



IPSL Climate Modelling Centre



Modélisation numérique du climat et étude des changements climatiques

Jean-Louis Dufresne

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

Institut Pierre Simon Laplace

Plan

- I. Contexte et historique
- II. Variations du climat et rôle des activités humaines
- III. Retour sur la modélisation

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)

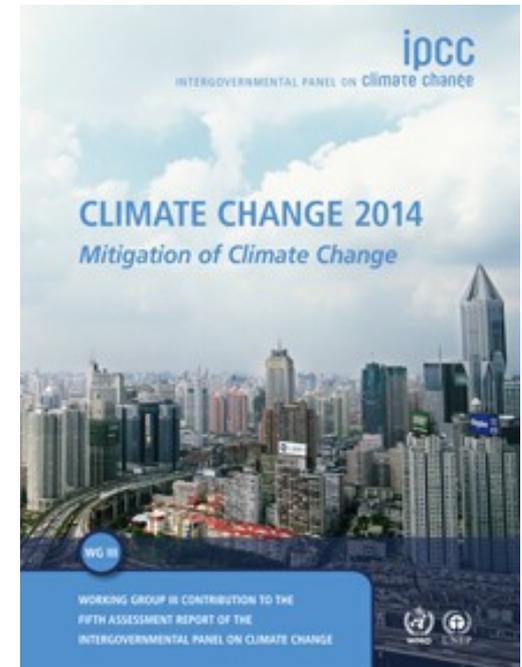
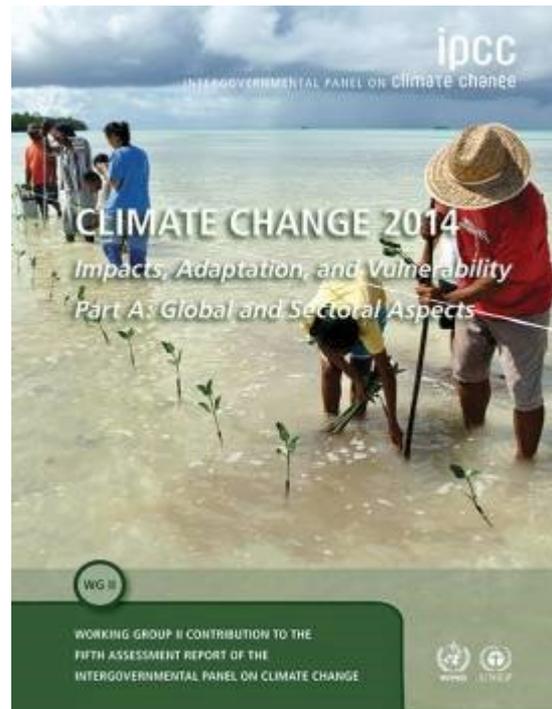
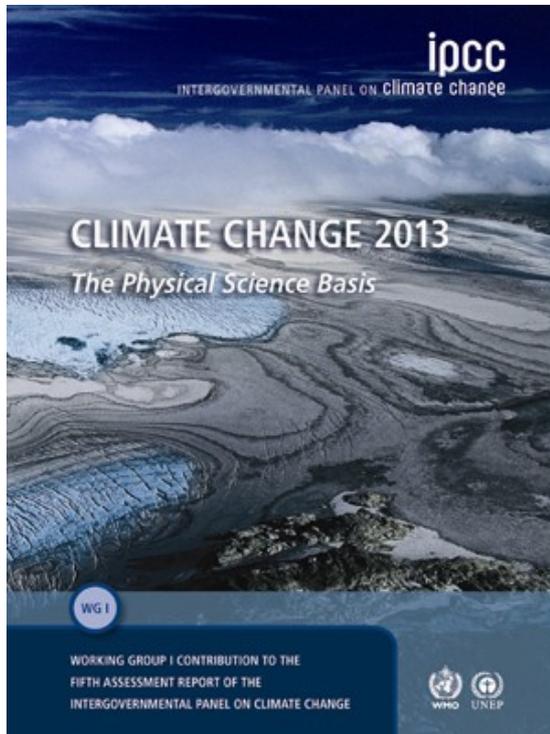
Trois groupes de travail:

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 question des températures terrestres, l'une des plus importantes et des plus difficiles de toute la Philosophie naturelle, se compose d'éléments assez divers qui doivent être considérés sous un point de vue général. [...] J'ai désiré surtout présenter aux physiciens, dans un tableau peu étendu, l'ensemble des phénomènes et les rapports mathématiques qu'ils ont entre eux. »



Joseph Fourier
(1768-1830)

- 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

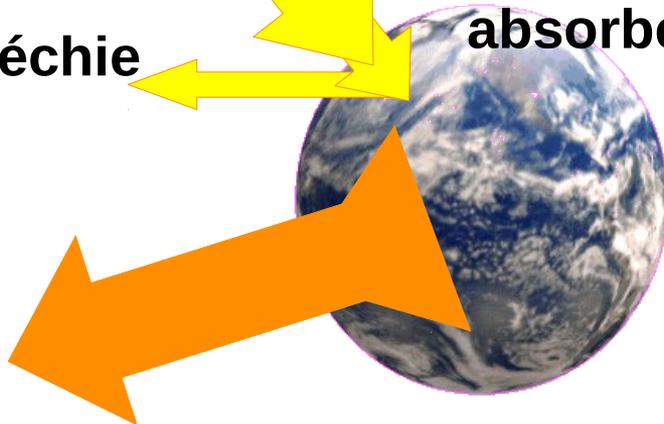
Température d'équilibre d'une planète



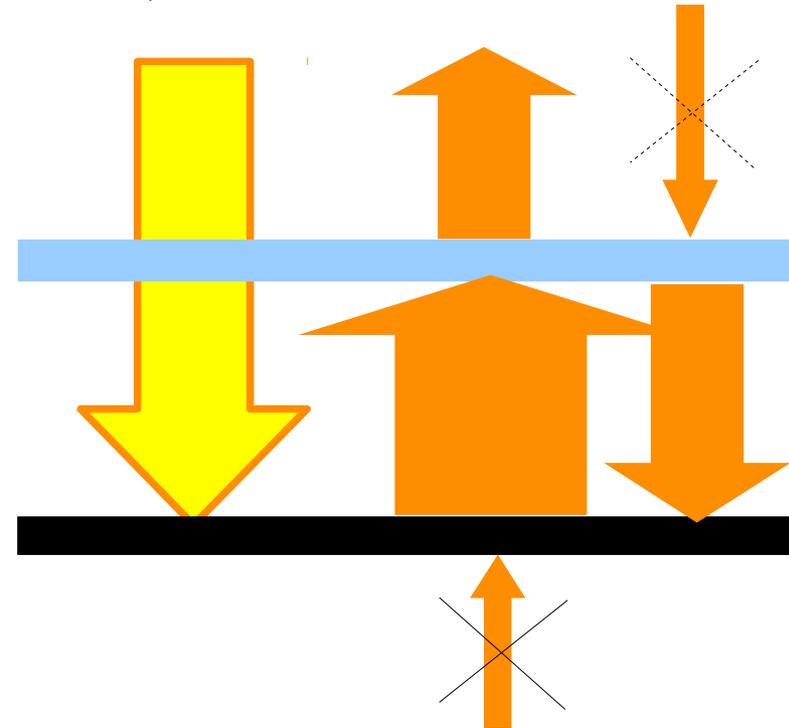
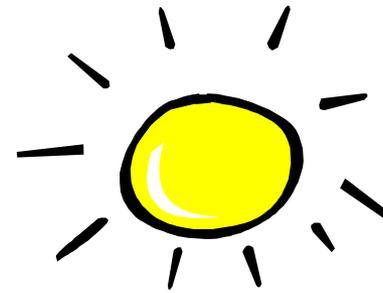
Rayonnement solaire

Partie réfléchie

Partie absorbée



La température de surface moyenne résulte du bilan d'énergie



Naissance de la physique du climat

Contribution de Joseph Fourier:

- Les échanges de chaleurs entre la surface et l'intérieur de la Terre sont négligeables en moyenne annuelle.
- Importance du rayonnement solaire et infra-rouge et analogie de la «boite chaude» (effet de serre)
- Il envisage l'importance des variations éventuelles du soleil:
« Les moindres variations de la distance de cet astre [soleil] à la Terre occasionneraient des changements très considérables dans les températures, l'excentricité de l'orbite terrestre donnerait naissance à diverses saisons. »
- Toutes variations de l'ensoleillement ou des propriétés de surface modifieront la température de surface
« 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 »

Plan

- I. Contexte et historique
- II. Variations du climat et rôle des activités humaines
- III. Retour sur la modélisation

Variations du climat et rôle des activités humaines

Début 19e siècle: J. Fourier

Début 20e siècle:

S. Arrhenius:

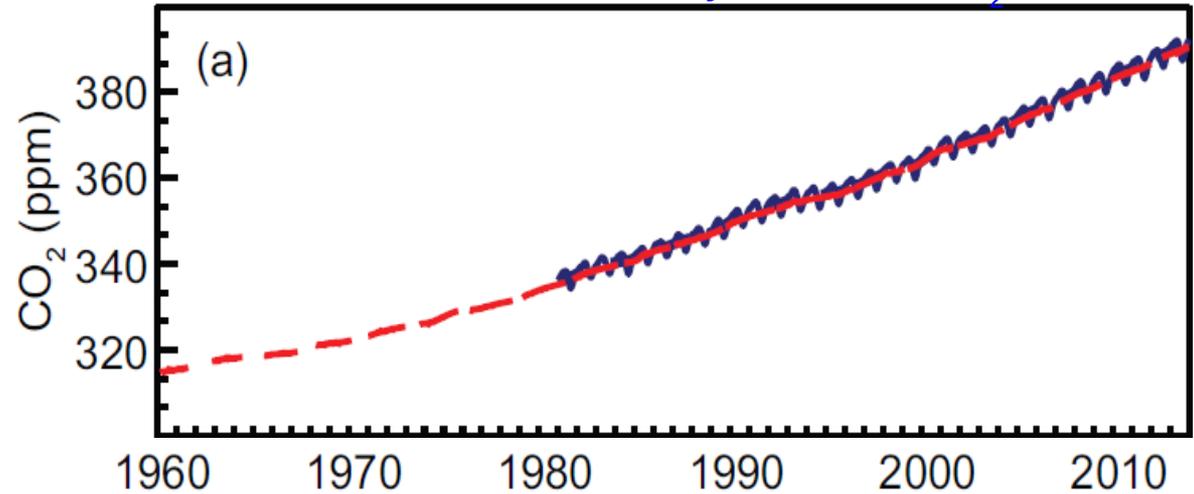
- Premier calcul de la température moyenne de la Terre
- Hypothèse de variations passées et éventuellement future de la concentration atmosphérique de CO₂
- **Critique:** la Terre « régule » la concentration de CO₂
- Calcul de la variation de température due à une variation de CO₂
- **Critique:** la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

A partir des années 1960:

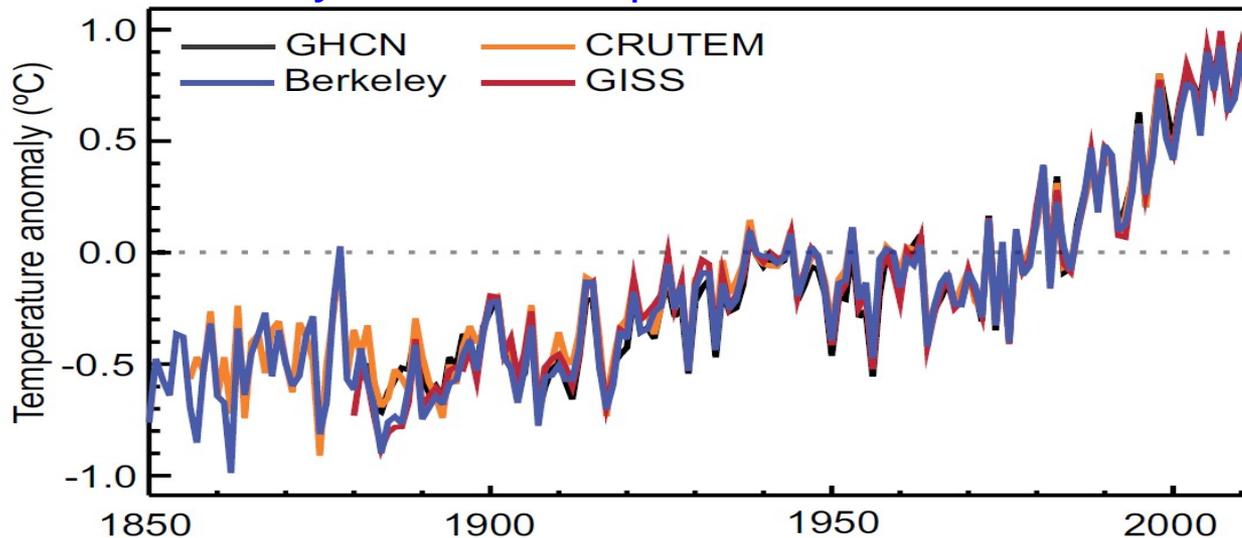
- Rayonnement infra-rouge mieux connu
- On observe un accroissement de la concentration de CO₂
- Premier calcul « moderne » de l'accroissement de température en réponse à un accroissement de CO₂
- Développement des modèles de climat
- Observations des variations des paléoclimats

