



IPSL Climate Modelling Centre



# *Projection des changements climatiques et modélisation numérique du climat*

*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*



# Extraits du Bulletin officiel spécial n° 8 du 13 octobre 2011- programme de Terminale S

## Thème 2 - Enjeux planétaires contemporains

Atmosphère, hydrosphère, climats : du passé à l'avenir

- Les bulles d'air contenues dans les glaces permettent d'étudier la composition de l'air durant les 800 000 dernières années y compris des polluants d'origine humaine. La composition isotopique des glaces et d'autres indices (par exemple la palynologie) permettent de retracer les évolutions climatiques de cette période.

- L'effet de serre, déterminé notamment par la composition atmosphérique, est un facteur influençant le climat global. **La modélisation de la relation effet de serre/climat est complexe.** Elle permet de proposer des hypothèses d'évolutions possibles du climat de la planète notamment en fonction des émissions de gaz à effet de serre induites par l'activité humaine. [L'ensemble des mécanismes agissant sur le climat n'est pas au programme, mais **on indiquera que l'effet de serre n'est qu'un facteur parmi d'autres.** En particulier, l'influence des paramètres astronomiques pourra être évoquée, mais n'est pas exigible des élèves au baccalauréat.]

C'est plus le climat que l'effet de serre qui est complexe

Deux facteurs essentiels (à position des continents fixe): ensoleillement et effet de serre

# Plan

- I. Contexte et historique
- II. Variations du climat et rôle des activités humaines
- III. Projections des climats futurs
- IV. Paléoclimats
- 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)

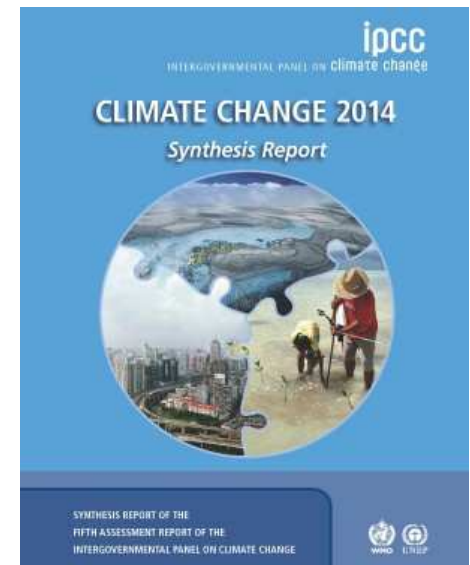
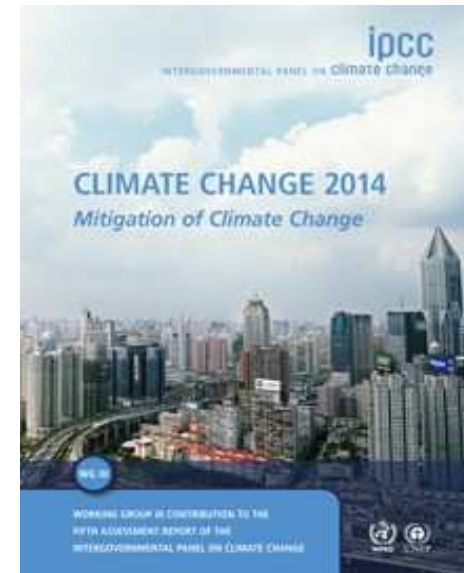
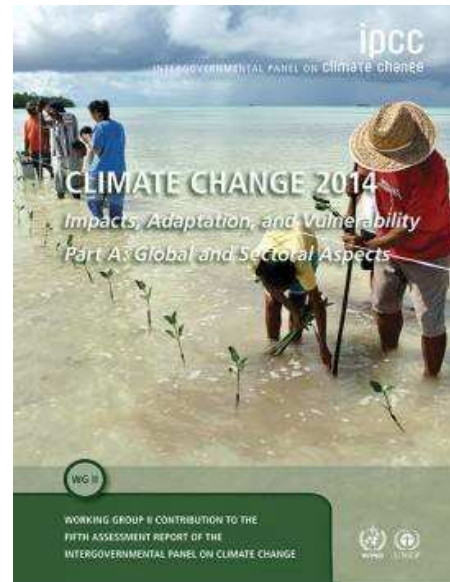
Trois groupes de travail:

**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<sup>e</sup> 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*

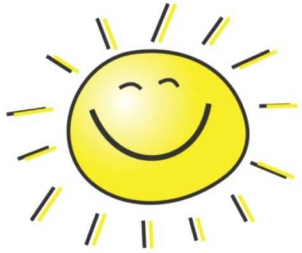
- La Terre est une planète comme les autres
- Le bilan d'énergie pilote la température de surface de la Terre
- Les principaux modes de transferts d'énergie sont
  1. Rayonnement solaire
  2. Rayonnement infra-rouge
  3. Conduction avec le centre de la Terre
- Il pressent l'importance de tous changements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

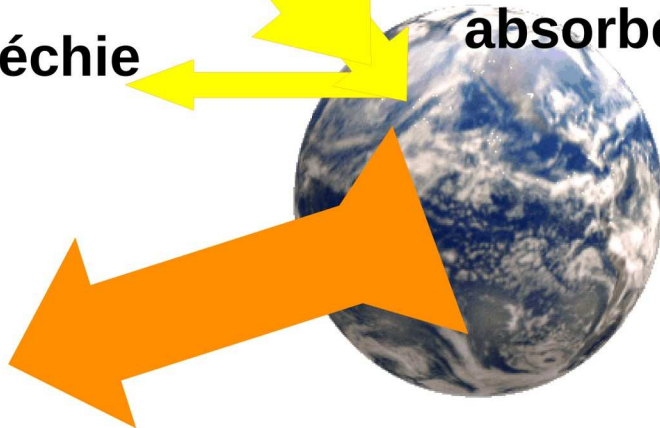
# Température d'équilibre d'une planète



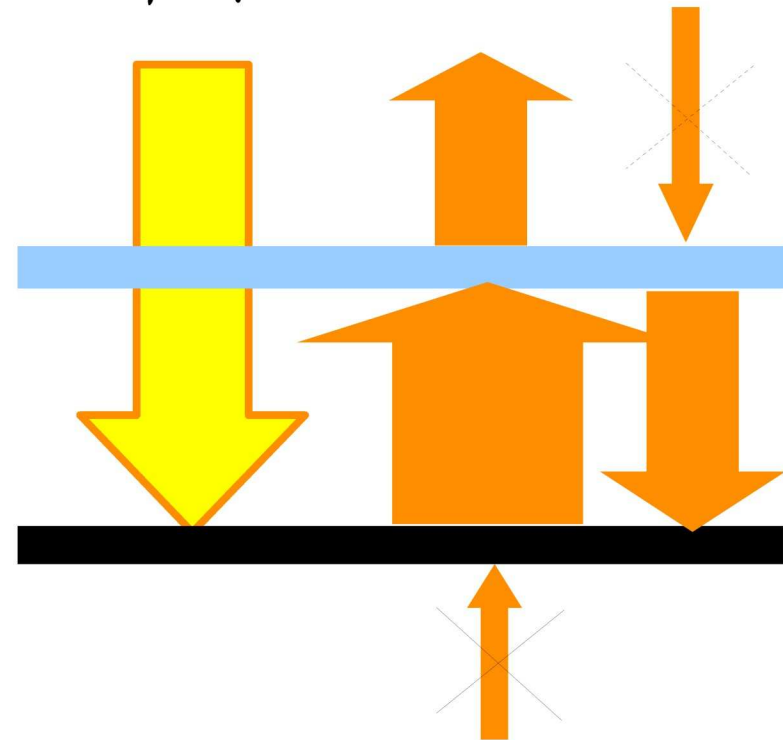
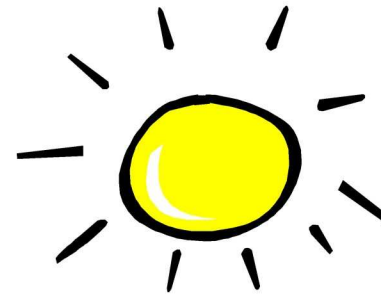
**Rayonnement solaire**

**Partie réfléchie**

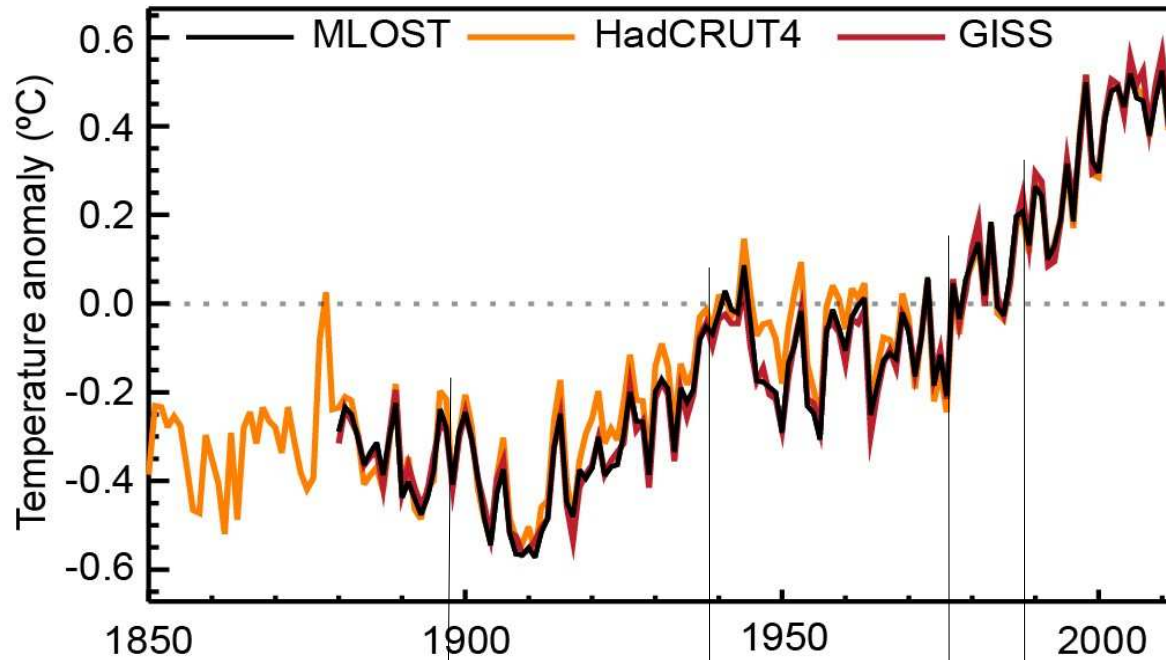
**Partie absorbée**



**La température de surface moyenne résulte du bilan d'énergie**



# Premières projections climatiques alors que la température a peu augmenté



[GIEC 2013]

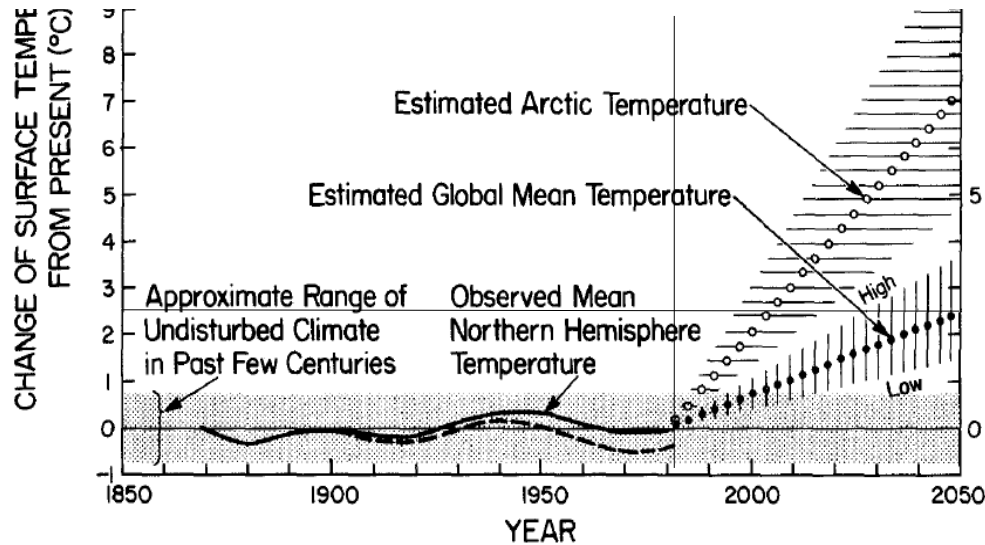
1897: S. Arrhenius:  
première estimation du  
rôle du CO<sub>2</sub>

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

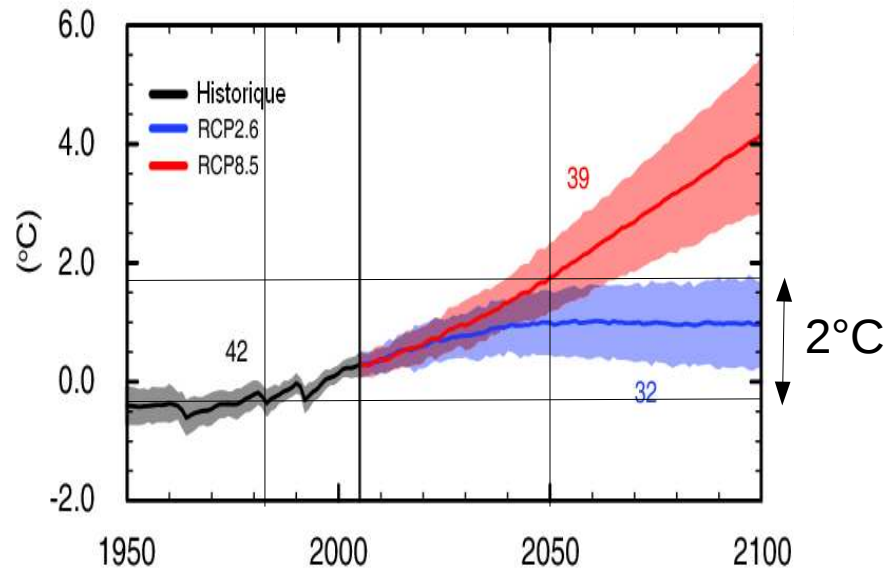
1970-1980: Premières  
projections climatiques avec  
des modèles numériques

1988: Création du GIEC

# Premières projections climatiques alors que la température a peu augmenté

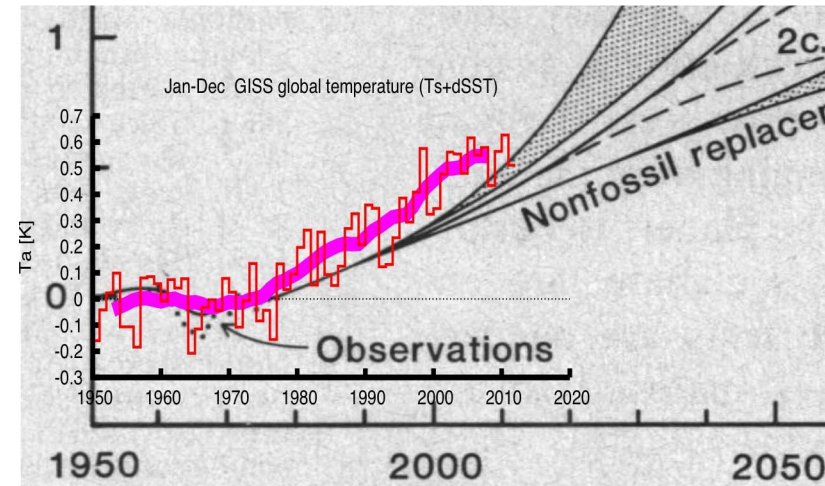
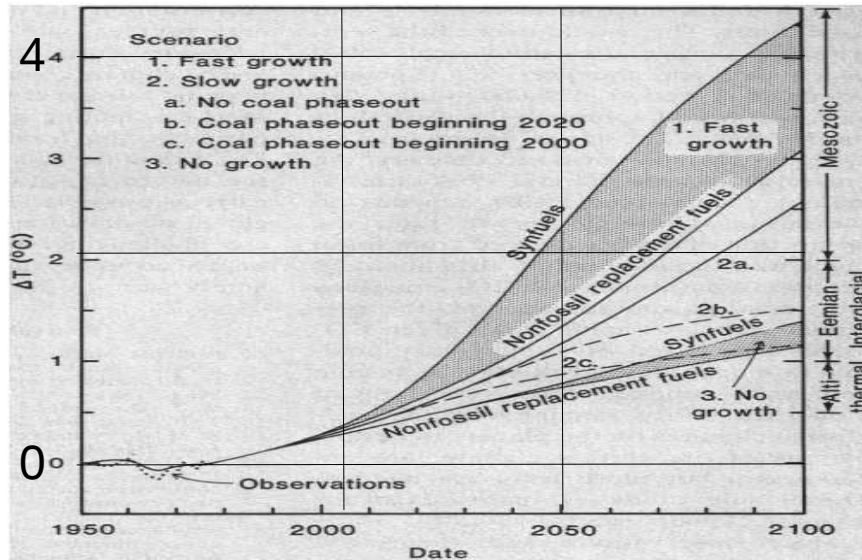


[Kellogg 1977]



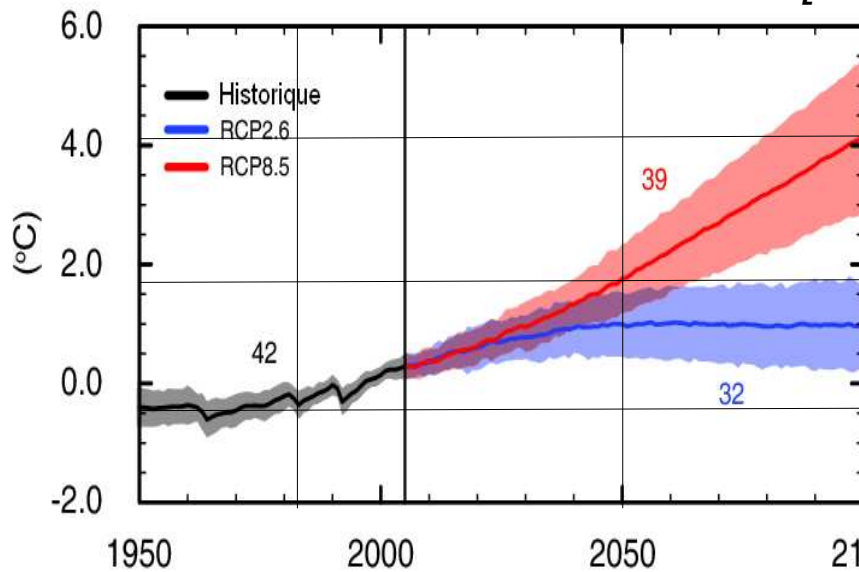
[GIEC 2013]

# Premières projections climatiques alors que la température a peu augmenté



<http://www.realclimate.org>

[Hansen et al. 1981]



[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 CO<sub>2</sub>
- **Critique:** la Terre « régule » la concentration de CO<sub>2</sub>
- Calcul de la variation de température due à une variation de CO<sub>2</sub>
- **Critique:** la variation de CO<sub>2</sub> ne change pas l'absorption du rayonnement infrarouge par l'atmosphère

**A partir des années 1960:**

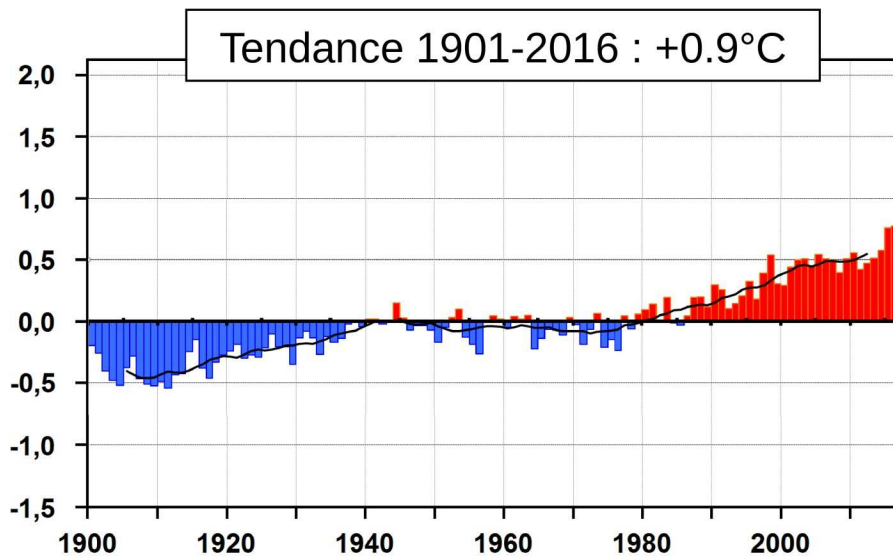
- Rayonnement infra-rouge mieux connu
- On observe un accroissement de la concentration de CO<sub>2</sub>
- Premier calcul « moderne » de l'accroissement de température en réponse à un accroissement de CO<sub>2</sub>
- Développement des modèles de climat
- Observations des variations des paléoclimats

# Plan

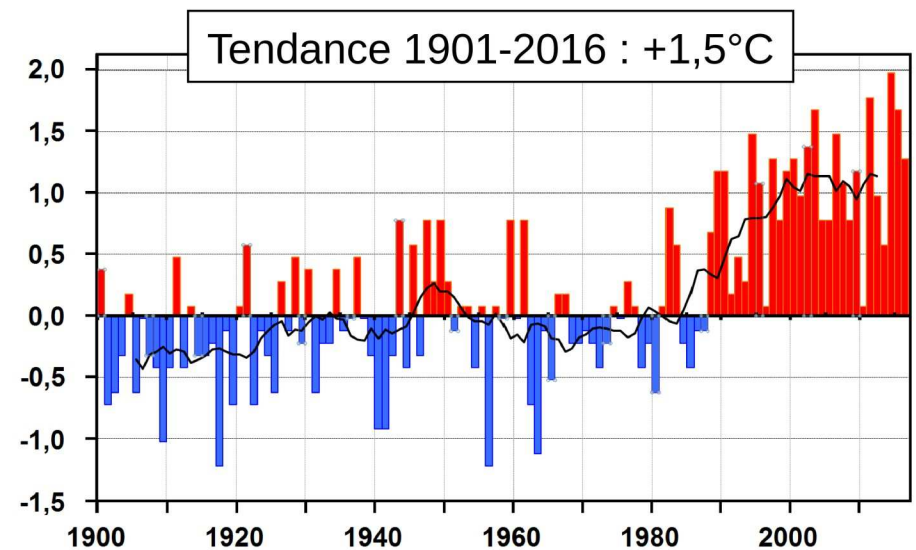
- I. Contexte et historique
- II. Variations du climat et rôle des activités humaines
- III. Projections des climats futurs
- IV. Paléoclimats
- V. Retour sur la modélisation et sur quelques questions

