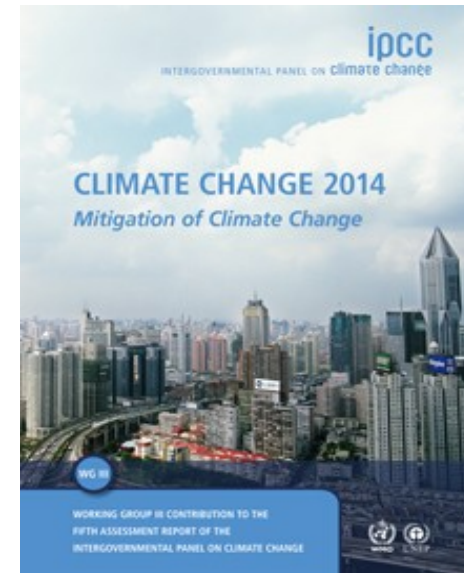
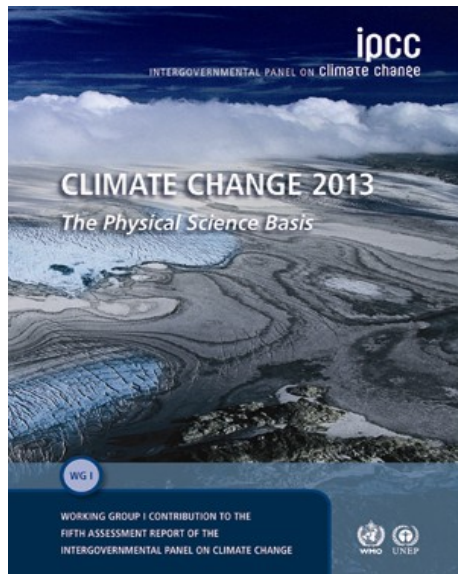
Trois groupes de travail:

I- Les bases physiques des changements climatiques et de l'évolution du climat

II- Impacts, adaptations et vulnérabilités aux changements climatiques. Vulnérabilité des systèmes socioéconomiques et naturels aux changements climatiques, les conséquences de ces changements et les possibilités de s'y adapter.

III- Atténuation des changements climatique. Solutions envisageables pour limiter les émissions de gaz à effet de serre ou atténuer de toute autre manière les changements climatiques.

2013-2014: 5^e rapport d'évaluation des 3 groupes du GIEC



Depuis quand se pose-t-on des questions sur les changements climatiques liés aux activités humaines?

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
- Il pressent l'importance de tous changements 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 »

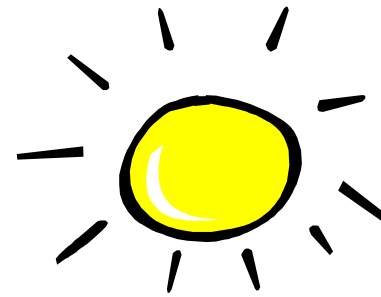


Joseph Fourier
(1768-1830)

Température d'équilibre d'une planète

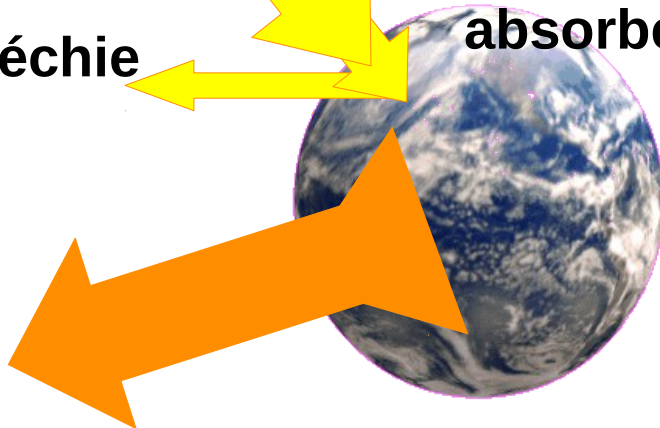


Rayonnement solaire

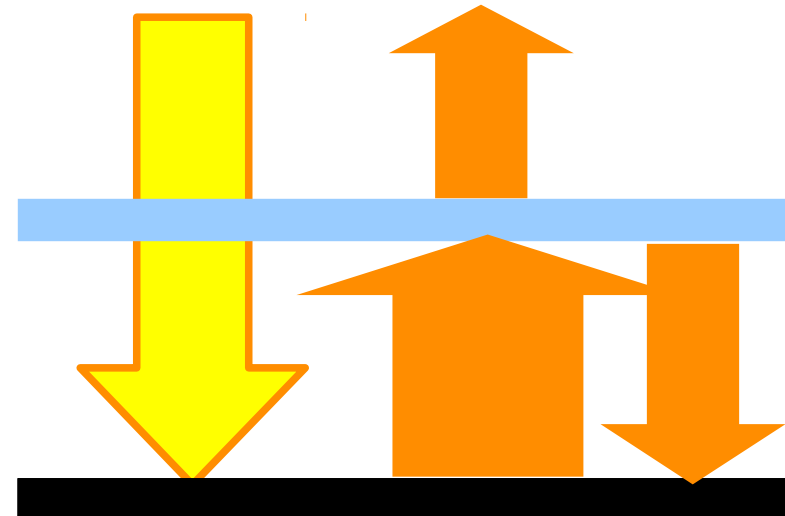


Partie réfléchie

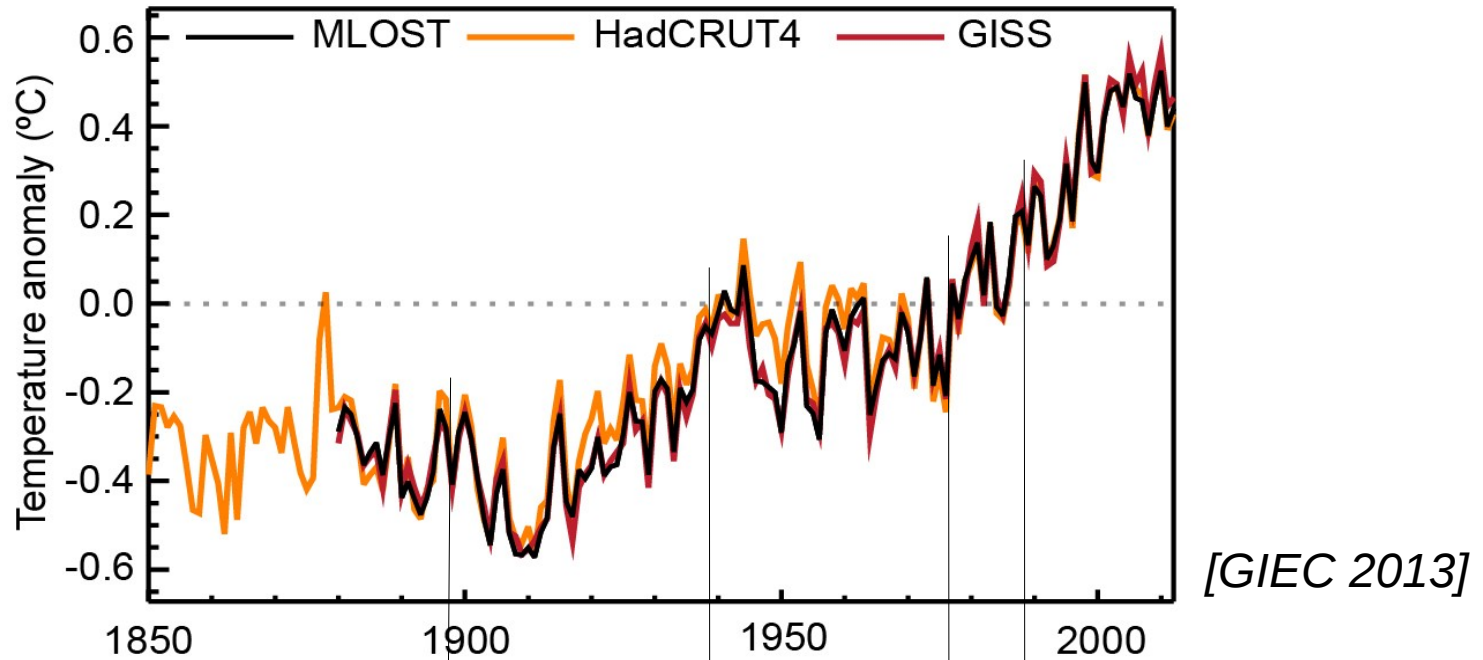
Partie absorbée



La température de surface moyenne résulte du bilan d'énergie



Premières projections climatiques alors que la température a peu augmenté



[GIEC 2013]

1988: Création du GIEC

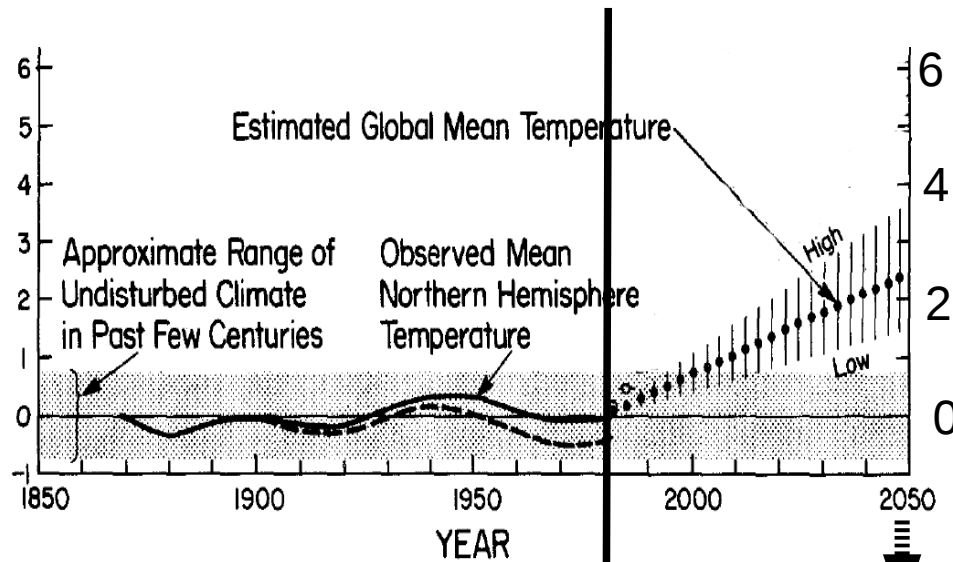
1970-1980: Premières projections climatiques avec des modèles numériques

1937: G. Callendar: nouvelle estimation du rôle du CO₂

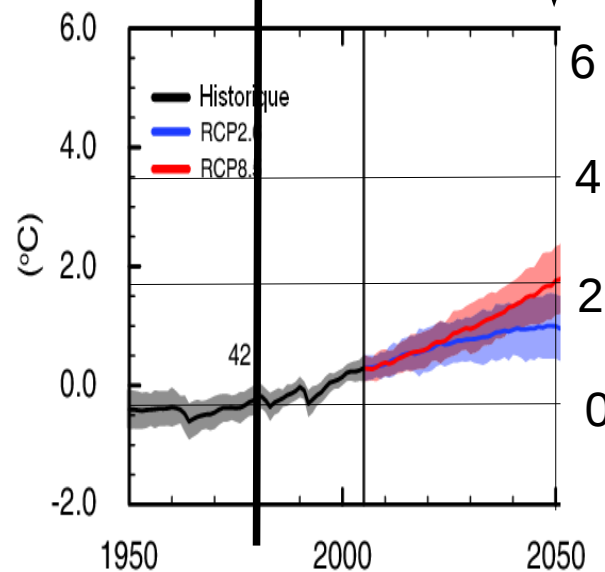
1897: S. Arrhenius: première estimation du rôle du CO₂

1824: J. Fourier établit les bases de la physique du climat et de l'effet de serre

Premières projections climatiques alors que la température a peu augmenté

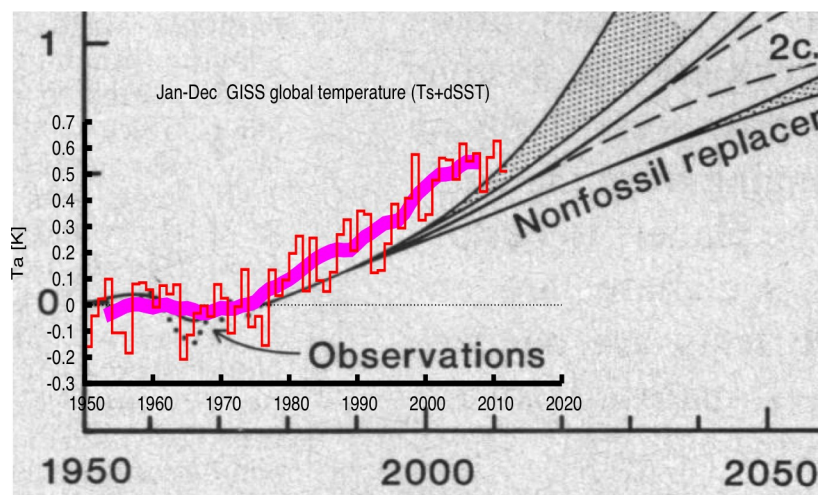
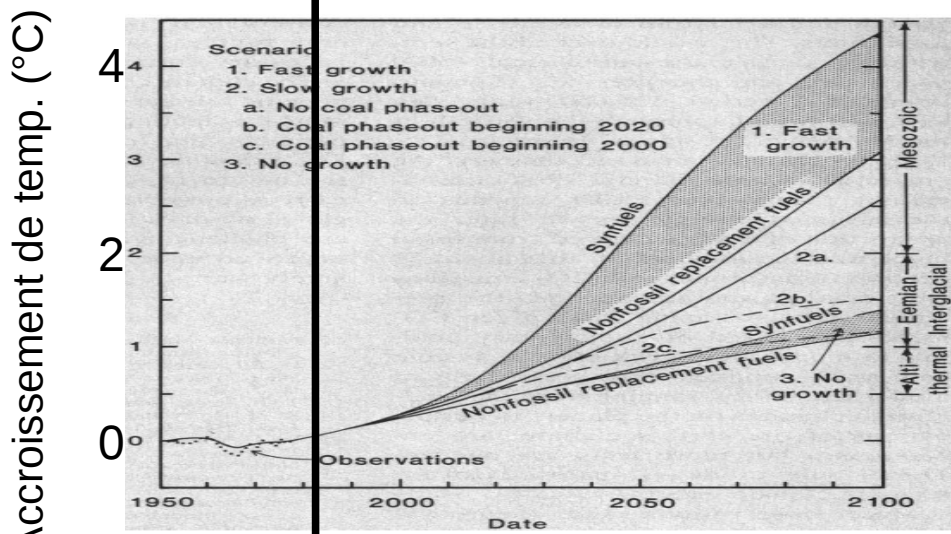


[Kellogg 1977]



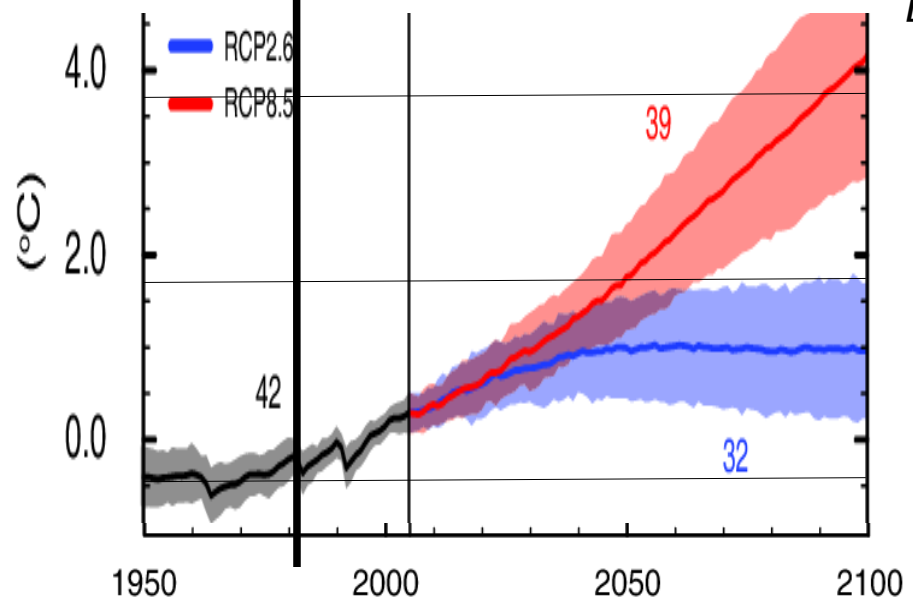
[GIEC 2013]

Premières projections climatiques alors que la température a peu augmenté



[Hansen et al. 1981]

<http://www.realclimate.org>



[GIEC 2013]

Variations du climat et rôle des activités humaines

Début 19e siècle: J. Fourier

Début 20e siècle:

S. Arrhenius:

- Premier calcul de la température moyenne de la Terre
- Hypothèse de variations passées et éventuellement future de la concentration atmosphérique de CO₂
- **Critique:** la Terre « régule » la concentration de CO₂
- Calcul de la variation de température due à une variation de CO₂
- **Critique:** la variation de CO₂ ne change pas l'absorption du rayonnement infrarouge par l'atmosphère

A partir des années 1960:

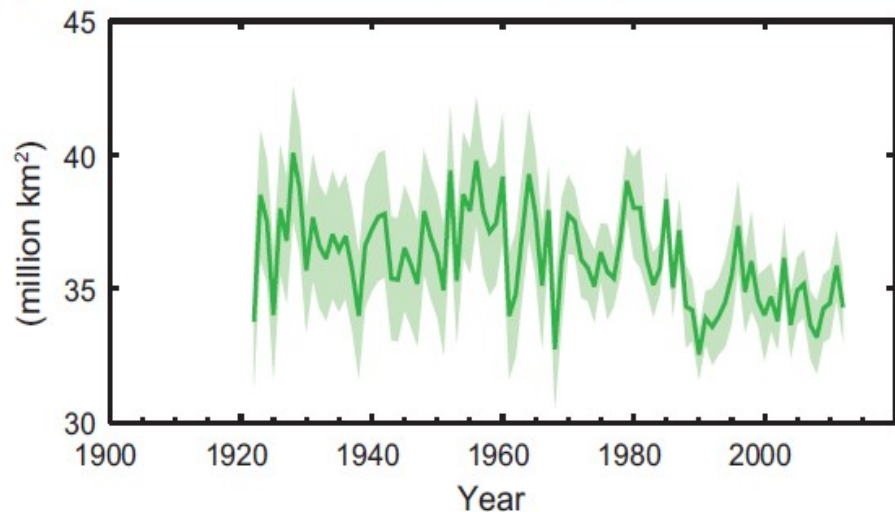
- Rayonnement infra-rouge mieux connu
- On observe un accroissement de la concentration de CO₂
- Premier calcul « moderne » de l'accroissement de température en réponse à un accroissement de CO₂
- Développement des modèles de climat
- Observations des variations des paléoclimats

Plan

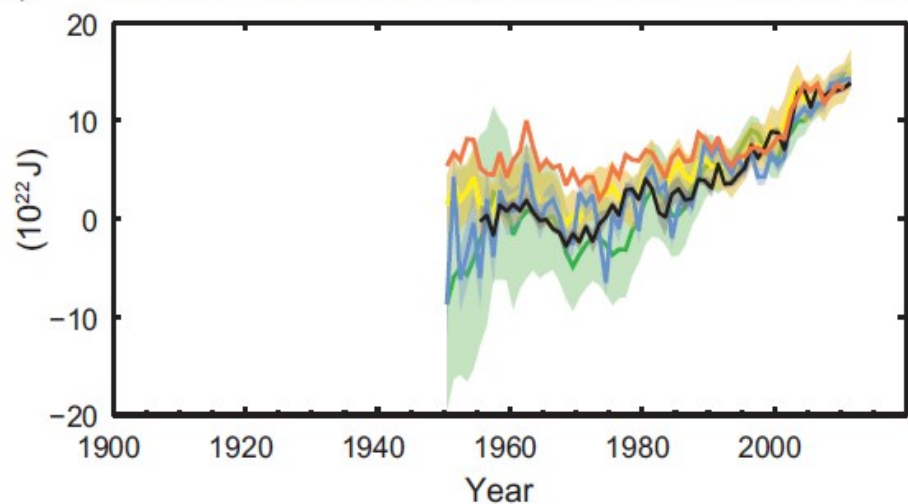
- I. Contexte et historique
- II. Variations du climat et rôle des activités humaines
- III. Projections des climats futurs
- IV. Paléoclimats et variabilité naturelle
- V. Retour sur la modélisation et sur quelques questions

Variations du climat et rôle des activités humaines

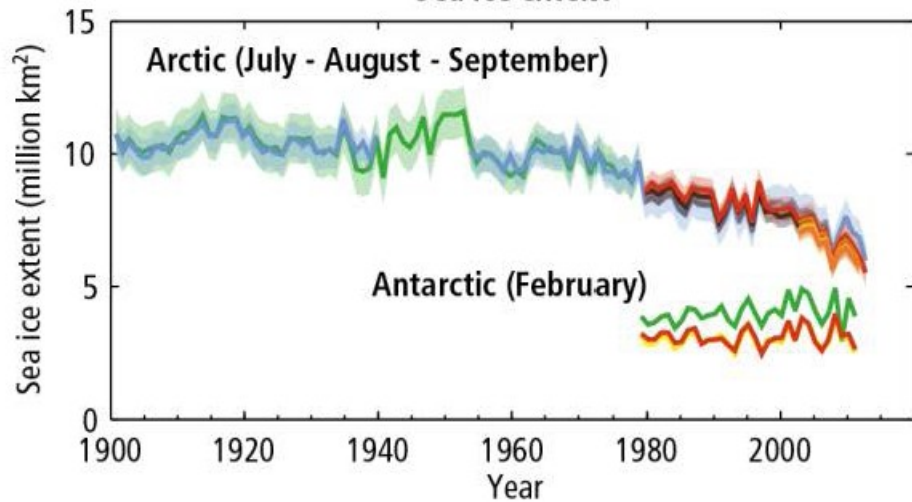
(a) Northern Hemisphere spring snow cover