Variations du climat et rôle des activités humaines

Concentration moyenne de CO₂

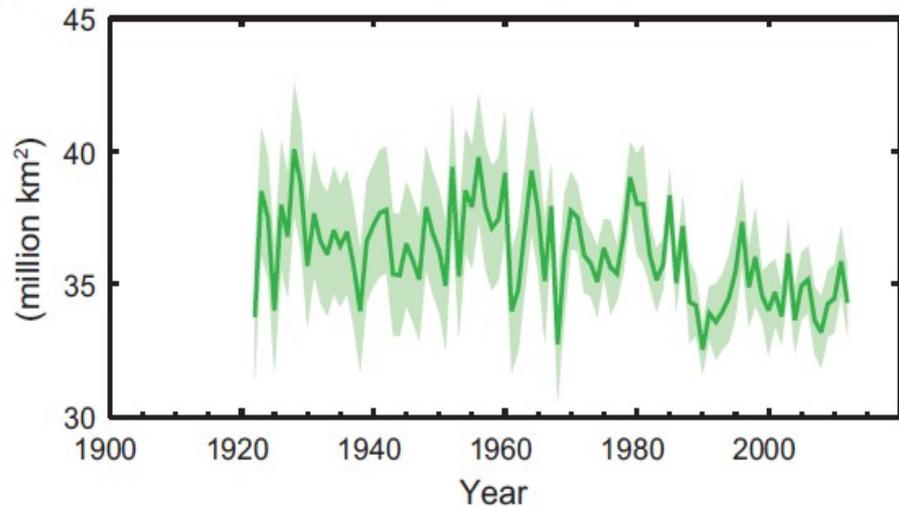


Moyenne des températures de surface

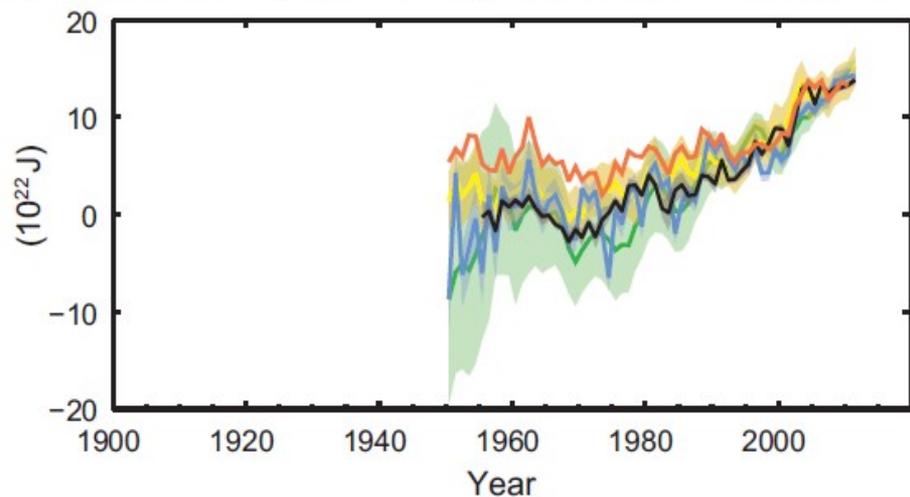


Variations du climat et rôle des activités humaines

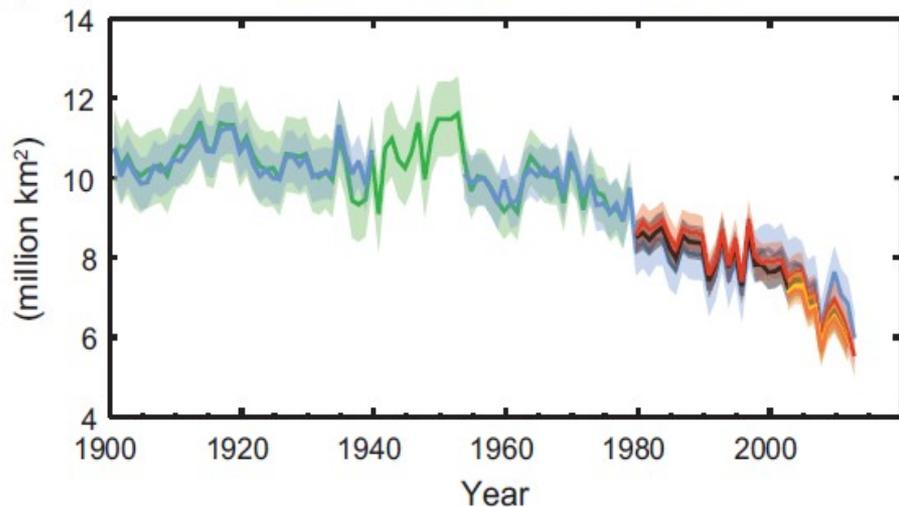
(a) Northern Hemisphere spring snow cover



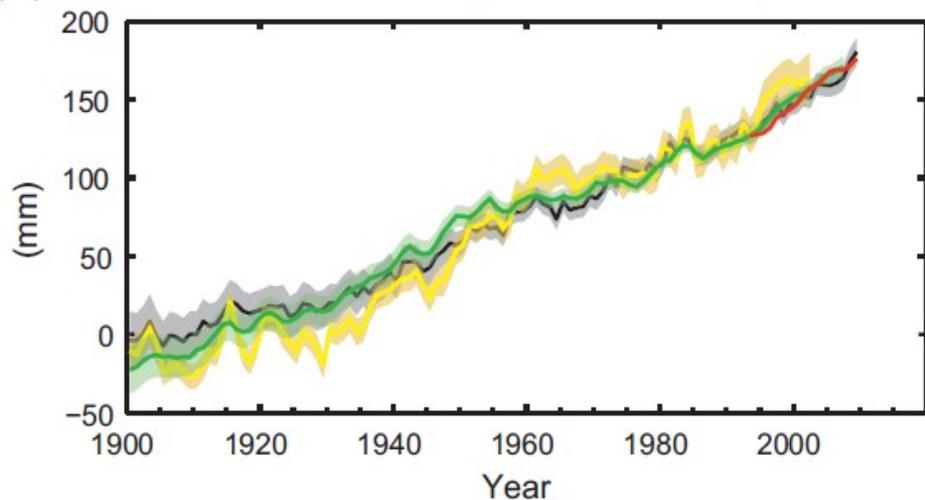
(c) Change in global average upper ocean heat content



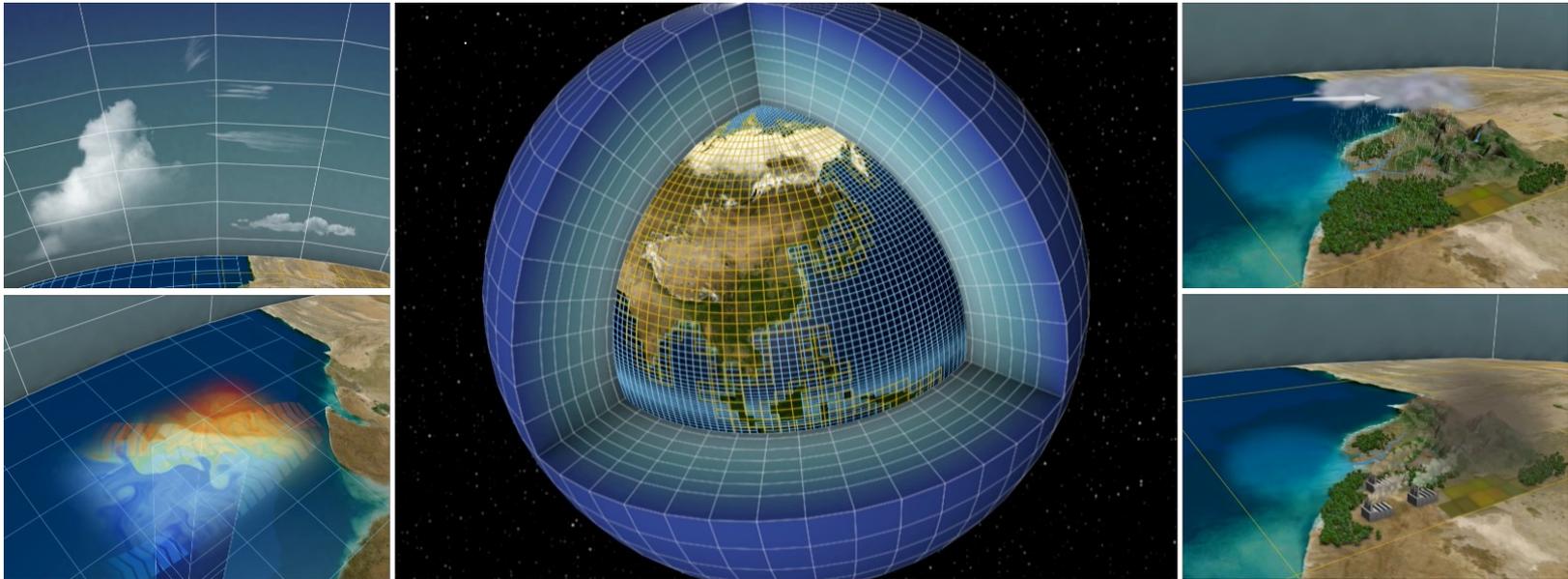
(b) Arctic summer sea ice extent



(d) Global average sea level change



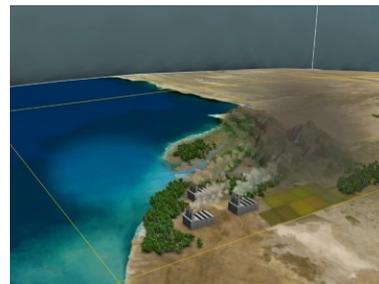
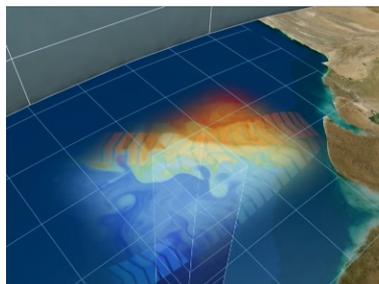
Modèle de climat (Modèle de circulation générale)



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



INCA / REPROBUS
(chimie atmosphérique)
(aérosol)

ORCHIDEE
(surfaces continentales)
(végétation)

LMDZ
(atmosphère)

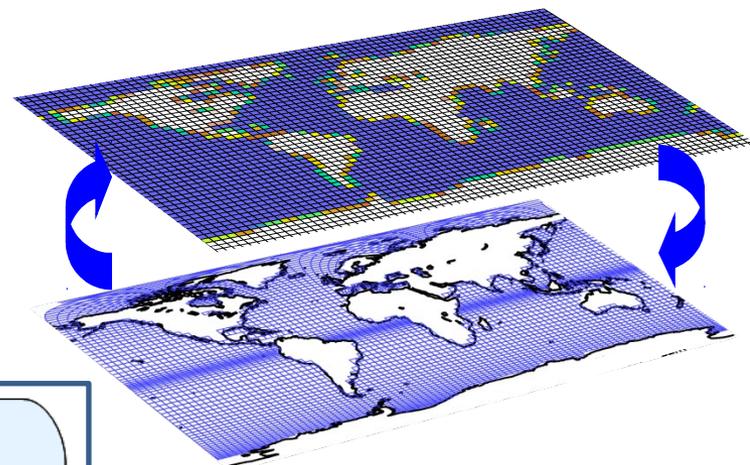
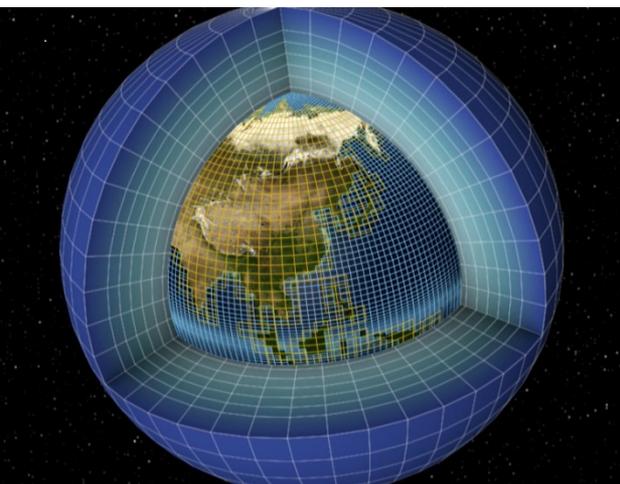
OASIS
(coupleur)

OPA
(océan)

LIM
(glace de mer)

PISCES
(biogéochimie marine)

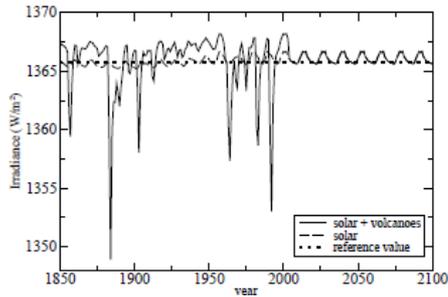
NEMO



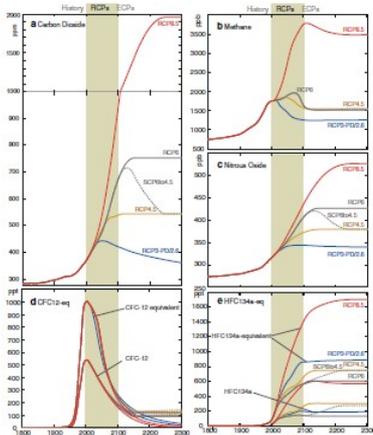
Le modèle couplé "Système Terre" de l'IPSL

Forçages naturels et anthropiques

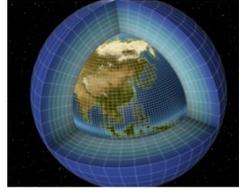
Soleil et volcans



Gaz à effet de serre ou chimiquement actifs



Concentration de CO₂



IPSL-CM5

- Atmosphere (*LMDZ*)
- Land surf. (*Orchidée*)

- Coupler (*OASIS*)

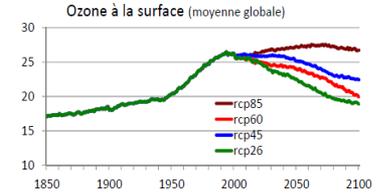
- Ocean (*Nemo*)
- Sea-ice (*LIM*)

Tropo chemistry & aerosols (*INCA*)

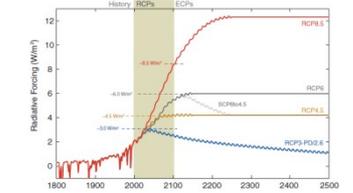
Strato. chemistry (*Reprobus*)