# Evolution de la température moyenne en surface par rapport à 1961-1990 sur la période 1900-2016

## Sur la planète



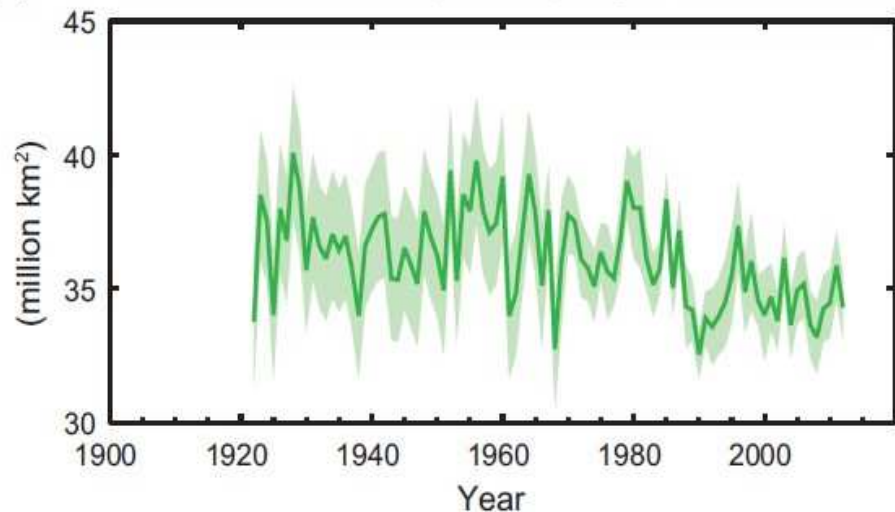
## En France métropolitaine



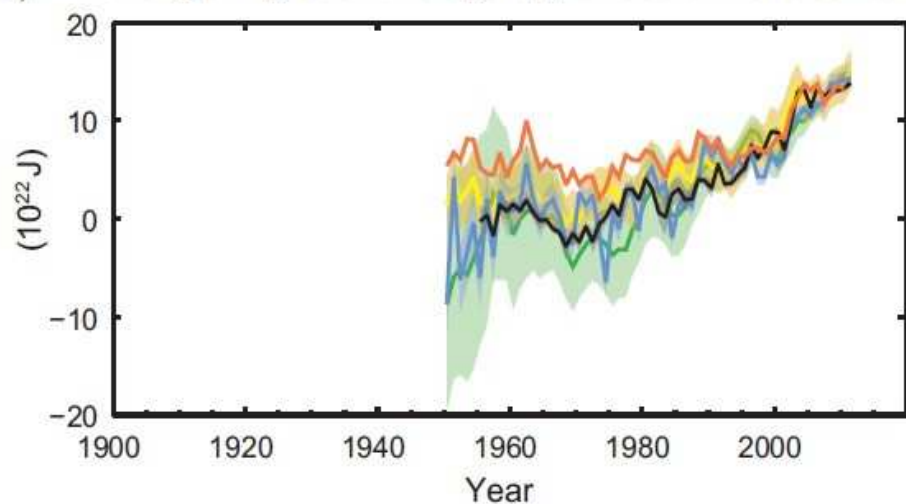


# Variations du climat et rôle des activités humaines

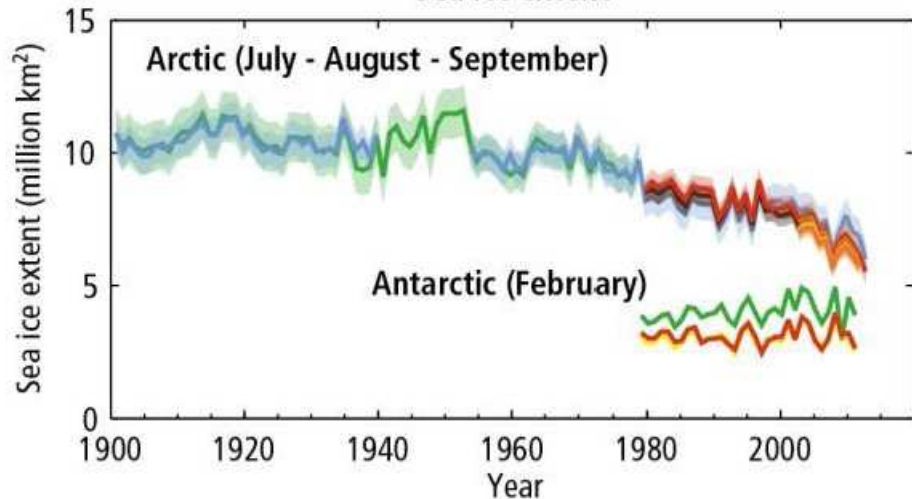
(a) Northern Hemisphere spring snow cover



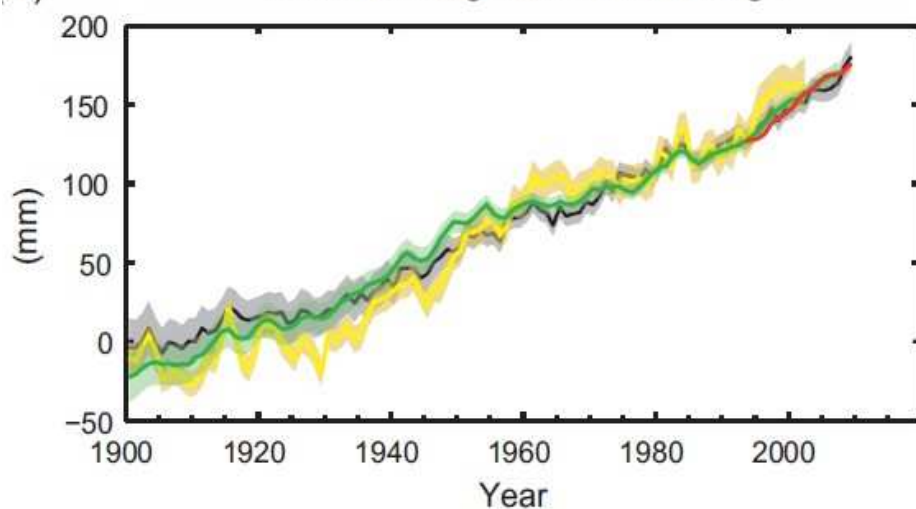
(c) Change in global average upper ocean heat content



Sea ice extent



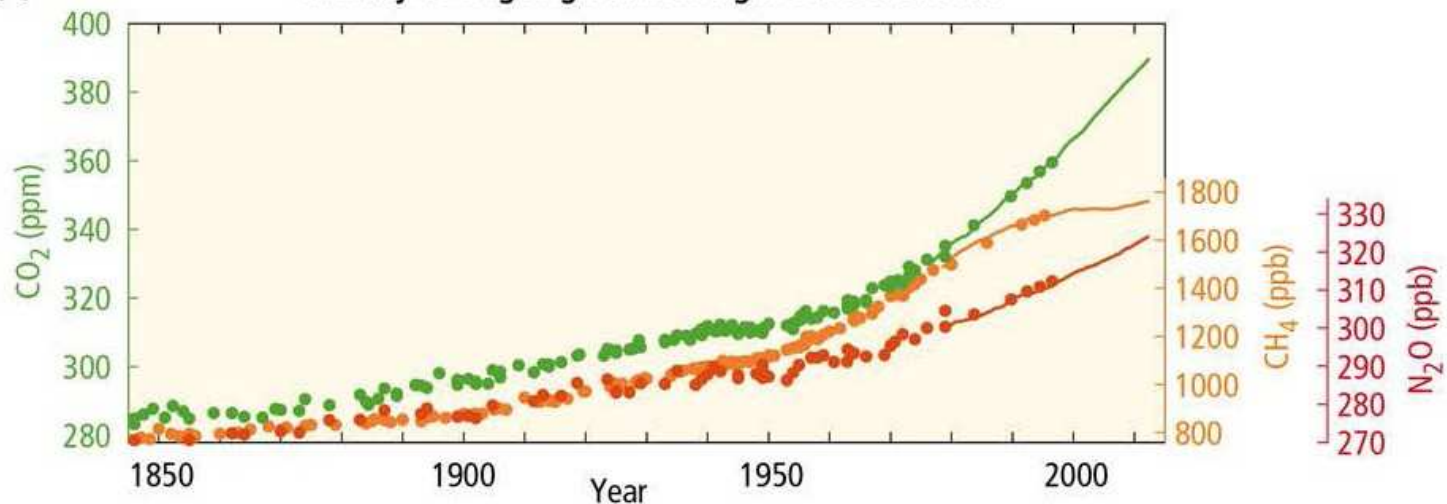
(d) Global average sea level change



# Variations du climat et rôle des activités humaines

(c)

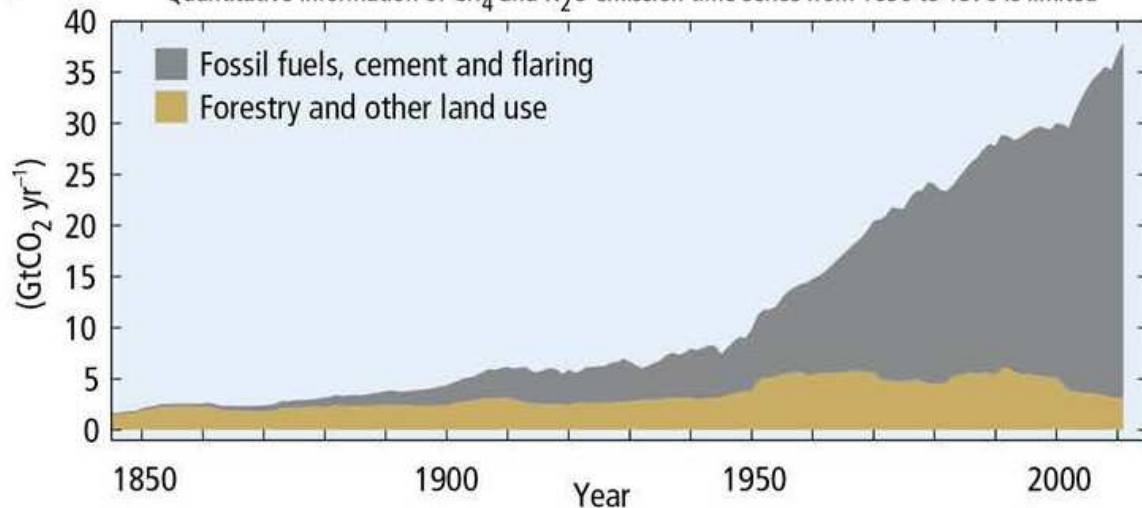
Globally averaged greenhouse gas concentrations



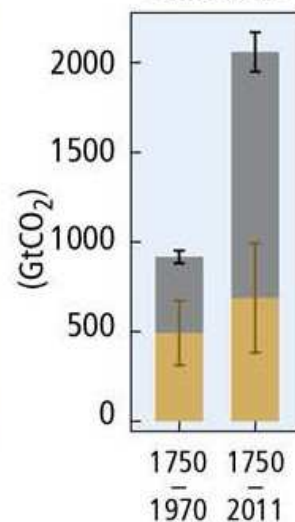
(d)

Global anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions

Quantitative information of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission time series from 1850 to 1970 is limited



Cumulative CO<sub>2</sub> emissions



[GIEC 2014]

# Emissions moyennes de CO<sub>2</sub> pour 2003-2012

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

8,6 ± 0,4 GtC y<sup>-1</sup>



0,8 ± 0,5 GtC y<sup>-1</sup>



+

4,3 ± 0,1 GtC y<sup>-1</sup>  
45%



2,6 ± 0,5 GtC y<sup>-1</sup>  
27%



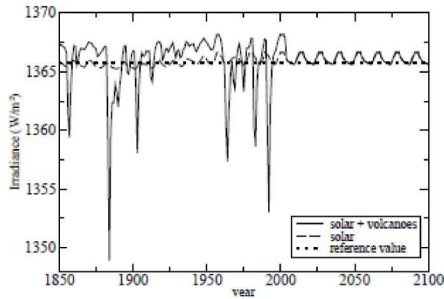
2,6 ± 0,8 PgC y<sup>-1</sup>  
27%



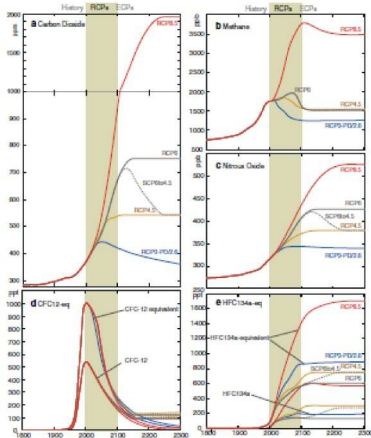
# Le modèle couplé "Système Terre" de l'IPSL