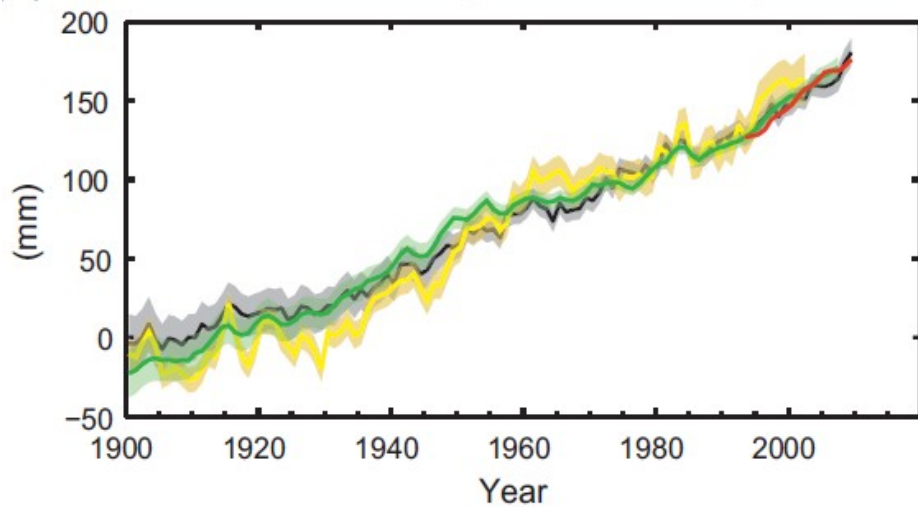
(c) Change in global average upper ocean heat content



Sea ice extent



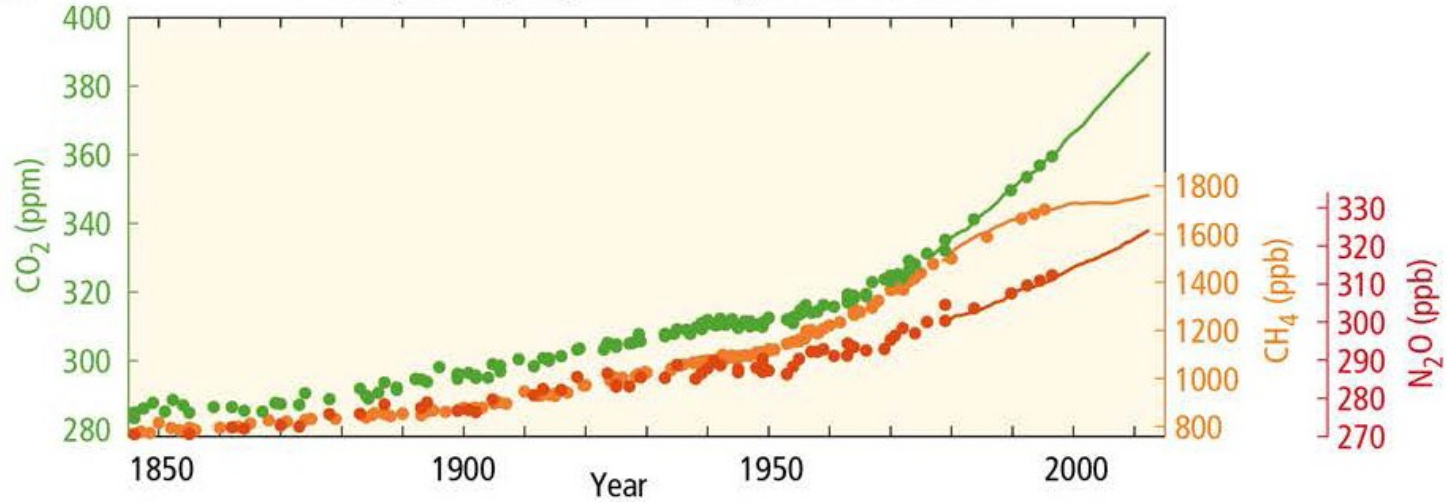
(d) Global average sea level change



Variations du climat et rôle des activités humaines

(c)

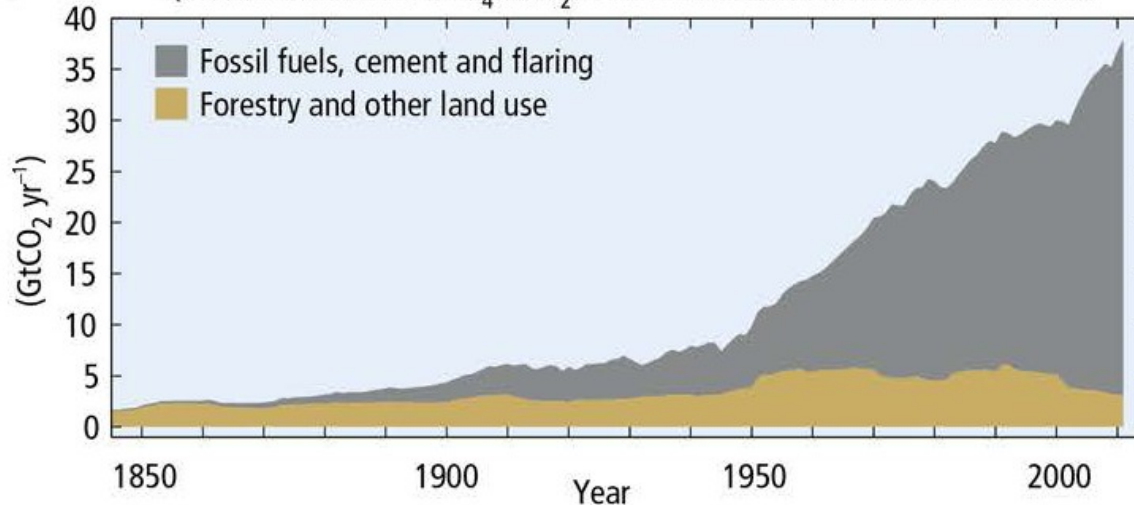
Globally averaged greenhouse gas concentrations



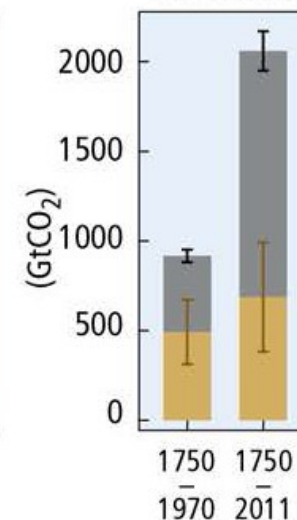
(d)

Global anthropogenic CO₂ emissions

Quantitative information of CH₄ and N₂O emission time series from 1850 to 1970 is limited



Cumulative CO₂ emissions



[GIEC 2014]

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%



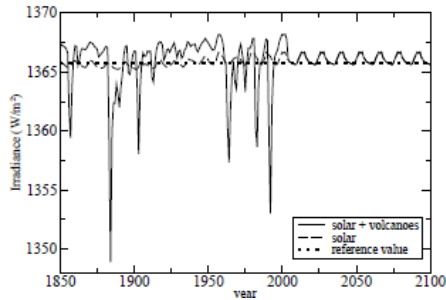
2,6 ± 0,8 PgC y⁻¹
27%



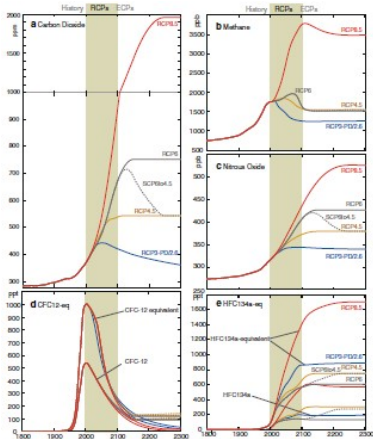
Le modèle couplé "Système Terre" de l'IPSL

Forçages naturels et anthropiques

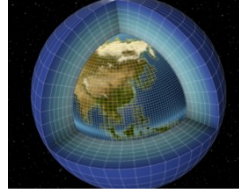
Soleil et volcans



Gaz à effet de serre ou chimiquement actifs



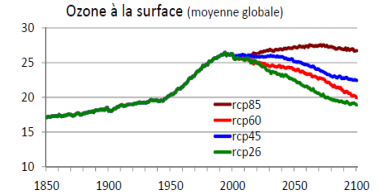
Concentration de CO_2



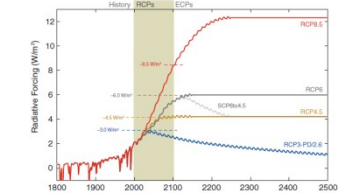
Modèle de climat

- 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

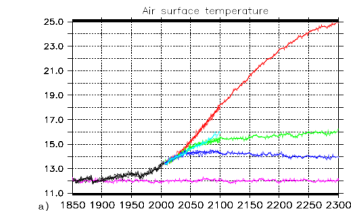
Composition de l'atmosphère



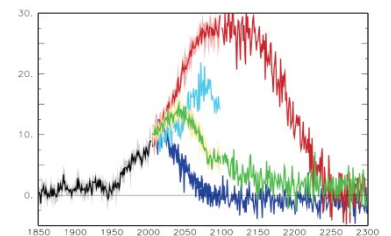
Forçage radiatif



Changement climatique

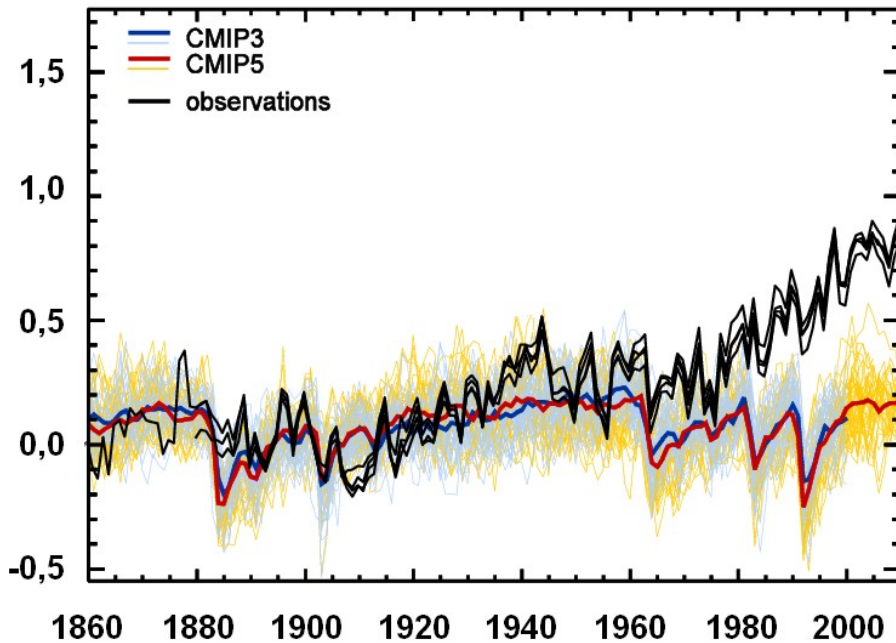


Émission autorisée de CO_2

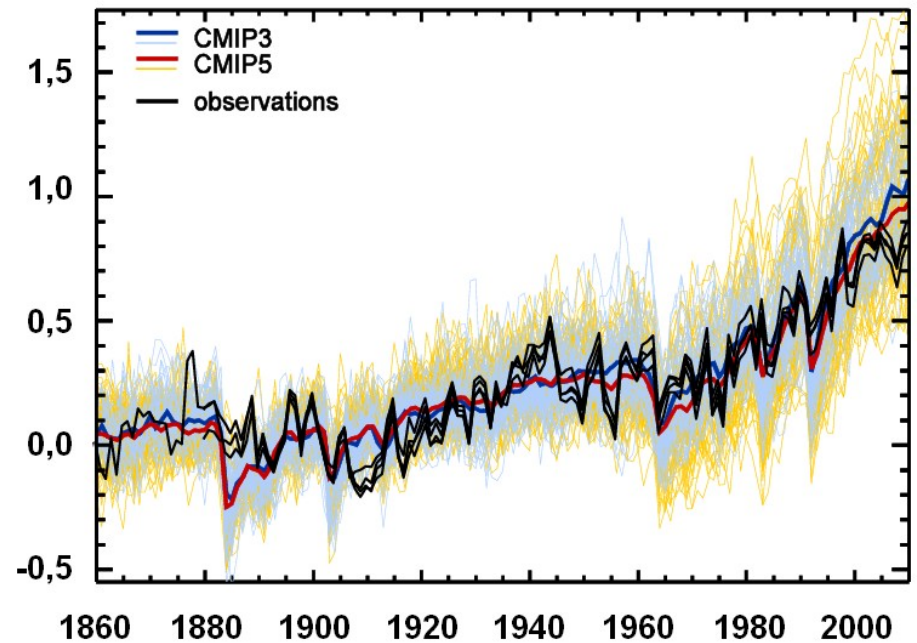


Évolution récente de la température de surface de la Terre

Simulations avec forçages naturels seulement

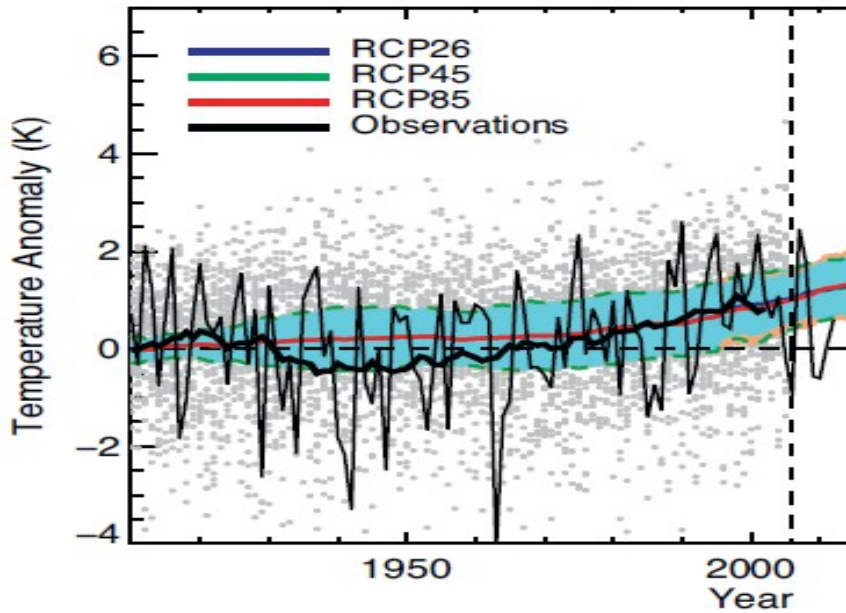


Simulations avec forçages naturels et anthropiques

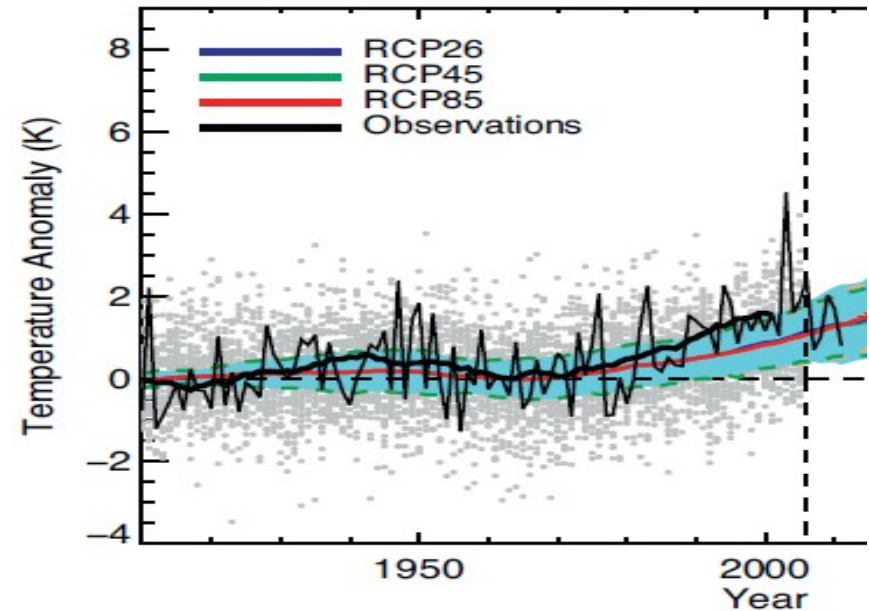


Evolution de la température en France

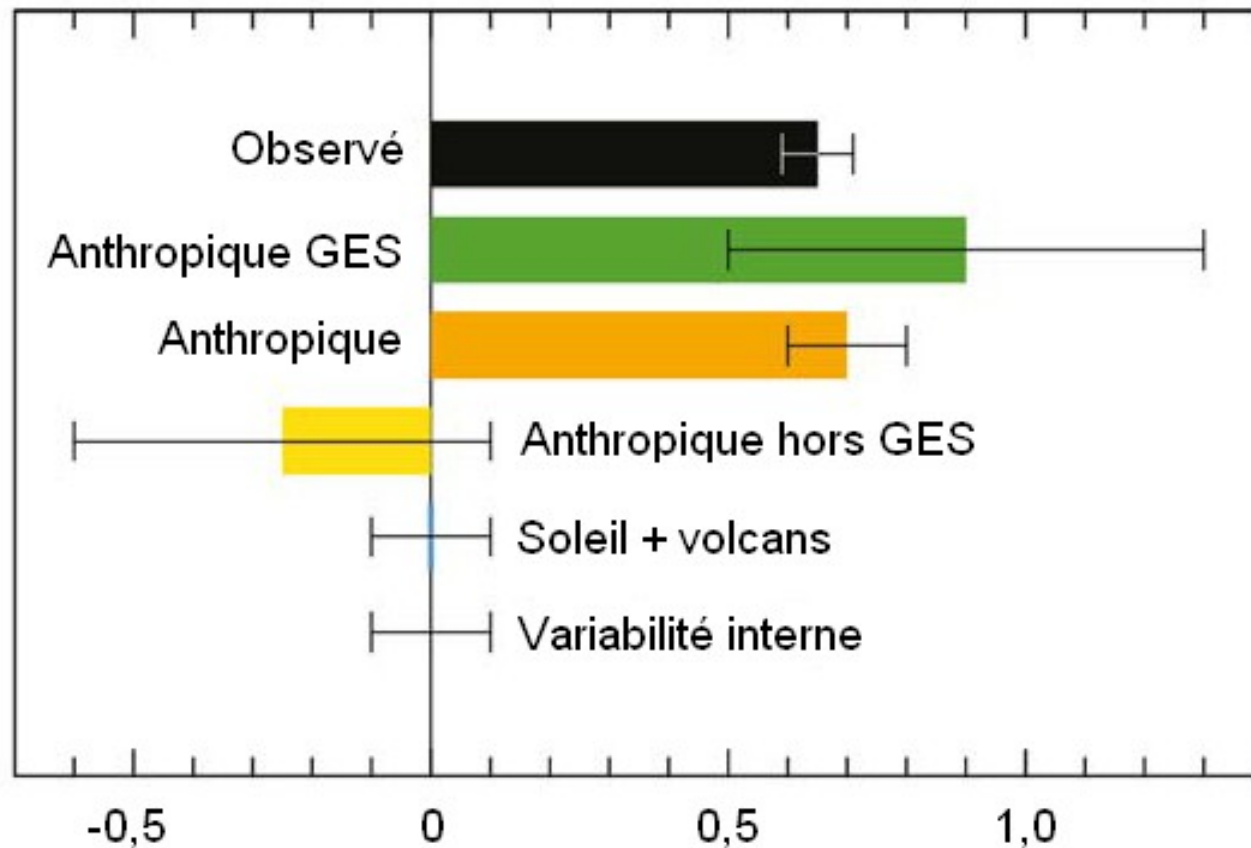
hiver



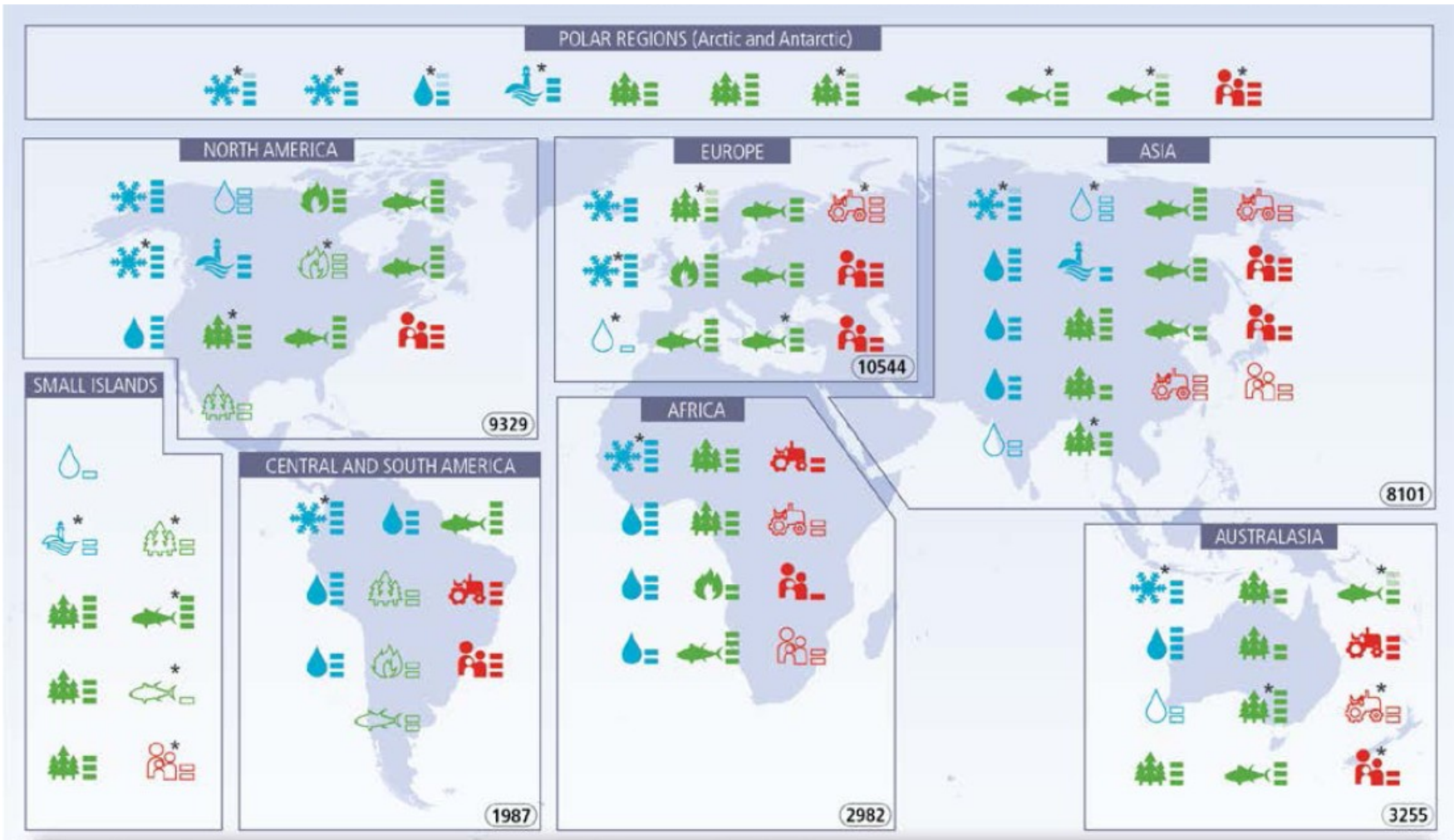
été



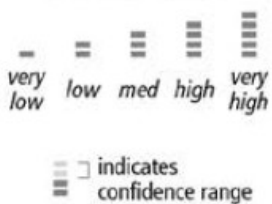
Attribution des tendances sur 1951-2010 de la température moyenne globale en surface