Carbon & CO₂ (*Orchidée, Pisces*)

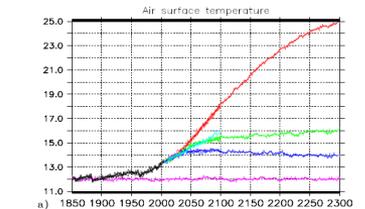
Composition de l'atmosphère



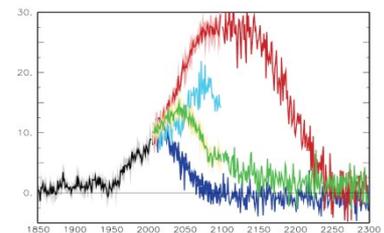
Forçage radiatif



Changement climatique

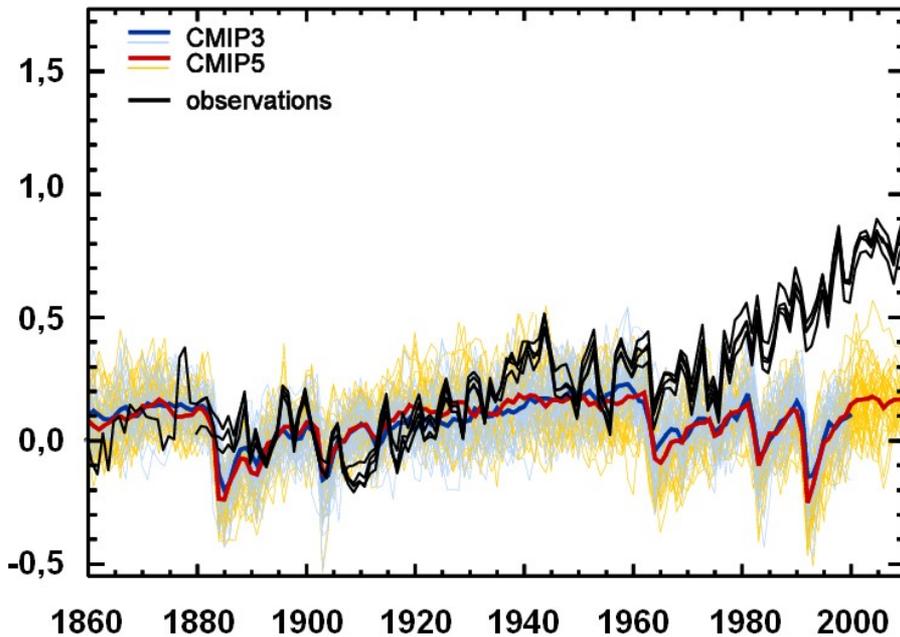


Émission autorisée de CO₂

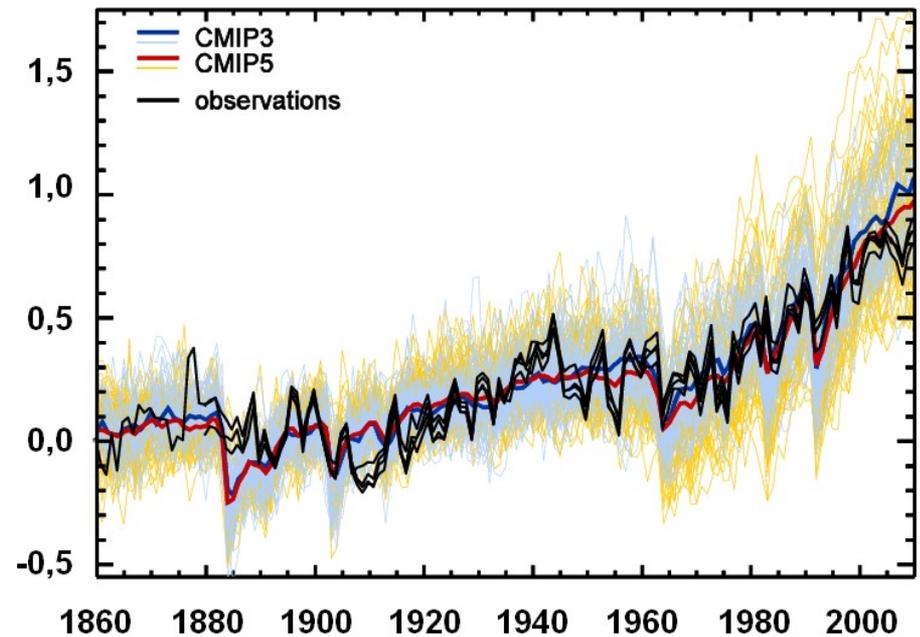


Évolution récente de la température de surface de la Terre

Simulations avec forçages naturels seulement

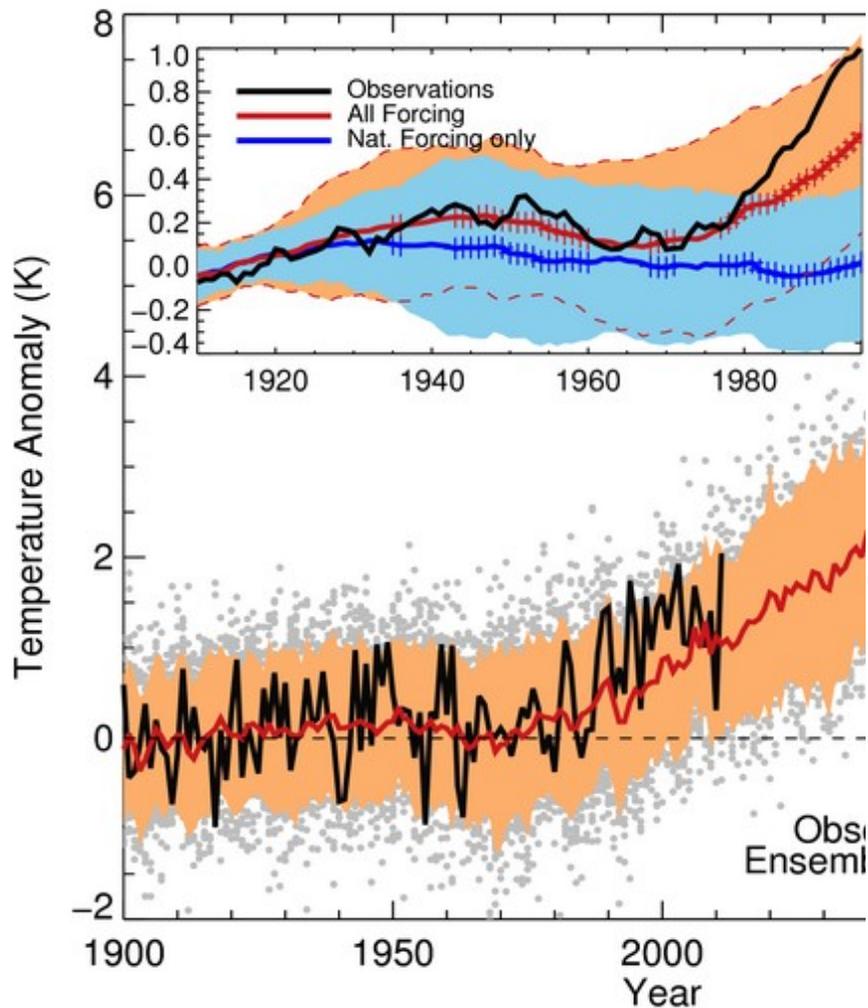


Simulations avec forçages naturels et anthropiques

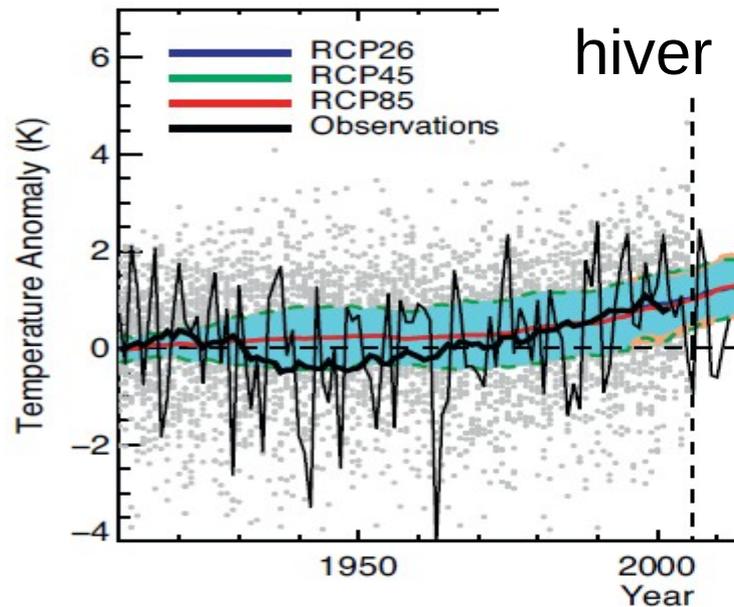


Evolution de la température en France

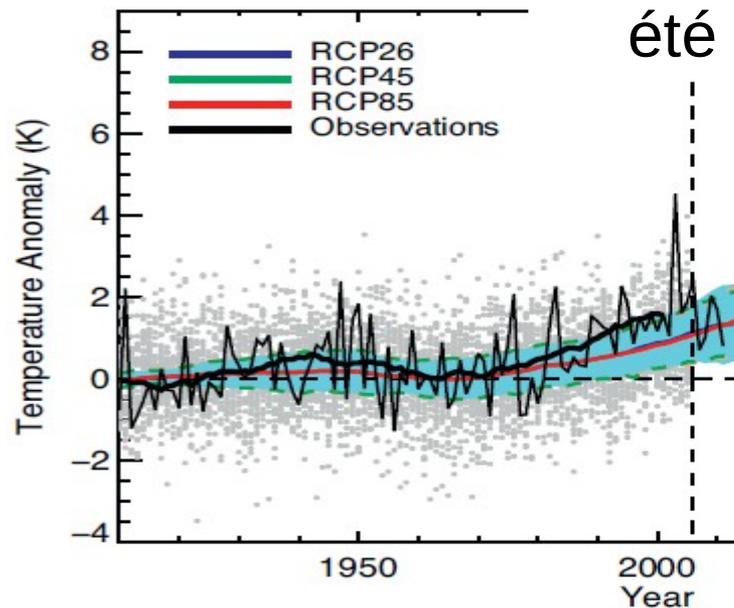
annuelle



hiver



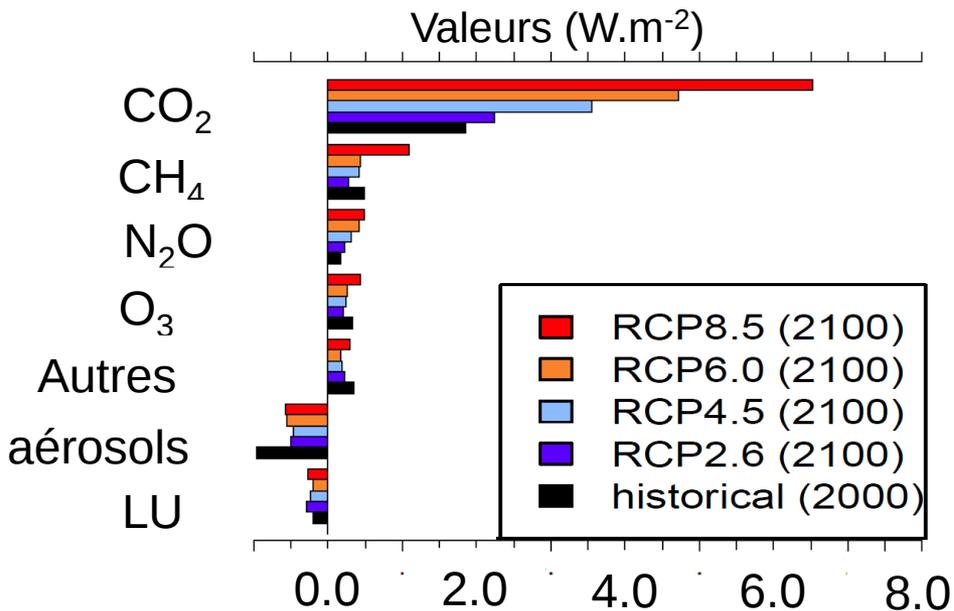
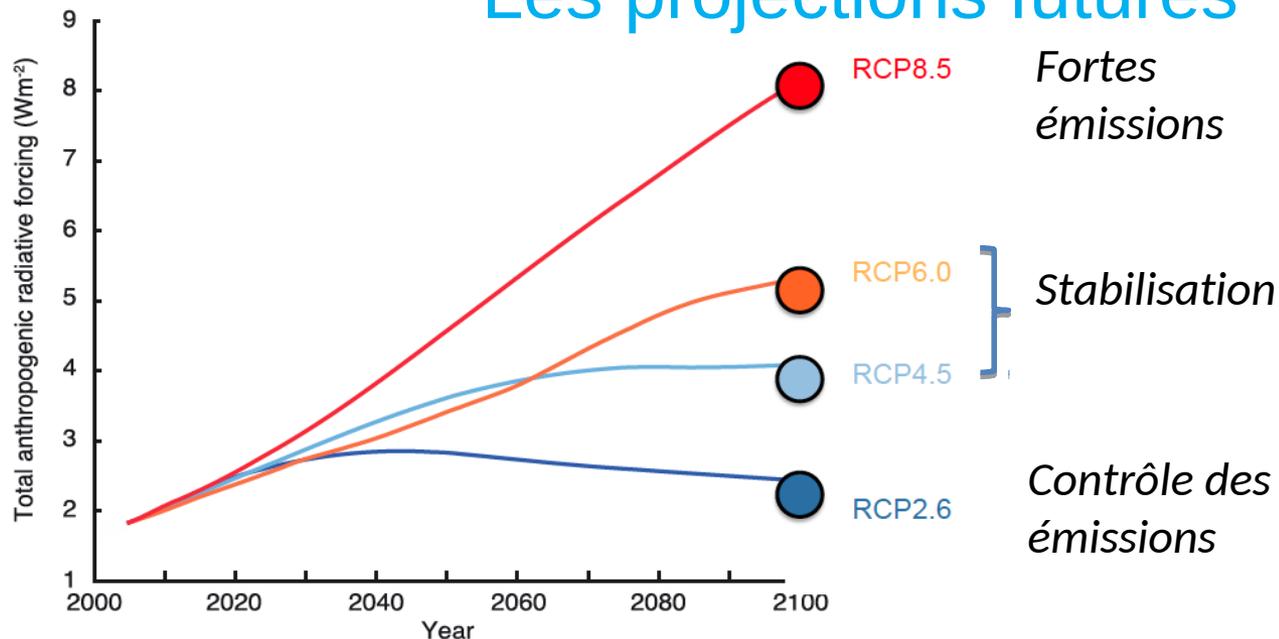
été