## Forçages naturels et anthropiques

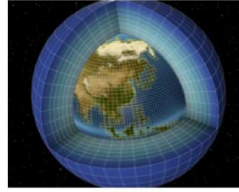
### Soleil et volcans



### Gaz à effet de serre ou chimiquement actifs



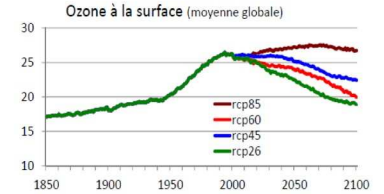
### Concentration de CO<sub>2</sub>



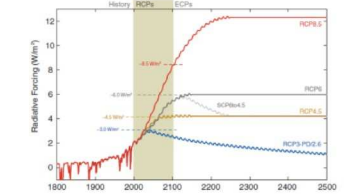
## Modèle de climat

- 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

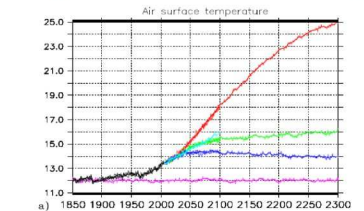
## Composition de l'atmosphère



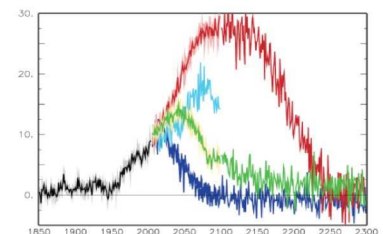
## Forçage radiatif



## Changement climatique

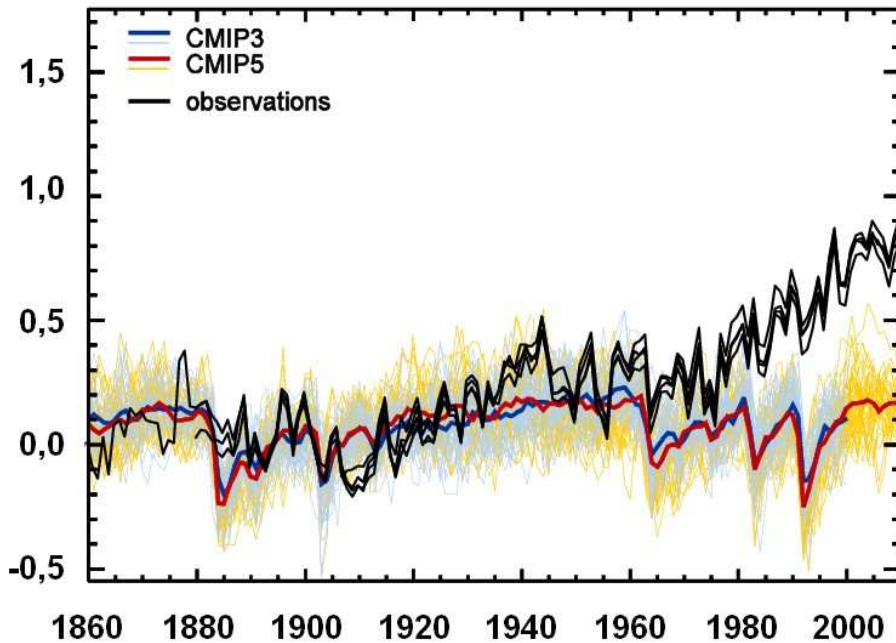


## Émission autorisée de CO<sub>2</sub>

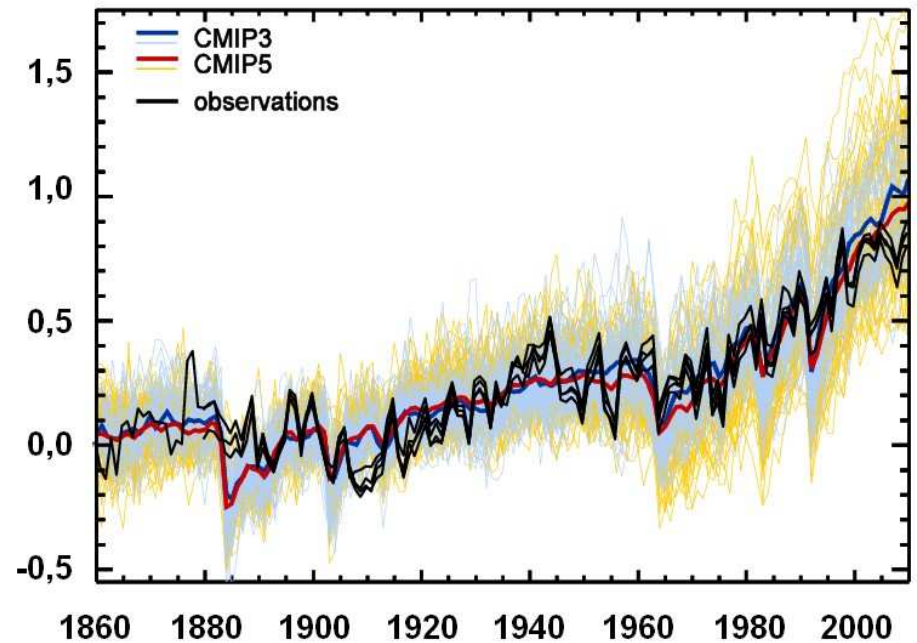


# Évolution récente de la température de surface de la Terre

Simulations avec forçages naturels seulement

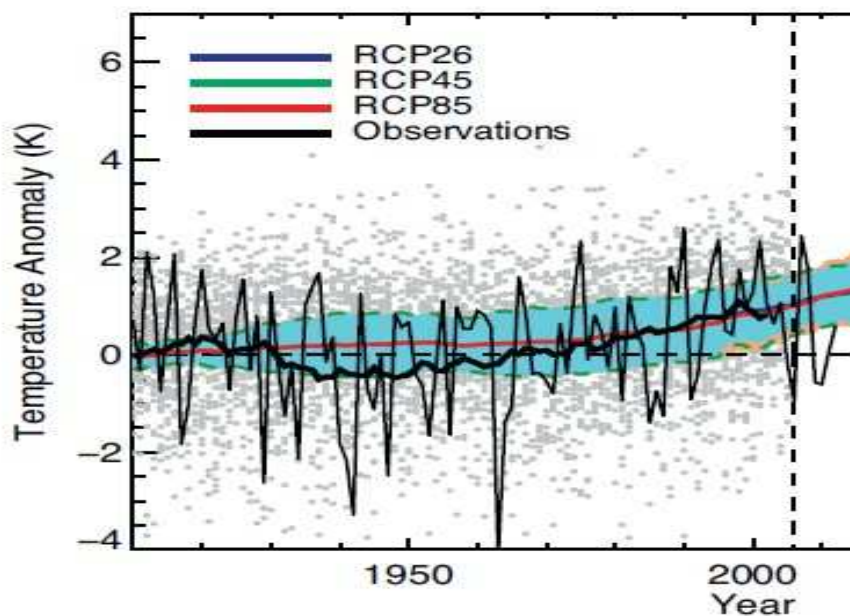


Simulations avec forçages naturels et anthropiques

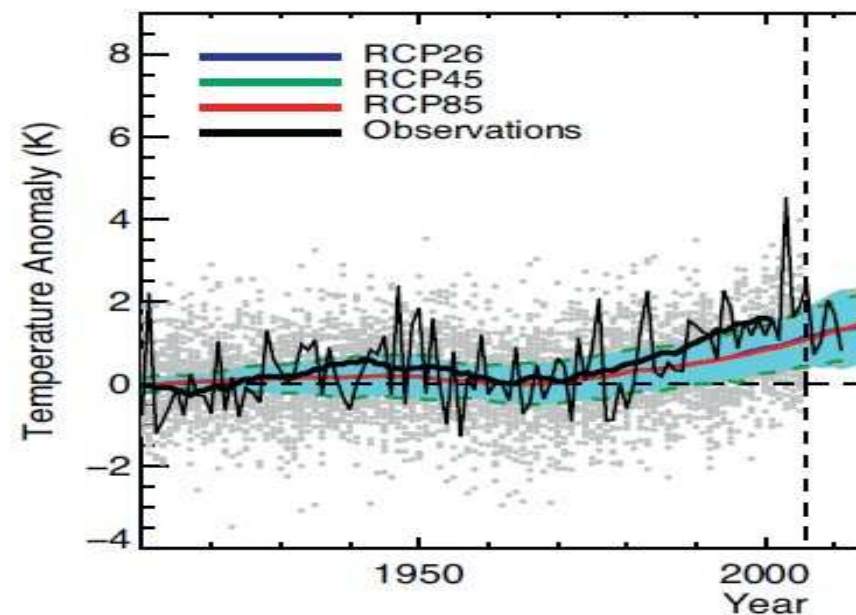


# Evolution de la température en France

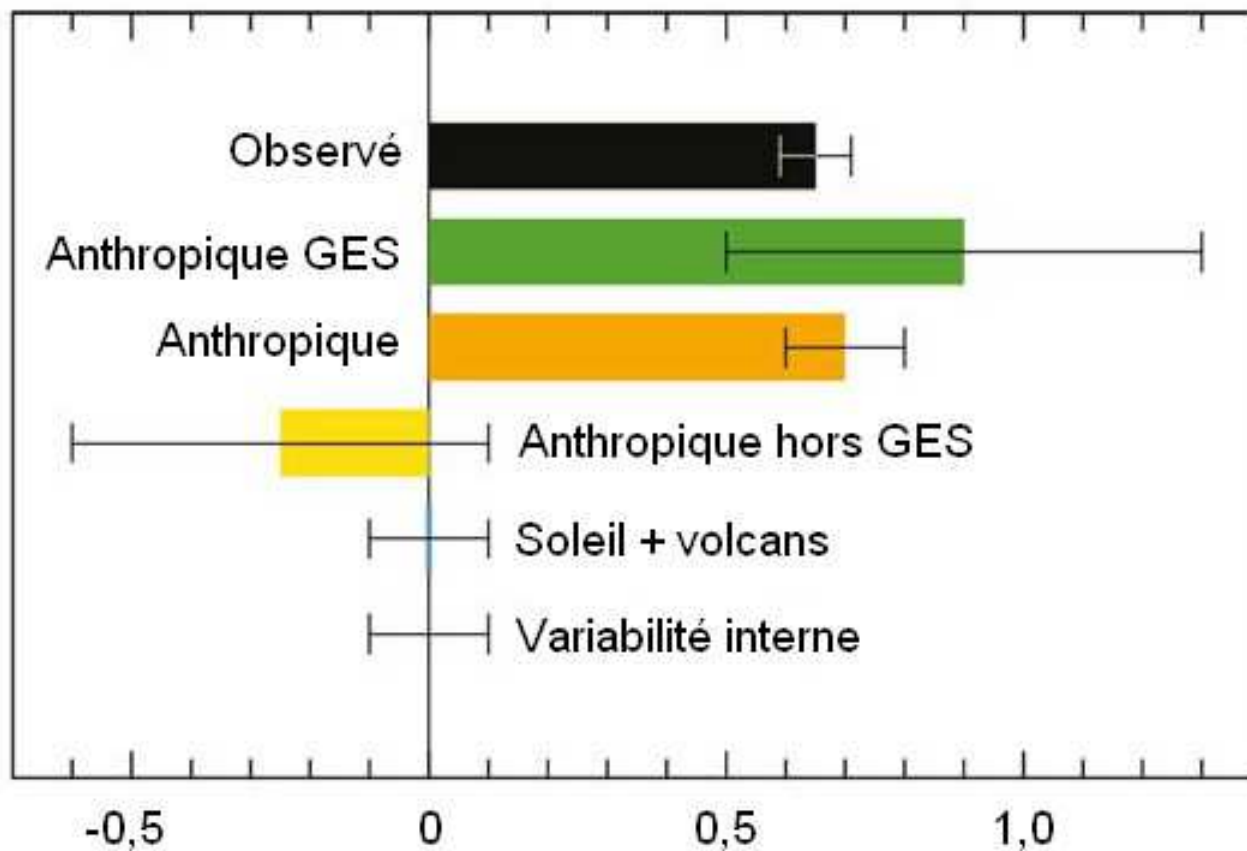
hiver



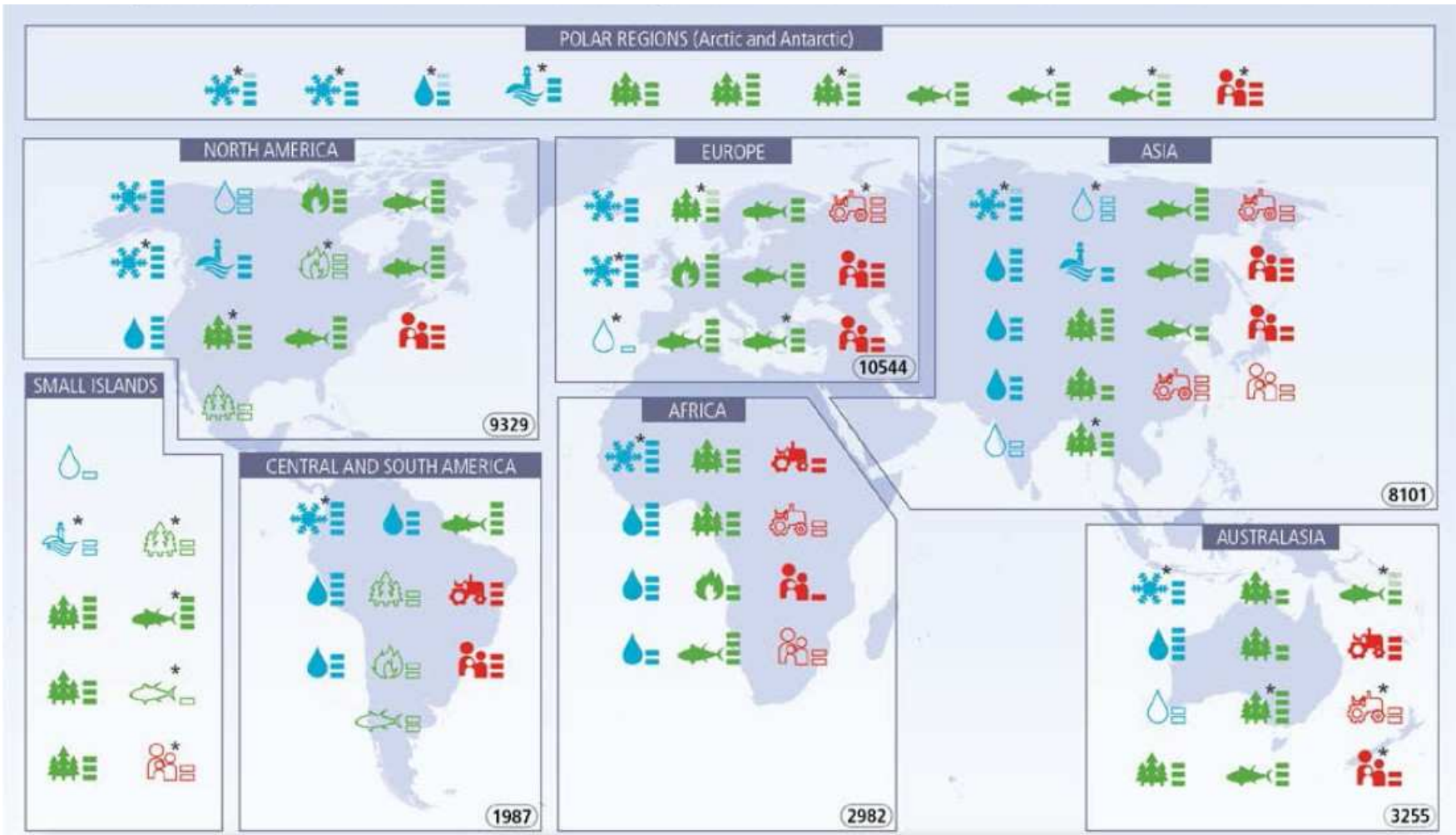
été



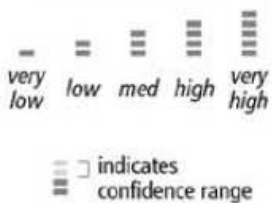
# Attribution des tendances sur 1951-2010 de la température moyenne globale en surface



# 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]



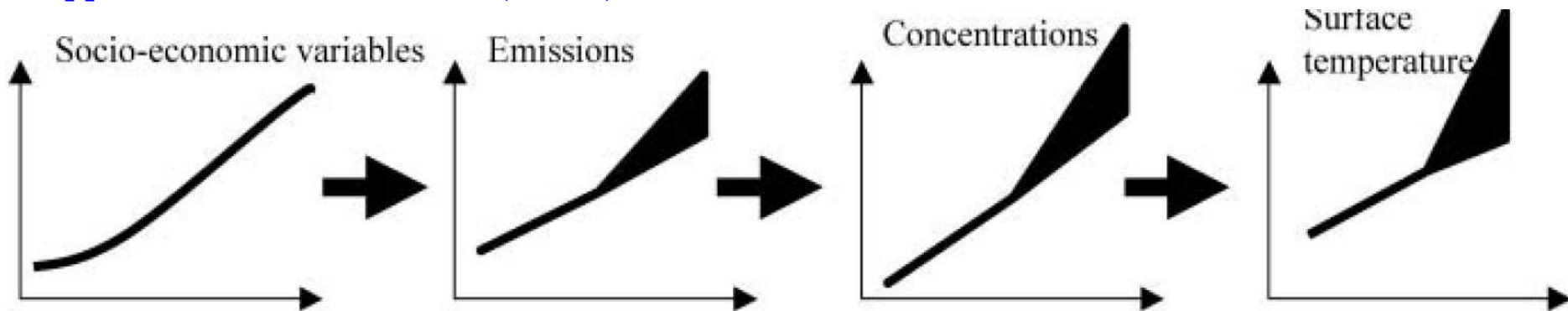
# Plan

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

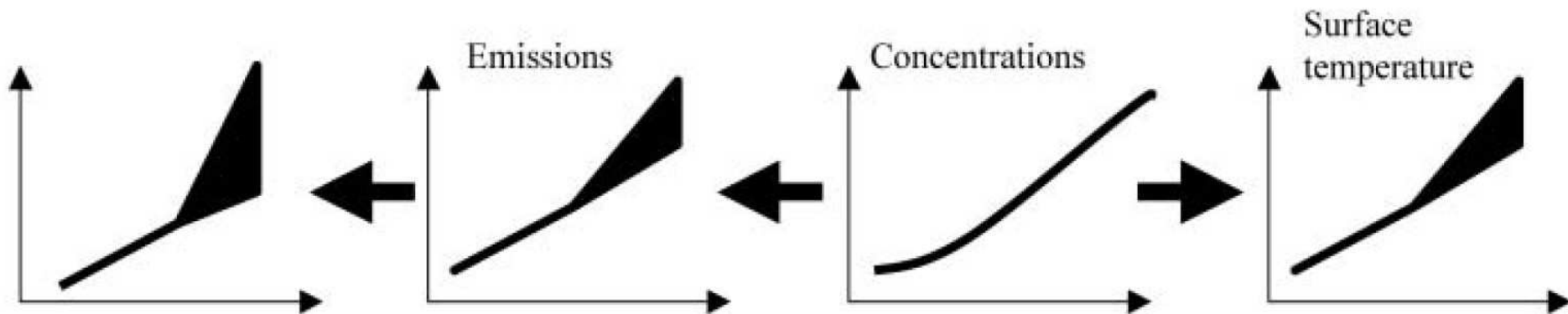
# Les projections futures

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

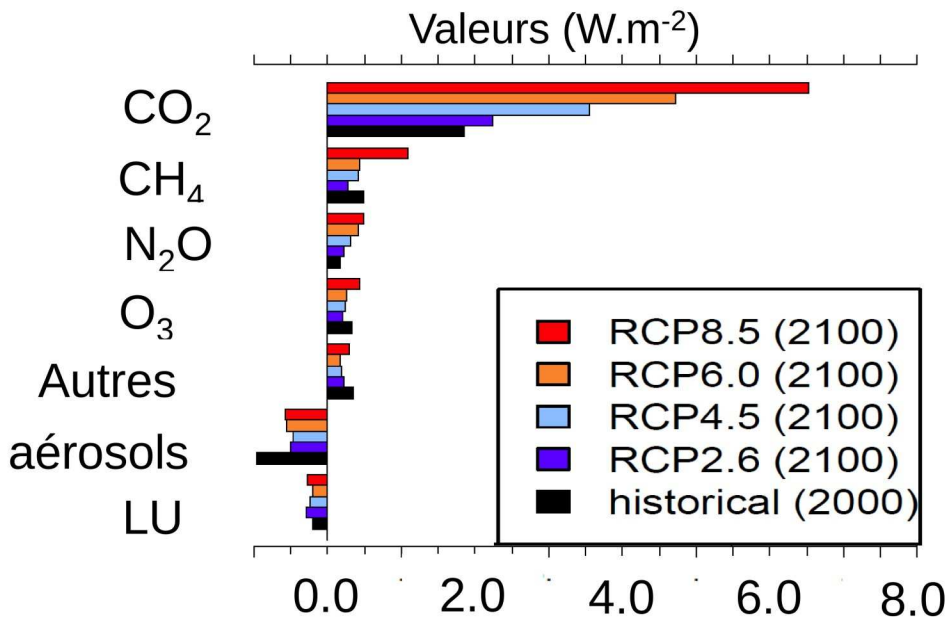
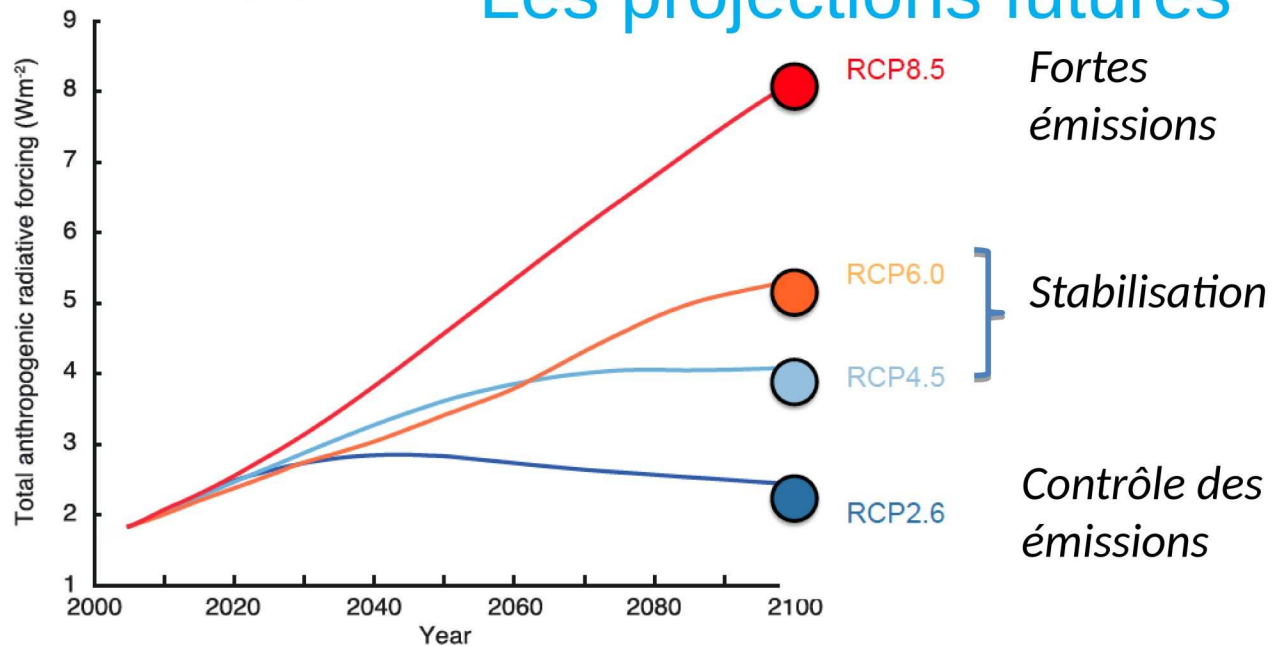
## Approche anciens scénarios (SRES)



## Approche nouveaux scénarios (RCP)



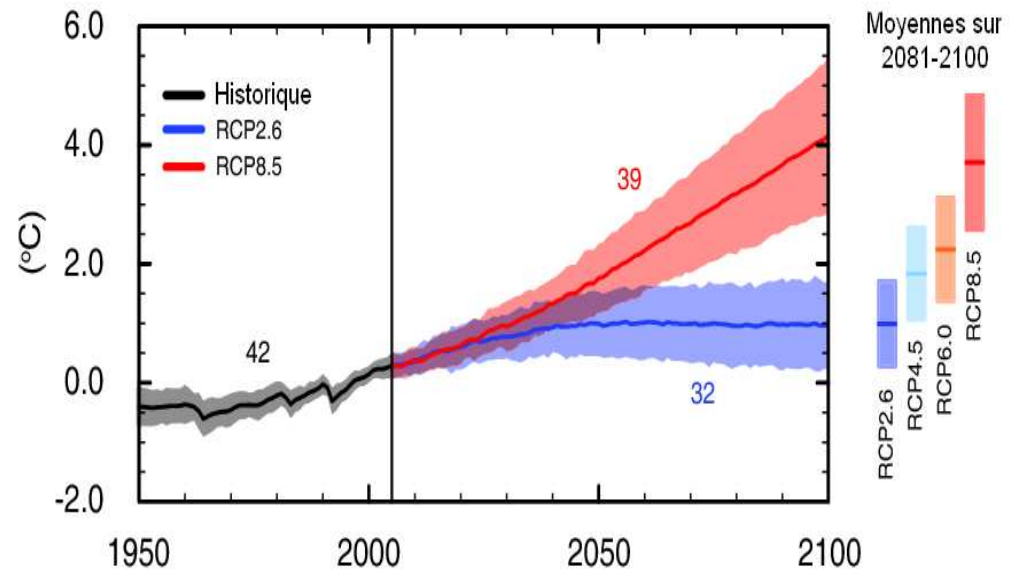
# Les projections futures



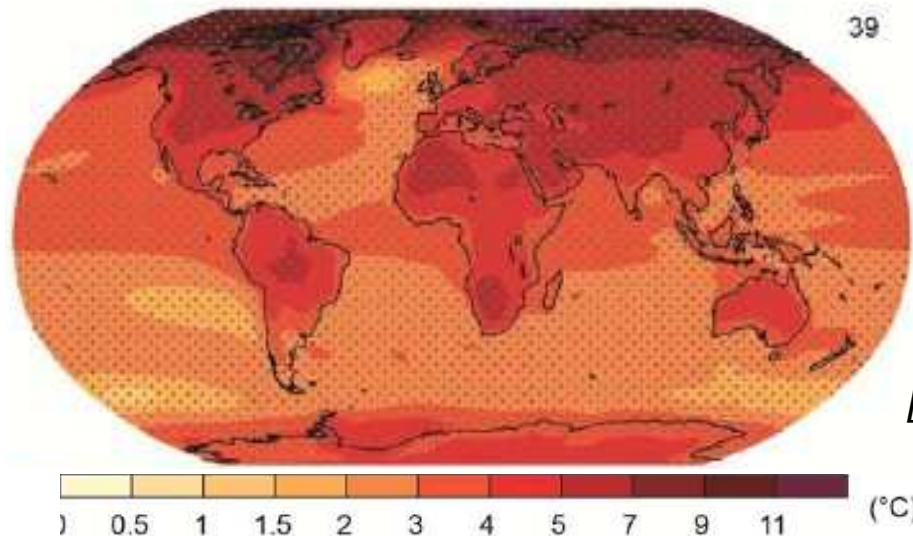
*Contribution des forçages individuels au forçage total (référence 1850)*

# Température de surface

Moyenne globale  
1950 à 2100  
(40 modèles CMIP5)

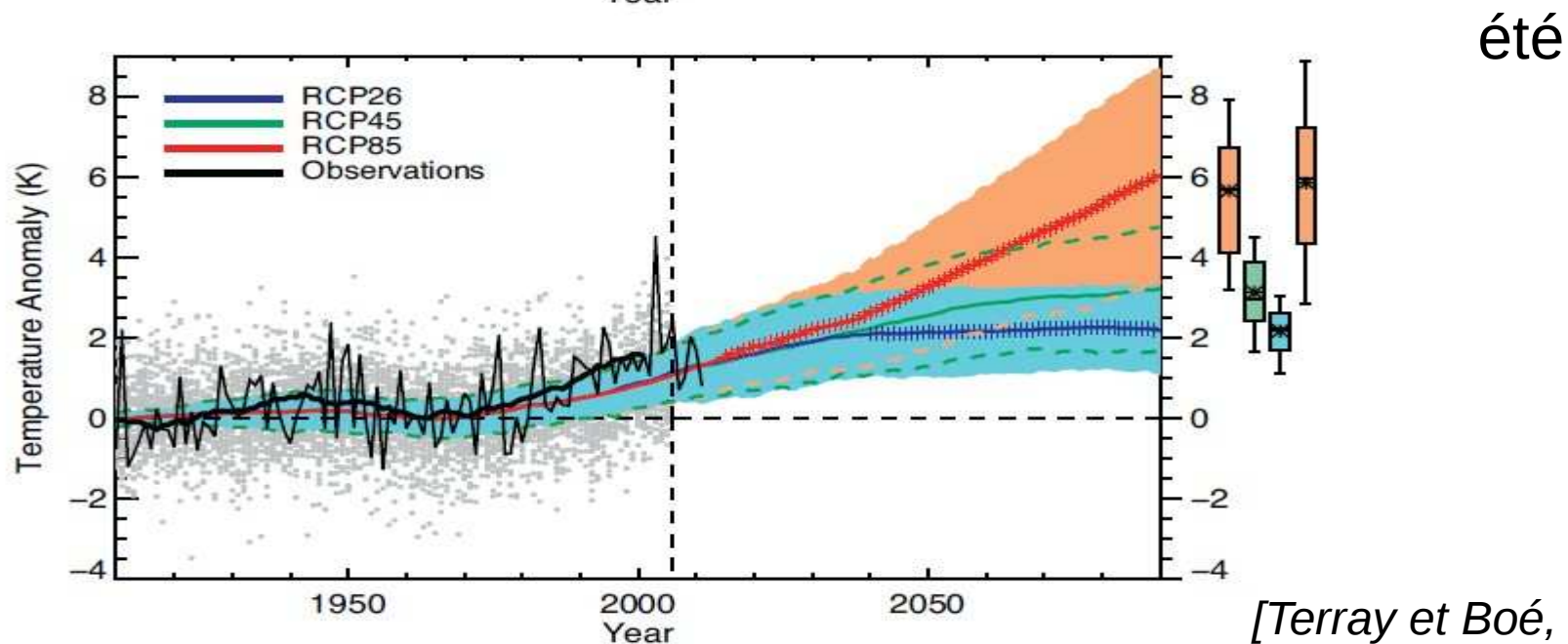
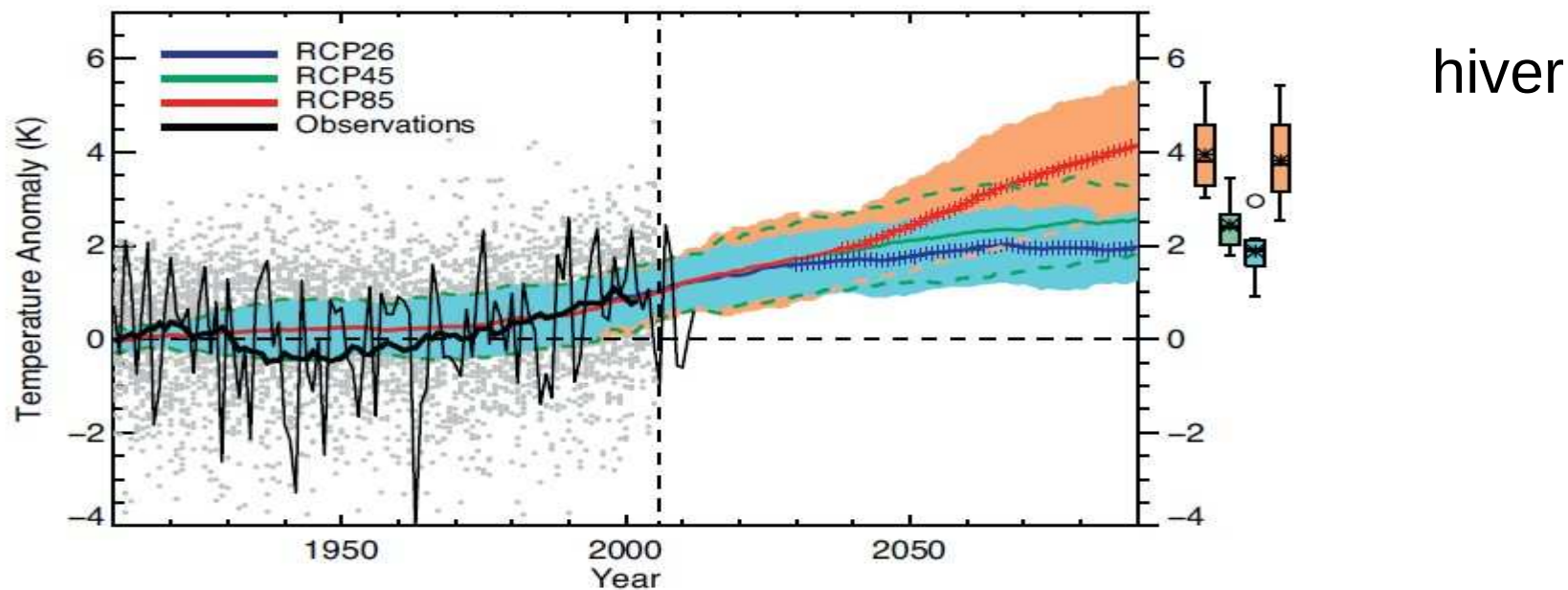