Incidences attribuées au changement climatique

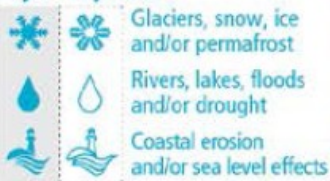


Confidence in attribution to climate change



Observed impacts attributed to climate change for

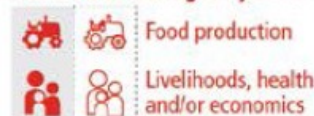
Physical systems



Biological systems



Human and managed systems



* Impacts identified based on availability of studies across a region

Outlined symbols = Minor contribution of climate change
Filled symbols = Major contribution of climate change

[GIEC, 2014]

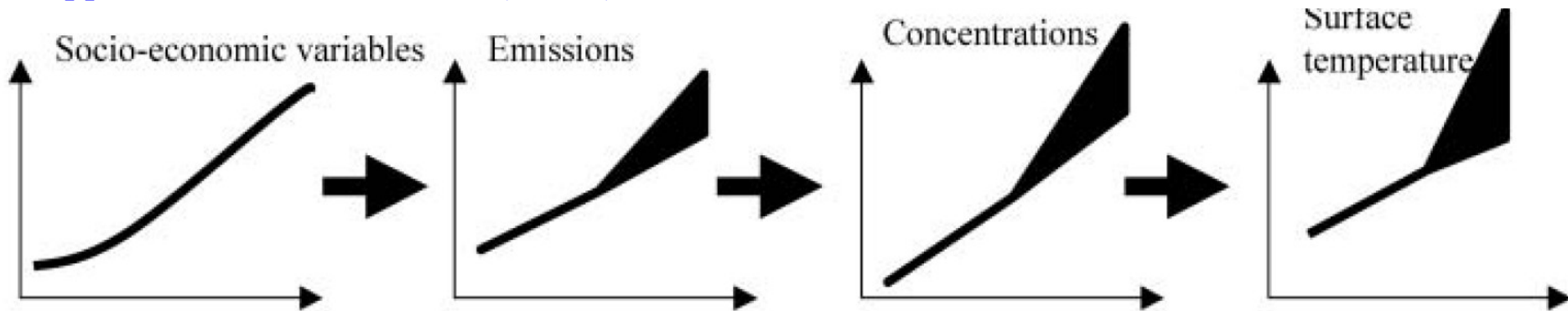
Plan

- I. Contexte et historique
- II. Variations du climat et rôle des activités humaines
- III. Projections des climats futurs
- IV. Paléoclimats et variabilité naturelle
- V. Retour sur la modélisation et sur quelques questions

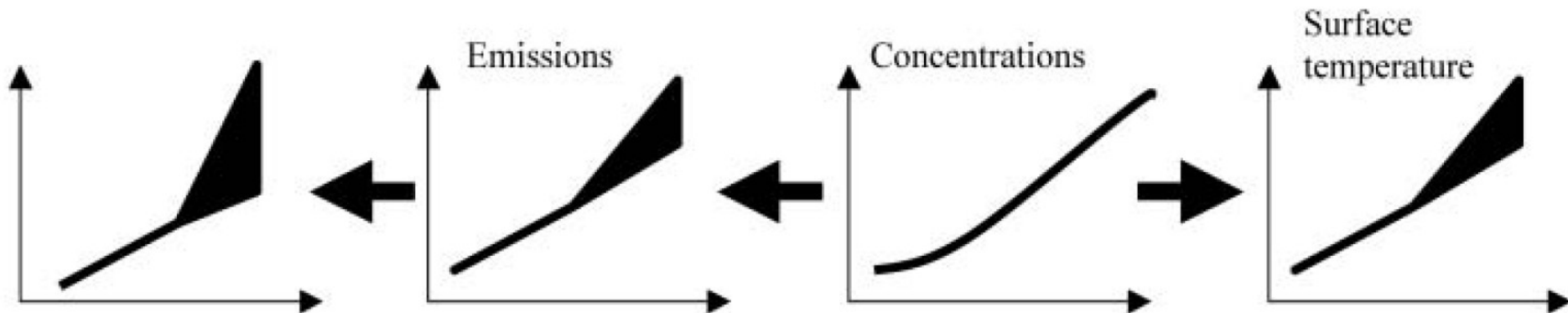
Les projections futures

Explorations des futurs possibles. Repose sur des scénarios d'émissions ou de concentration des gaz à effet de serre et précurseurs des aérosols

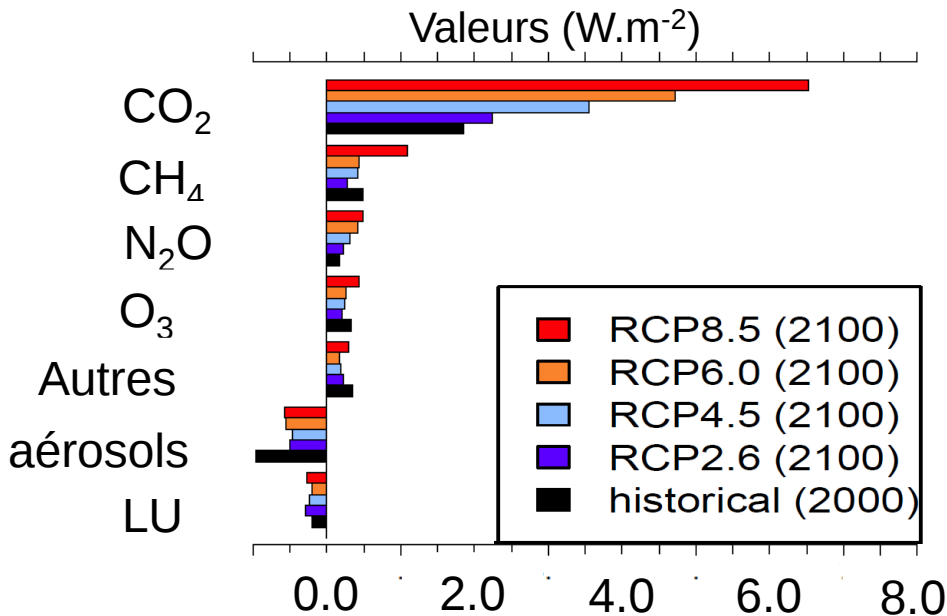
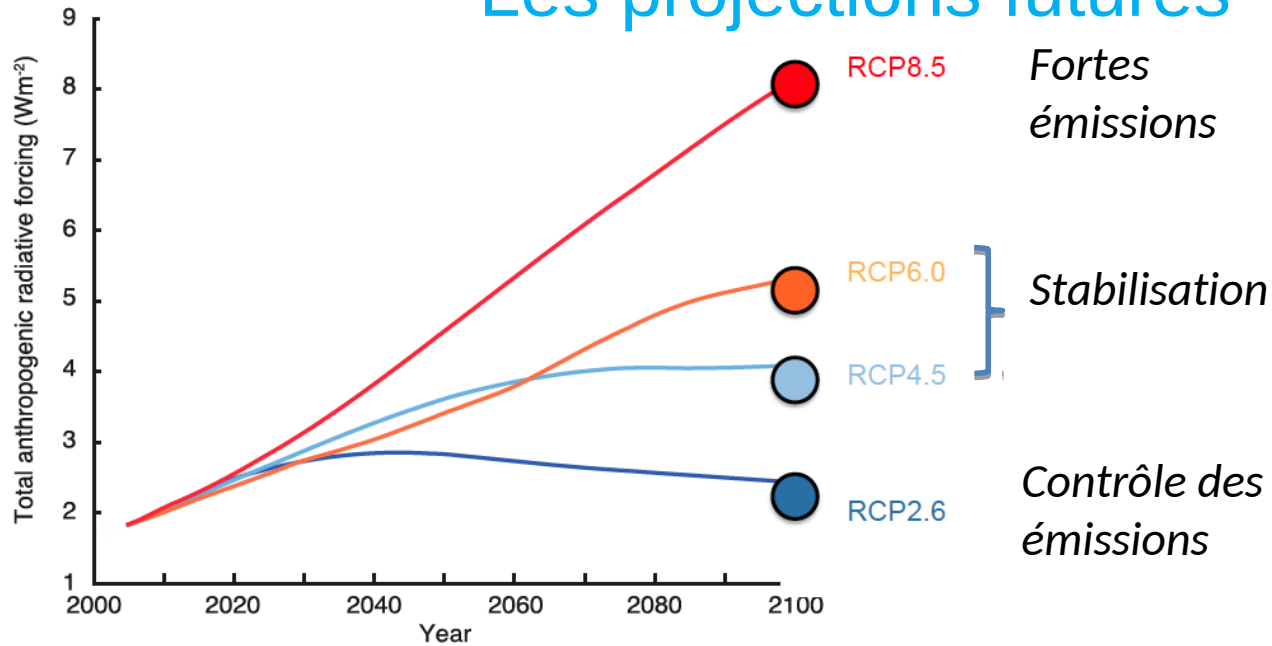
Approche anciens scénarios (SRES)



Approche nouveaux scénarios (RCP)



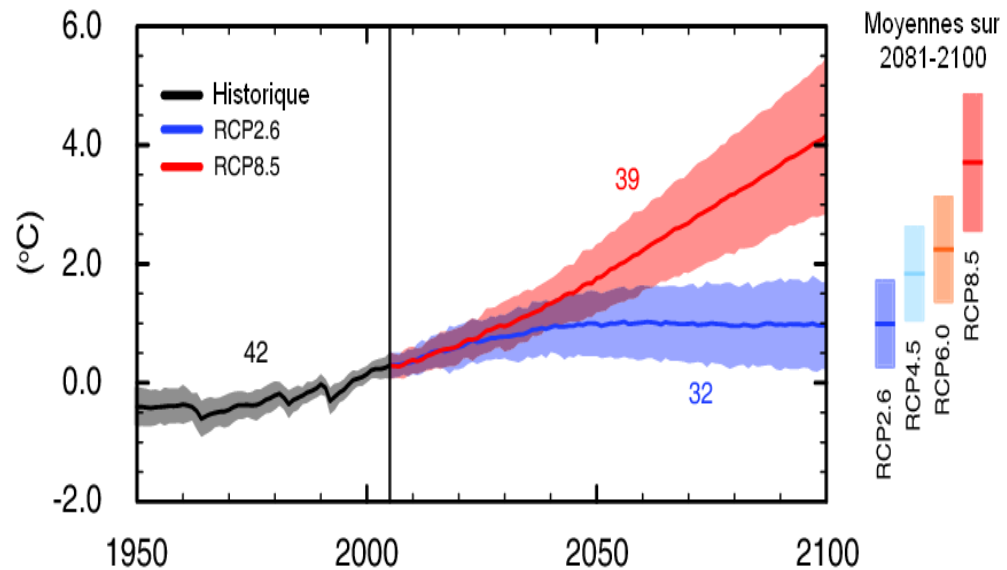
Les projections futures



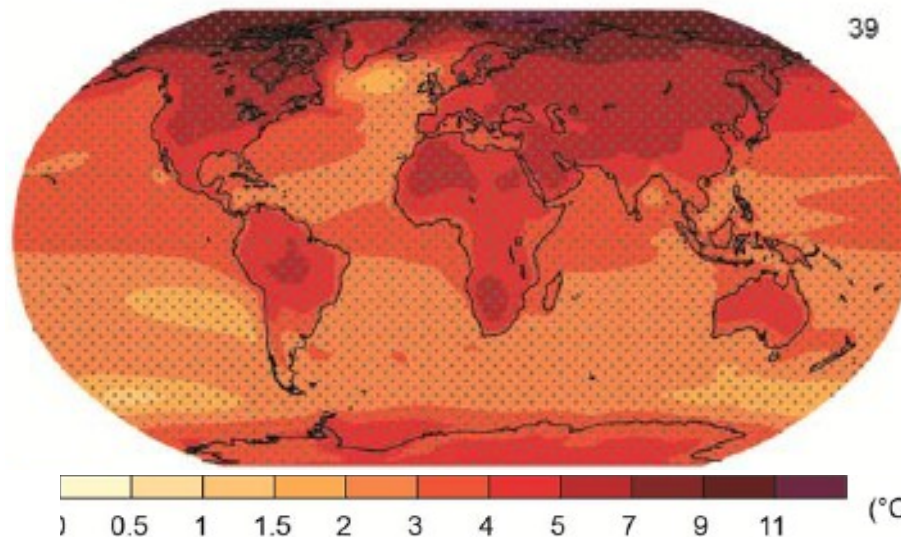
Contribution des forçages individuels au forçage total (référence 1850)

Température de surface

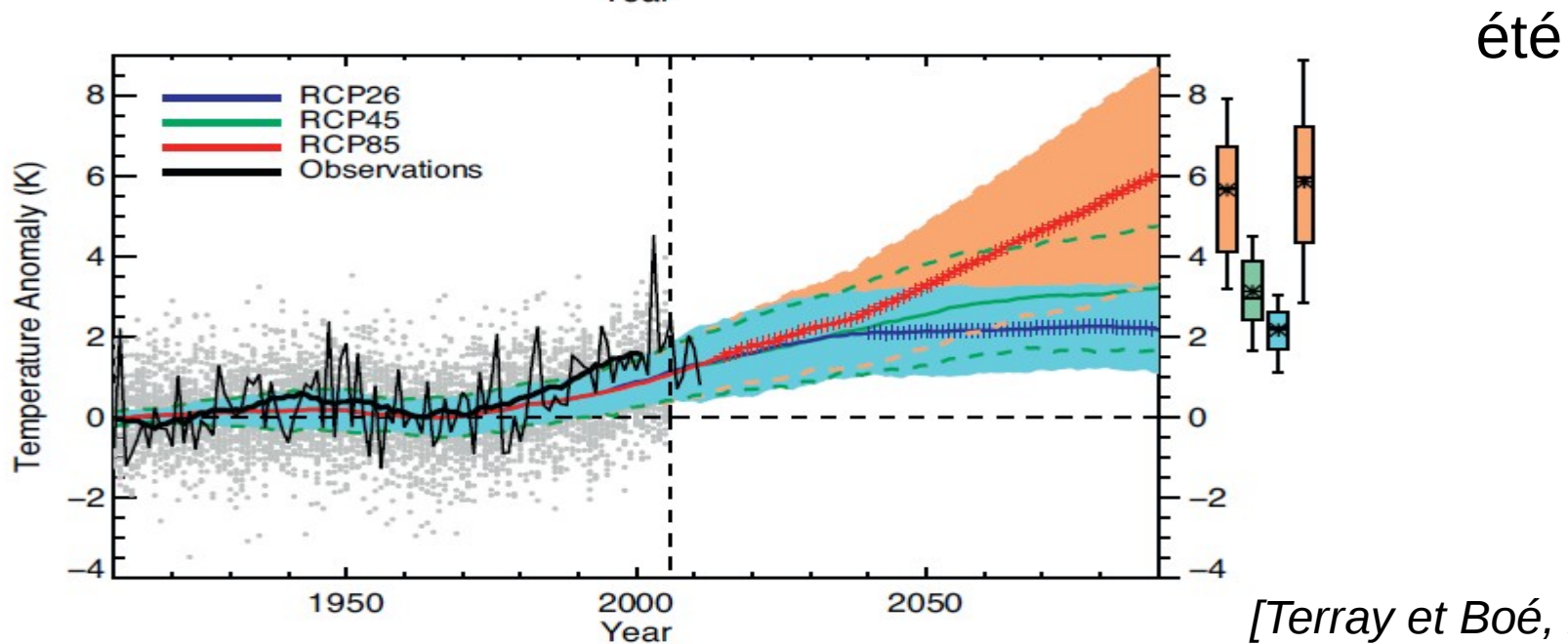
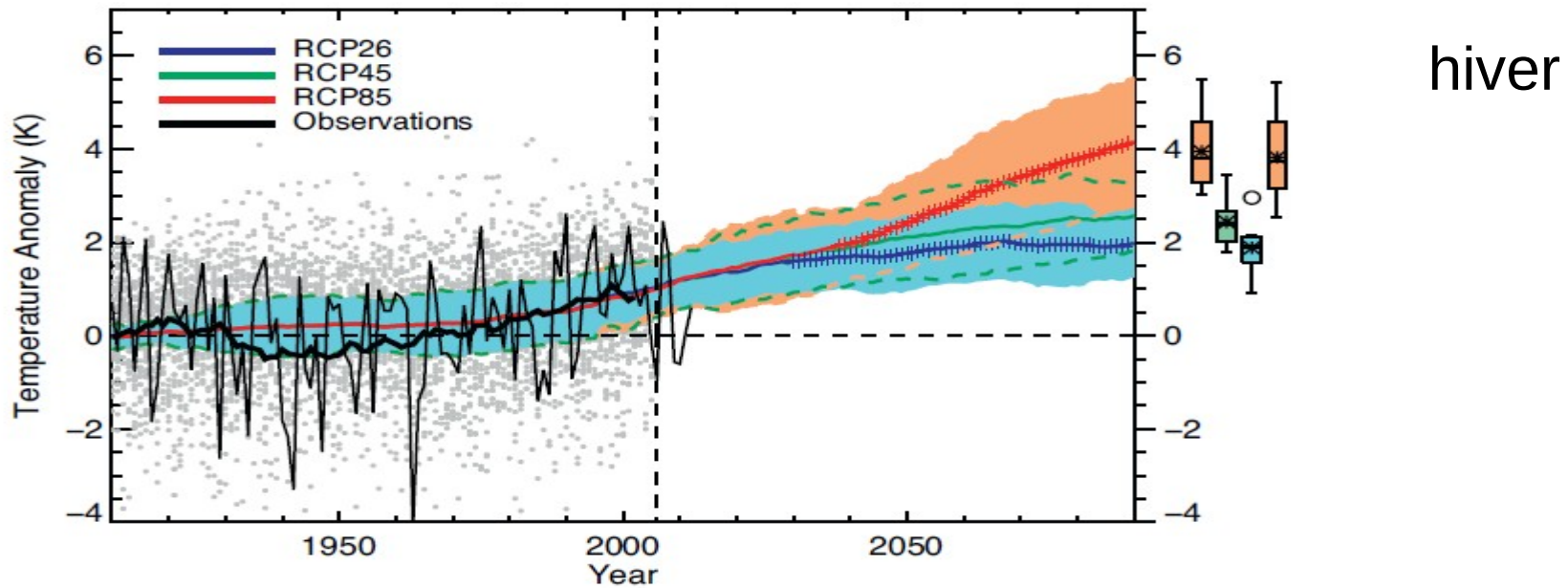
Moyenne globale
1950 à 2100
(40 modèles CMIP5)



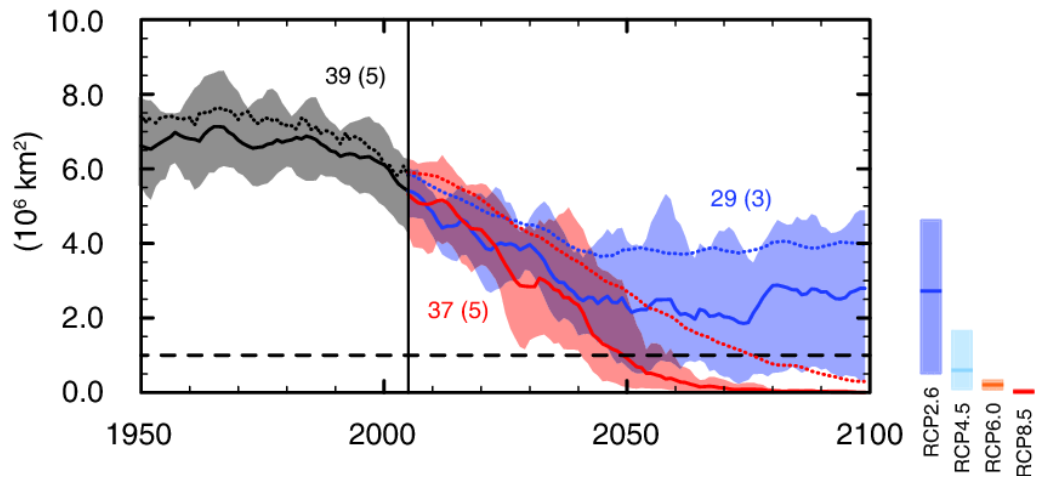
En 2100,
scénario RCP8.5
(39 modèles CMIP5)



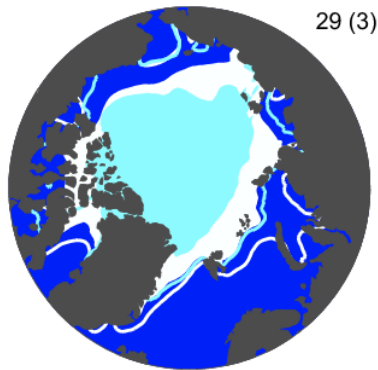
Evolution de la température en France







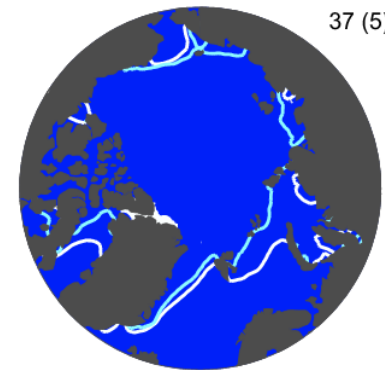
Changements d'extension de la banquise de l'hémisphère nord septembre (minimum d'extension)