[Terry et Boé, 2013]

Les projections futures

Les projections futures



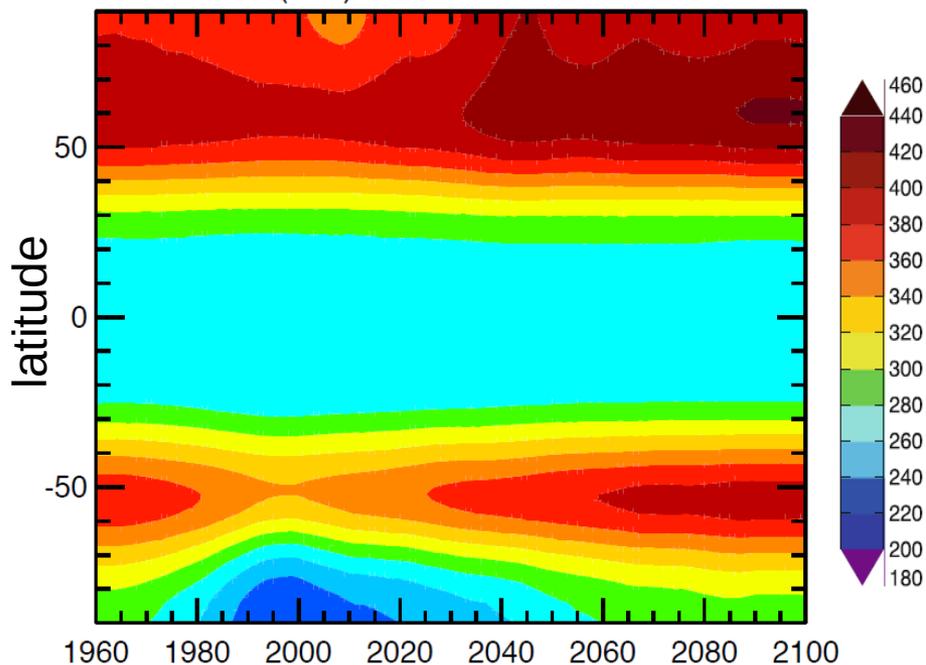
Contribution des forçages individuels au forçage total (référence 1850)

Calcul des champs d'ozone et d'aérosols

- Calcul des concentrations en fonction des émissions des composés réactifs et des changements climatiques

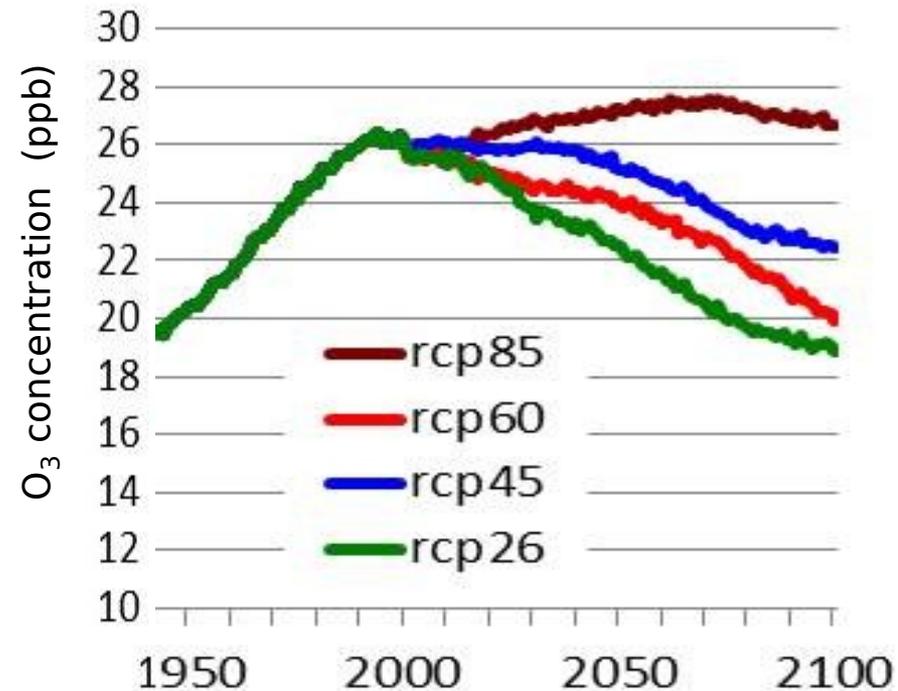
Moyenne zonale de l'ozone

Ozone total (DU) from CMIP5 for run RCP6.0



[Bekki et al. 2013, Dufresne et al. 2013]

Ozone moyen en surface



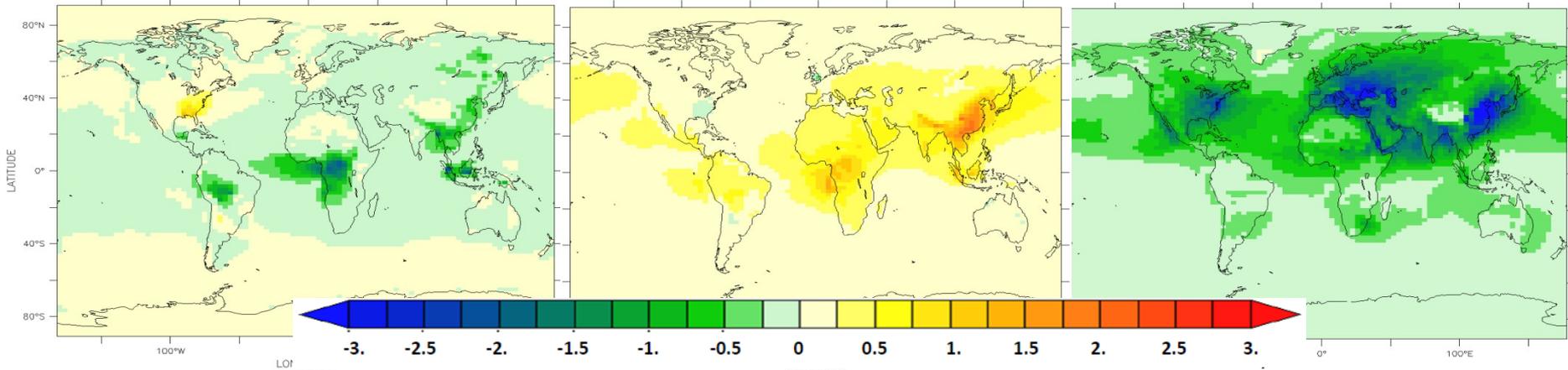
[Szopa et al., 2013]

Aérosols en 2100 Forçage Radiatif ($W.m^{-2}$)

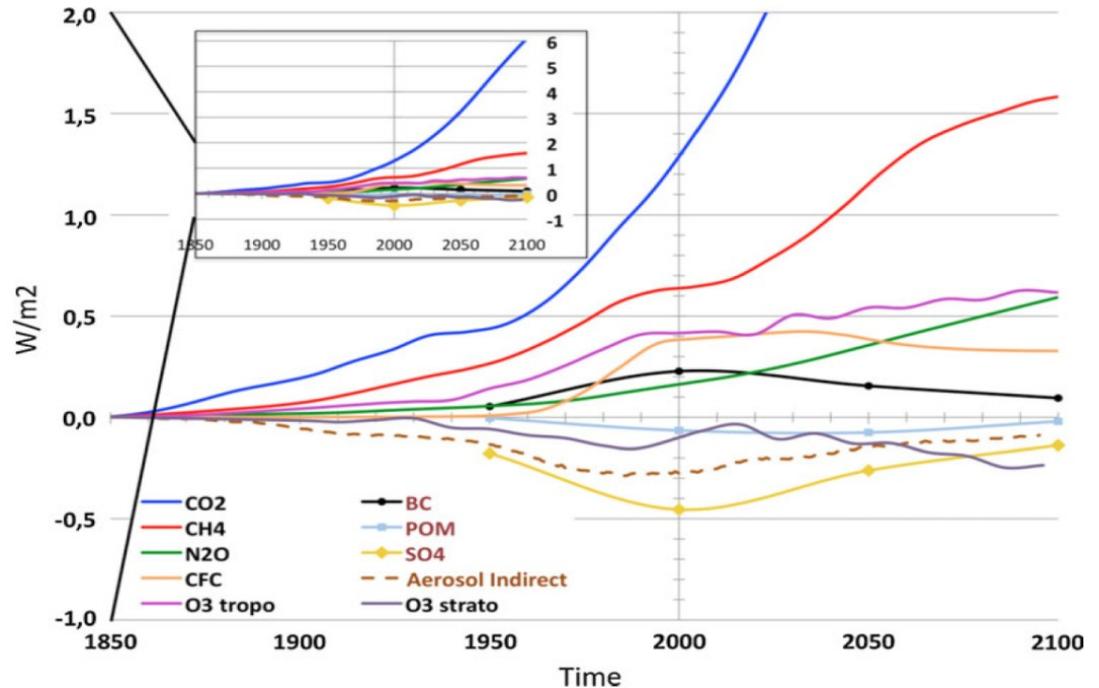
Matière organique

Carbone suie

Sulfates



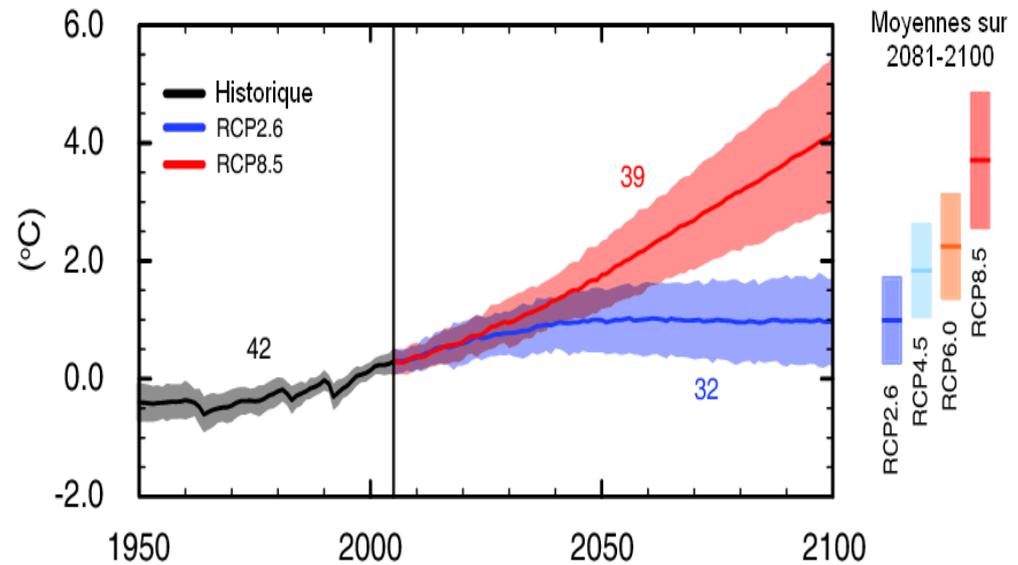
Forçages radiatifs sur la période 1850-2100
(scénario RCP8.5, modèle IPSL-CM5A-LR)



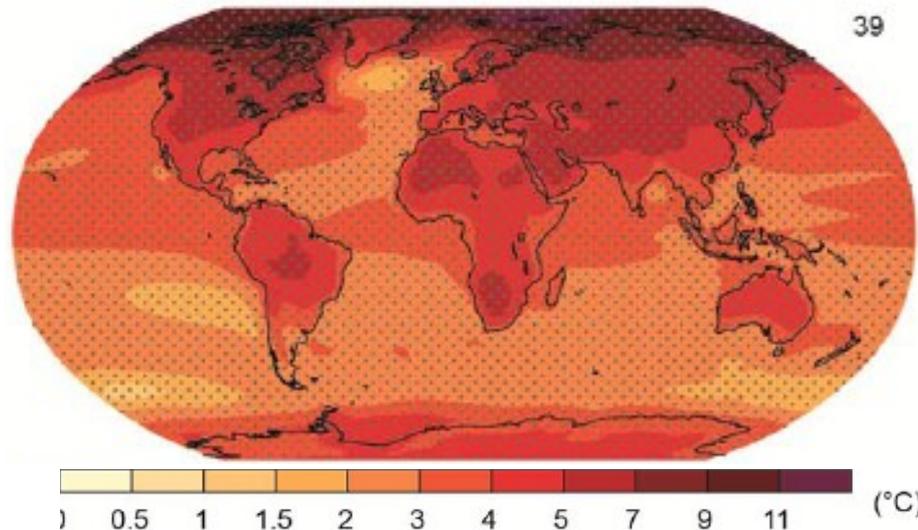
[Szopa et al., 2011]

température de surface

Moyenne globale
1950 à 2100
40 modèles CMIP5



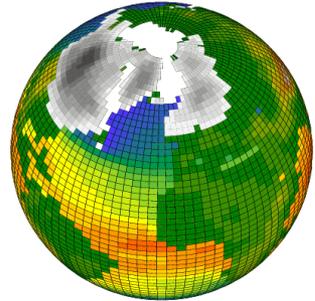
En 2100
39 modèles CMIP5



GIEC, 2013]

Land-sea contrasts and polar amplification in past and future climates

Last Glacial Maximum main forcings



Ice-sheets



Greenhouse gases

CO₂: 185 ppm,
CH₄: 350 ppb ...