En 2100,  
scénario RCP8.5  
(39 modèles CMIP5)

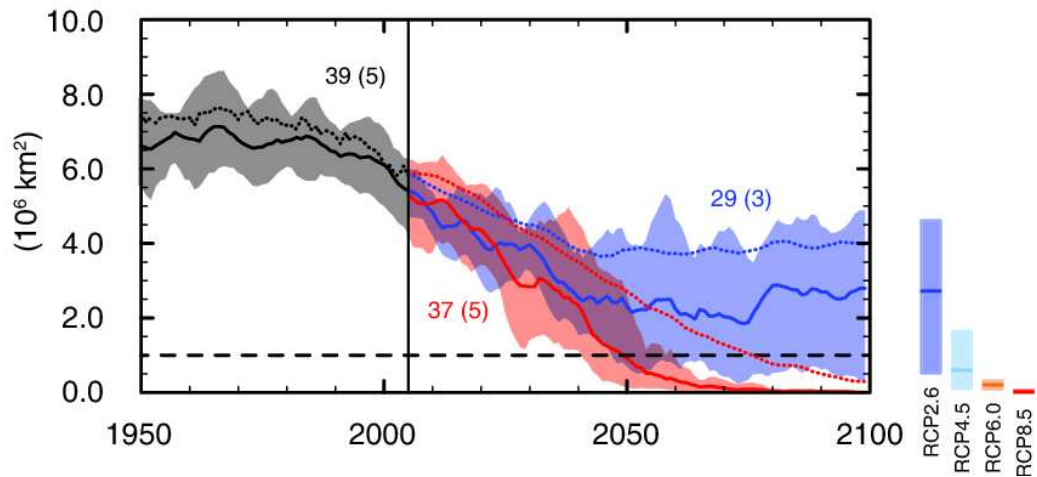


[GIEC, 2013]

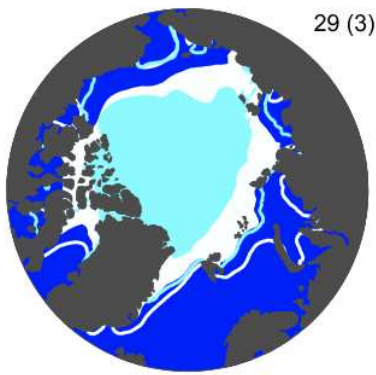
# Evolution de la température en France



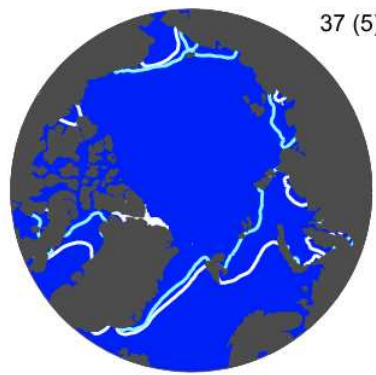
# Changements d'extension de la banquise de l'hémisphère nord septembre (minimum d'extension)



RCP2.6

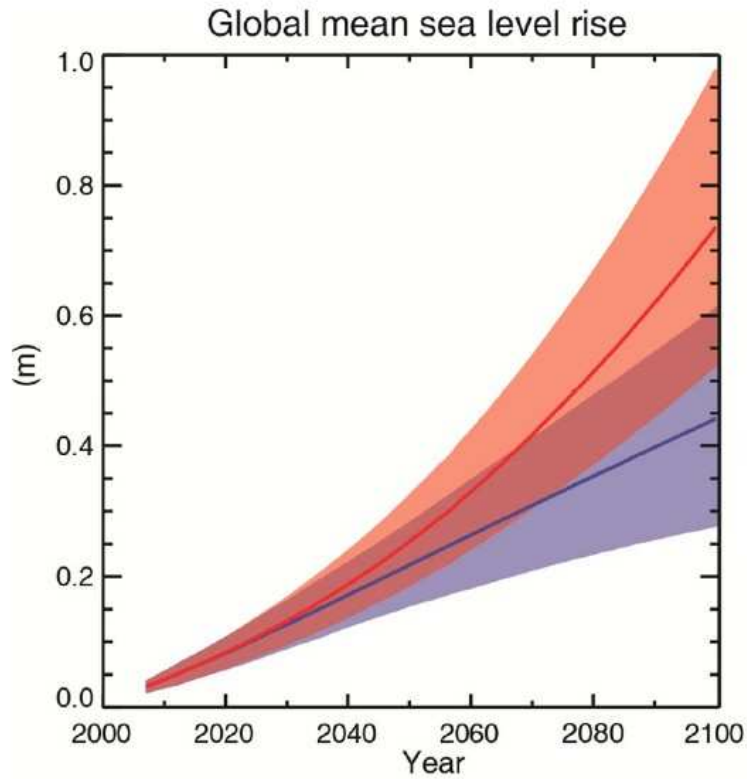


- CMIP5 multi-model average 1986-2005
- CMIP5 multi-model average 2081-2100
- CMIP5 subset average 1986-2005
- CMIP5 subset average 2081-2100



RCP8.5

# Changement du niveau des mers



Mean over  
2081-2100

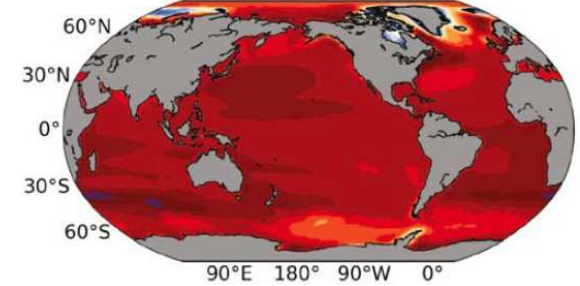
RCP2.6

RCP4.5

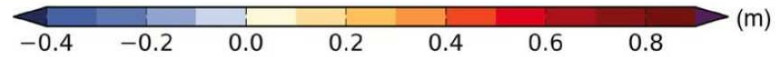
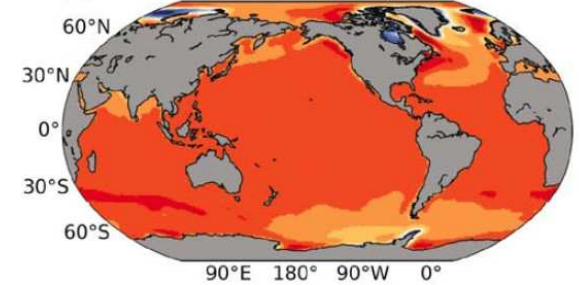
RCP6.0

RCP8.5

(d) RCP8.5 + other components



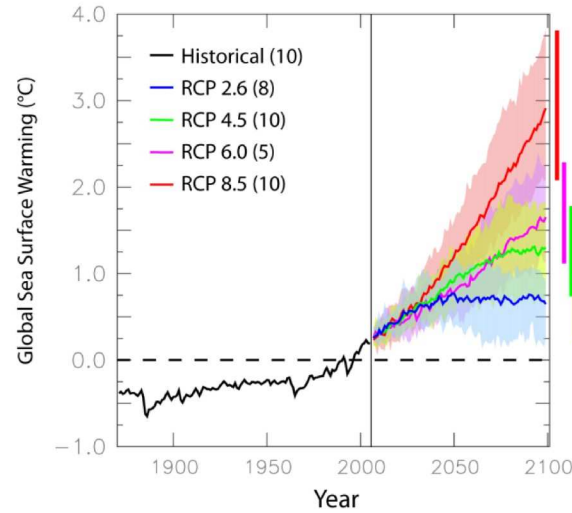
(a) RCP2.6 + other components



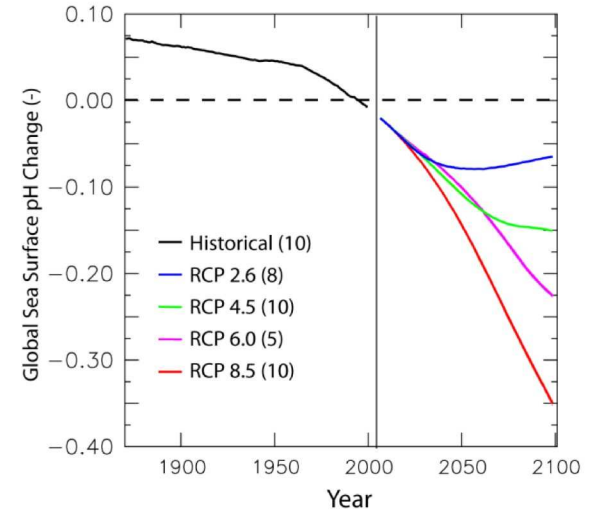
# Impacts du changement climatique sur les écosystèmes marins : Multi-modèle

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

## Température de Surface

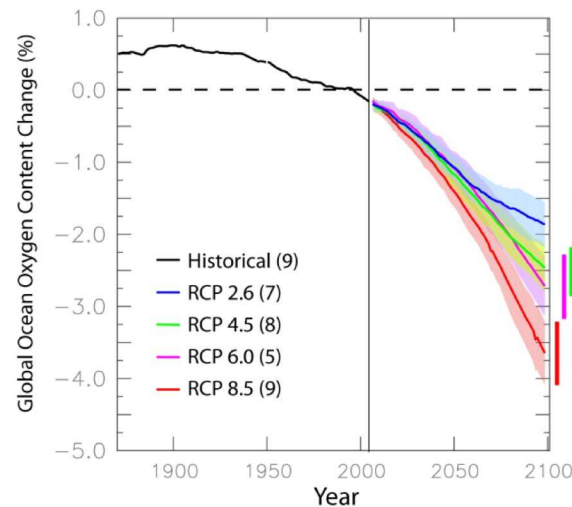


## pH de Surface

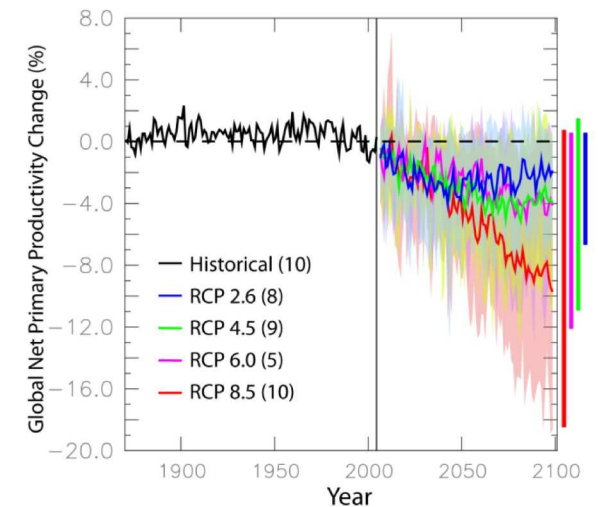


Moins d'oxygène et  
moins de production  
primaire

## Contenu en Oxygène

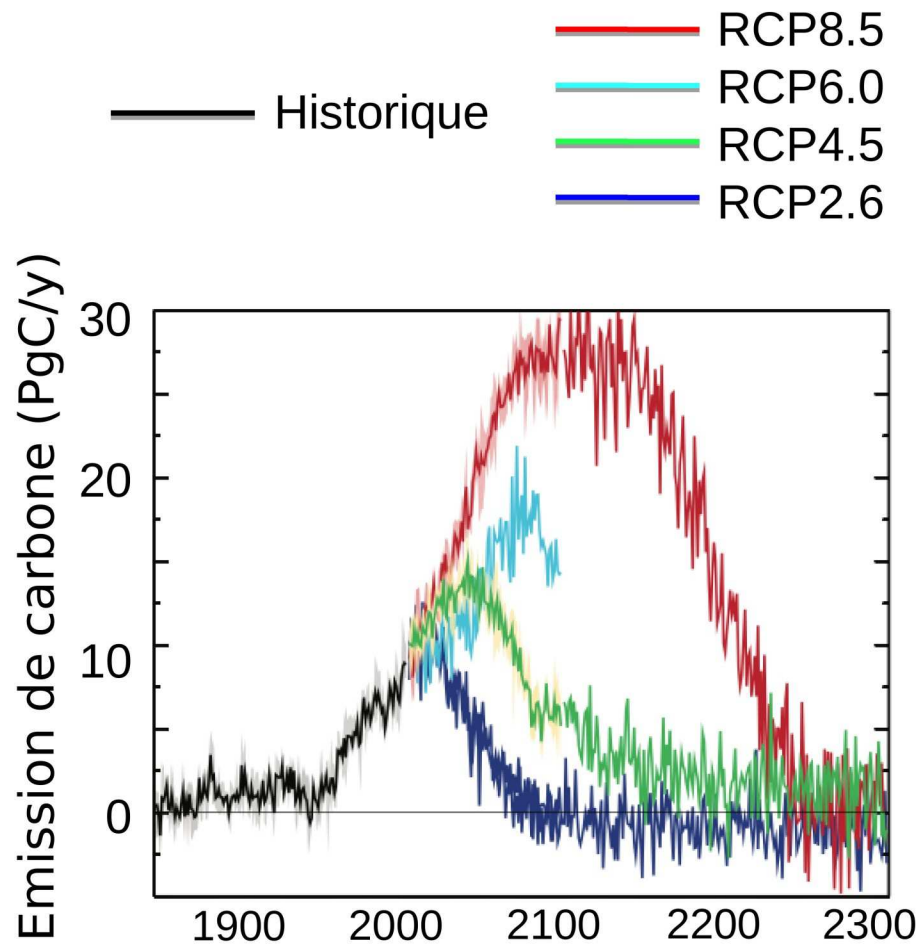
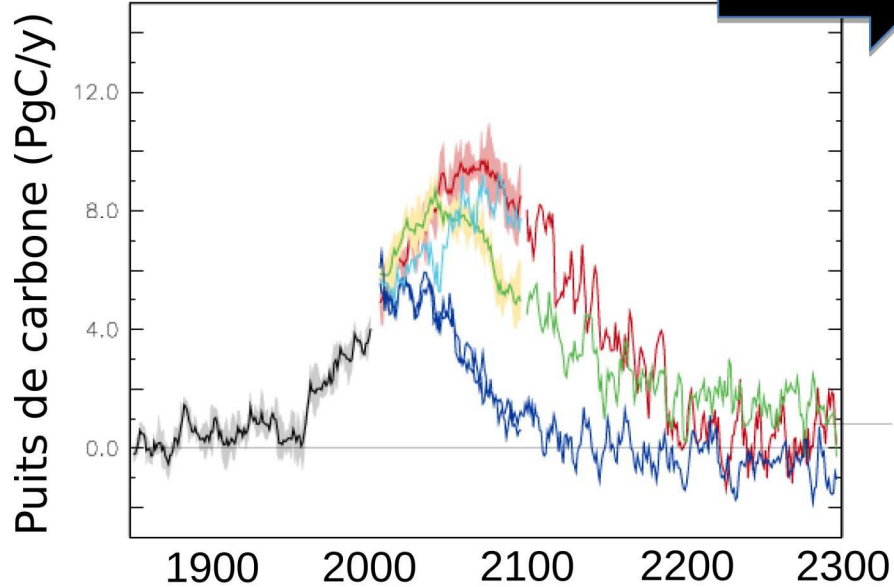
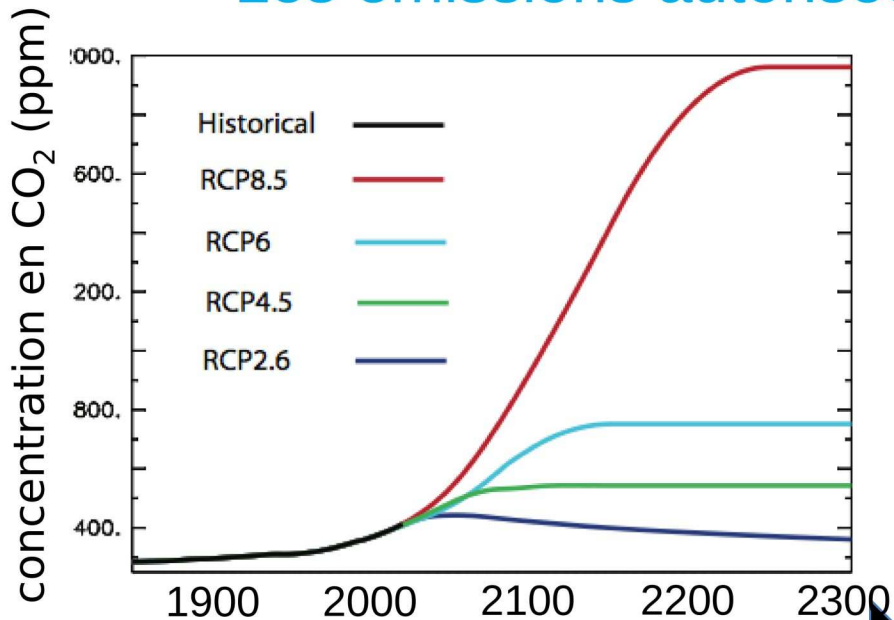


## Production Primaire Nette



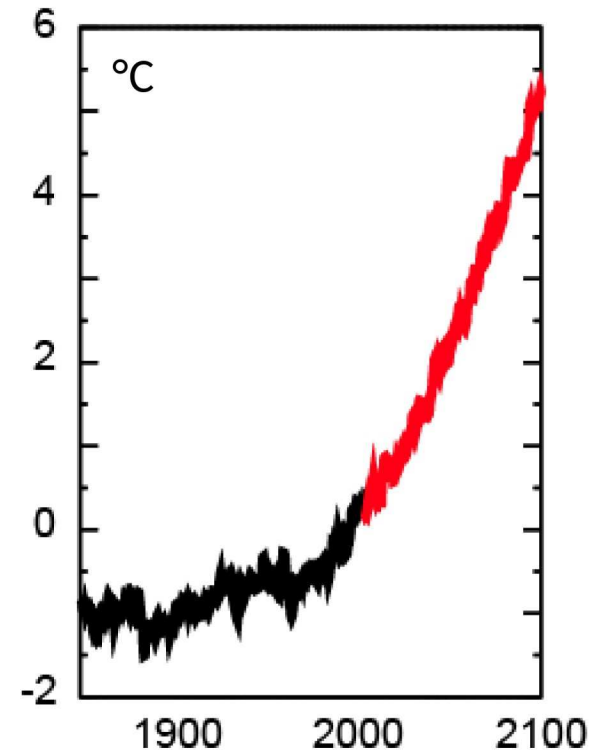
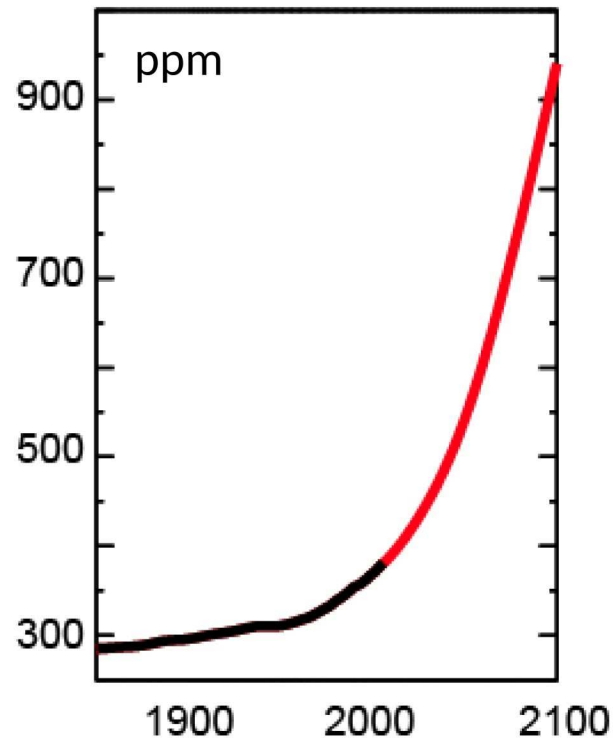
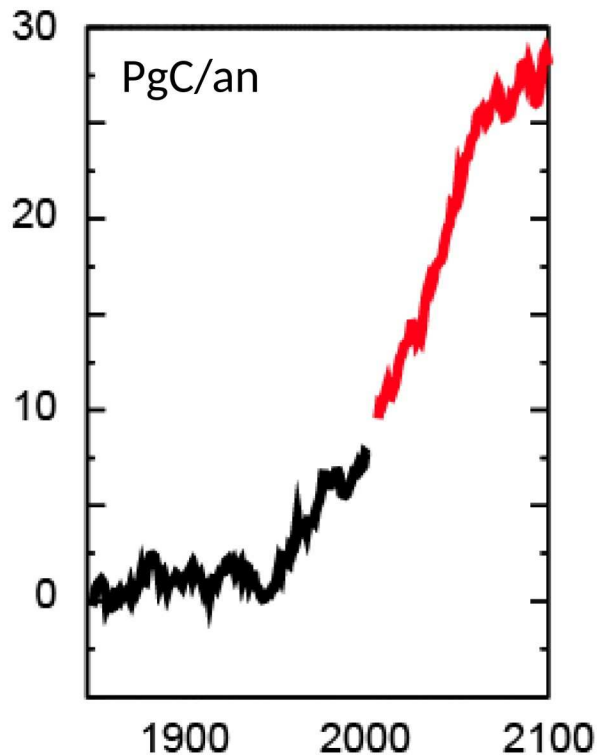