RCP2.6

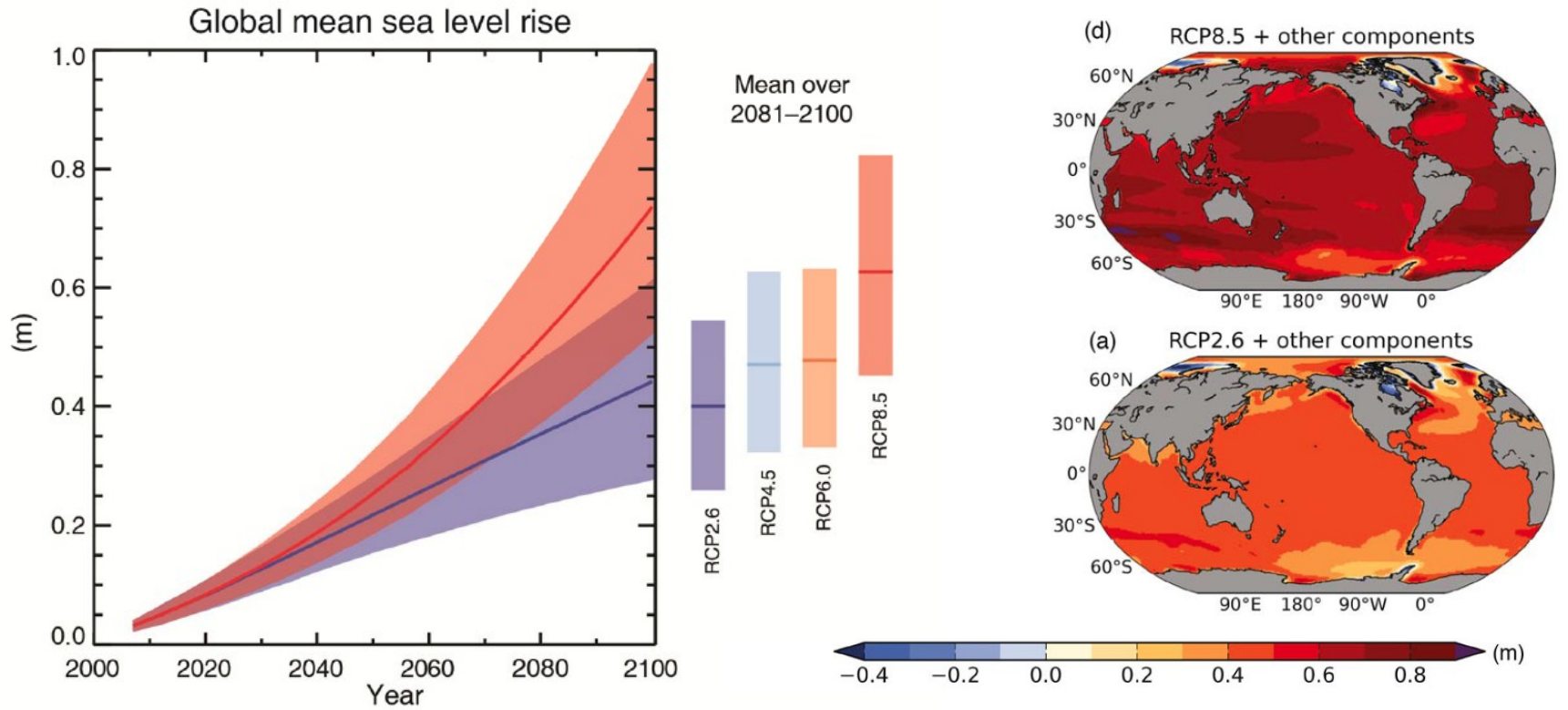


-  CMIP5 multi-model average 1986–2005
-  CMIP5 multi-model average 2081–2100
-  CMIP5 subset average 1986–2005
-  CMIP5 subset average 2081–2100



RCP8.5

Changement du niveau des mers

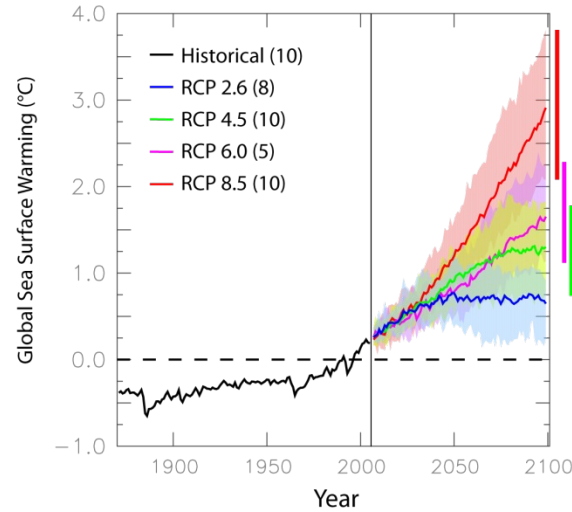


[GIEC, 2013]

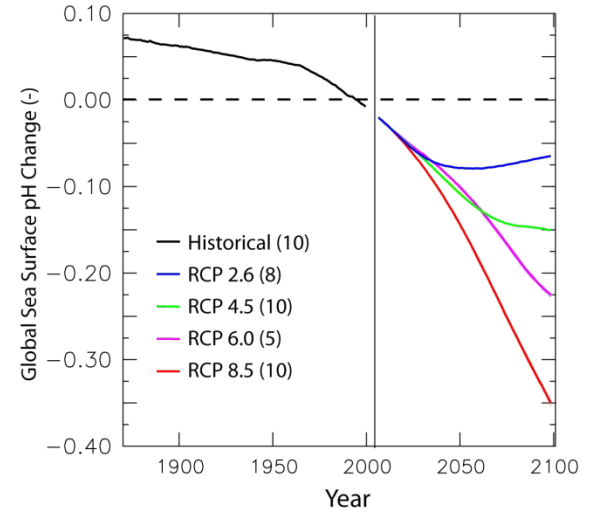
Impacts du changement climatique sur les écosystèmes marins : Multi-modèle

Des eaux de surface plus chaudes...
et plus acides

Température de Surface

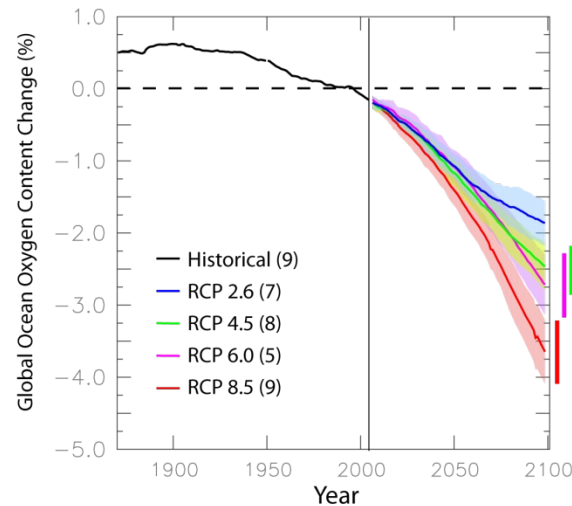


pH de Surface

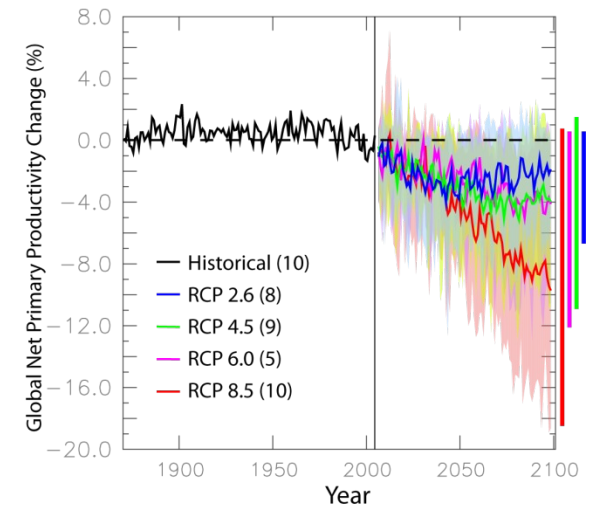


Moins d'oxygène et
moins de production
primaire

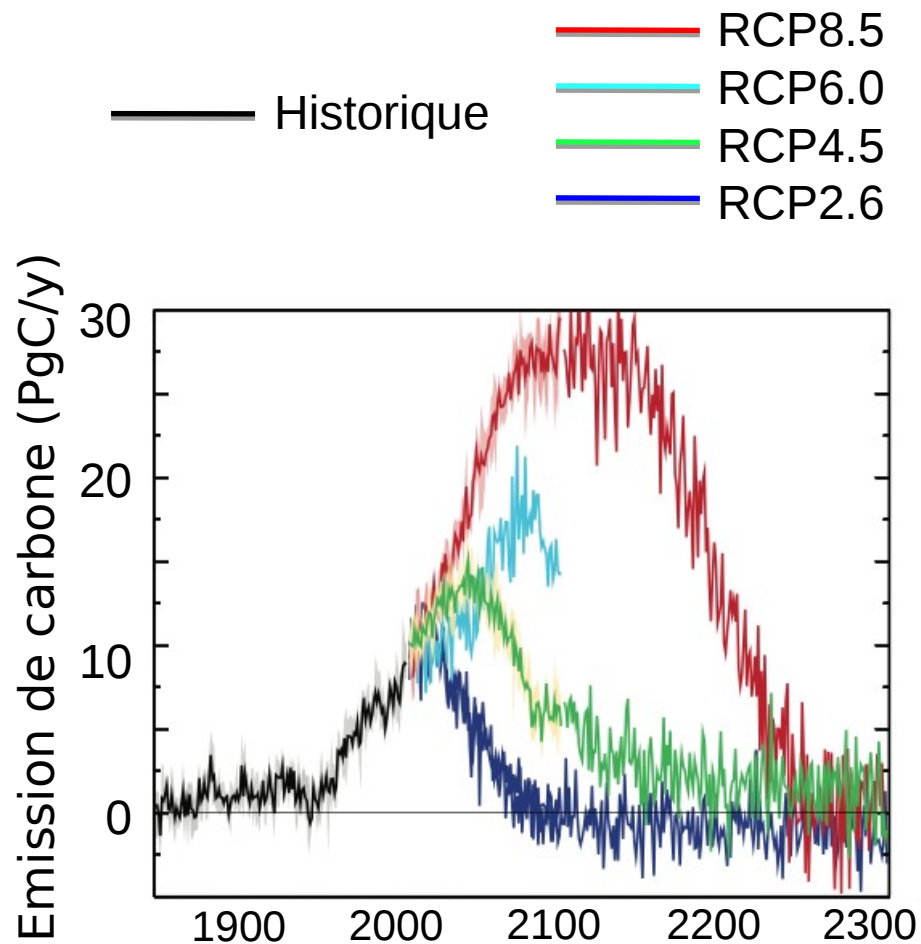
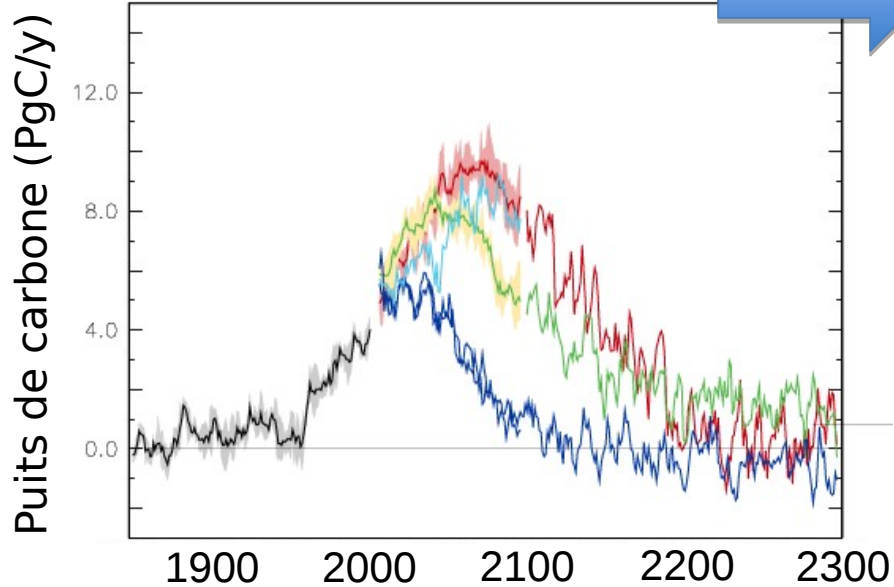
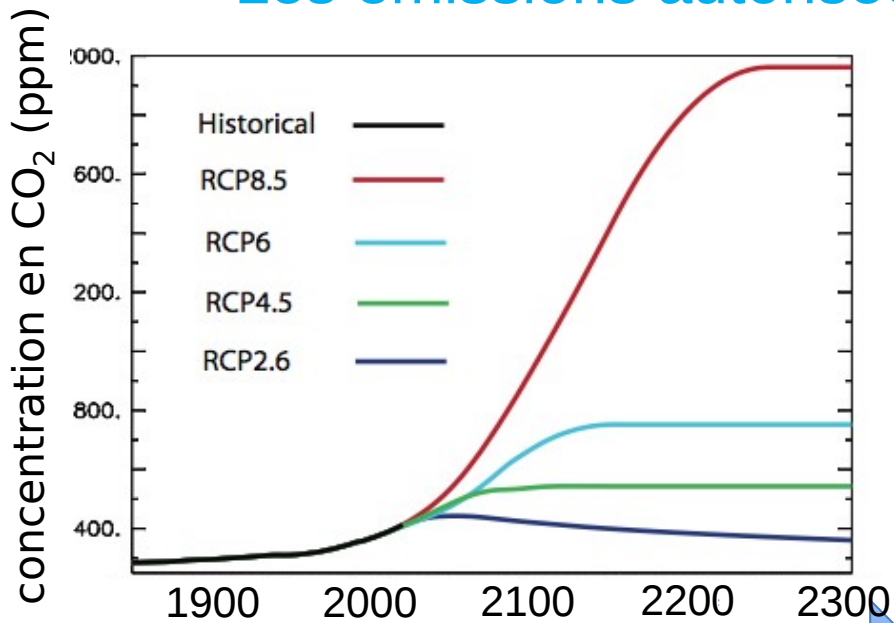
Contenu en Oxygène



Production Primaire Nette

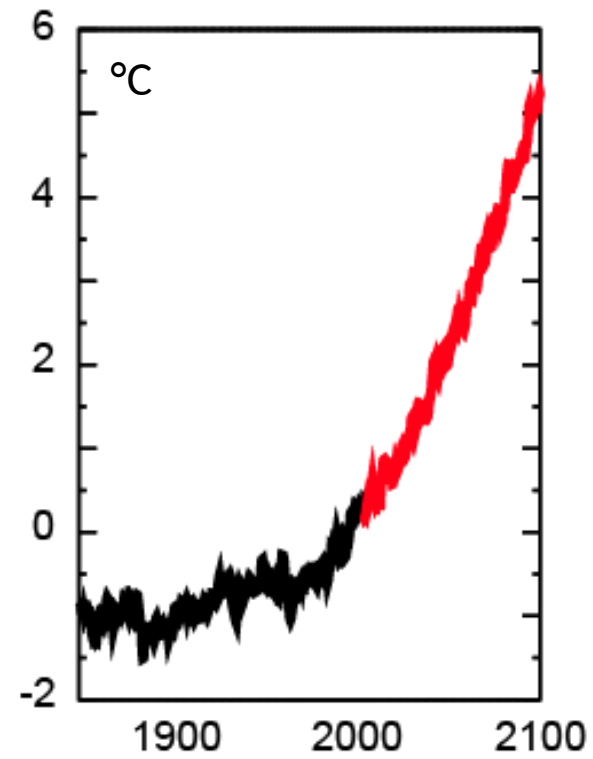
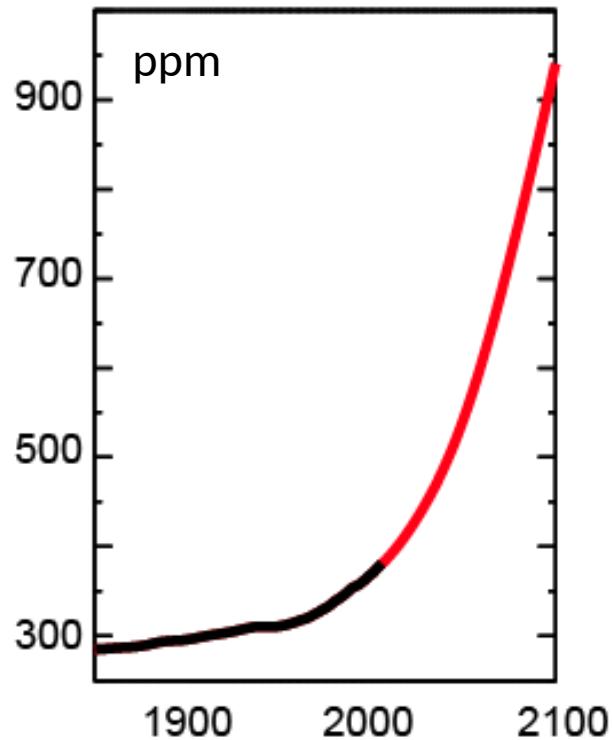
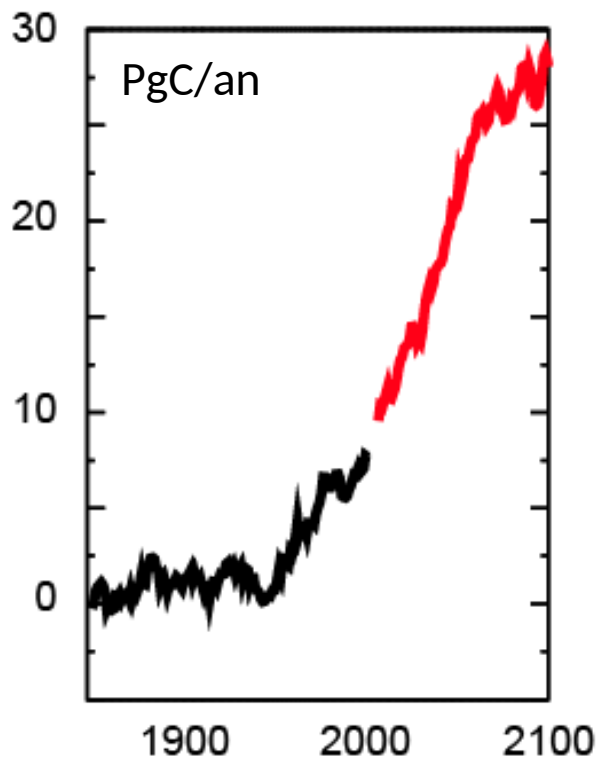


Les émissions autorisées de CO₂ avec IPSL-CM5



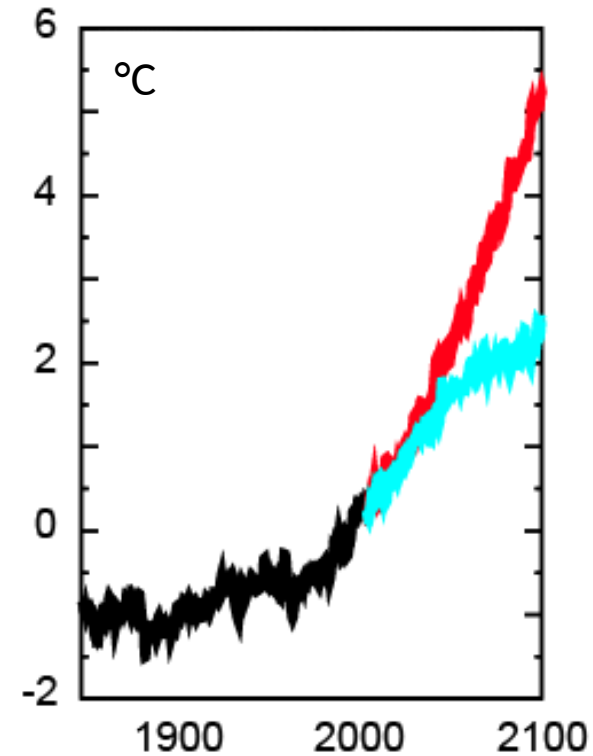
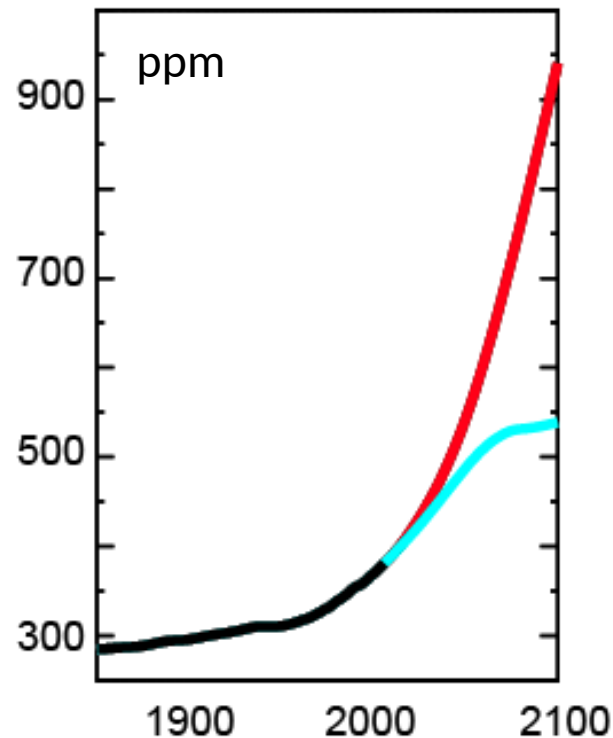
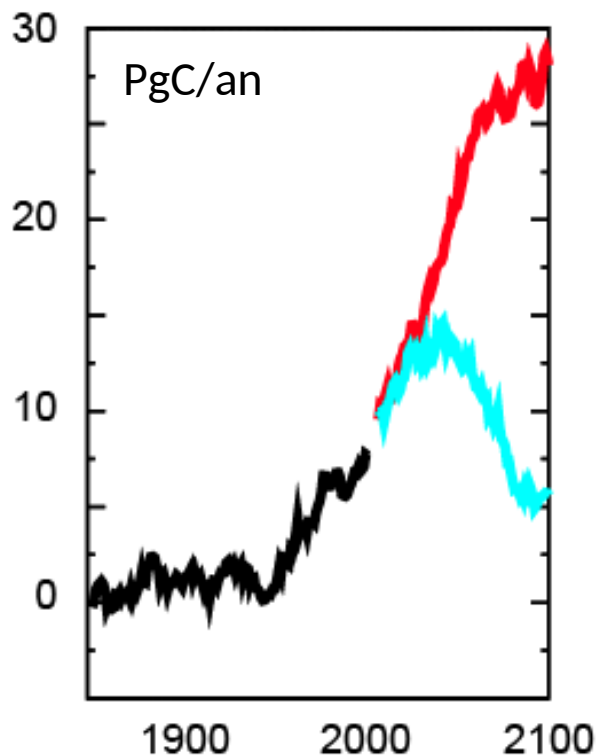
Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO₂, Température moyenne