LGM climate reconstructions

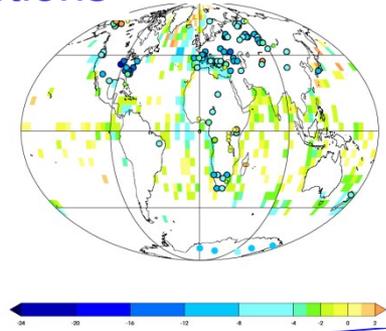
Land data

(pollen and plant macrofossils):
Bartlein et al, Clim Dynam 2011

Ocean data (multi proxy):
MARGO, NGS 2009

Ice-core data:

Masson-Delmotte et al pers. comm

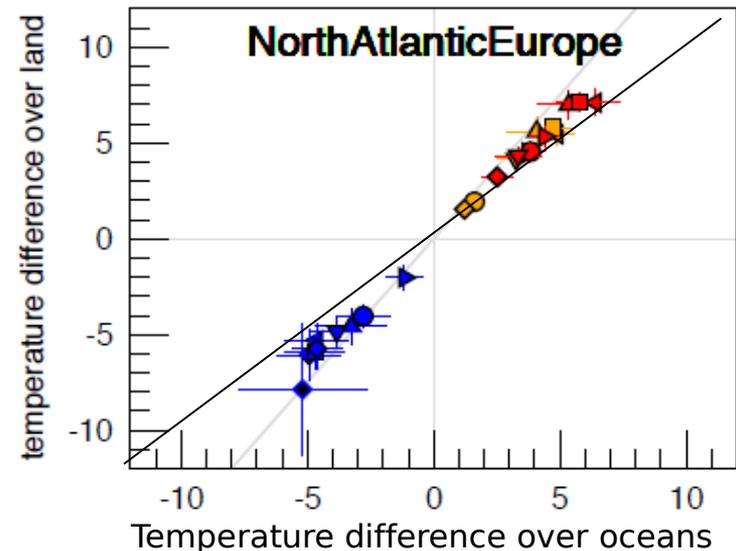
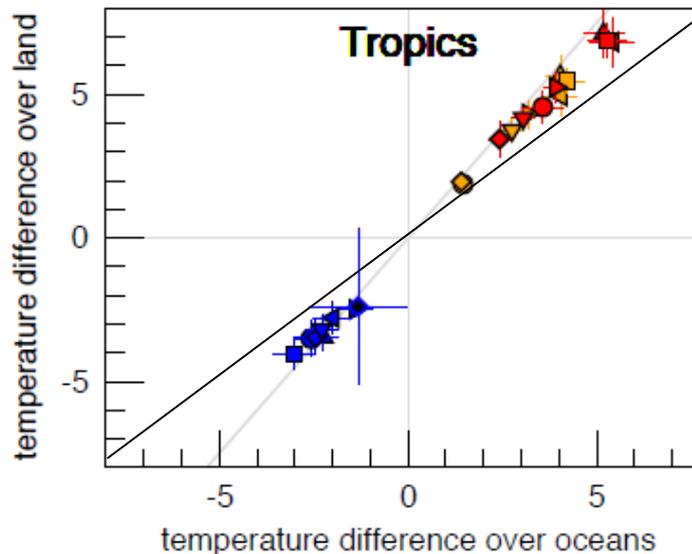


Relationships between LGM vs higher CO₂ climates?

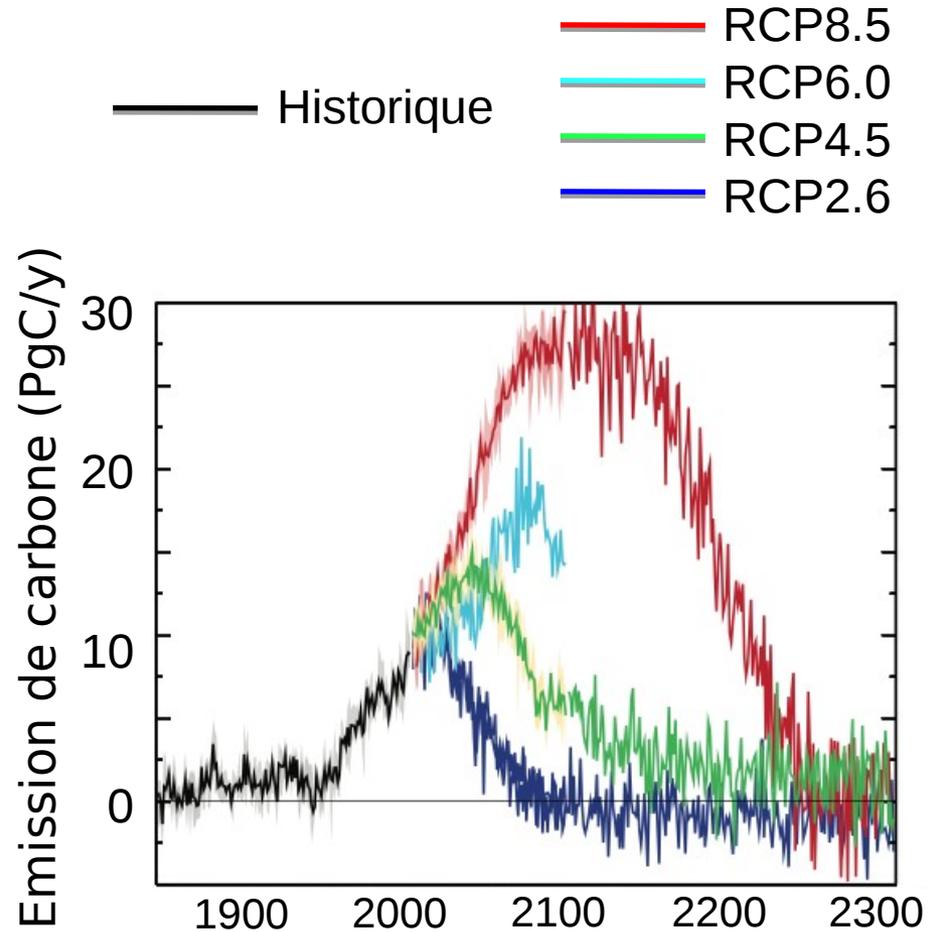
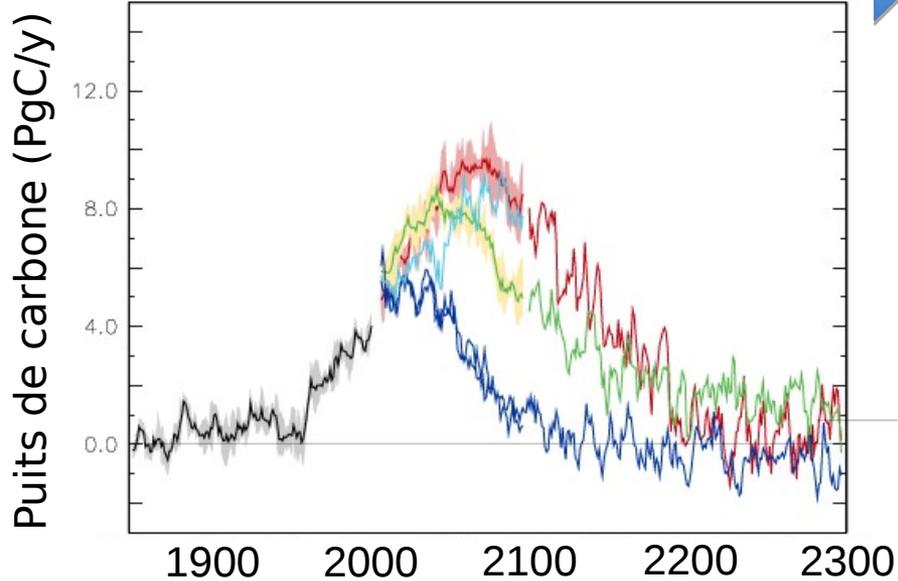
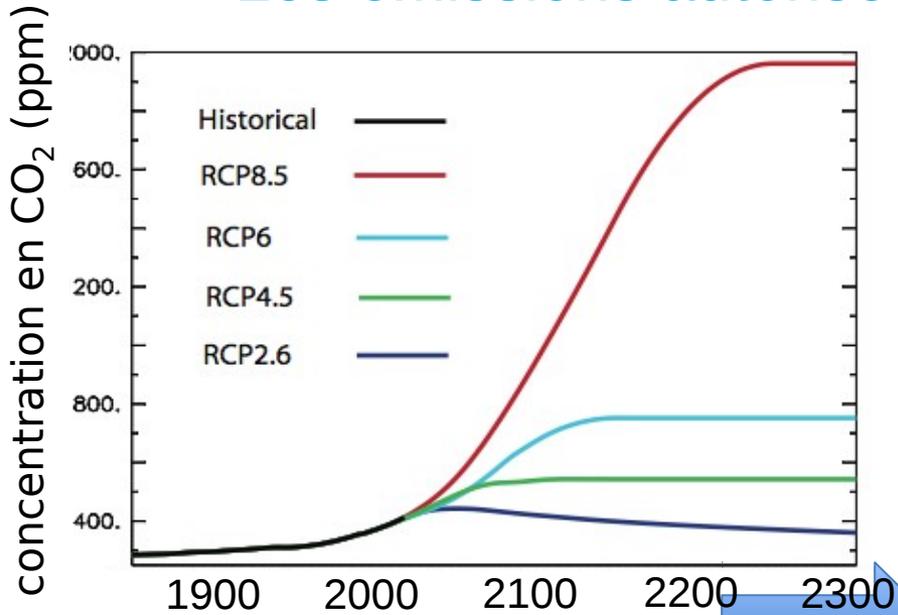
Are the large scale relationships stable? Can we evaluate them from paleodata ?

Example: Land sea contrasts

Note: all model averages calculated from grid points where LGM data is available

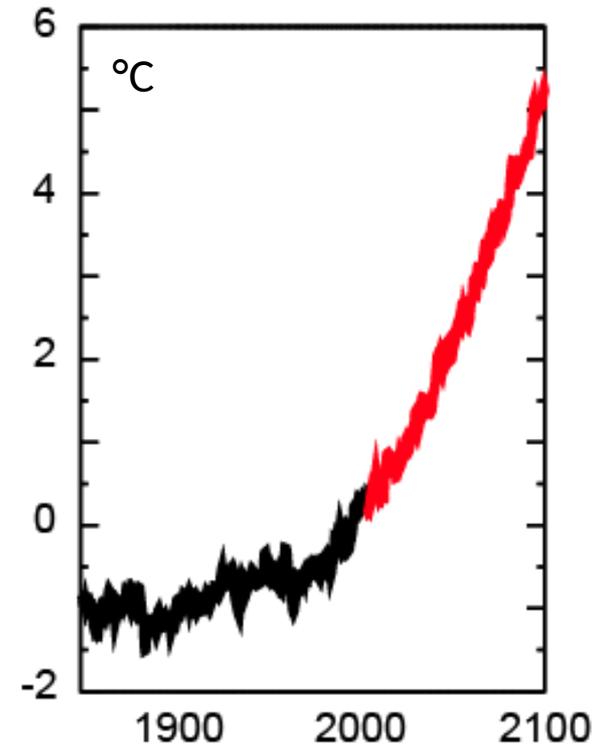
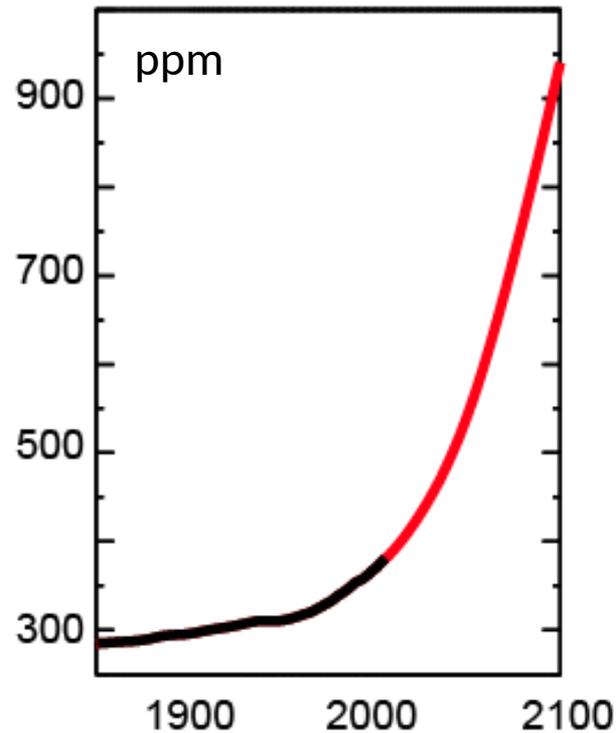
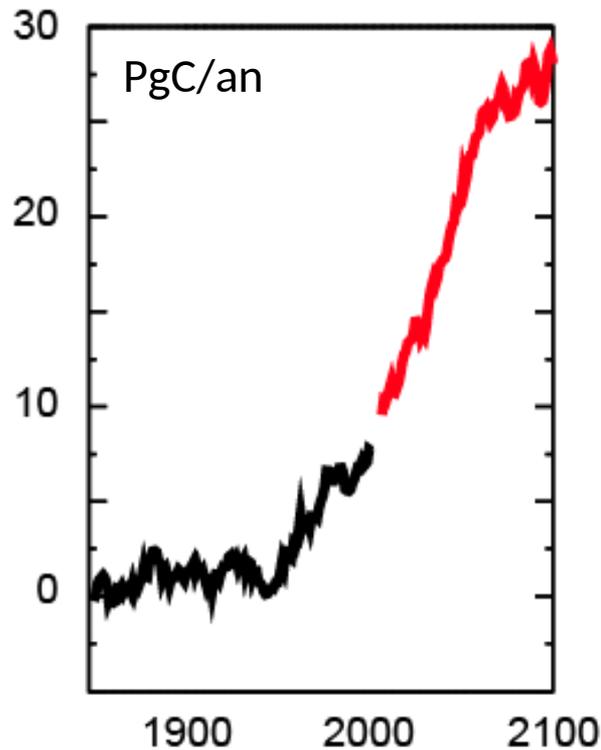