# Les émissions autorisées de CO<sub>2</sub> avec IPSL-CM5



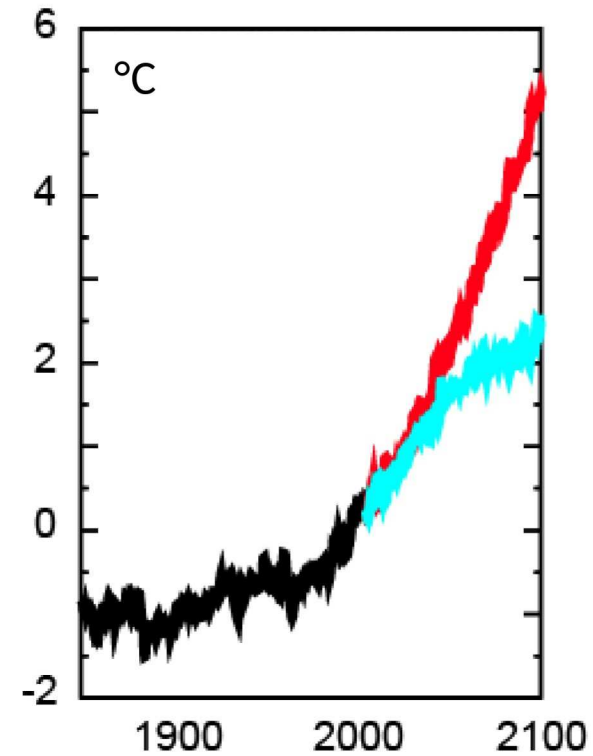
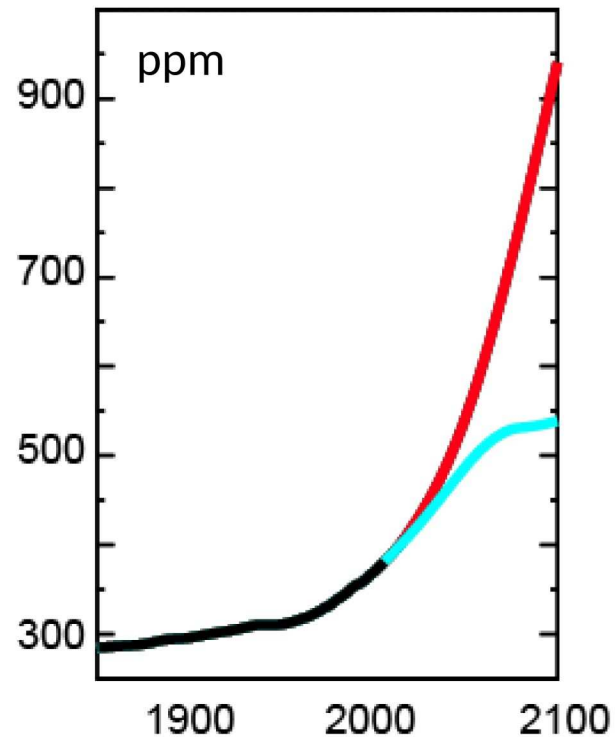
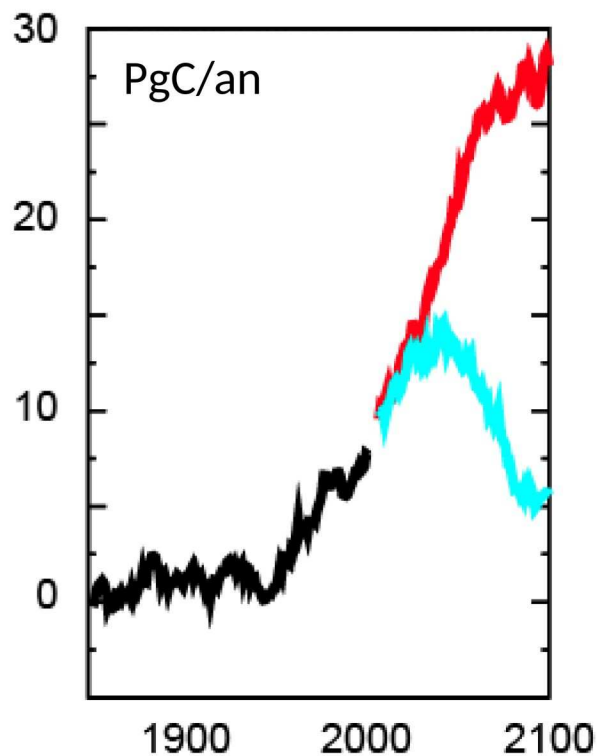
# Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO<sub>2</sub>, Température moyenne

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



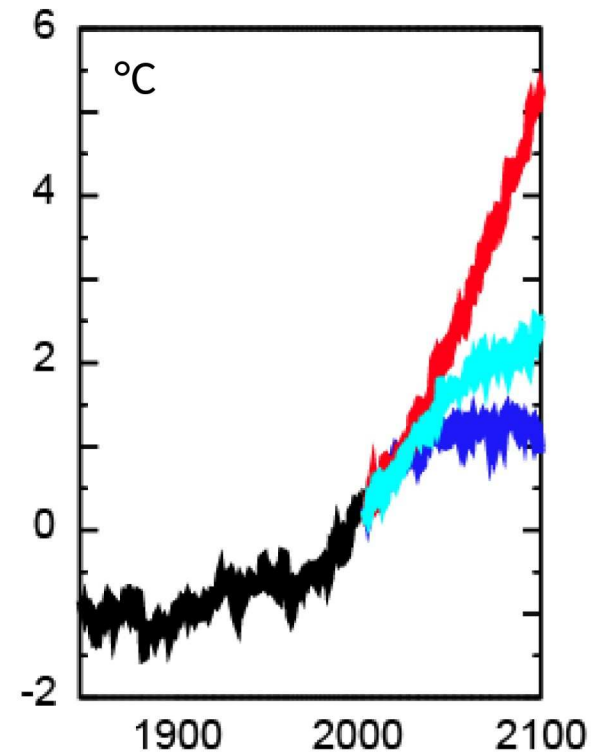
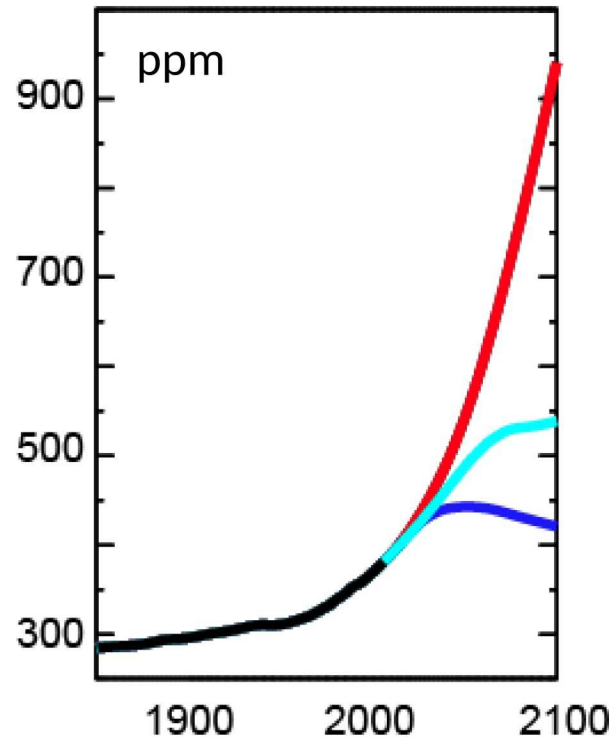
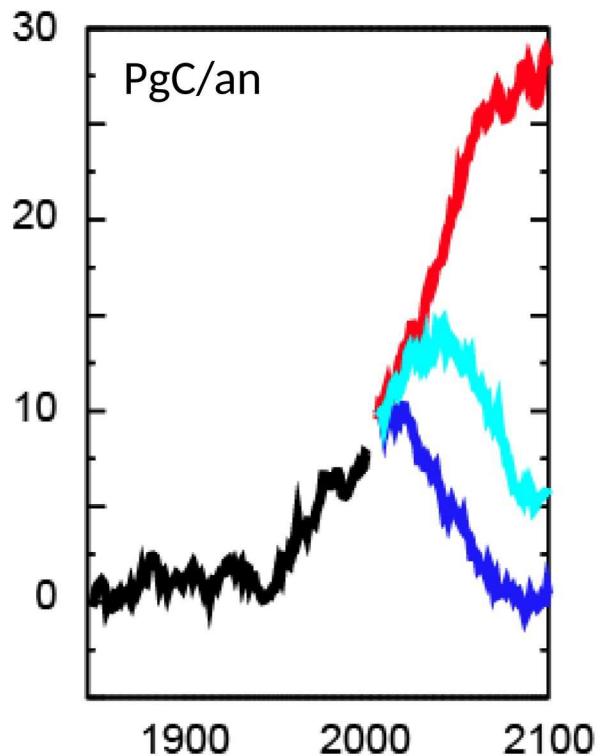
# Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO<sub>2</sub>, Température moyenne

- >> **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

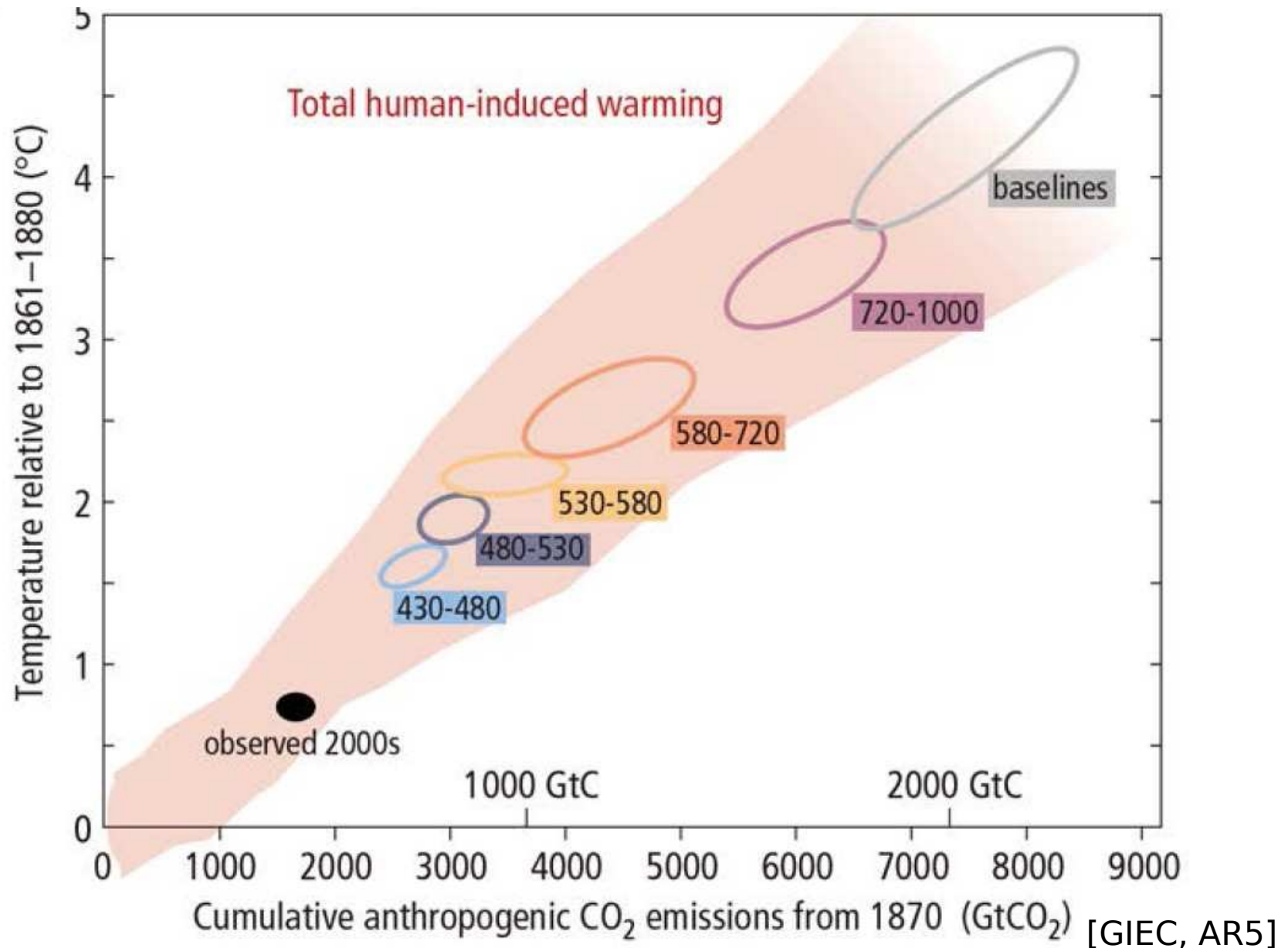


# Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO<sub>2</sub>, Température moyenne

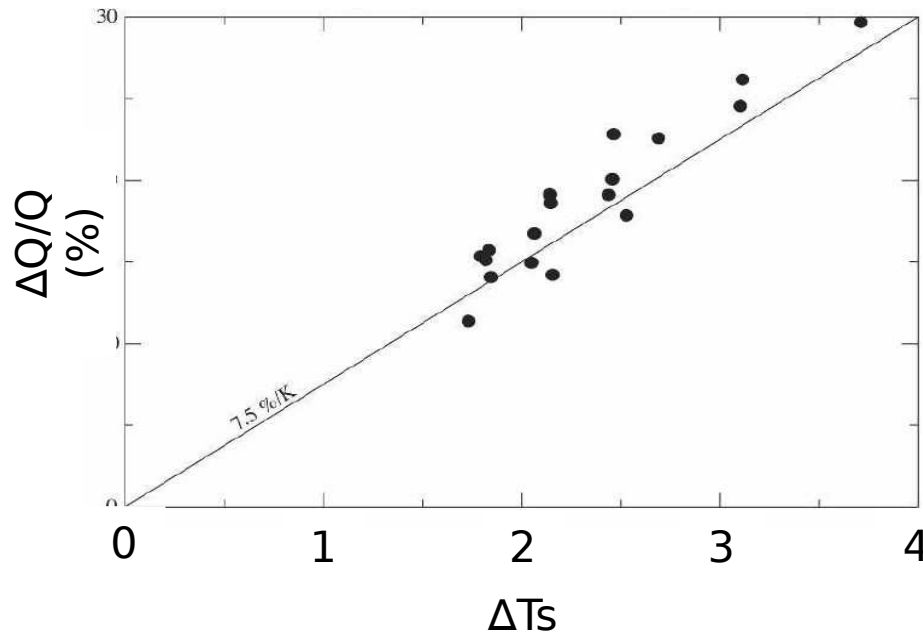
- >> **Scénario Haut** : les émissions, les concentrations et les températures augmentent
- >> **Scénario Médian** : pour stabiliser les concentrations à 550 ppm, il faut décroître fortement les émissions. Mais les températures continent à augmenter
- >> **Scénario Bas** : pour limiter le réchauffement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



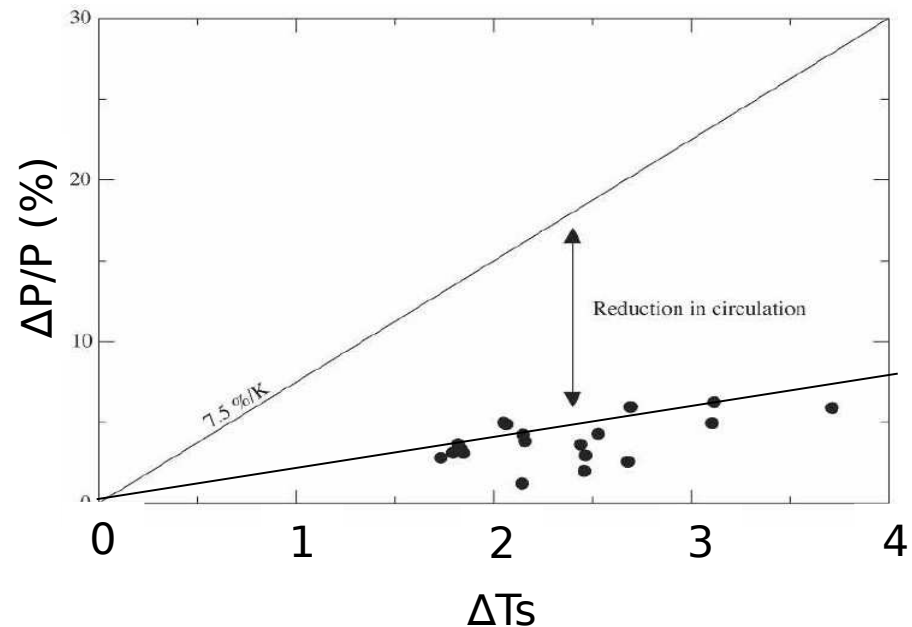
# Accroissement de température versus les émissions cumulées de CO<sub>2</sub>.



# Les changements de précipitations dus à l'accroissement de température



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



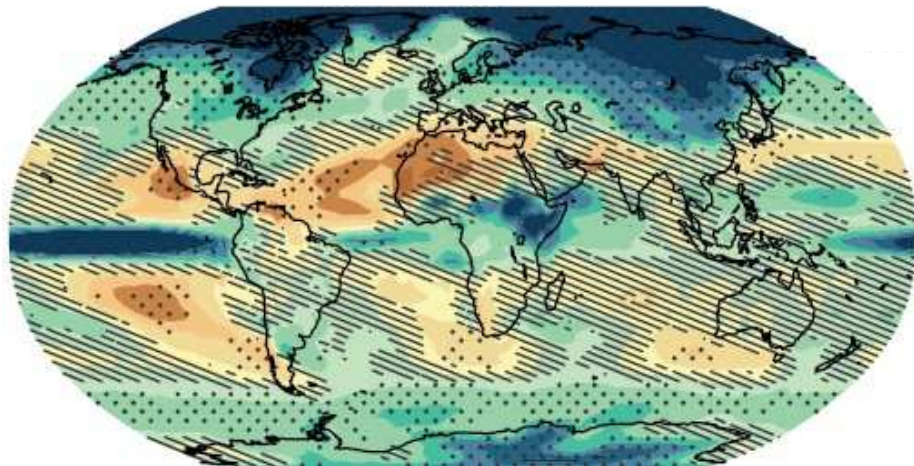
$$\Delta P/P (\%) \approx 1.5 \Delta T_s$$



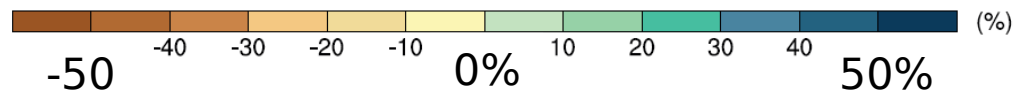
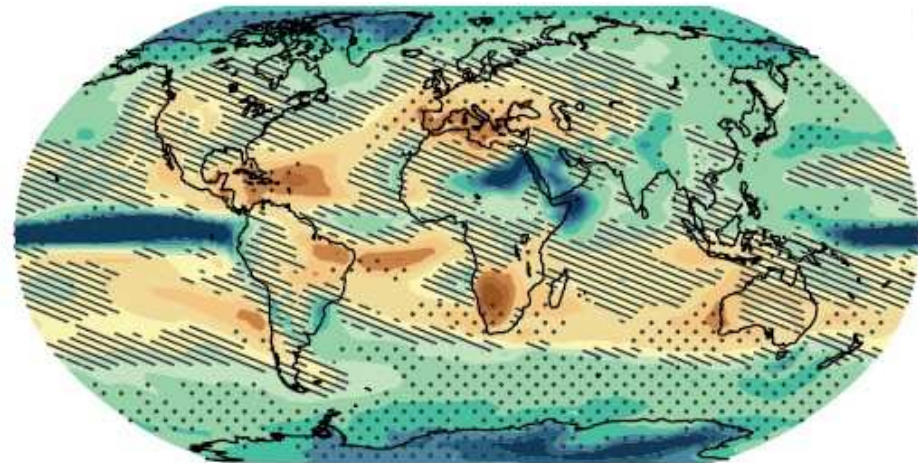
Changement moyen de précipitation n'est pas directement relié au changement moyen de vapeur d'eau

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

Décembre à février



Juin à septembre



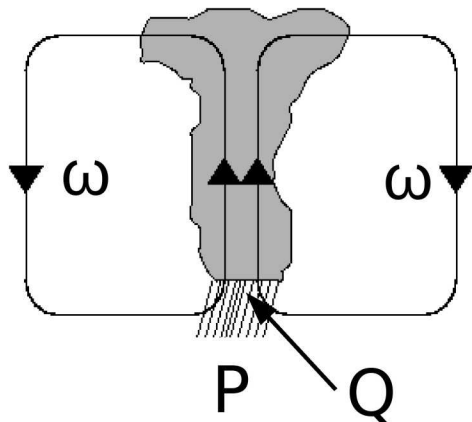
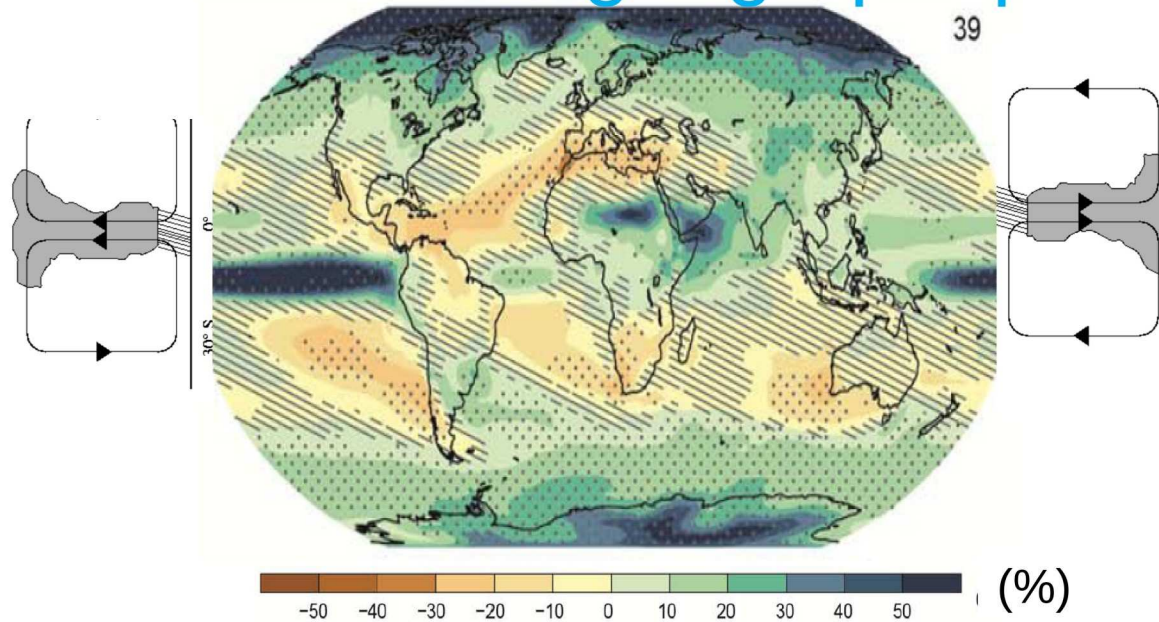
Signal/bruit faible