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



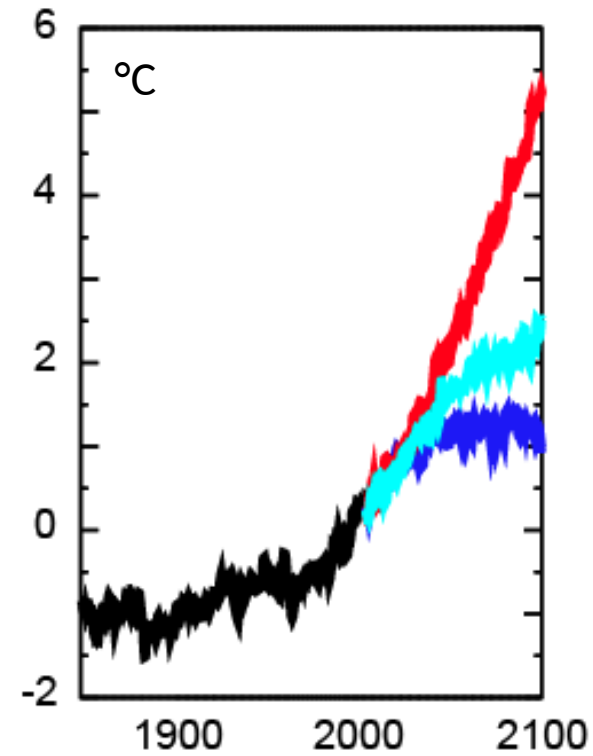
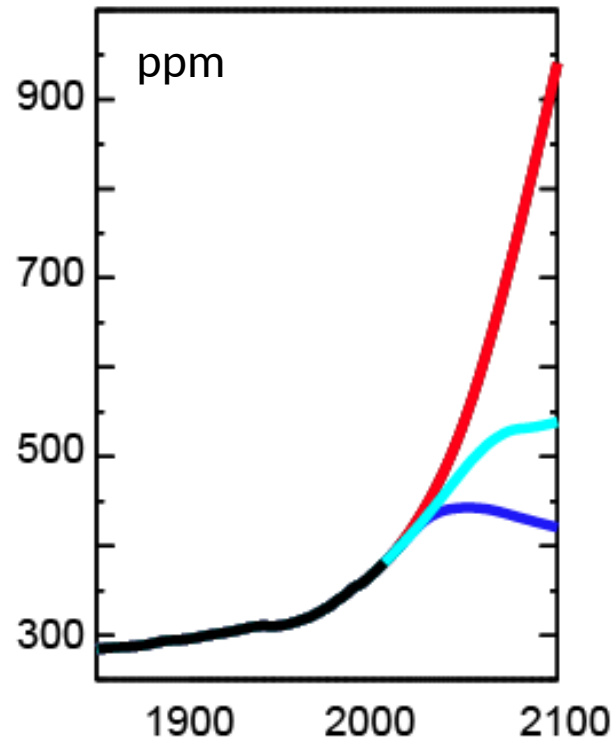
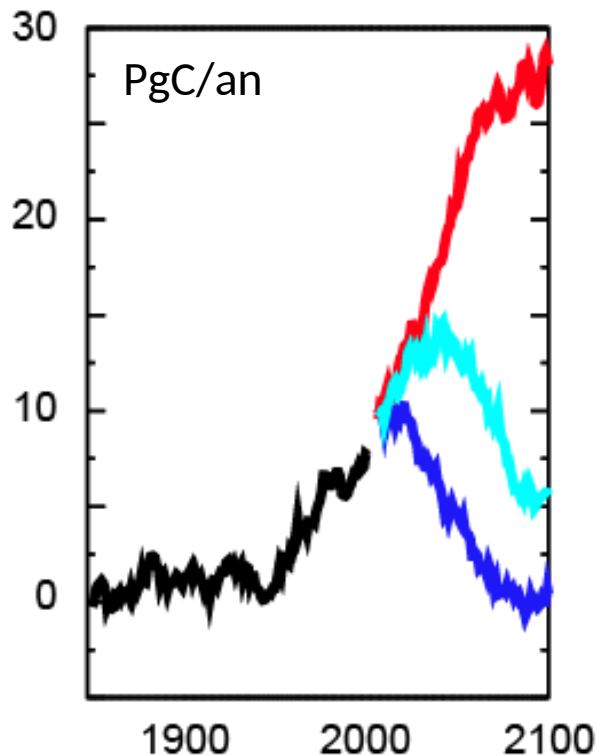
Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO₂, Température moyenne

- >> **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

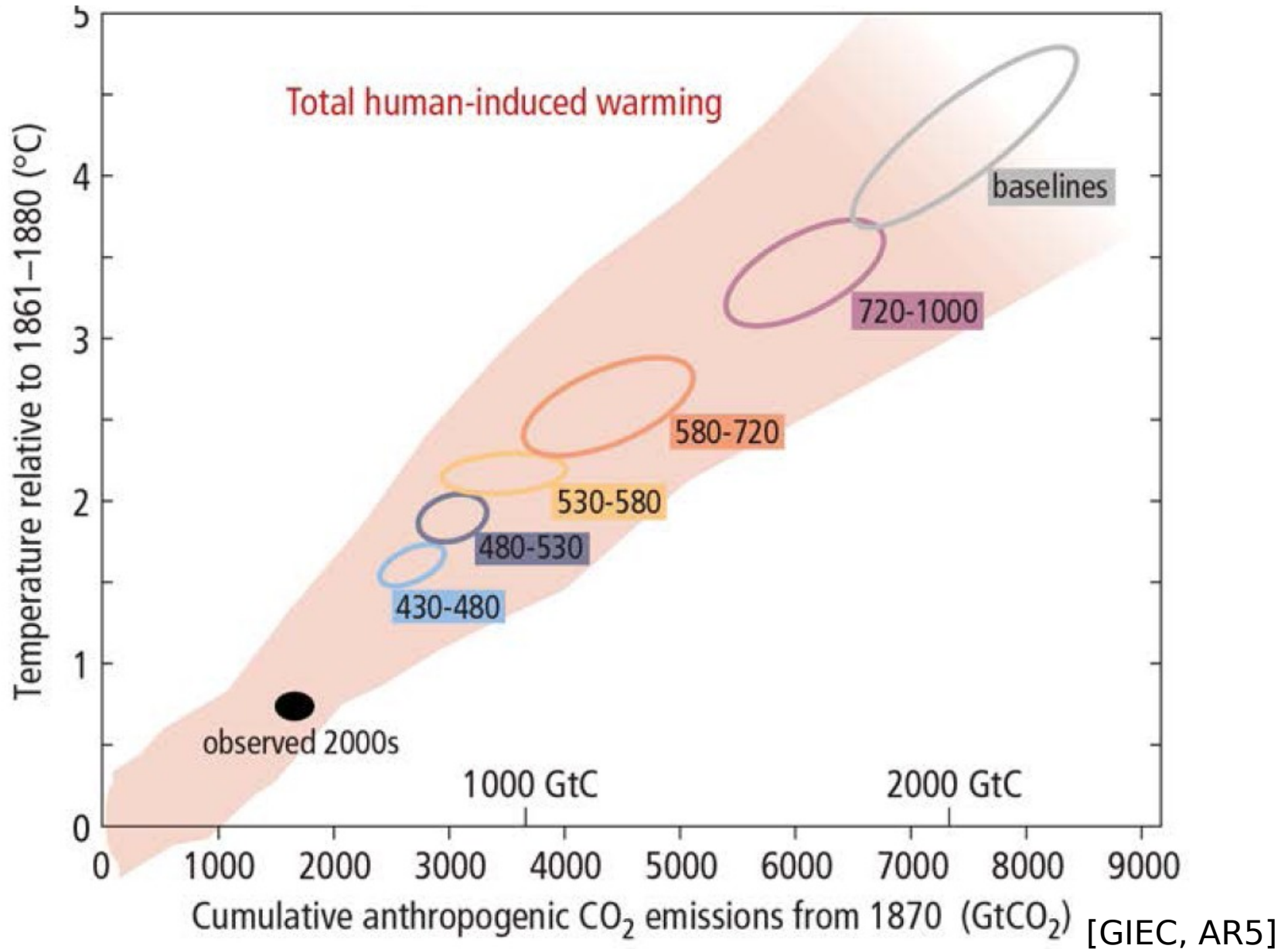


Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO₂, Température moyenne

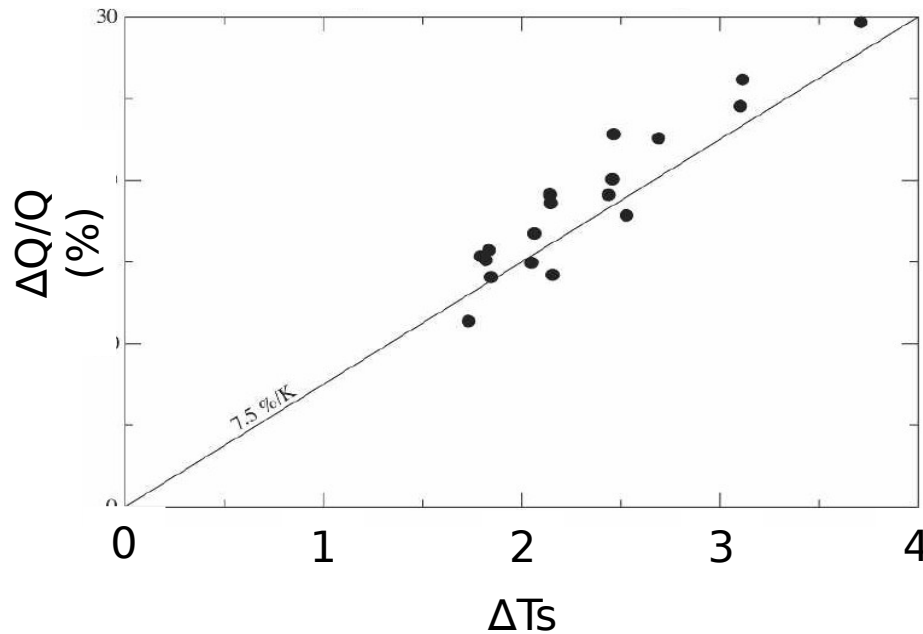
- >> **Scénario Haut** : les émissions, les concentrations et les températures augmentent
- >> **Scénario Médian** : pour stabiliser les concentrations à 550 ppm, il faut décroître fortement les émissions. Mais les températures continent à augmenter
- >> **Scénario Bas** : pour limiter le réchauffement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



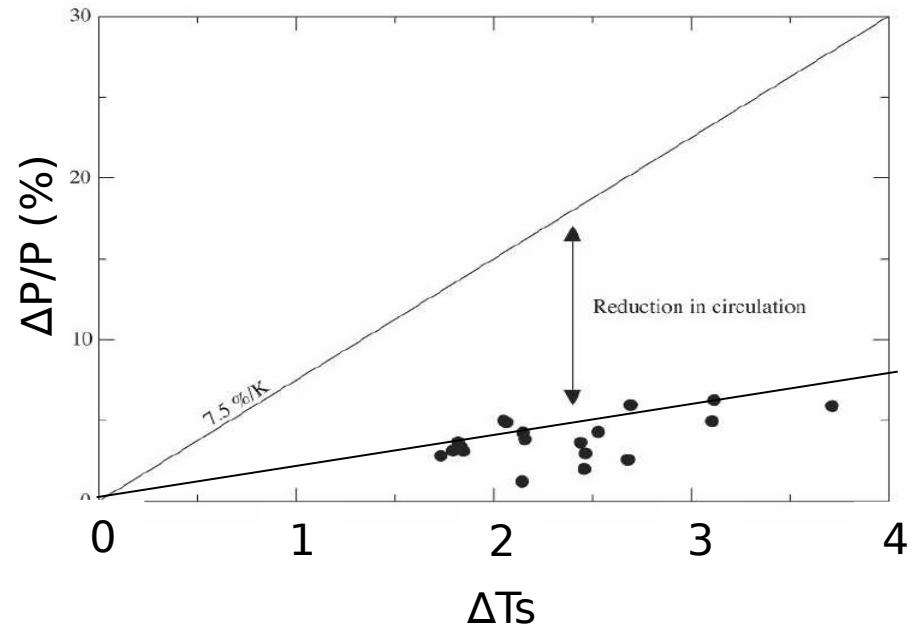
Accroissement de température versus les émissions cumulées de CO₂.



Les changements de précipitations dus à l'accroissement de température



$$\Delta Q/Q (\%) \approx 7.5 \Delta T_s$$



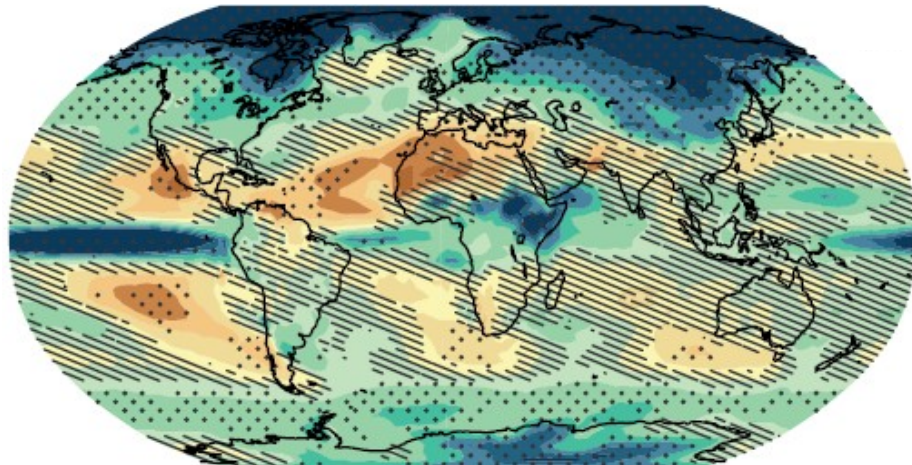
$$\Delta P/P (\%) \approx 1.5 \Delta T_s$$



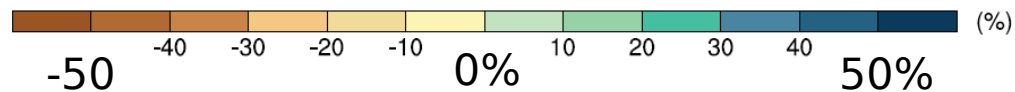
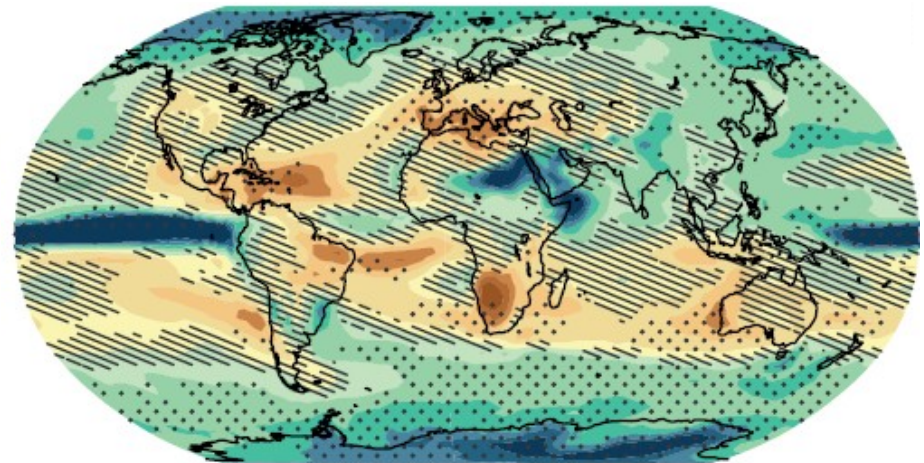
Changement moyen de précipitation n'est pas directement relié au changement moyen de vapeur d'eau

Distribution géographique et saisonnière du *changement relatif des précipitations* entre 2000 et 2100, scénario RCP8.5

Décembre à février



Juin à septembre



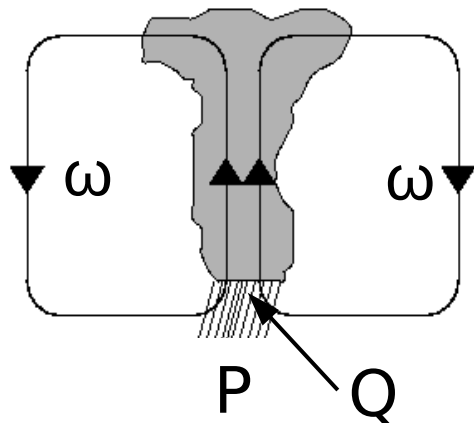
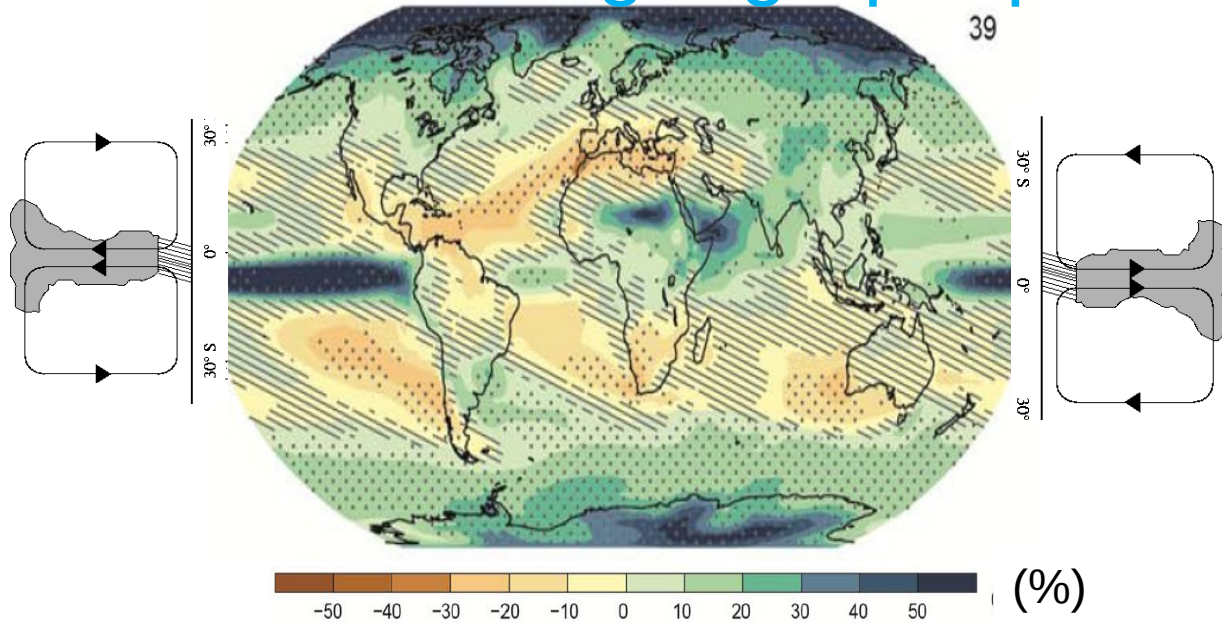
Signal/bruit faible