Les émissions autorisées de CO₂ avec IPSL-CM5



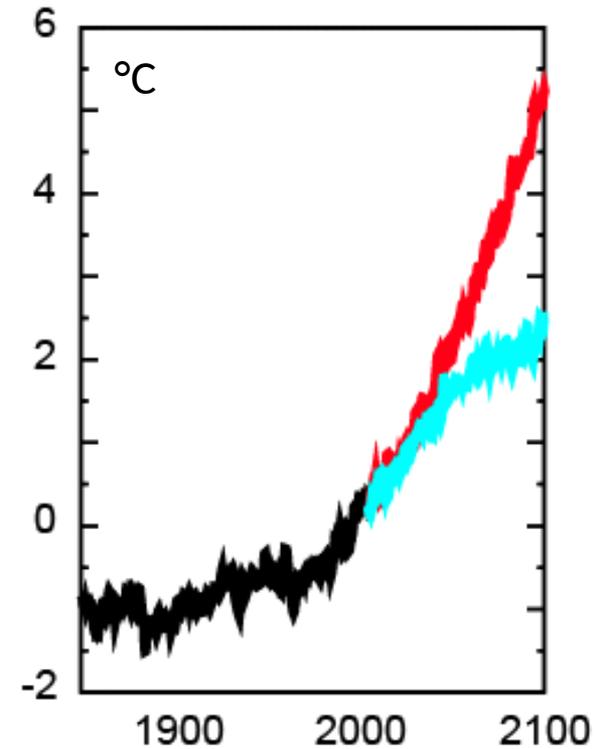
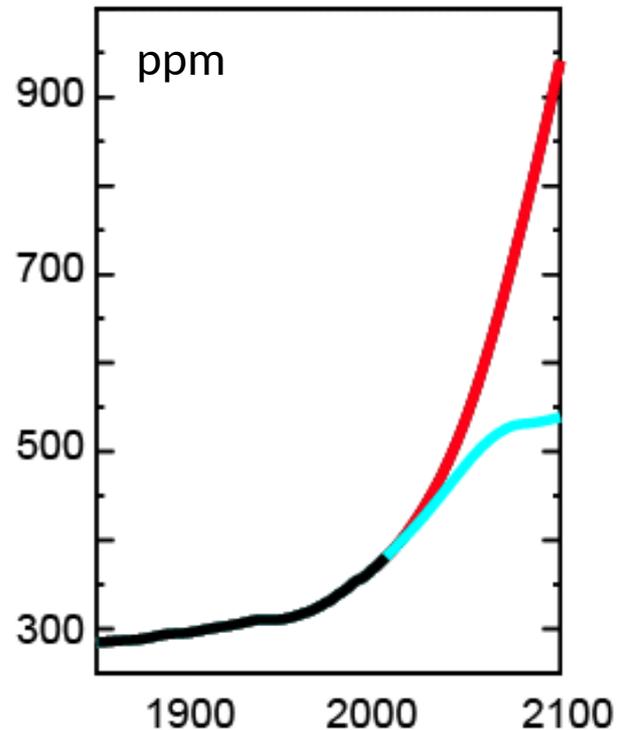
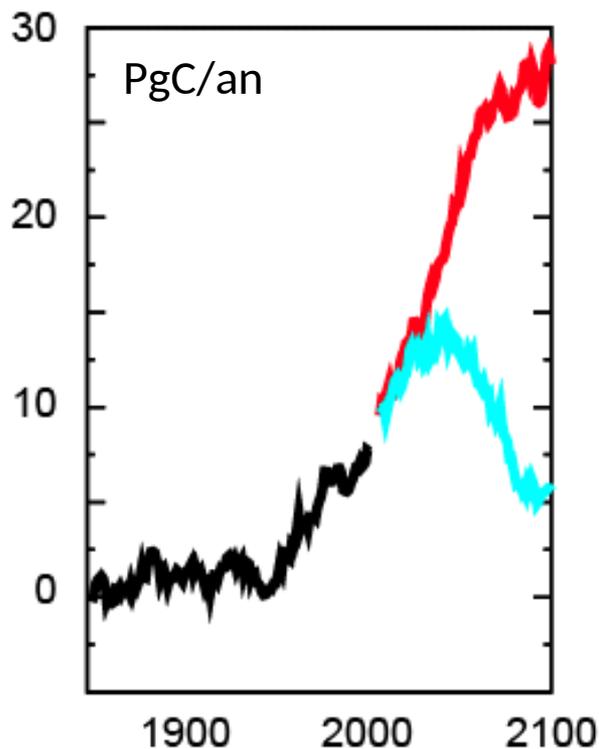
Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO₂, Température moyenne

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



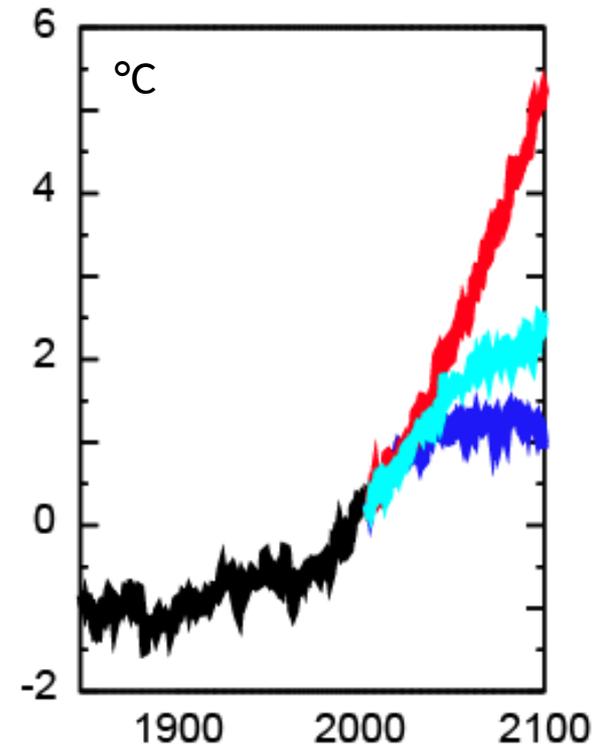
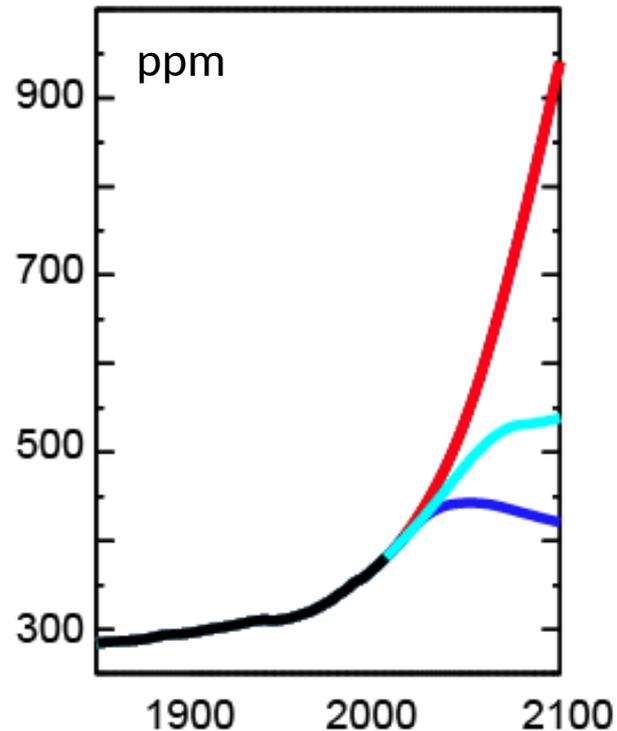
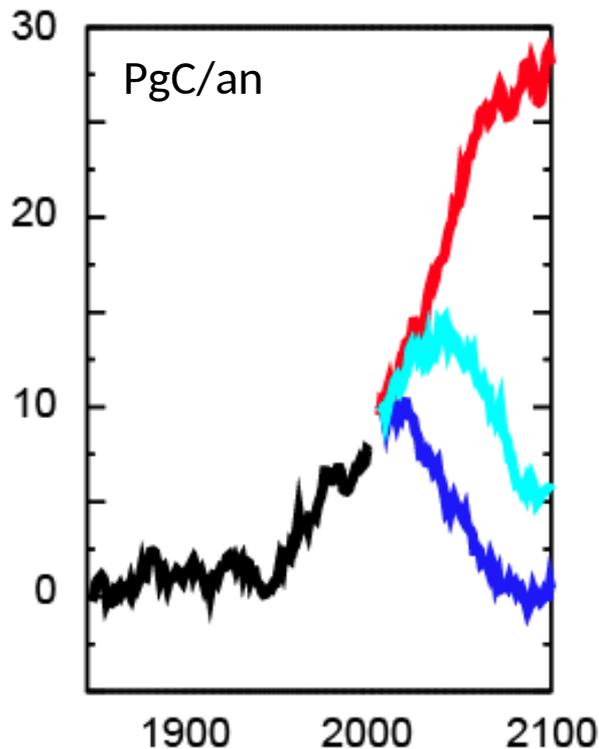
Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO₂, Température moyenne

- >> **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.



Plan

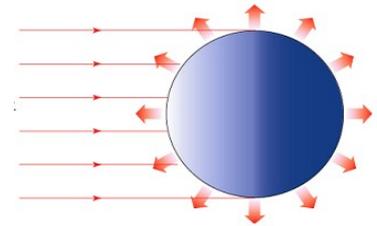
- I. Contexte et historique
- II. Variations du climat et rôle des activités humaines
- III. Retour sur la modélisation

Le système climatique

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

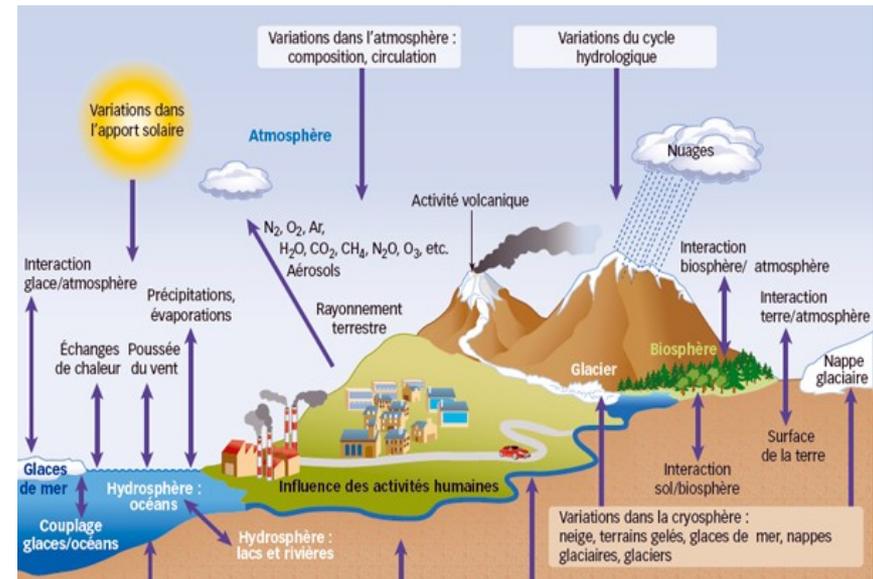
Système thermodynamique ouvert en pseudo équilibre, en général sans aucun rappel

=> conservation de l'énergie

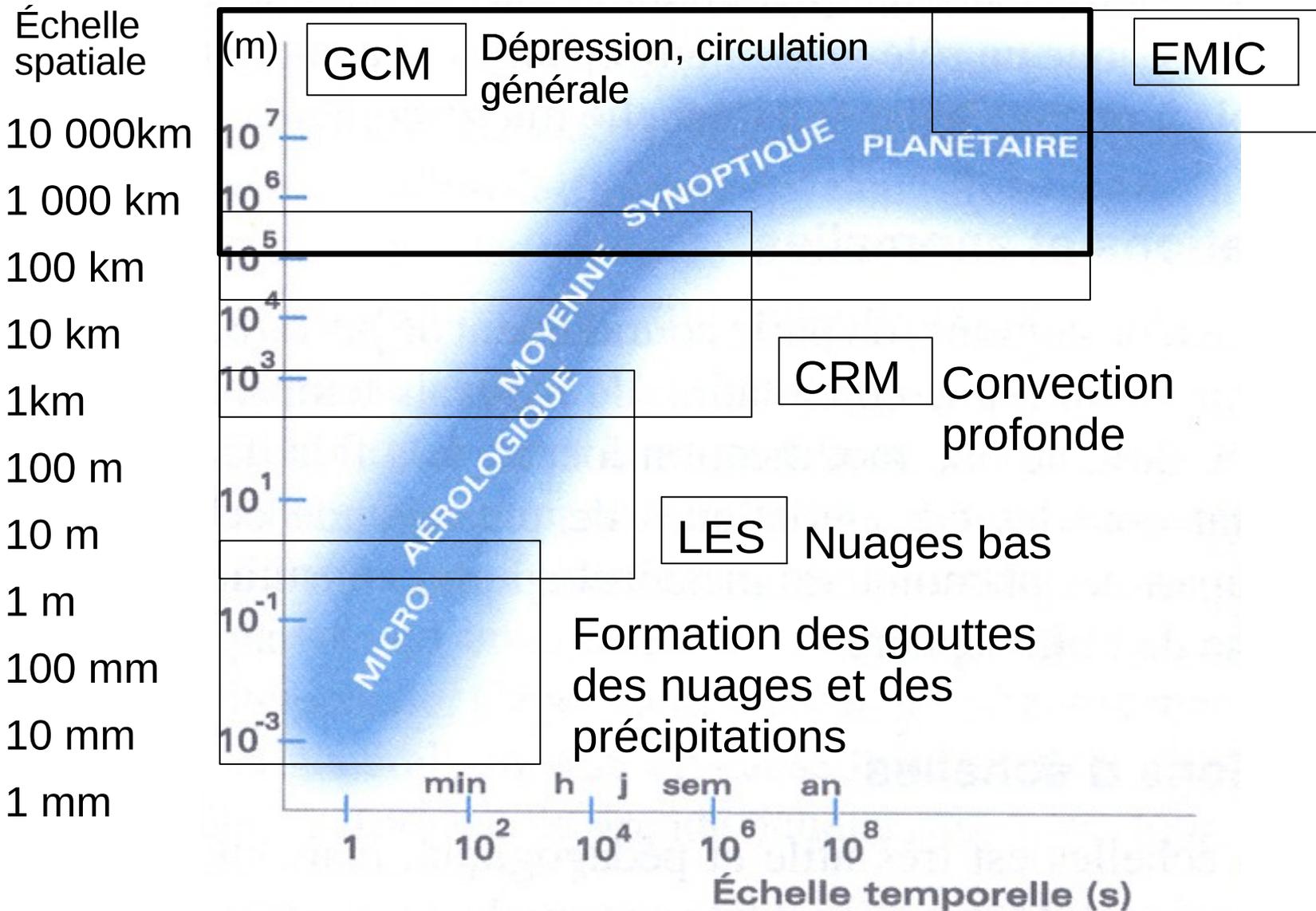


Système

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



Échelles spatiales et temporelles



Modèles de circulation générale (GCM)