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

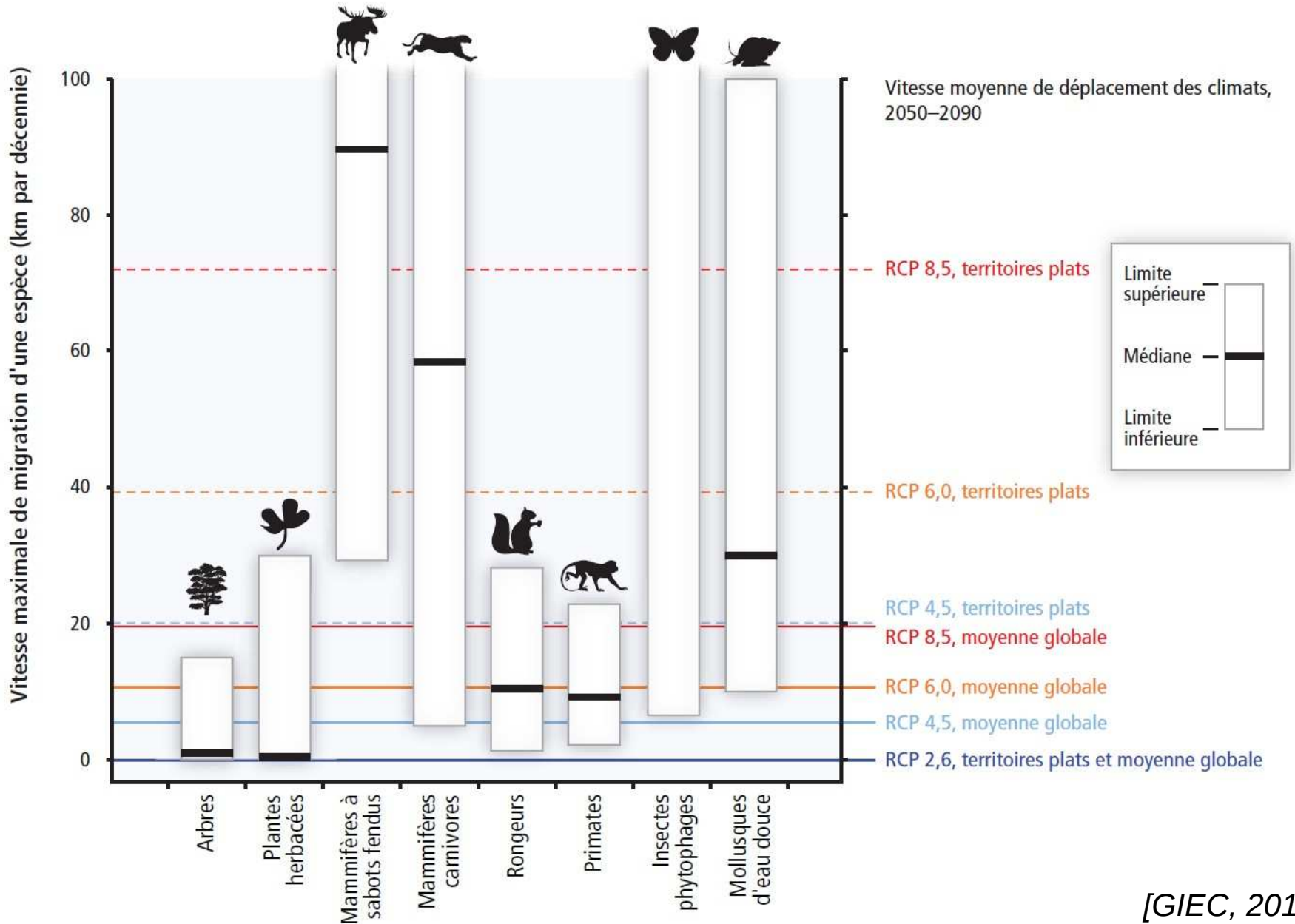
**dynamique**



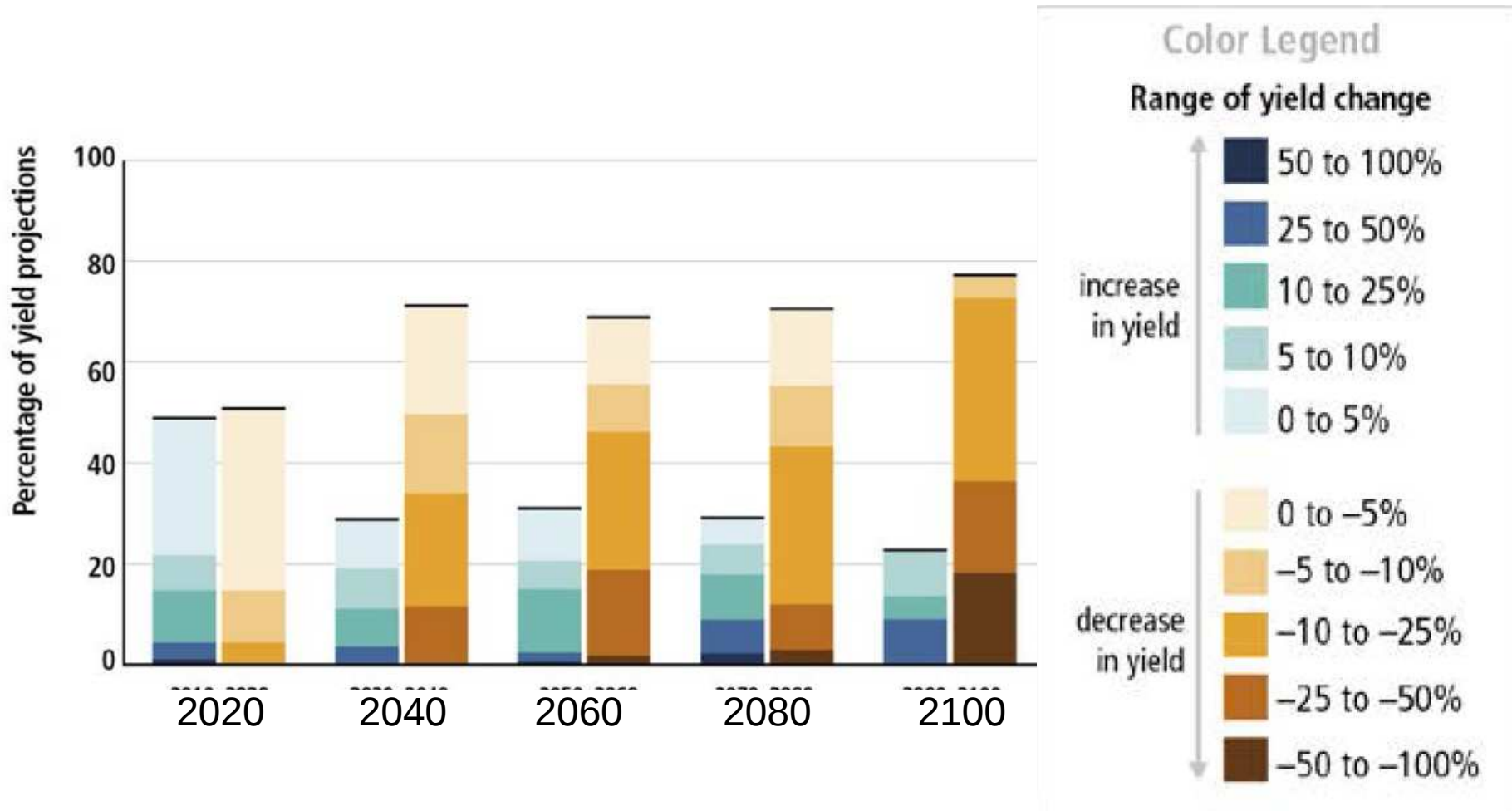
## Évènements extrêmes: tendances passées et futures

Phénomène	Probabilité depuis 1950	Contribution humaine	Probabilité au début / fin du XXI <sup>e</sup> siècle
<b>Périodes/vagues de chaleur</b> 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 <b>épisodes de précipitations abondantes</b>	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 <b>sécheresses</b>	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 <b>cyclonique tropicale</b> 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



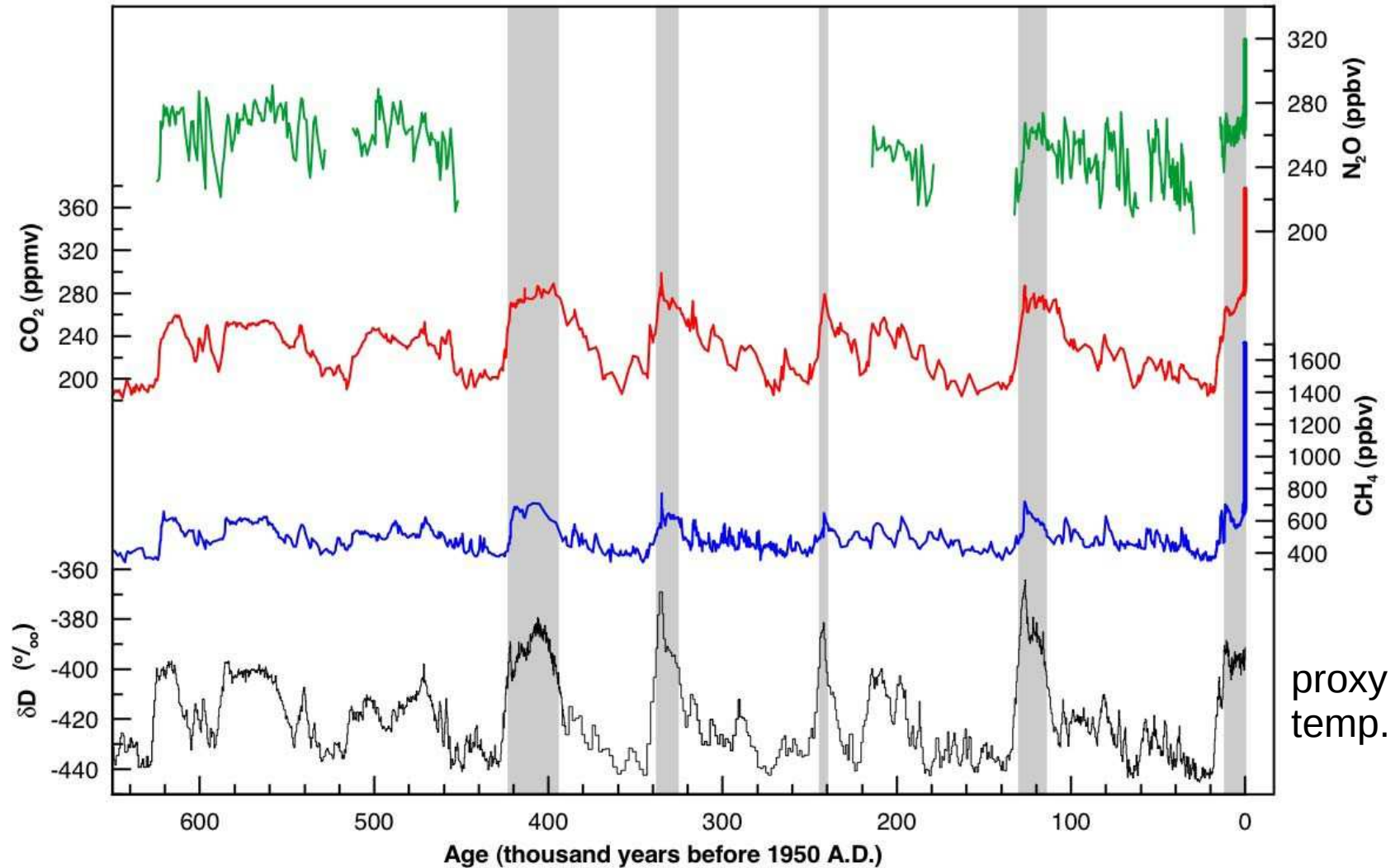
# Variation du rendement de l'agriculture



# Plan

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

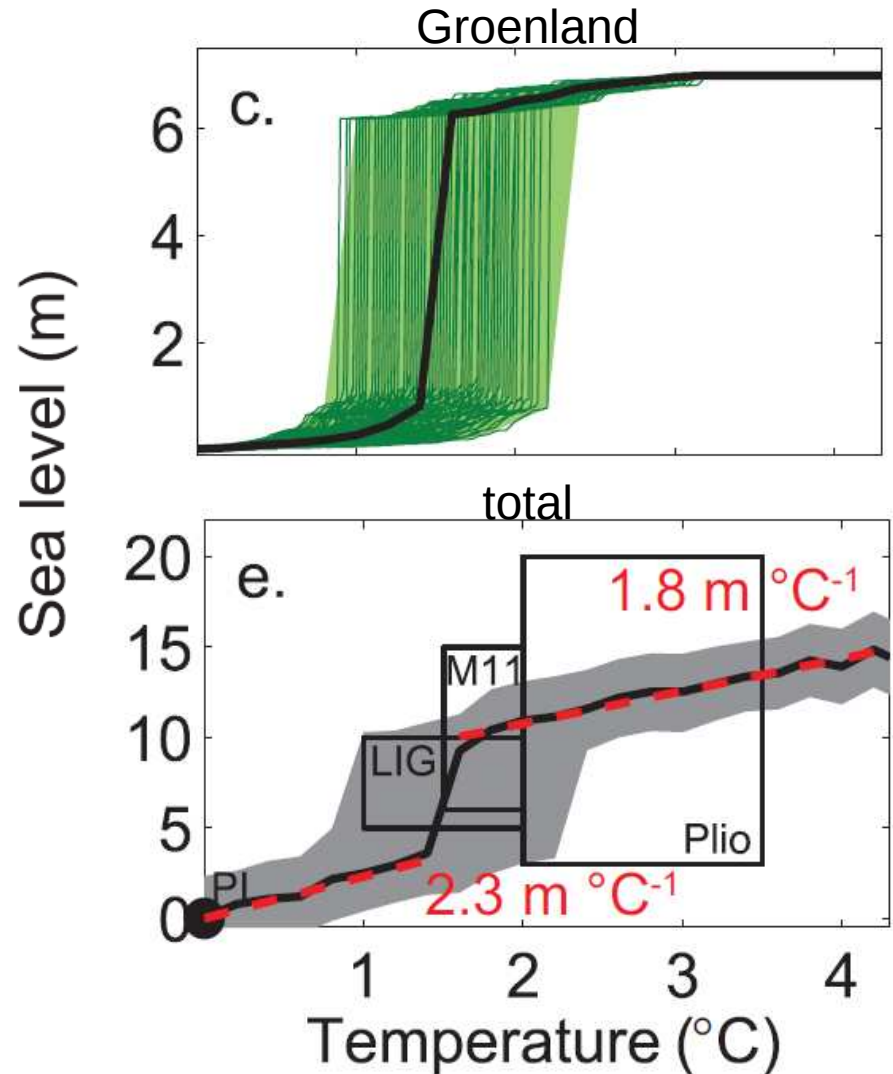
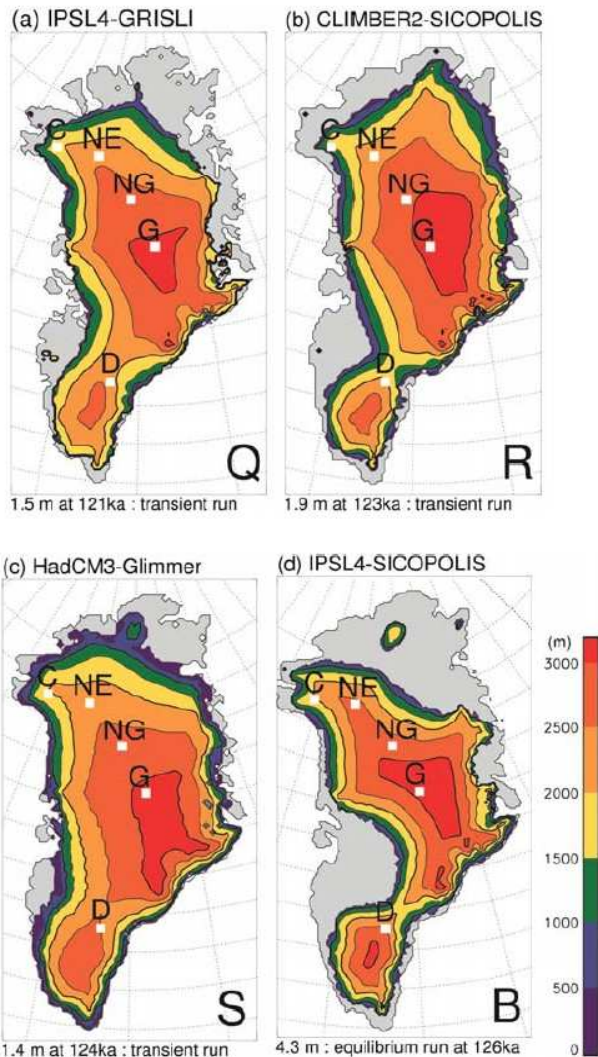
# Reconstructions à partir de carottages glaciaires et observations récentes



# Reconstructions dernier inter-glaciaire et conséquences pour le futur

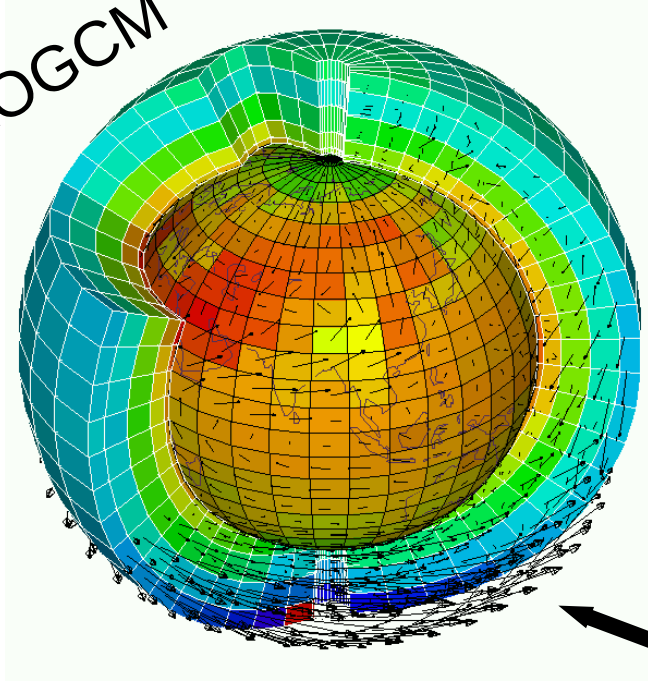
Estimation fonte du Groenland dernier interglaciaire

Estimation changement niveau des mers aux échelles multi-millénaires

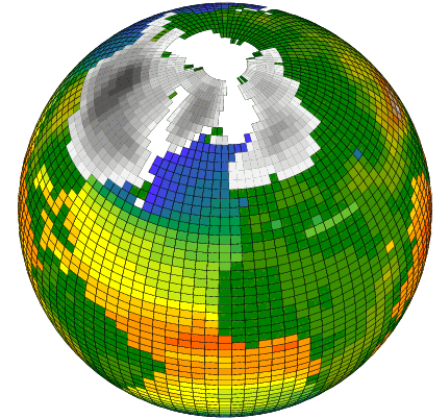


# Simulation du climat du Dernier Maximum Glaciaire

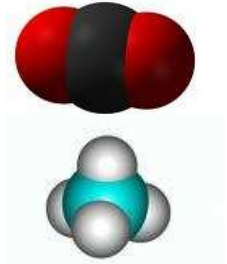
AOGCM



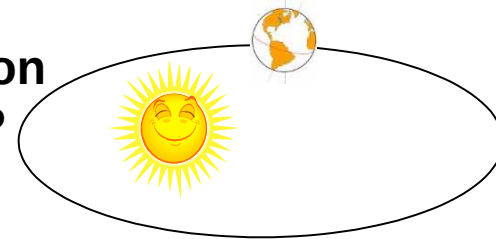
Calottes  
glaciaires



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



Insolation  
21ky BP



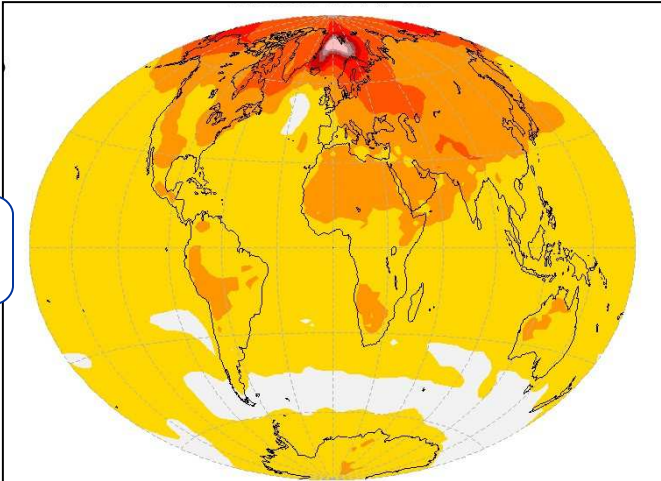
Forçage en gaz à effet de serre ~ climat futur  
Autre forçage majeur: calottes glaciaire

# Changement de température de surface

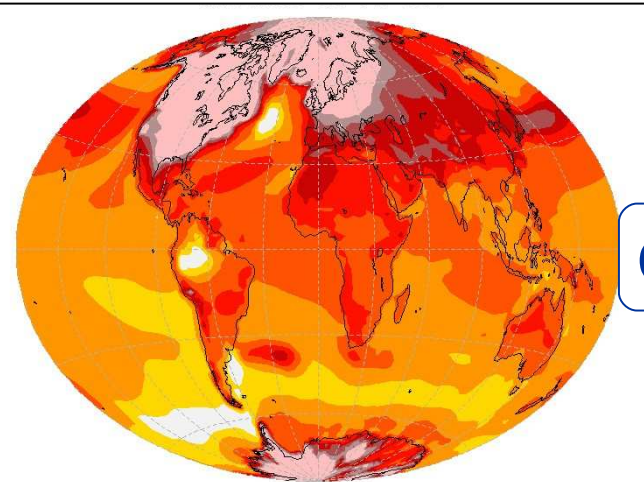
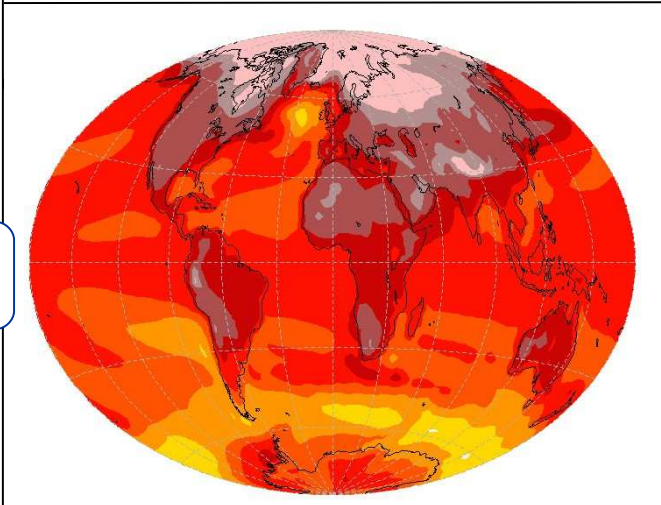
Différence entre **2100** et **1990**