Signal/bruit élevé et modèles en accord

39 modèles CMIP5

Changements des précipitations: distribution géographique



Variation des
précipitations

$$\Delta P \approx \omega \Delta Q + Q \Delta \omega$$

Variation

thermodynamique

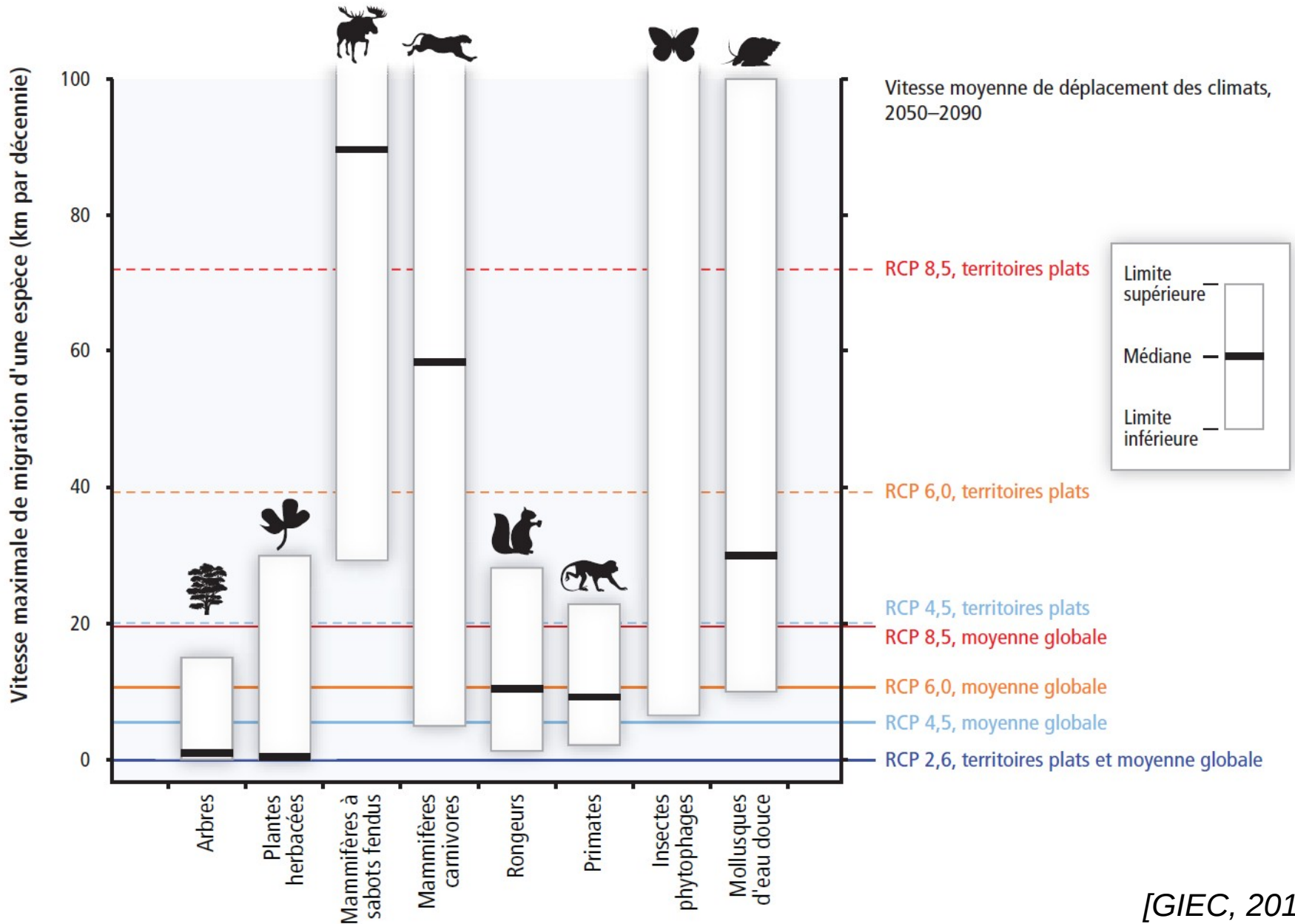
Variation

dynamique

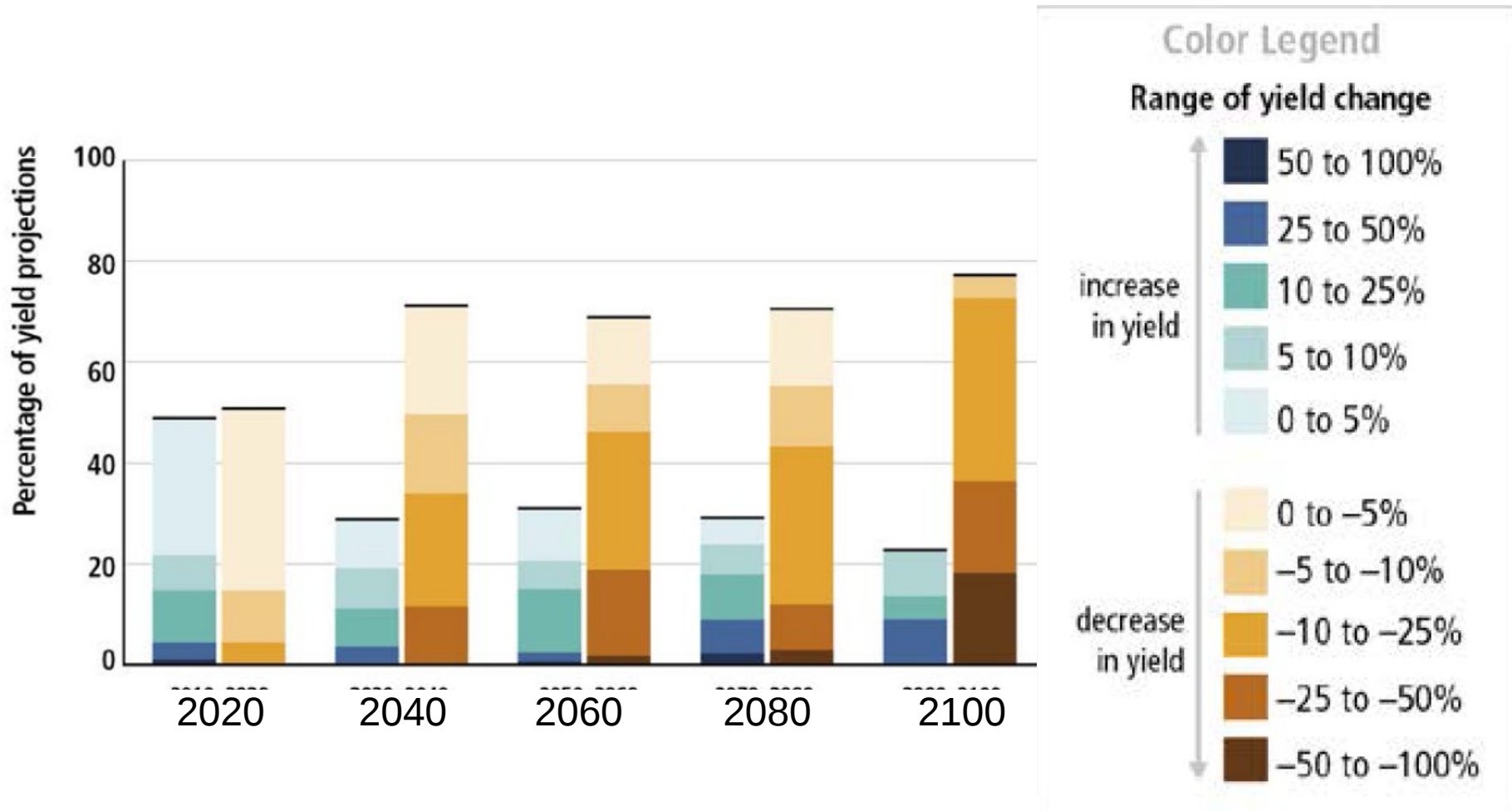
Évènements extrêmes: tendances passées et futures

Phénomène	Probabilité depuis 1950	Contribution humaine	Probabilité au début / fin du XXI ^e siècle
Périodes/vagues de chaleur plus fréquentes et/ou plus longues sur la plupart des terres émergées	Probable dans de grandes parties d'Europe, d'Asie et d'Australie	Probable	Non évalué / Très probable
Augmentation de la fréquence, intensité et/ou du nombre des épisodes de précipitations abondantes	Probablement plus d'augmentations que de diminutions sur les terres émergées	Degré de confiance moyen	Probable sur de nombreuses régions / Très probable sur certaines régions
Augmentation de l'intensité et/ou de la durée des sécheresses	Faible confiance à l'échelle mondiale, probable dans certaines régions	Faible confiance	Faible confiance / Probable à l'échelle régionale ou mondiale
Augmentation de l'activité cyclonique tropicale de forte intensité	Faible confiance à l'échelle séculaire, pratiquement certain pour Atlantique Nord	Faible confiance	Faible confiance / Plus probable qu'improbable dans certains bassins

Vitesse de migration et de « déplacement » des cmimats



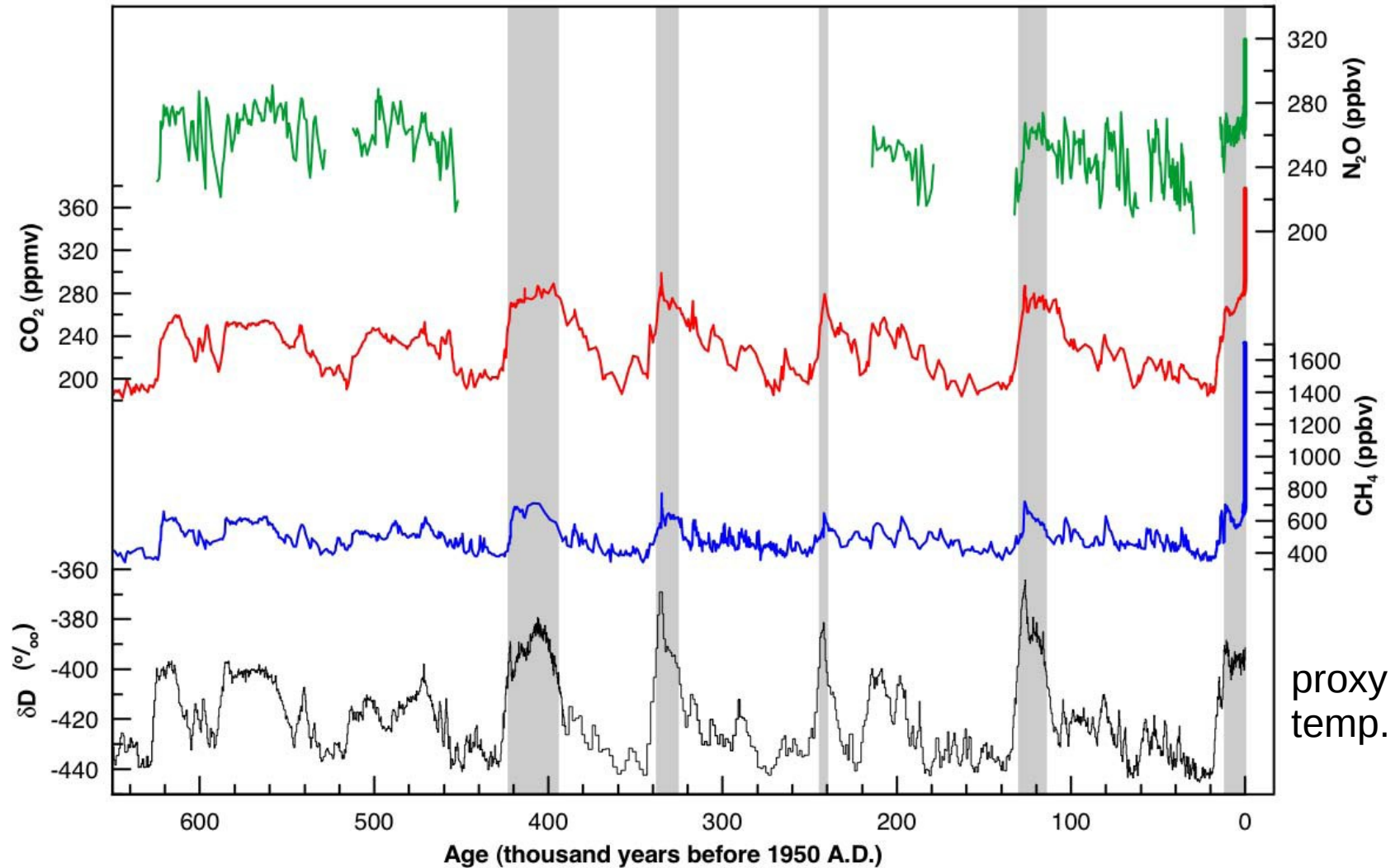
Variation du rendement de l'agriculture



Plan

- I. Contexte et historique
- II. Variations du climat et rôle des activités humaines
- III. Projections des climats futurs
- IV. Paléoclimats et variabilité naturelle
- V. Retour sur la modélisation et sur quelques questions

Reconstructions à partir de carottages glaciaires et observations récentes

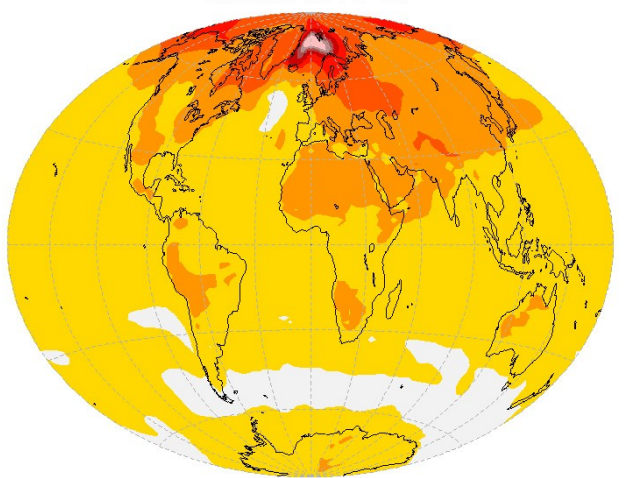


Changement de température de surface

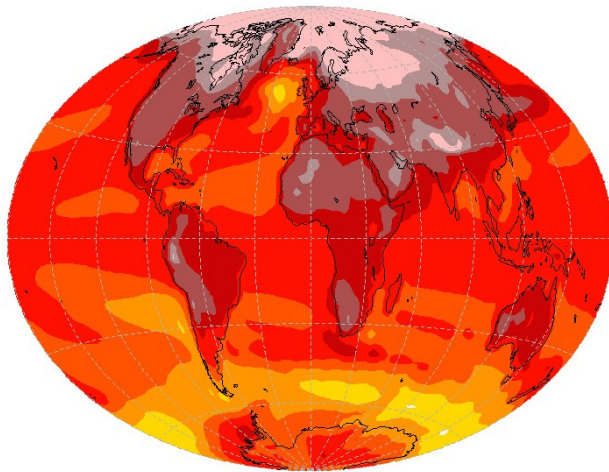
Différence entre **2100** et **1990**

IPSL-CM5A-LR

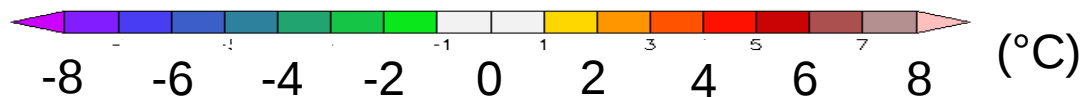
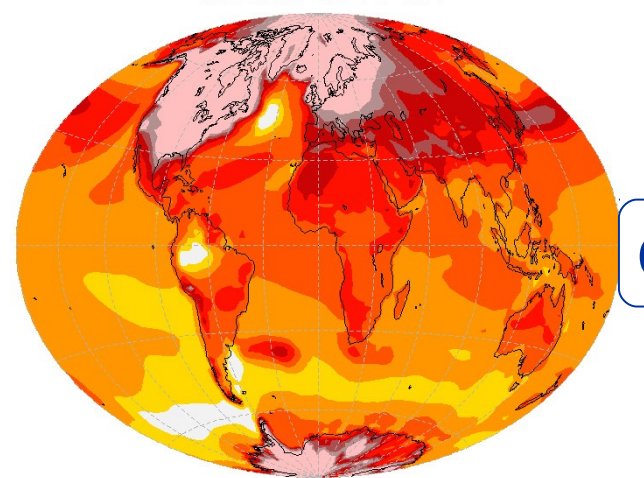
RCP2.6



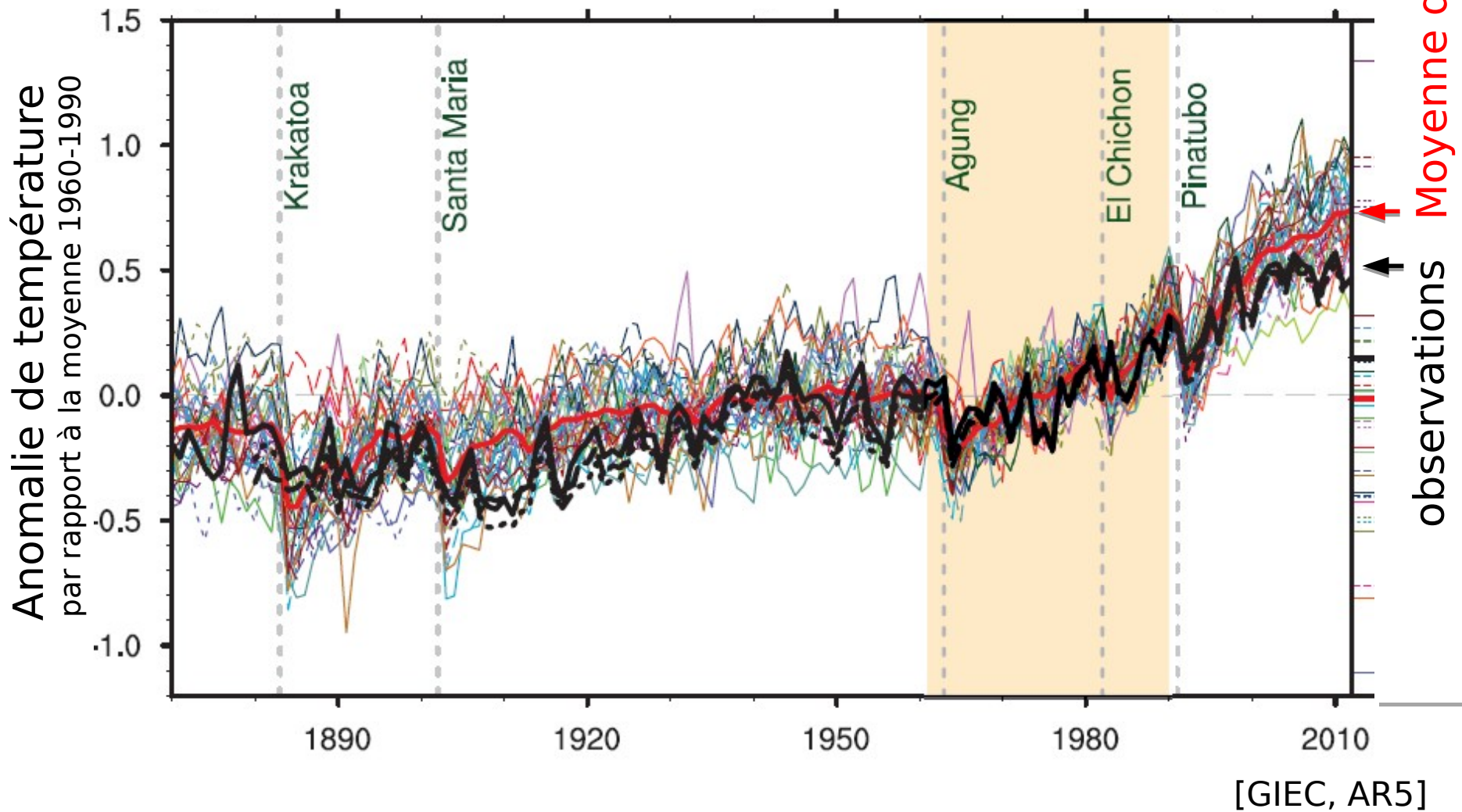
RCP8.5



Glaciaire

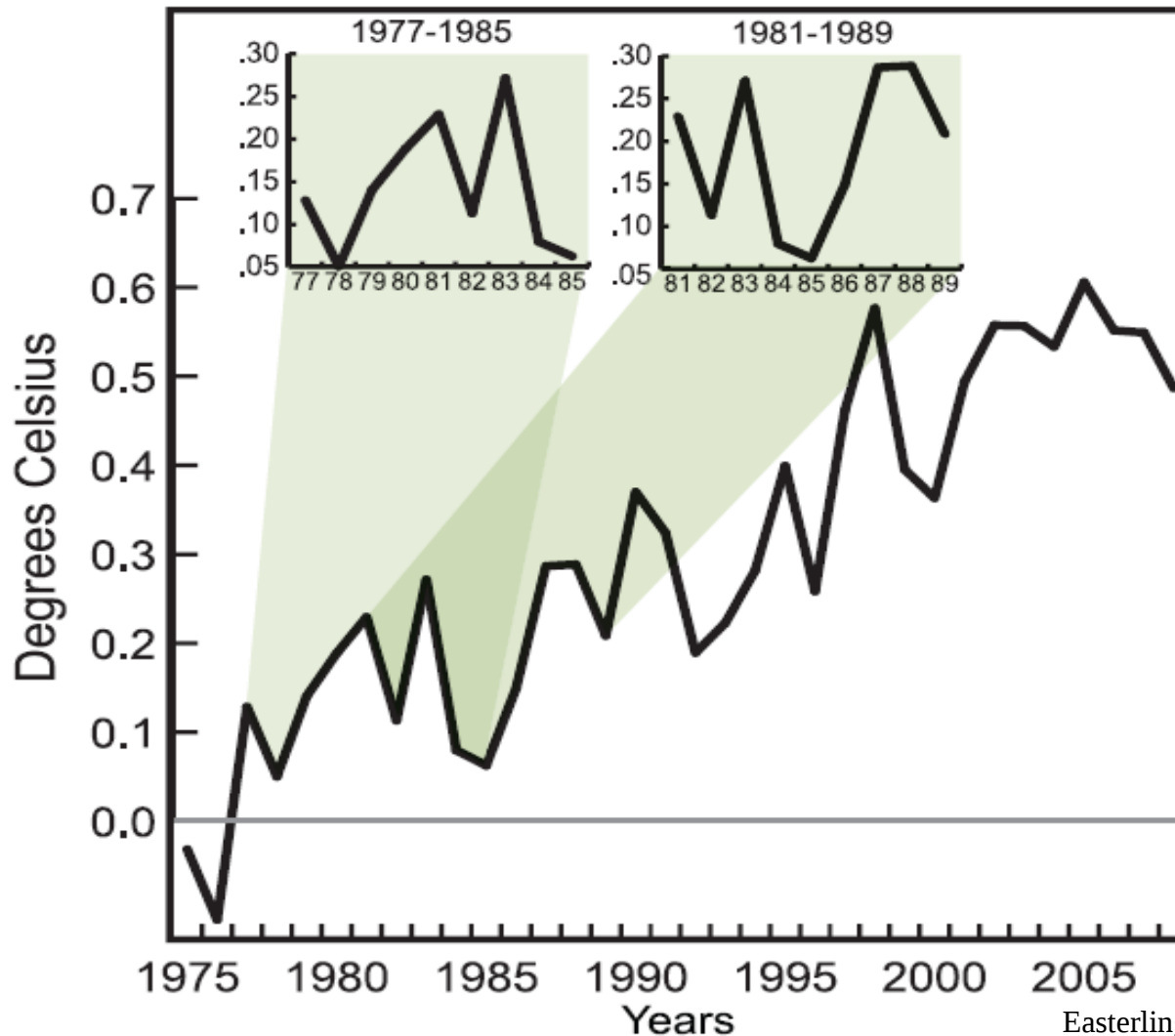


Simulation de l'évolution récente du climat



Les variations du climat sont elle régulières? Variations et variabilité du climat

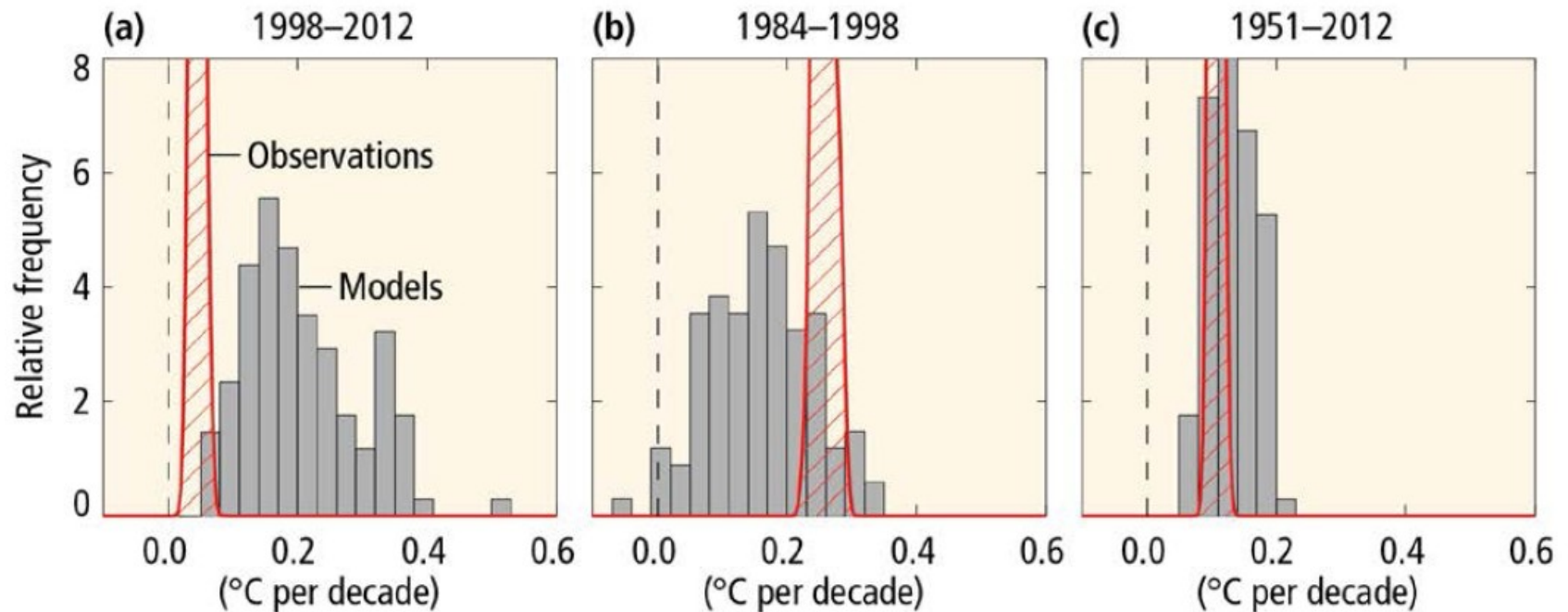
Observée



Les variations du climat sont-elles régulières?