Equations de GCM atmosphérique (extraits)

Equations dynamiques en coordonnées pression

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \partial_t \vec{V} = \underbrace{-(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V}}_{\text{transport}} - \underbrace{\omega \partial_p \vec{V}}_{\text{gravité}} - \underbrace{\vec{\nabla} \Phi}_{\text{Coriolis}} - \underbrace{f \vec{k} \times \vec{V}}_{\text{Coriolis}} + \underbrace{\vec{S}_V}_{\text{Sources}} \\
 \vec{\nabla} \cdot \vec{V} + \partial_p \omega = 0 \\
 \partial_t q = -\vec{V} \cdot \vec{\nabla} q - \omega \partial_p q + \underbrace{S_q}_{\text{Sources}}
 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l}
 \Phi = gz \quad \text{geopotentiel} \\
 \omega = \partial_t p \quad \text{vitesse vert.} \\
 q = \text{humidité spécifique}
 \end{array} \right. \quad (1)$$

\vec{S}_V et S_q : termes source déterminés par les **paramétrisations physiques** :

- couche limite planétaire
- convection profonde (Gros cumulus et cumulonimbus)
- nuages
- processus radiatifs
- orographie
- sol

Schéma de transport

Test d'advection d'un pic Gaussien

— Distribution initiale

— Solution exacte (translation)

U constant

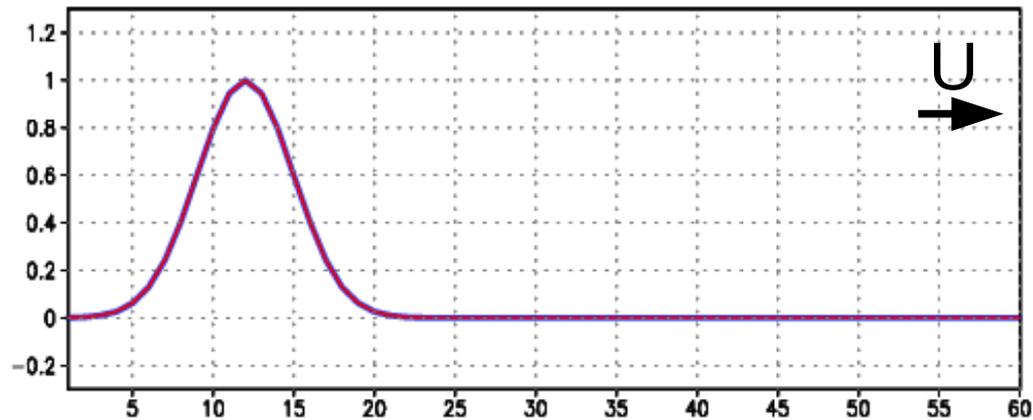
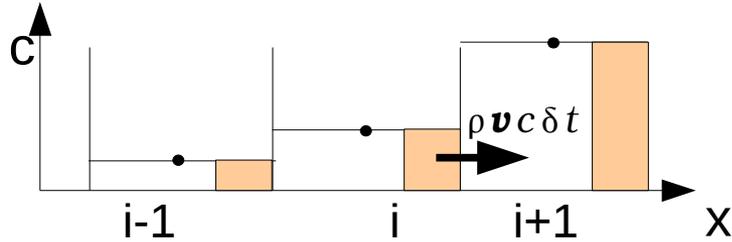


Schéma amont (Godunov, 1952)



Test d'advection d'un pic Gaussien

— Distribution initiale

— Solution exacte (translation)

— Calcul avec schéma d'advection

U constant

Advection avec le schéma amont ou semi-lagrangien d'ordre 1

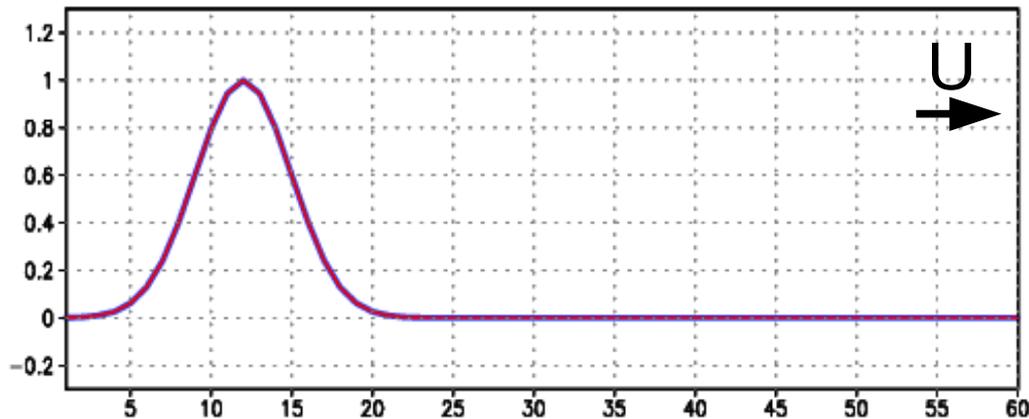
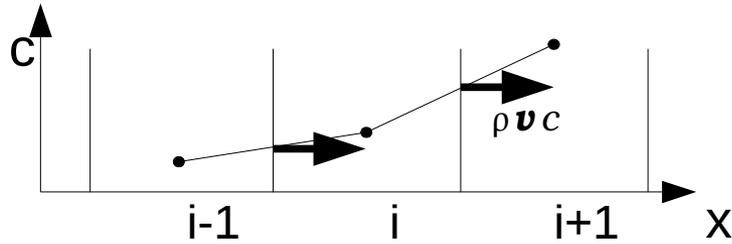


Schéma diffusif et peu précis

Différences finies centrées (second ordre)



- Test d'advection d'un pic Gaussien
- Distribution initiale
 - Solution exacte (translation)
 - Calcul avec schéma d'advection
- U constant

Advection avec le schéma en différences finies centré d'ordre 2

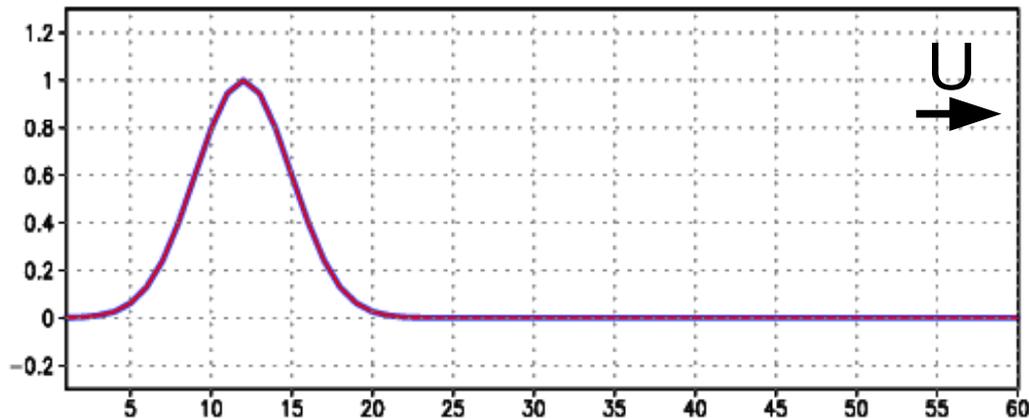
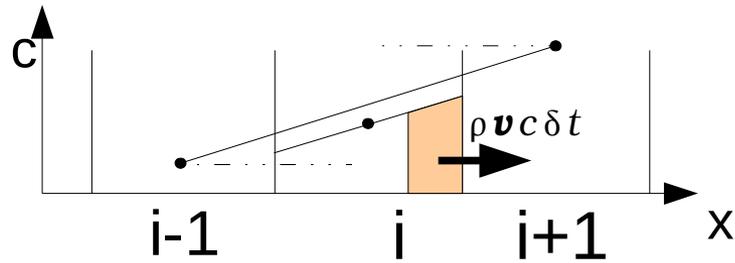


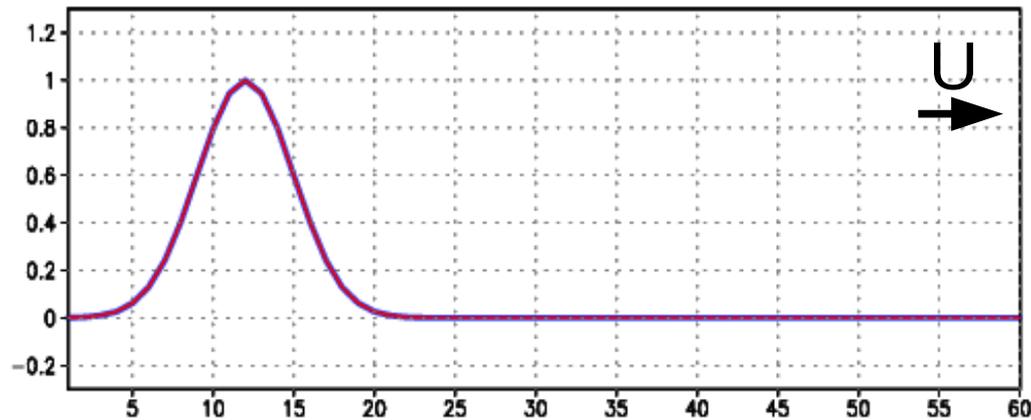
Schéma précis mais création de valeur négative et instabilité

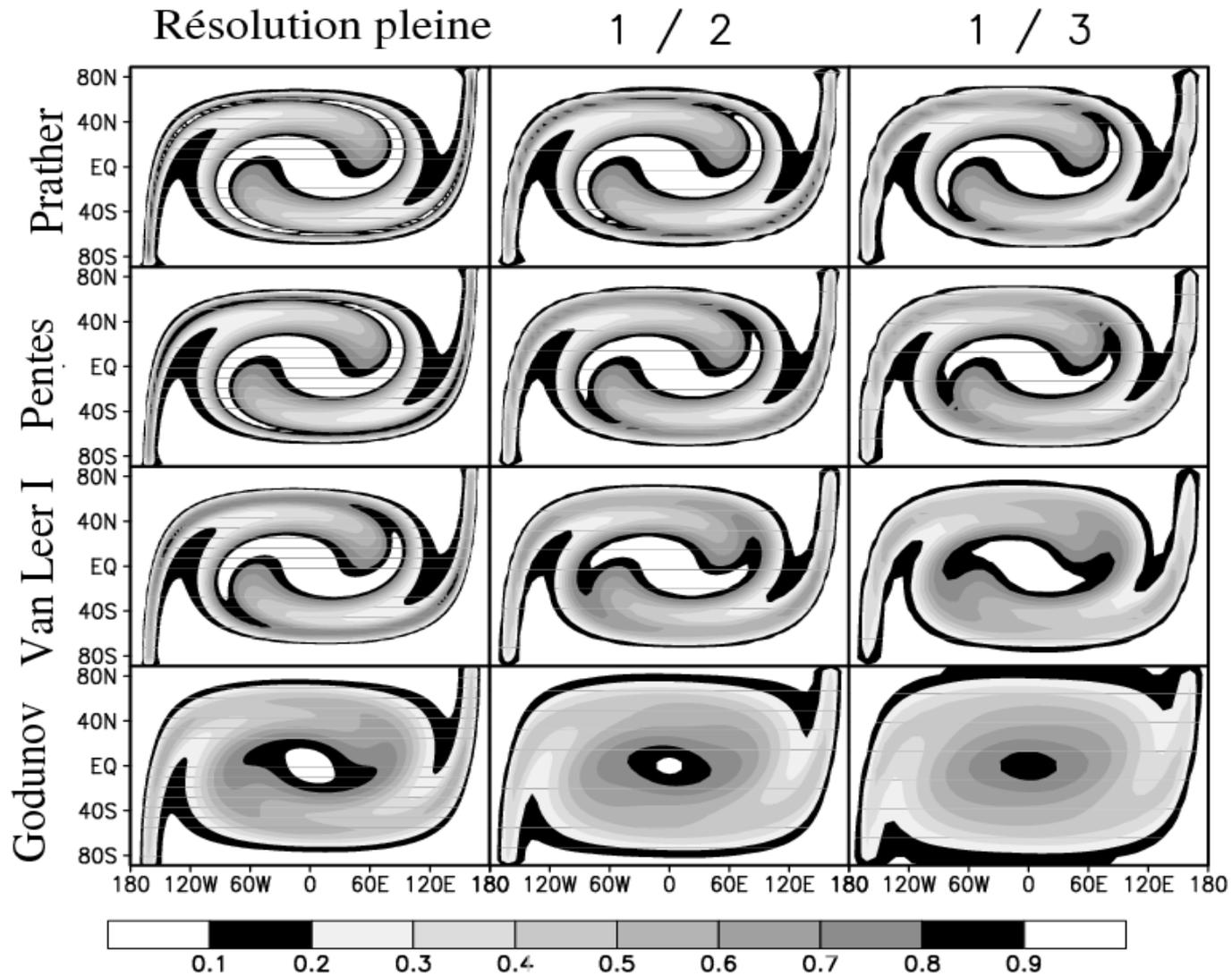
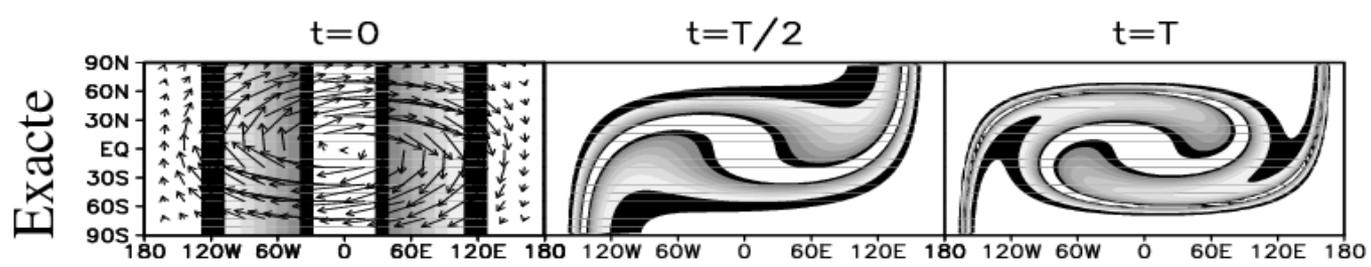
Schéma I de Van Leer (1977)