IPSL-CM5A-LR

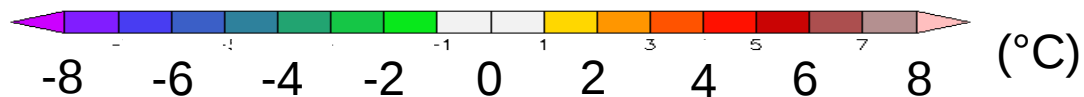
**RCP2.6**



**RCP8.5**

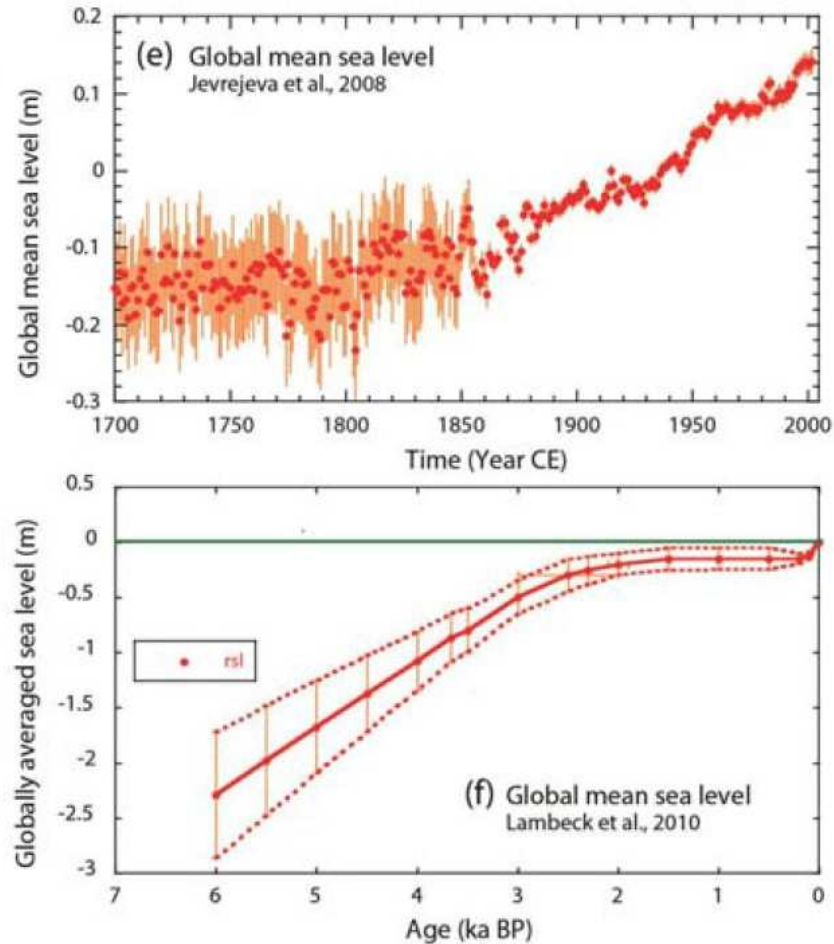


**Glaciaire**



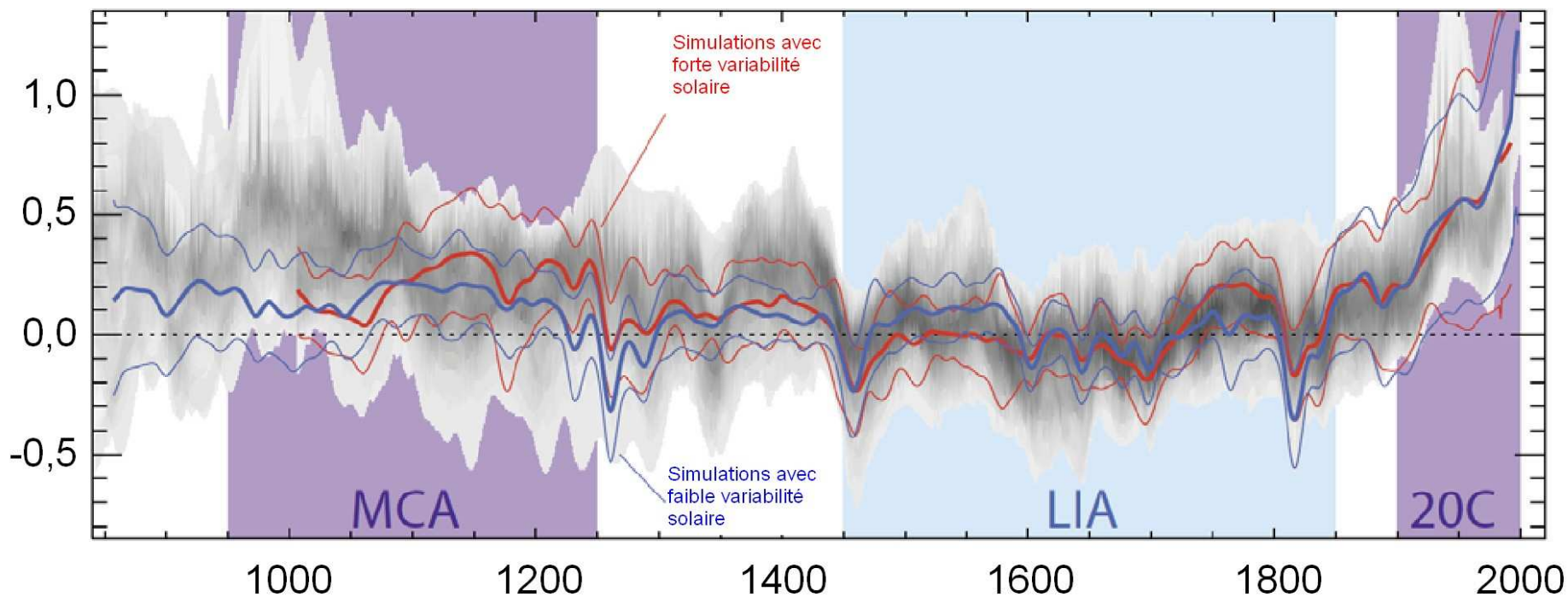


# Niveau des mers



Une transition a eu lieu entre la fin du XIX<sup>e</sup> et le début du XX<sup>e</sup> 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*)

# Plan

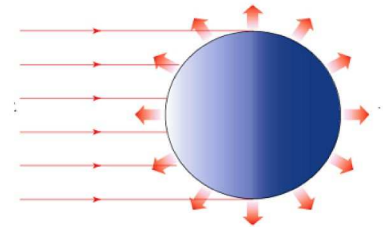
- I. Contexte et historique
- II. Variations du climat et rôle des activités humaines
- III. Paléoclimats
- IV. Projections des climats futurs
- V. Retour sur la modélisation et sur quelques questions

# Le système climatique

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

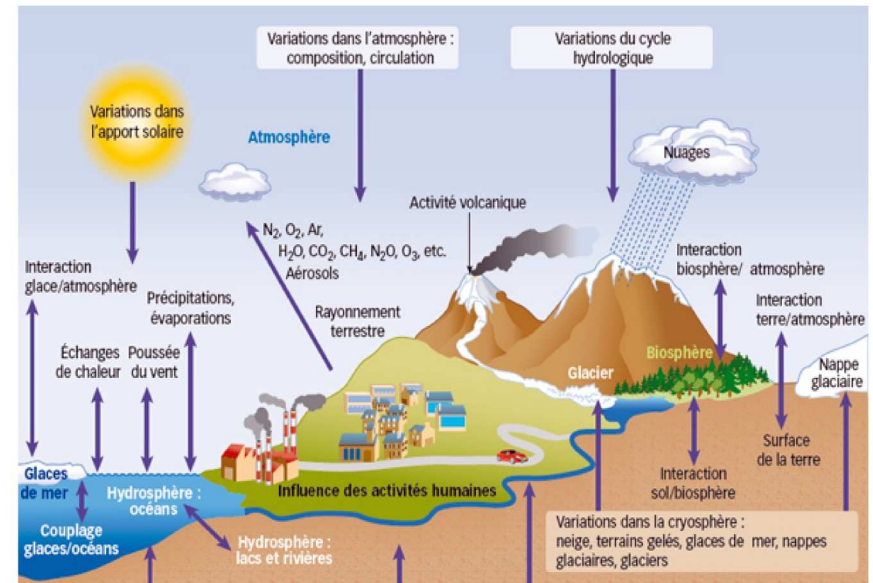
Système thermodynamique ouvert en pseudo équilibre, en général sans aucun rappel

=> conservation de l'énergie



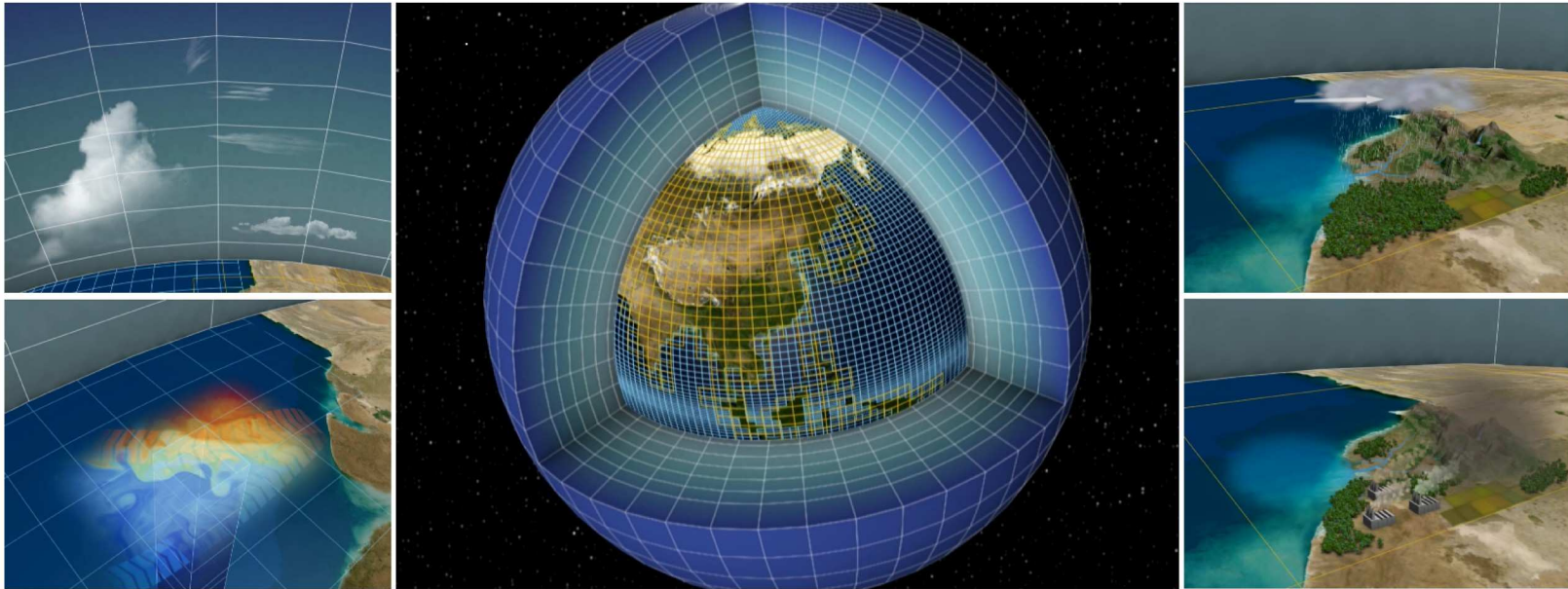
## Système

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



# Modèle de climat

## (Modèle de circulation générale)



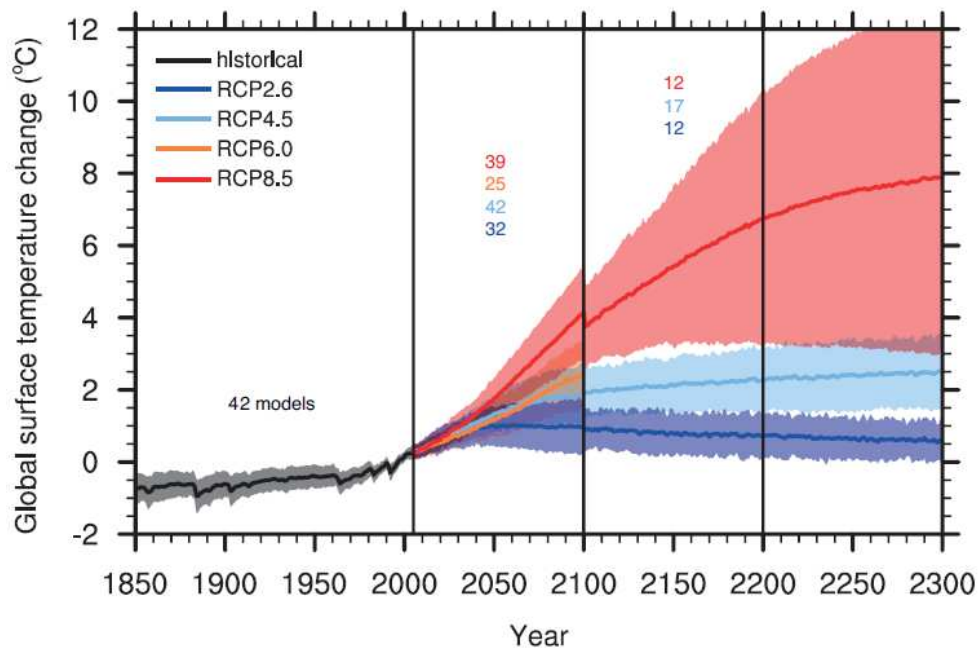
Images issues d'un film présentant la modélisation du climat. Copyright CEA

- 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

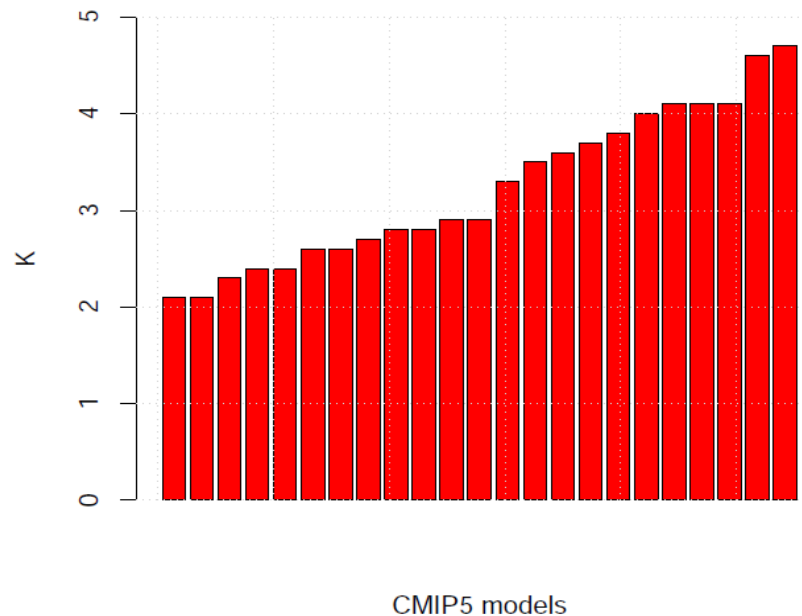
# Amplitude du réchauffement Sensibilité climatique

Accroissement de la moyenne des températures de surface

Pour des scénarios « réalistes »

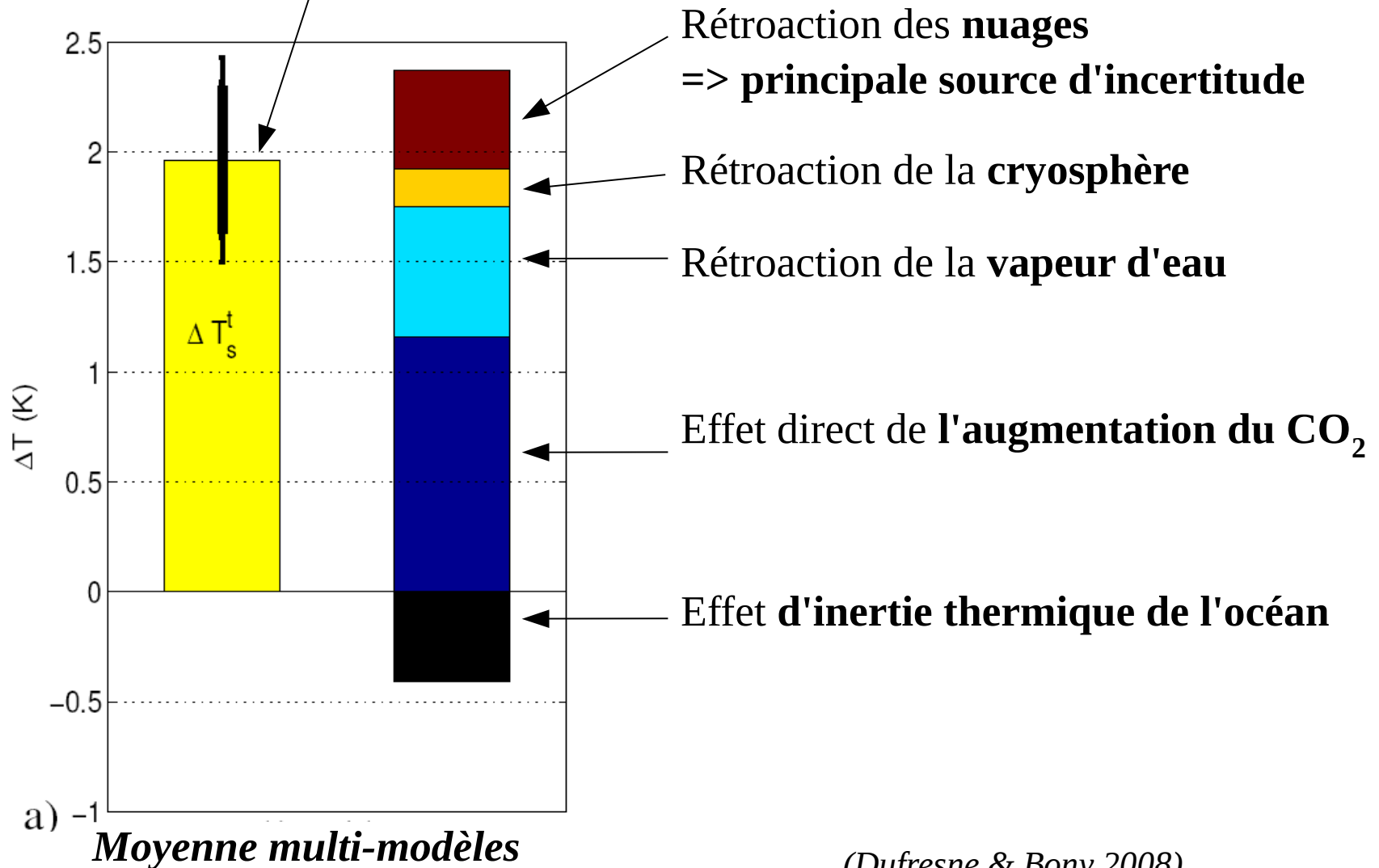


Pour un doublement de CO<sub>2</sub>



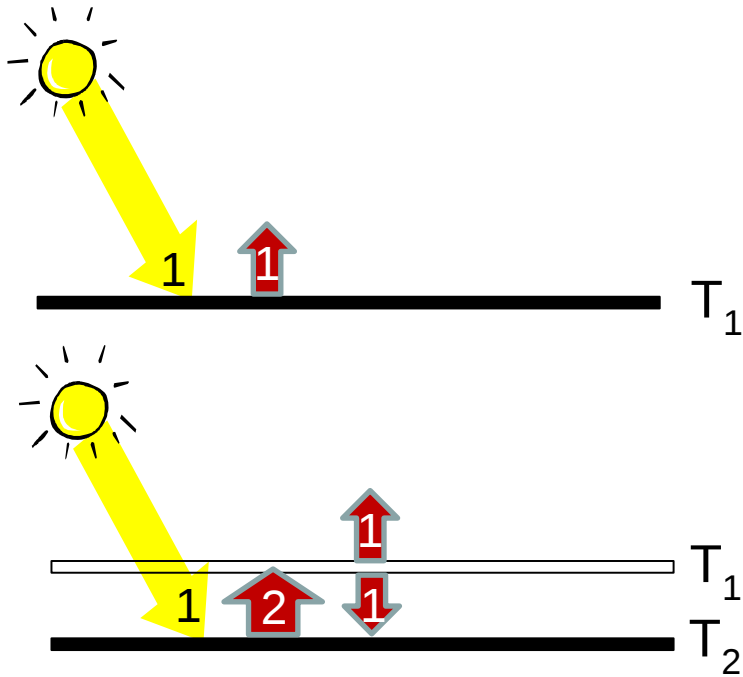
# Accroissement de CO<sub>2</sub> et température

Réchauffement global pour un doublement de CO<sub>2</sub> en 70 ans

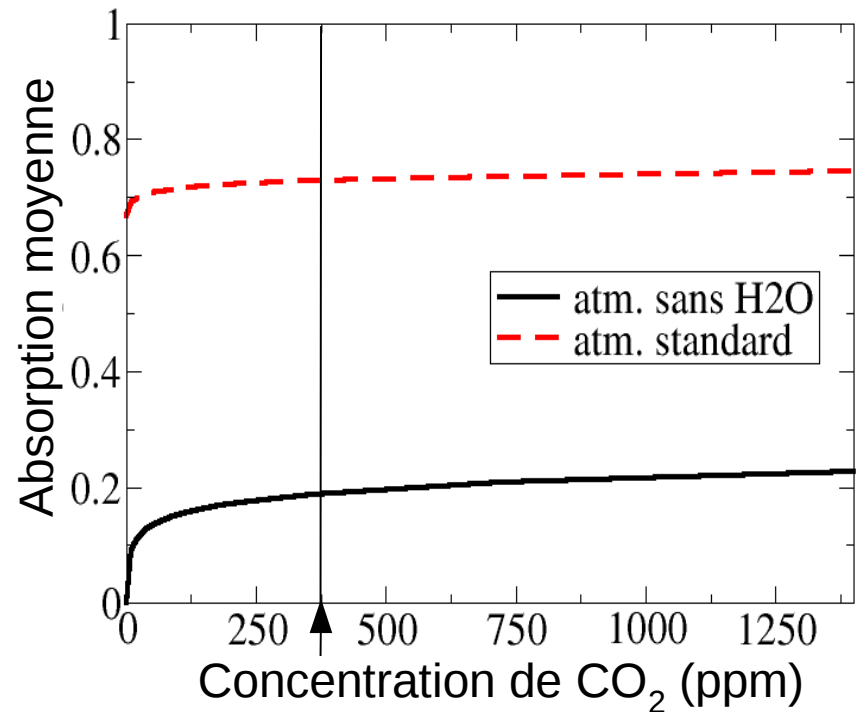


# Accroissement de CO<sub>2</sub> et effet de serre

## L'analogie de l'effet de serre



Absorption de l'atmosphère en fonction du CO<sub>2</sub>, pour différentes valeurs de H<sub>2</sub>O