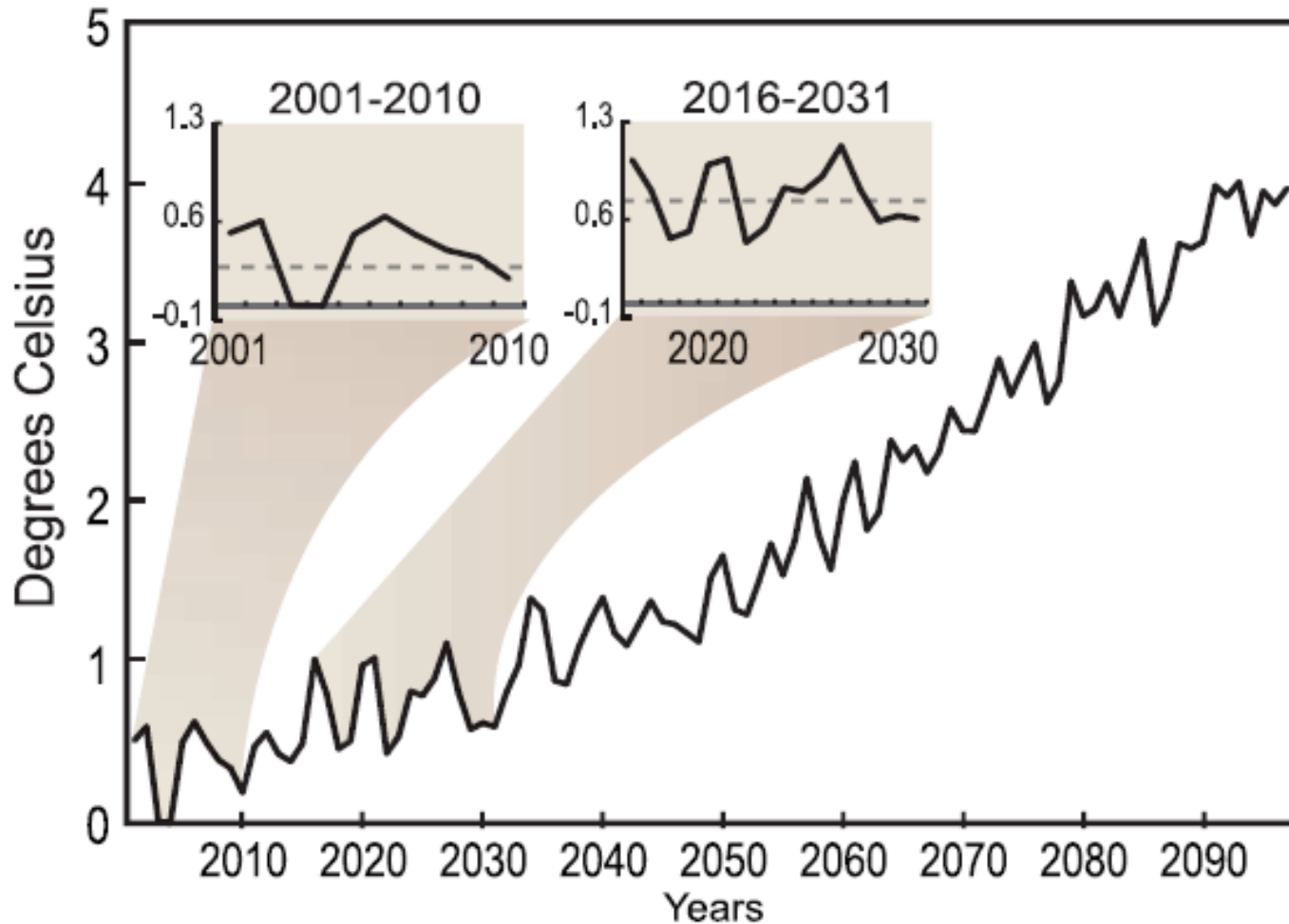
Variations et variabilité du climat

Tendances observées et simulées



Les variations du climat sont elle régulières? Variations et variabilité du climat

Simulations



Plan

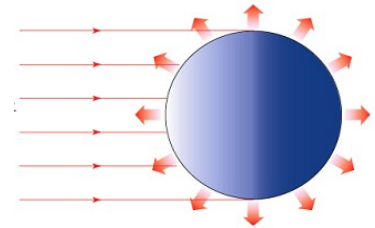
- I. Contexte et historique
- II. Variations du climat et rôle des activités humaines
- III. Projections des climats futurs
- IV. Paléoclimats et variabilité naturelle
- V. Retour sur la modélisation et sur quelques questions

Le système climatique

Objet d'études: climat actuel, variabilité interne, variations passées et futures

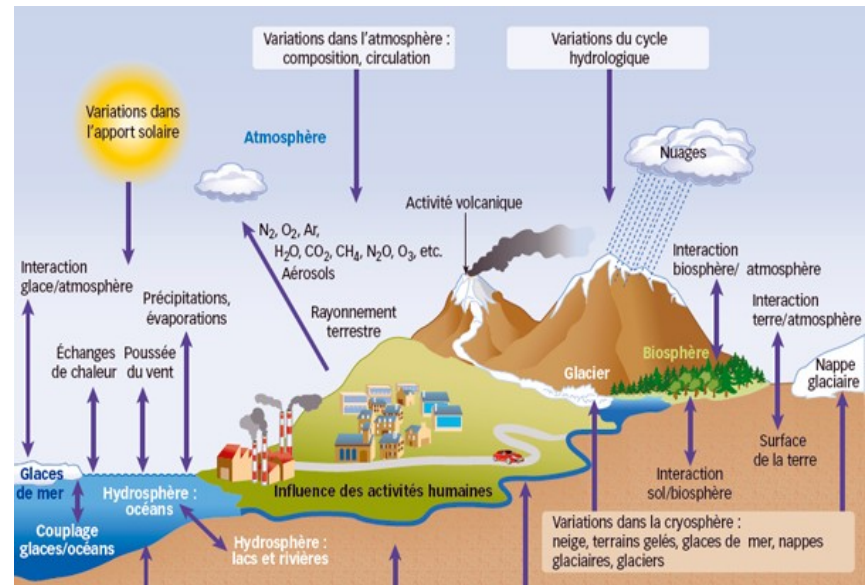
Système thermodynamique ouvert en pseudo équilibre, en général sans aucun rappel

=> conservation de l'énergie



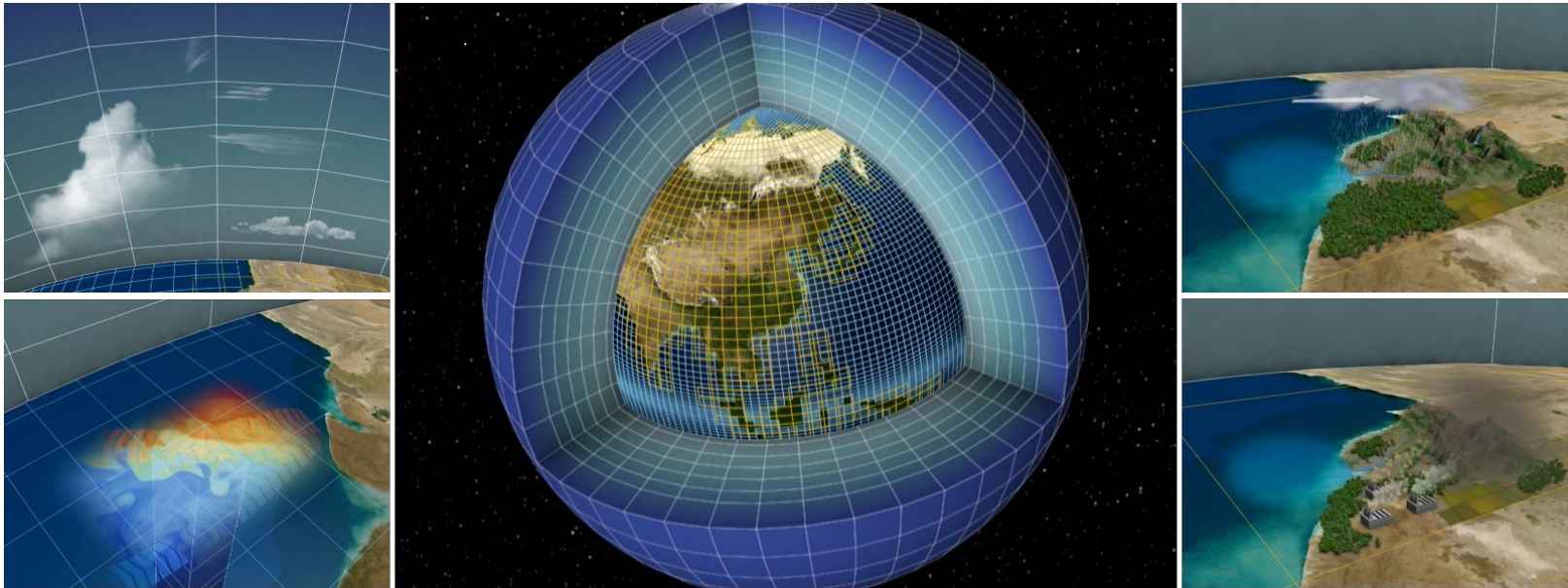
Système

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



Modèle de climat

(Modèle de circulation générale)



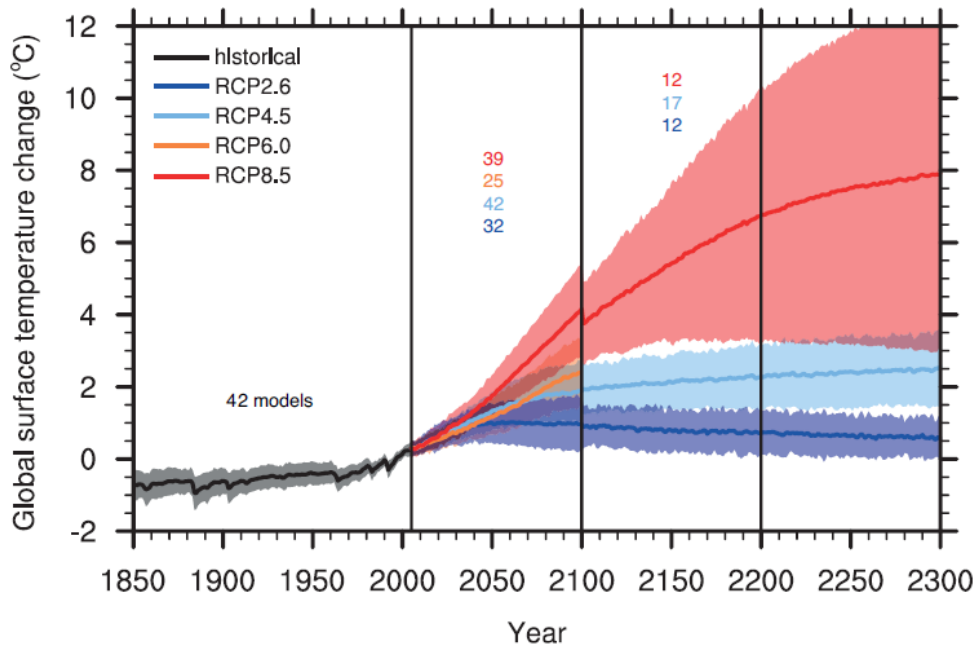
Images issues d'un film présentant la modélisation du climat. Copyright CEA

- 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

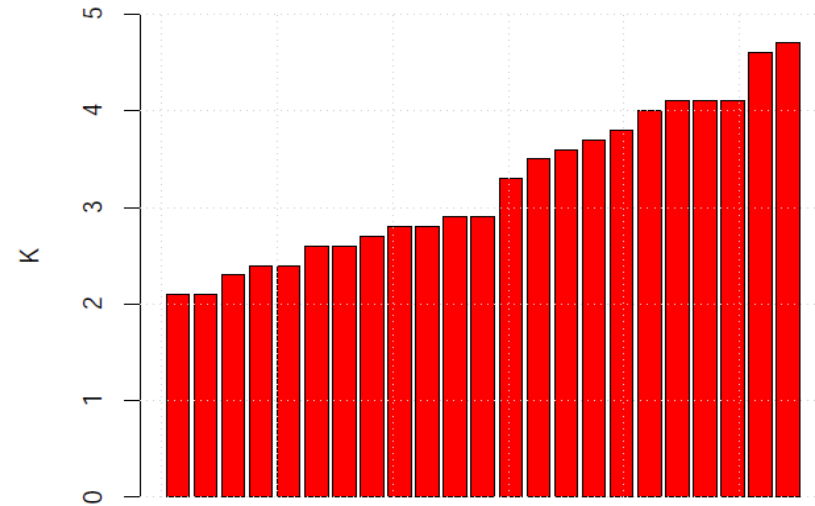
Amplitude du réchauffement Sensibilité climatique

Accroissement de la moyenne des températures de surface

Pour des scénarios « réalistes »



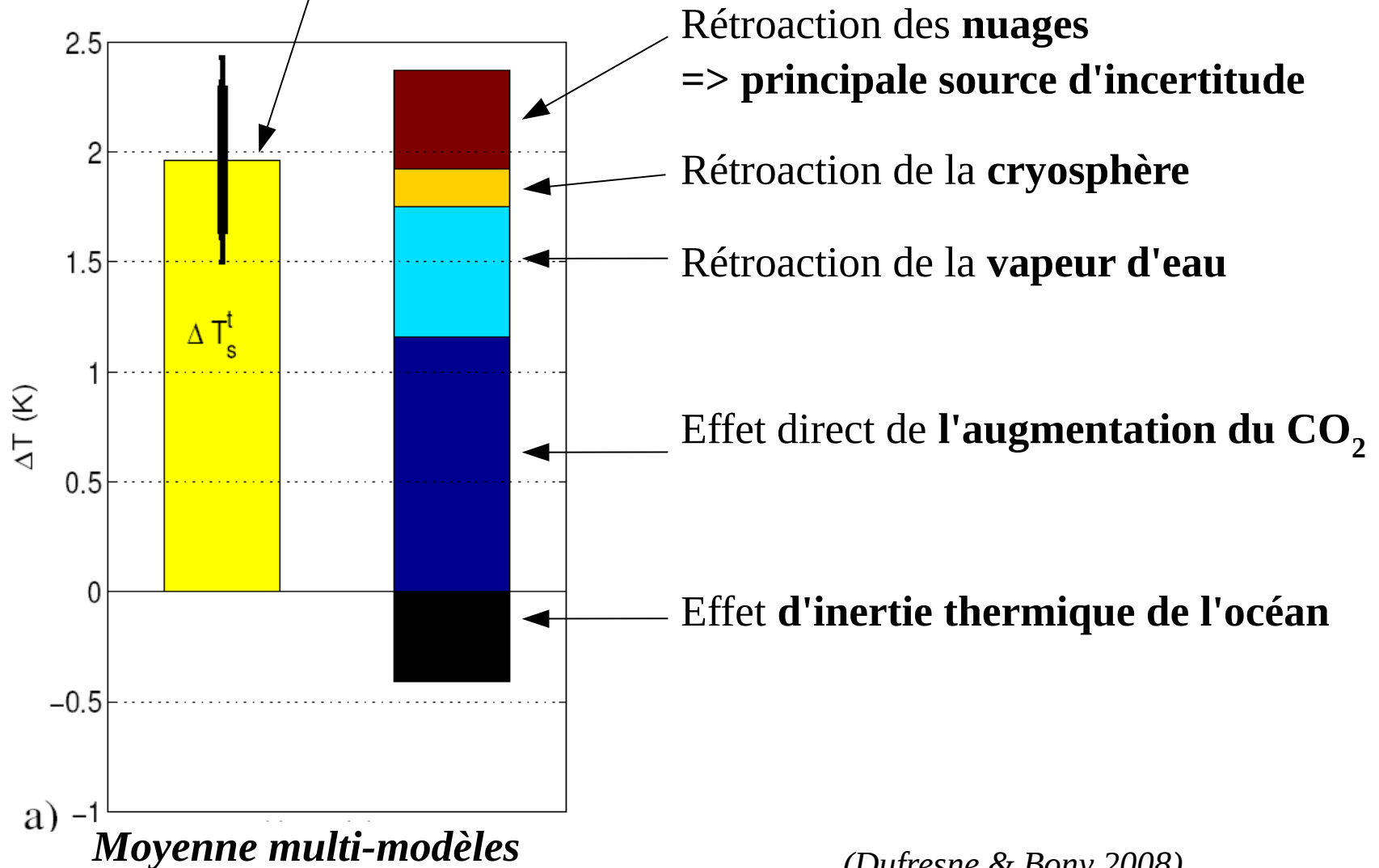
Pour un doublement de CO₂



CMIP5 models

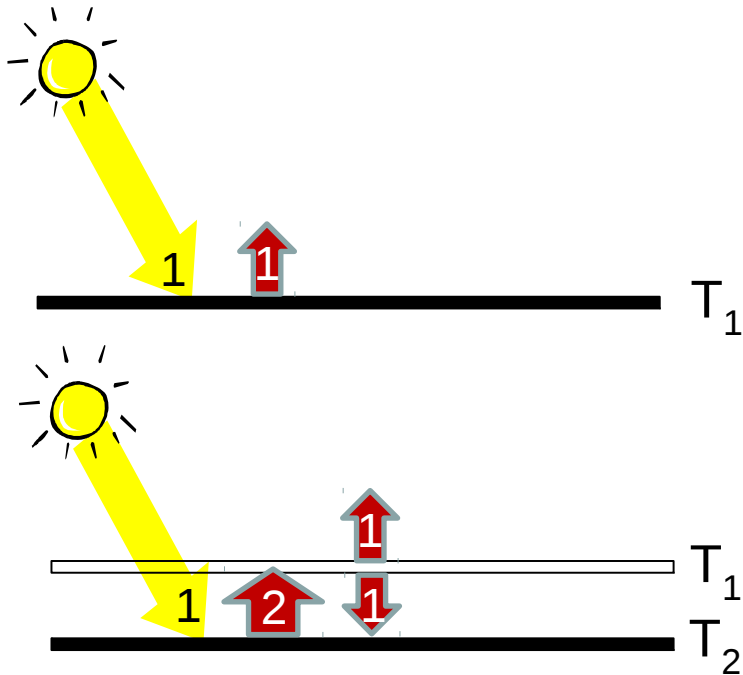
Accroissement de CO₂ et température

Réchauffement global pour un doublement de CO₂ en 70 ans

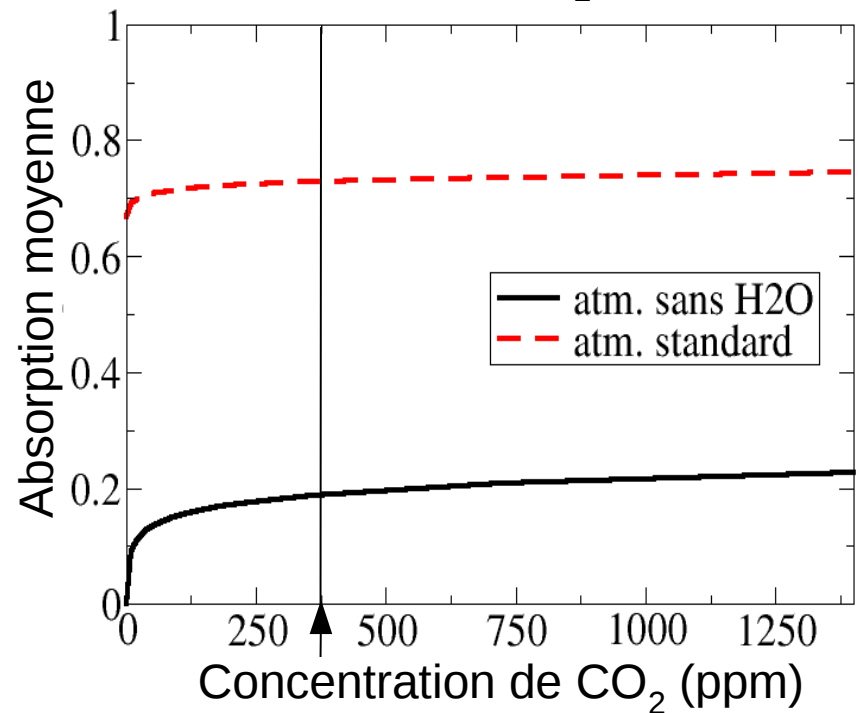


Accroissement de CO_2 et effet de serre

L'analogie de l'effet de serre



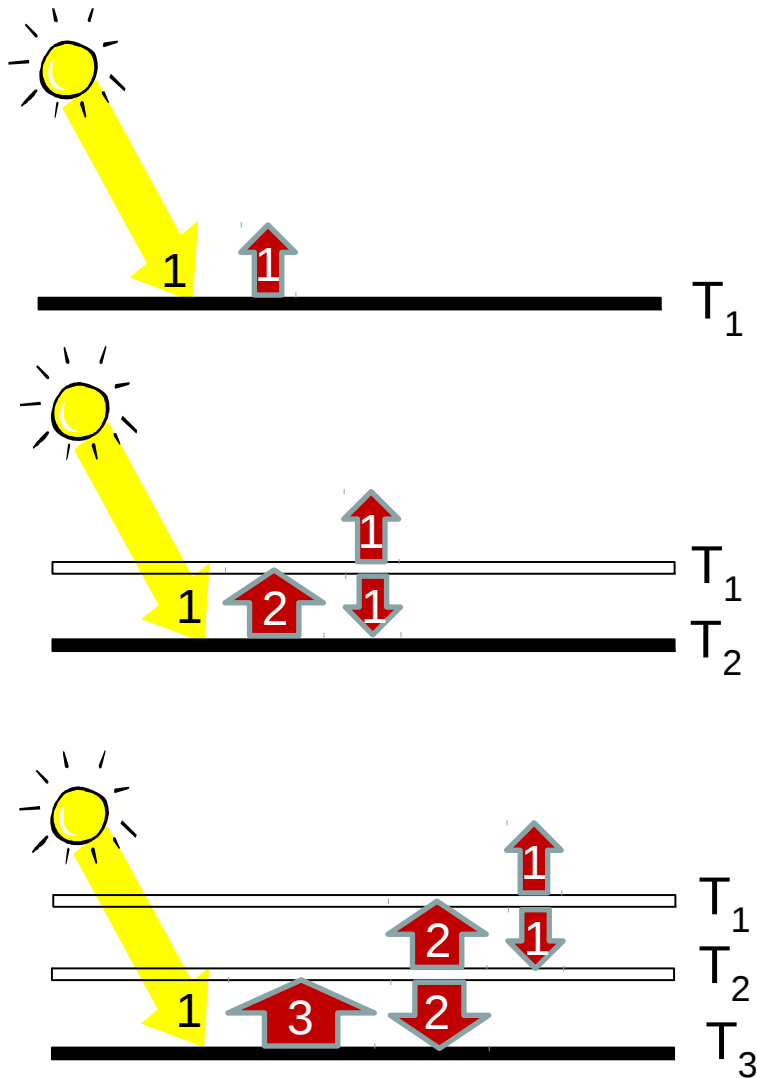
Absorption de l'atmosphère en fonction du CO_2 , pour différentes valeurs de H_2O



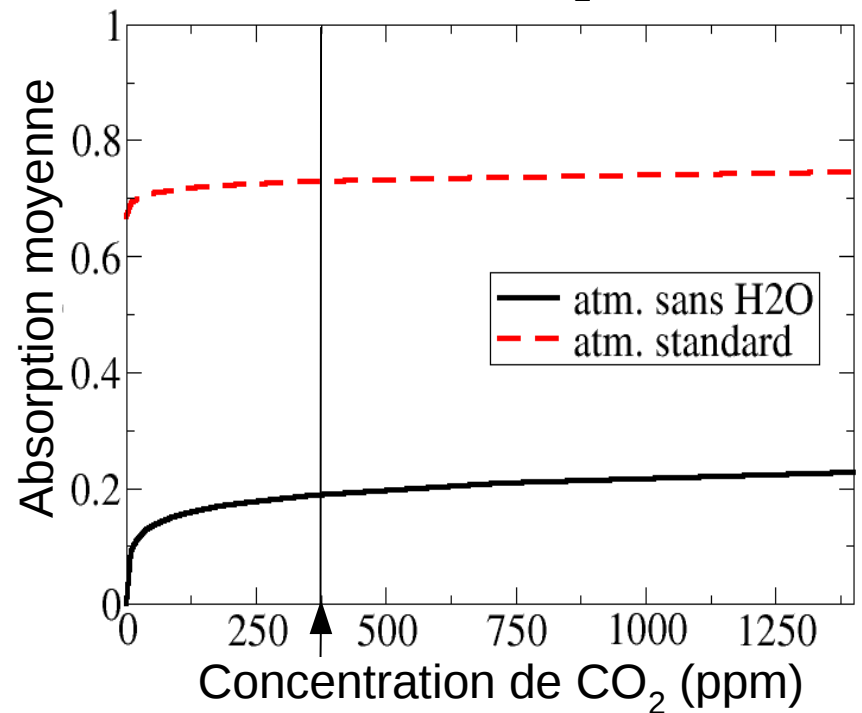
A-t-on atteint l'effet de serre maximum pour le CO_2 ?

Accroissement de CO₂ et effet de serre

L'analogie de l'effet de serre



Absorption de l'atmosphère en fonction du CO₂, pour différentes valeurs de H₂O



A-t-on atteint l'effet de serre maximum pour le CO₂?

NON! (Dufresne Treiner 2012)

Conclusions

- L'accroissement de la température globale et le rôle dominant des activités humaines sont maintenant bien établis, compris
- Les questions relatives aux changements climatiques évoluent: passage de l'alerte à la quantification, la description et l'anticipation des risques associés
- Il y a un saut d'ordre de grandeurs sur les exigences vis-à-vis des modèles climatiques. Importance de la représentation des processus et de la compréhension des phénomènes climatiques
- Plus on s'intéresse aux phénomènes régionaux, aux courtes échelles de temps (décennies) ou aux phénomènes extrêmes, plus les incertitudes et la variabilité naturelle deviennent importants

An aerial photograph of a vast, snow-covered mountain range under a clear blue sky. The snow is bright white, contrasting sharply with the deep blue of the sky. In the lower-left quadrant, a faint rainbow is visible, adding a touch of color to the scene. The text "Merci de votre attention" is centered in the middle of the image.

Merci de votre attention

Quelques ressources

Livres:

- Le climat à découvert - CNRS Editions

Revue:

- « La Météorologie Revue de l'atmosphère et du climat »
<http://meteoetclimat.fr/presentation-et-ligne-editoriale/>
numéro spécial à paraître au printemps 2015
- Analyse et modélisation du changement climatique. 2e éditions
du *Livre blanc Escrime*:
http://www.ipsl.fr/content/download/1513/13922/file/livre_blanc_escrime.pdf

Web:

- GIEC: www.ipcc.ch
- Le climat en questions: <http://www.climat-en-questions.fr/>
- ONERC <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Presentation-et-missions.html>

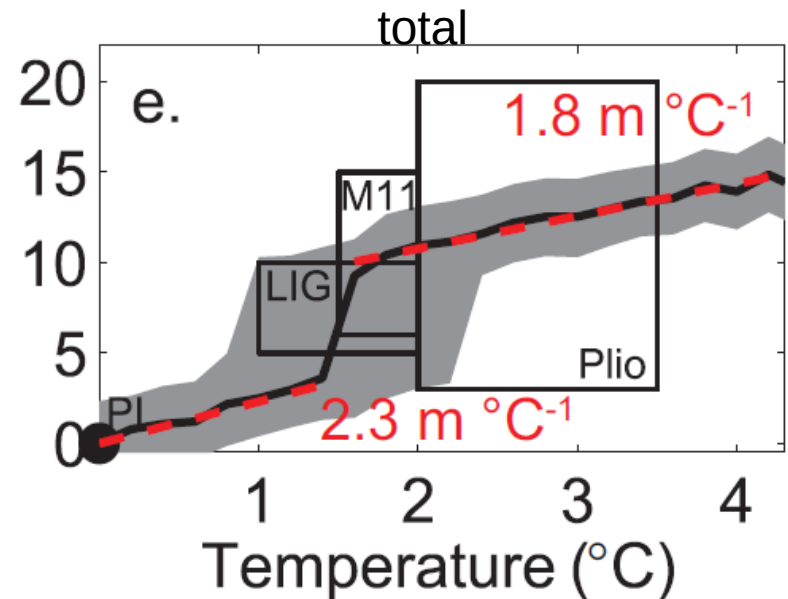
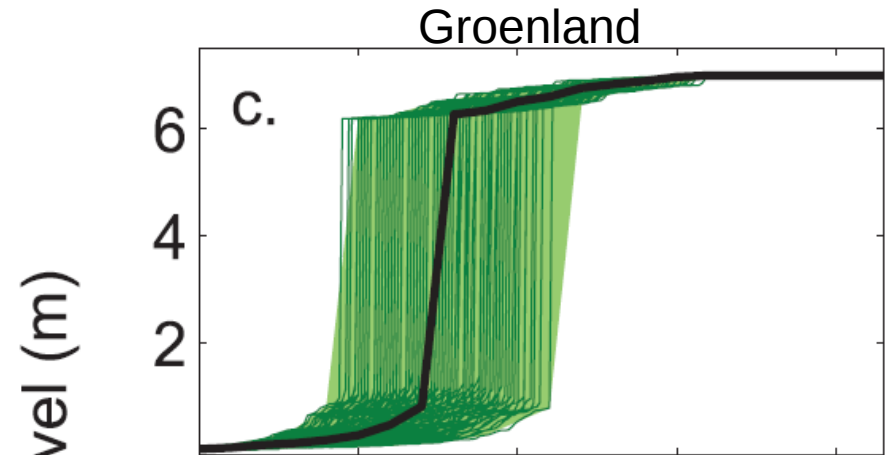
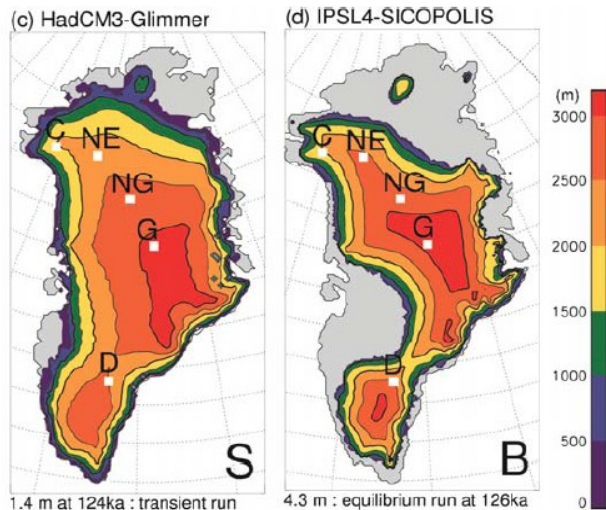
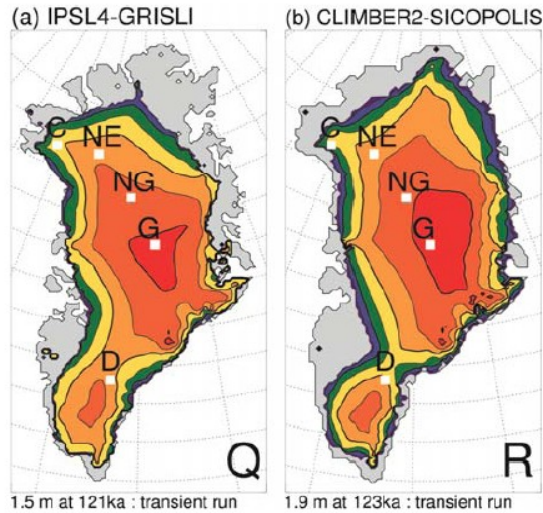
DVD:

- C'est pas sorcier: Effet de serre: coup de chaud sur la planète

Reconstructions dernier inter-glaciaire et conséquences pour le futur

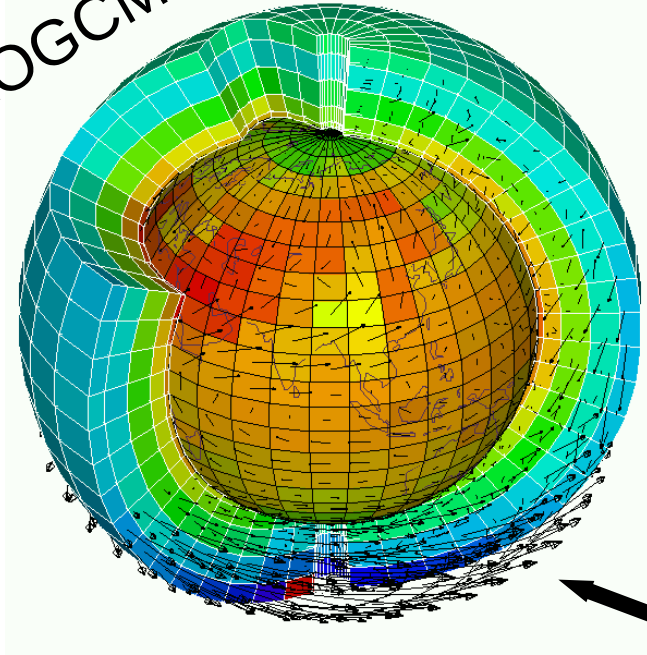
Estimation fonte du Groenland dernier interglaciaire

Estimation changement niveau des mers aux échelles multi-millénaires

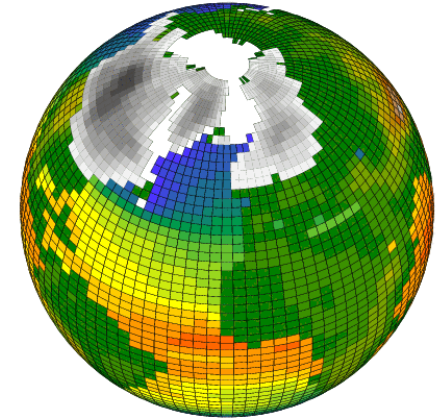


Simulation du climat du Dernier Maximum Glaciaire

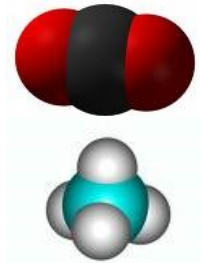
AOGCM



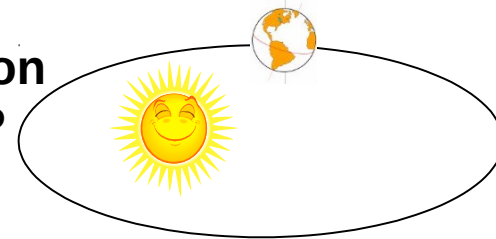
Calottes
glaciaires



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



Insolation
21ky BP



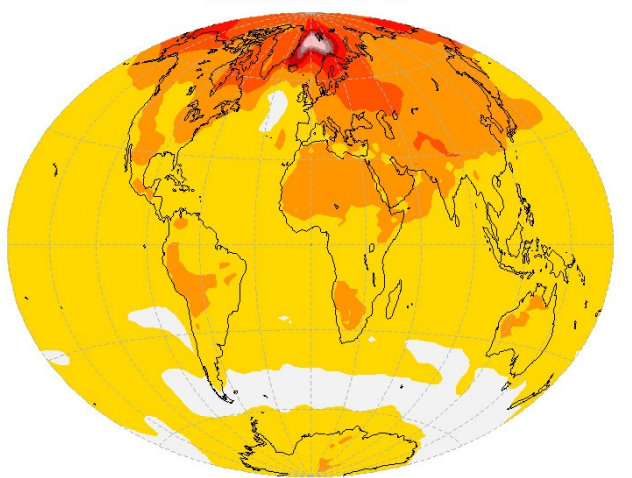
Forçage en gaz à effet de serre ~ climat futur
Autre forçage majeur: calottes glaciaire

Changement de température de surface

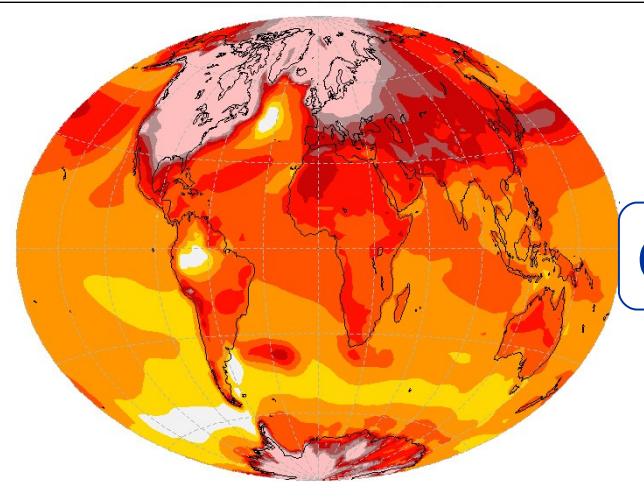
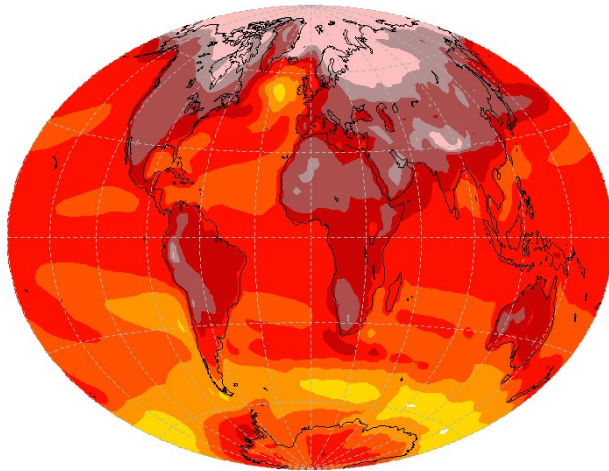
Différence entre **2100** et **1990**

IPSL-CM5A-LR

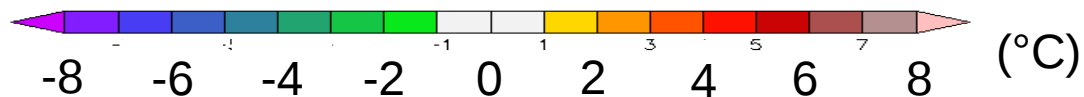
RCP2.6



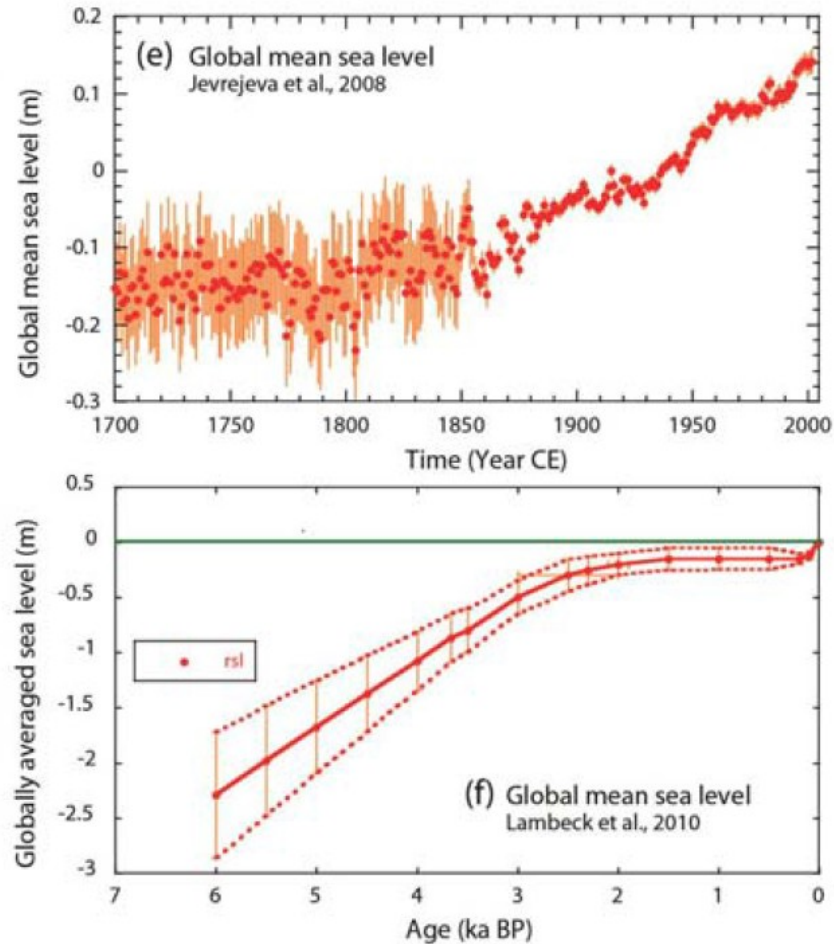
RCP8.5



Glaciaire

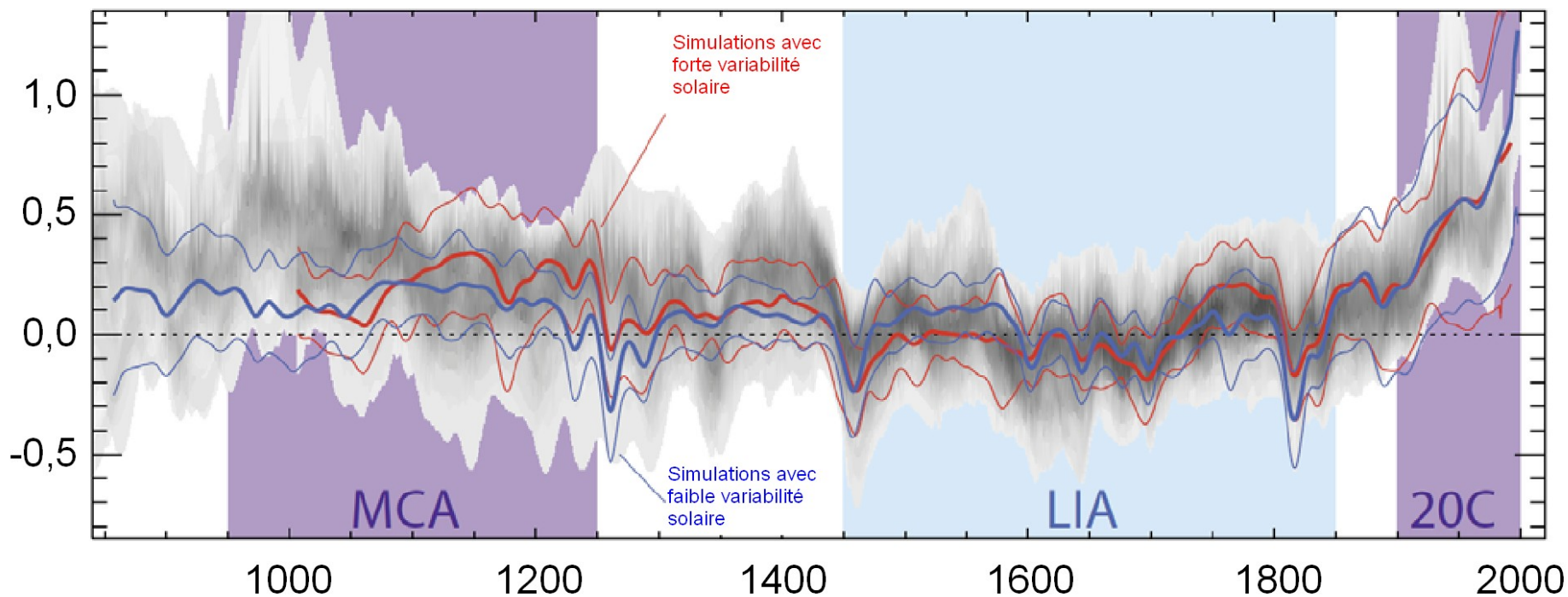


Niveau des mers



Une transition a eu lieu entre la fin du XIX^e et le début du XX^e siècle, où l'on est passé de taux d'élévation du niveau moyen des mers relativement faibles des deux derniers millénaires à des taux plus importants (*degré de confiance élevé*).

Reconstruction de la température moyenne de l'hémisphère nord



Dans l'hémisphère nord, la période 1983–2012 a *probablement* été la période de 30 ans la plus chaude des 1400 dernières années (*confiance moyenne*)