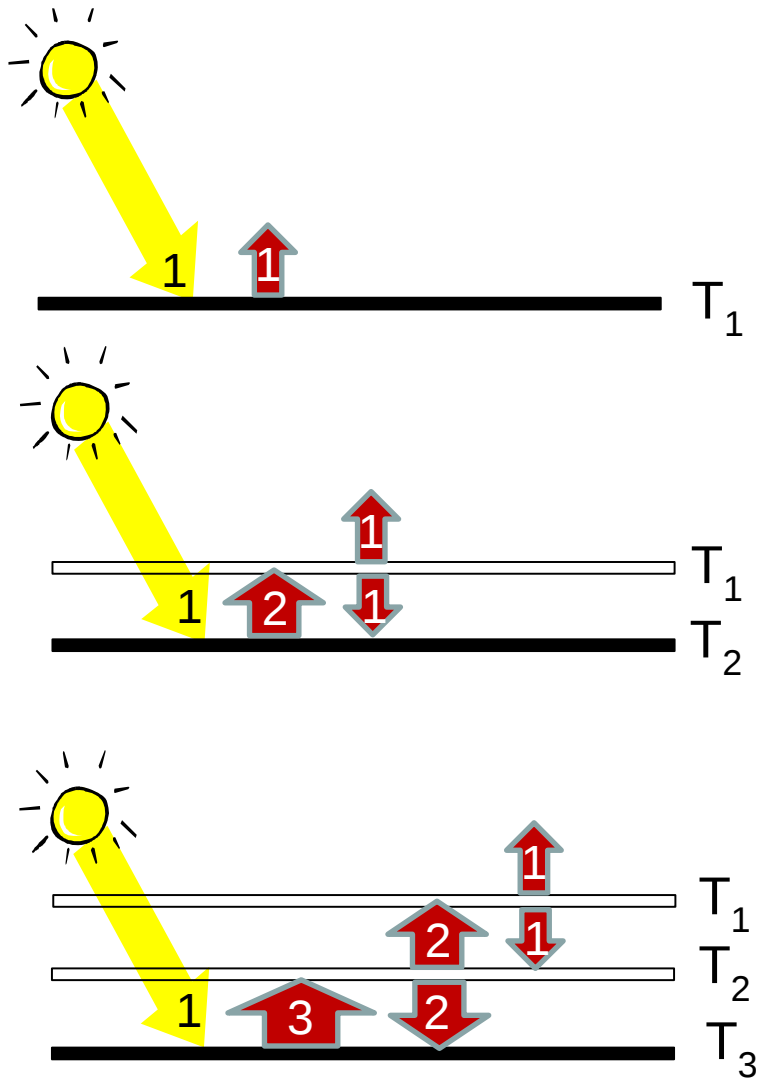


*A-t-on atteint l'effet de serre maximum pour le CO<sub>2</sub>?*

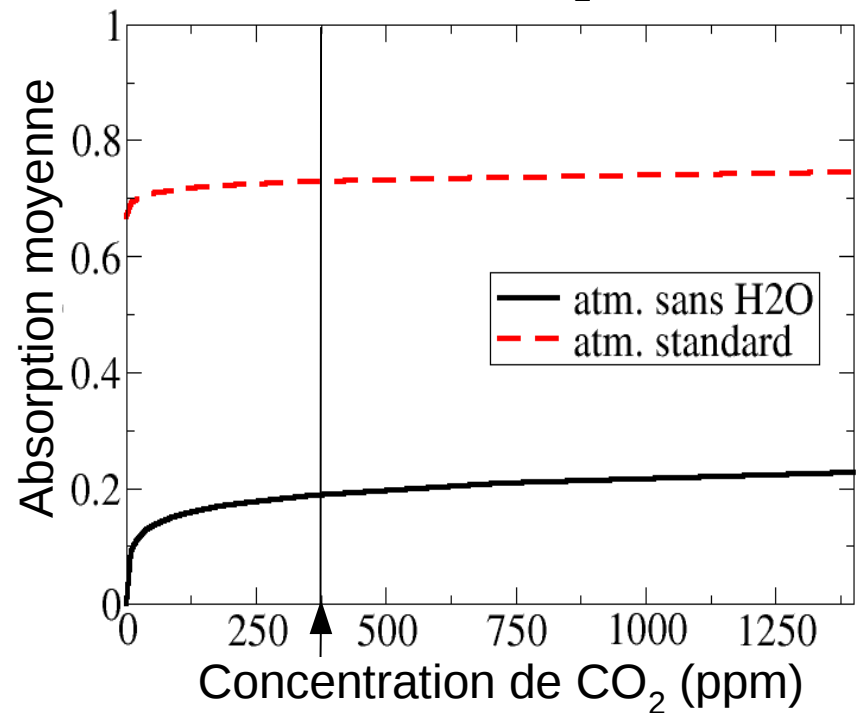


# Accroissement de CO<sub>2</sub> et effet de serre

## L'analogie de l'effet de serre



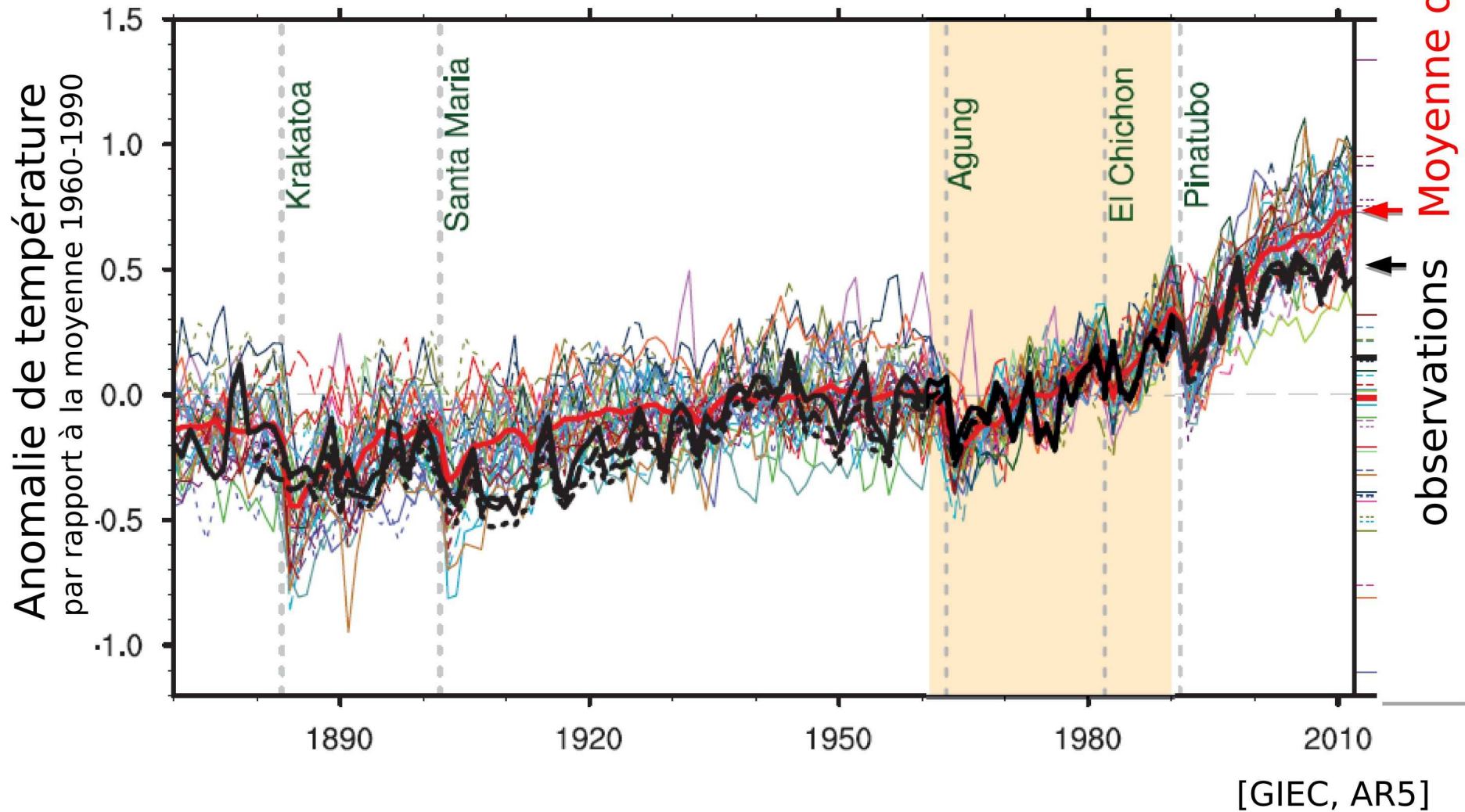
Absorption de l'atmosphère en fonction du CO<sub>2</sub>, pour différentes valeurs de H<sub>2</sub>O



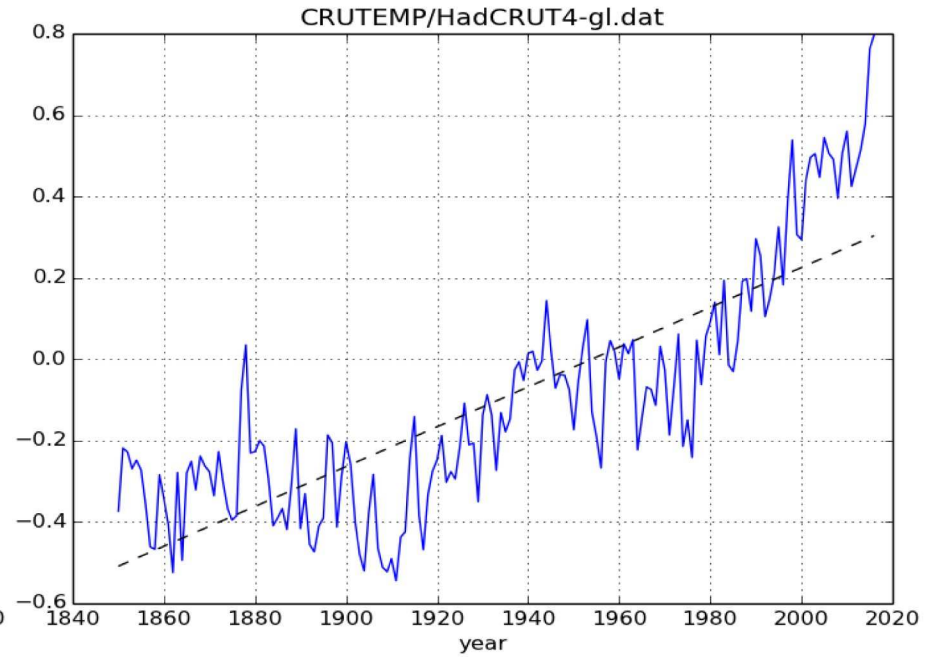
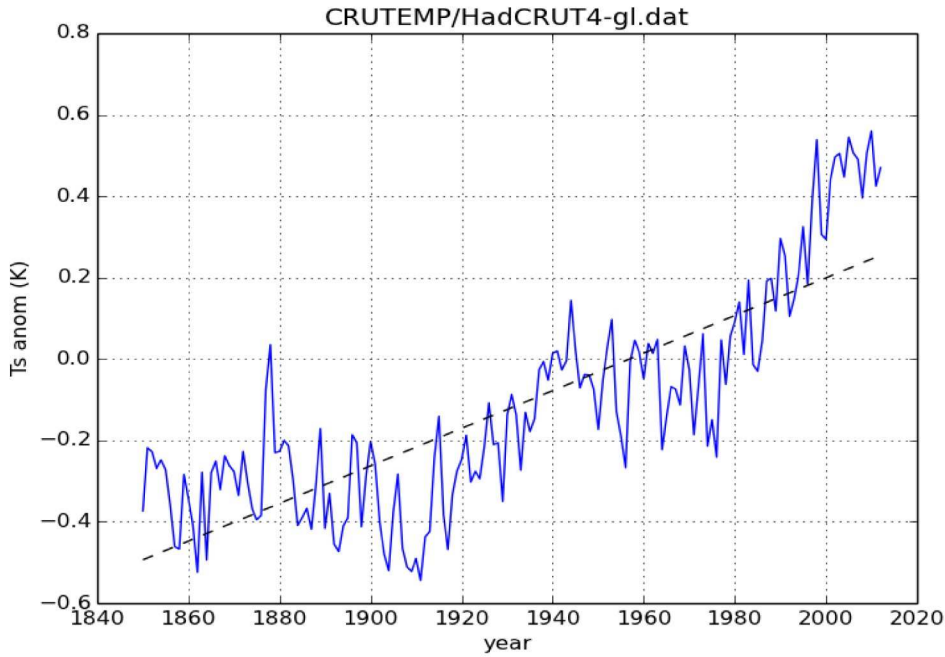
*A-t-on atteint l'effet de serre maximum pour le CO<sub>2</sub>?*

**NON!** (Dufresne Treiner 2012)

# Simulation de l'évolution récente du climat

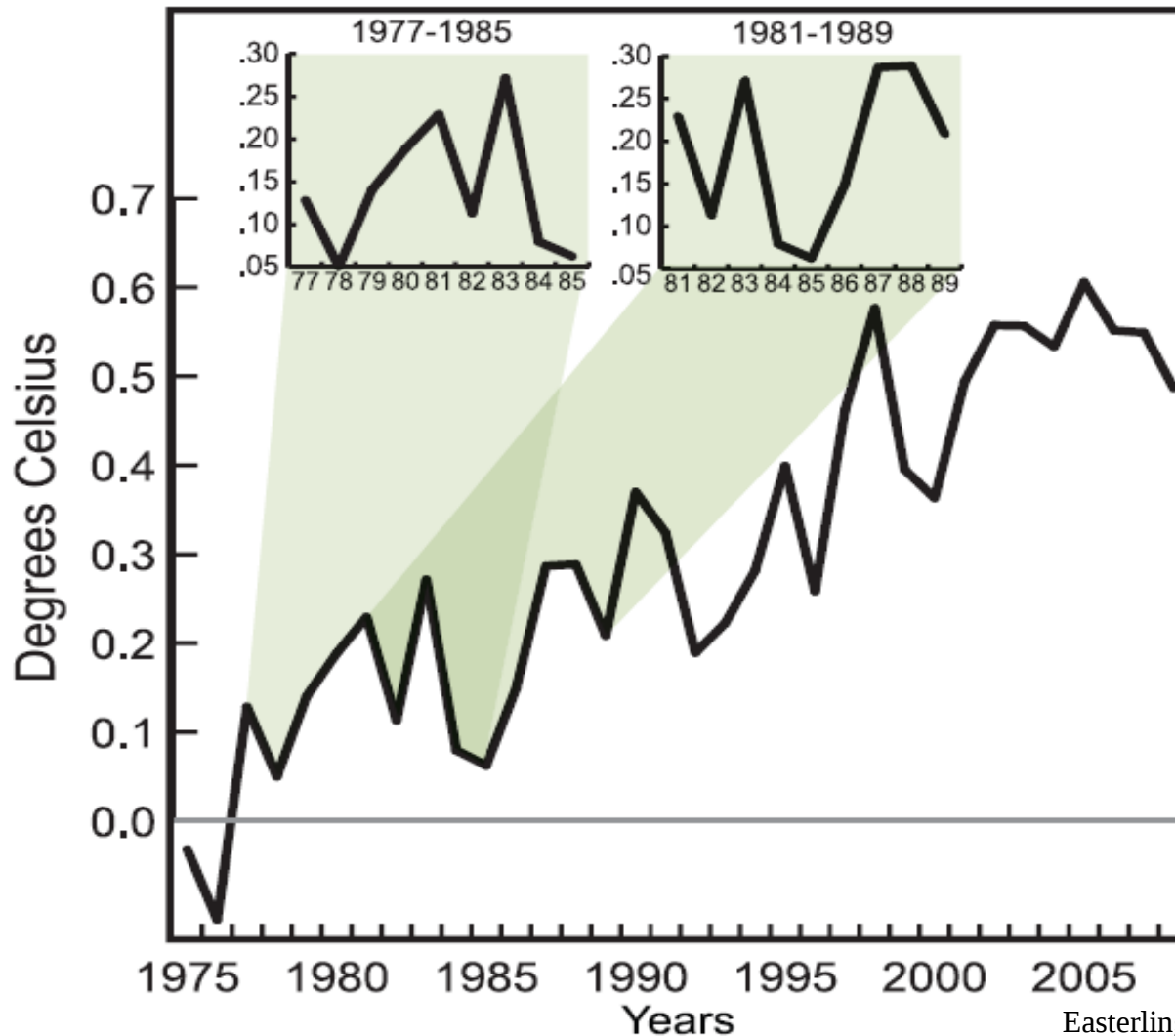


# Évolution récente de la température globale



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

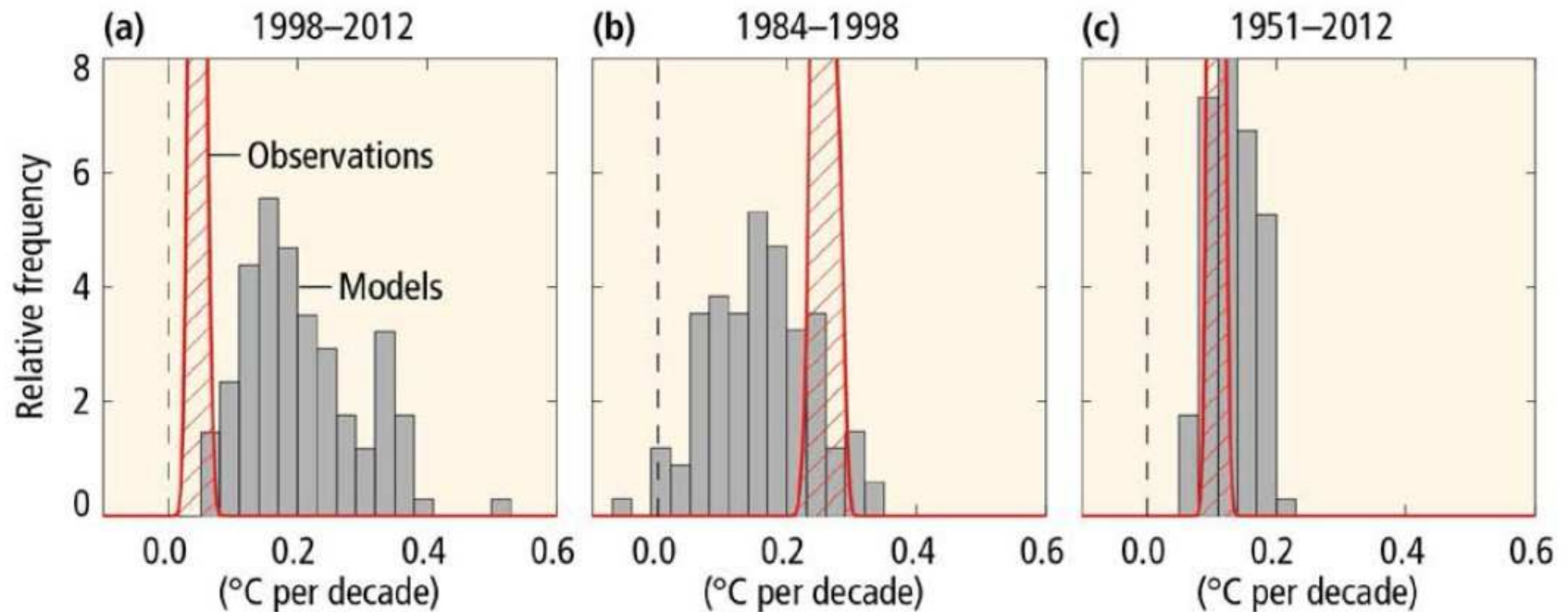
Observée



# Les variations du climat sont-elles régulières?

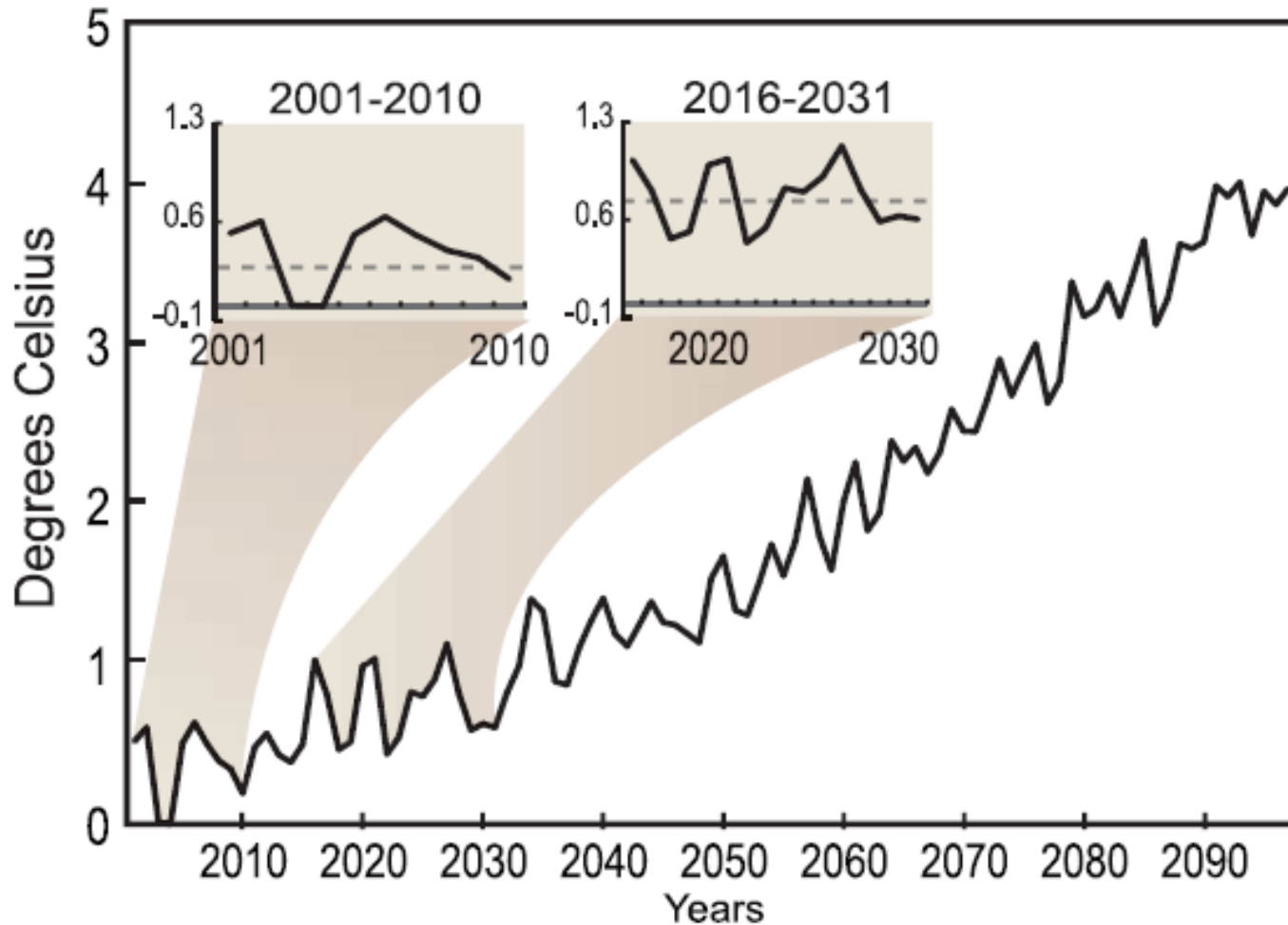
## Variations et variabilité du climat

### Tendances observées et simulées



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

## Simulations



# 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

# 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](http://www.ipsl.fr/content/download/1513/13922/file/livre_blanc_escrime.pdf)

## Web:

- GIEC: [www.ipcc.ch](http://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



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