- Test d'advection d'un pic Gaussien
- Distribution initiale
 - Solution exacte (translation)
 - Calcul avec schéma d'advection
- U constant

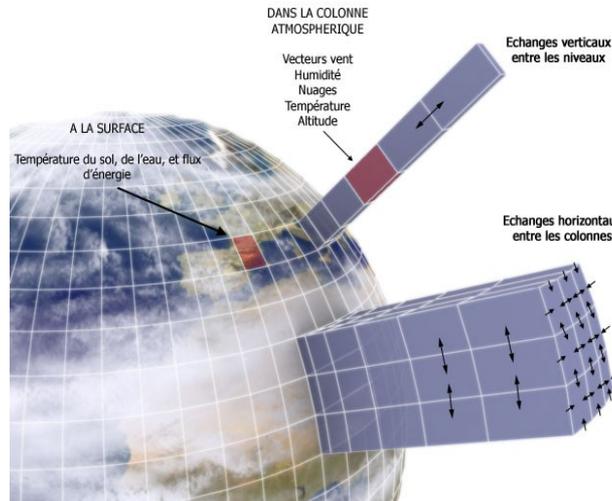
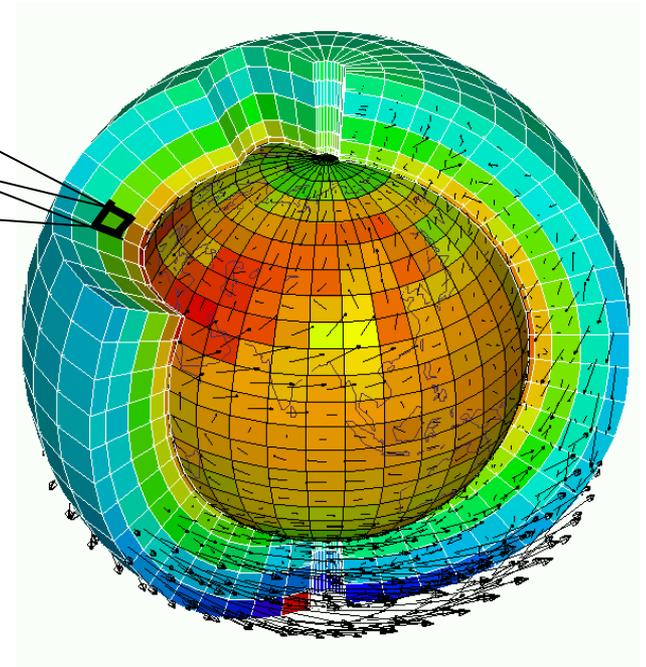
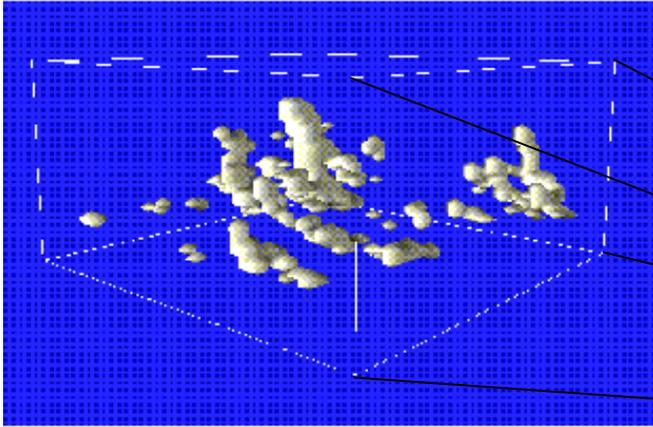
Advection avec le schéma volumes finis d'ordre 2 de Van Leer





Discrétisation

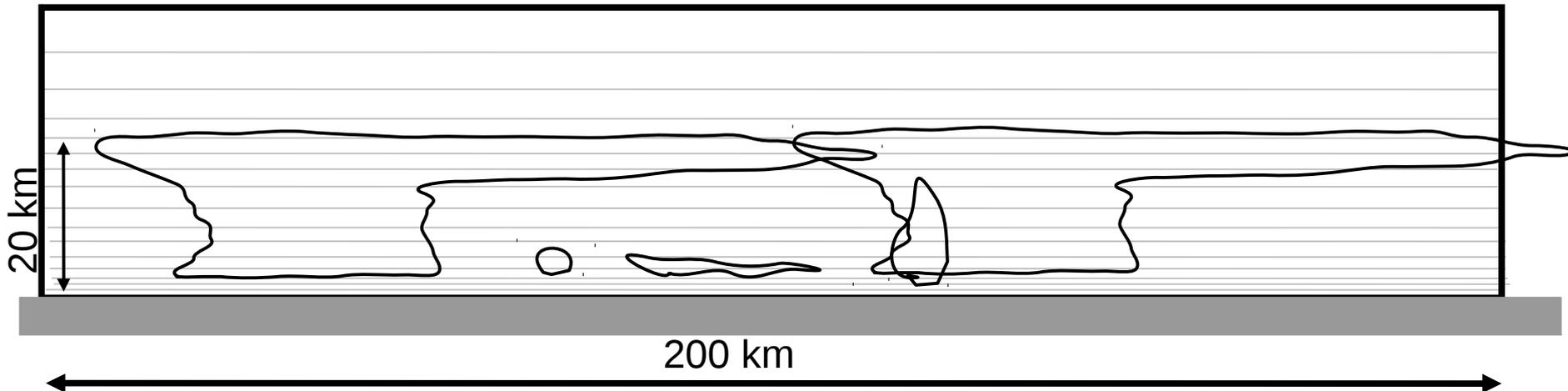
Modélisation des phénomènes sous-maillages,
ou paramétrisation



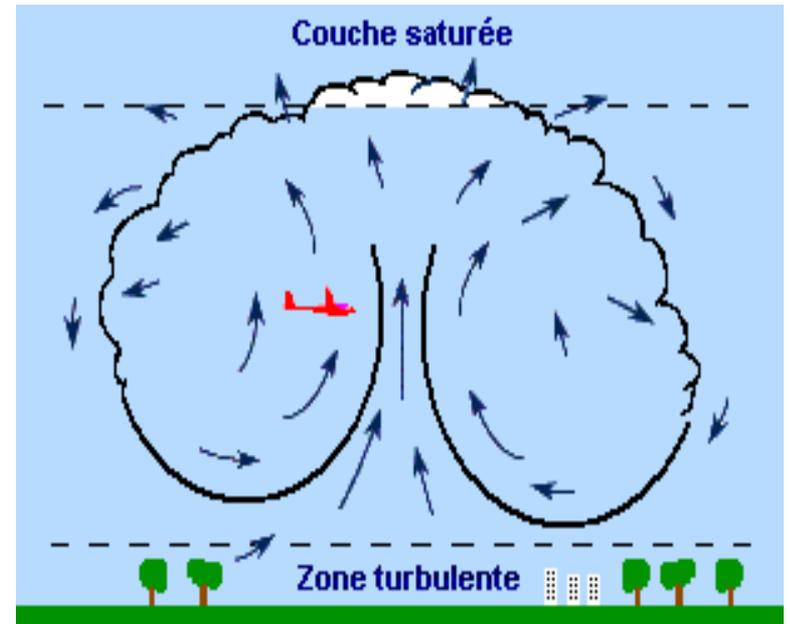
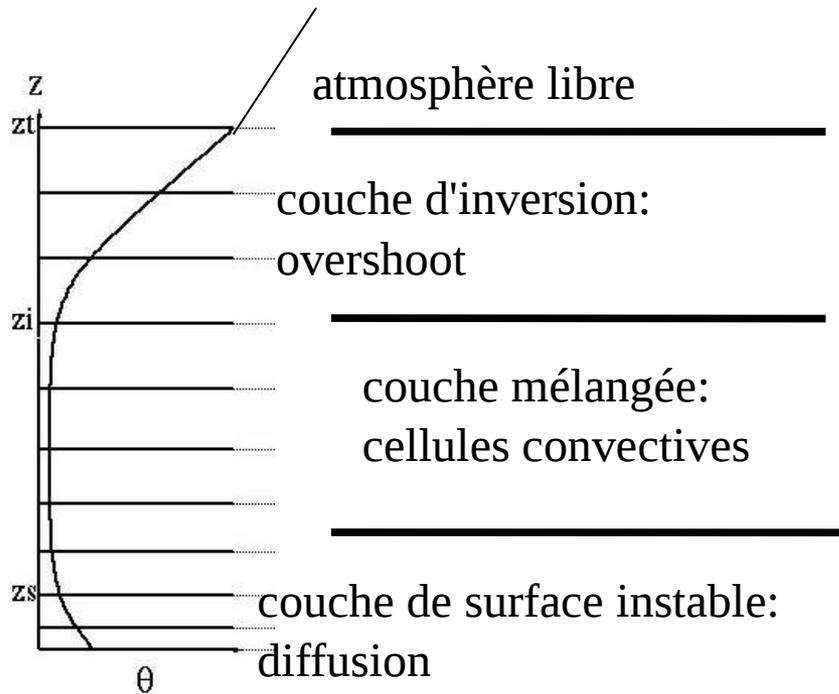
Discrétisation

- Incrément temporel : de quelques minutes à une demi-heure, selon la technique d'intégration.
- Grille horizontale : maille allant de 30 à 300 km.
- Grille verticale : maille allant de 20 à 100 m au niveau du sol, de 500 à qqs km dans la stratosphère.

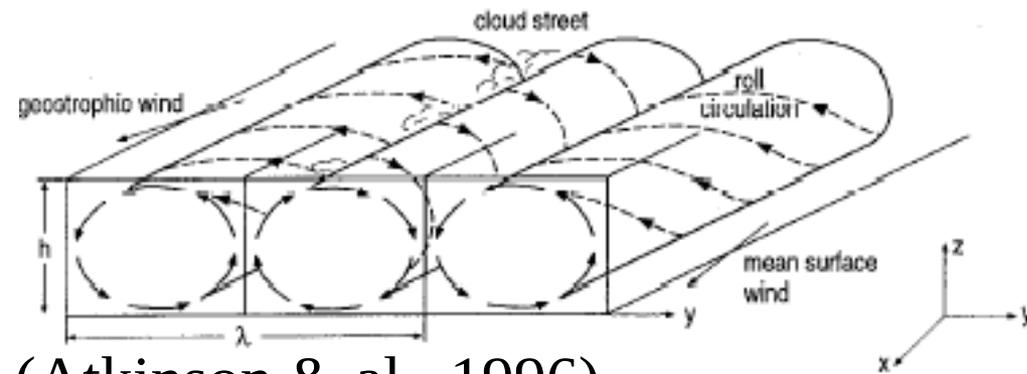
Colonne atmosphérique typique:



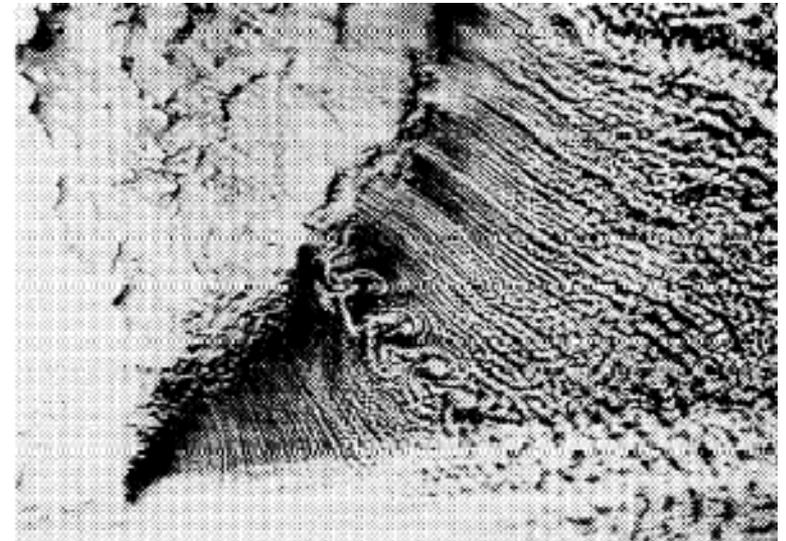
La couche limite atmosphérique convective



<http://www.astrosurf.org/lombry/meteo-vol-a-voile.htm>



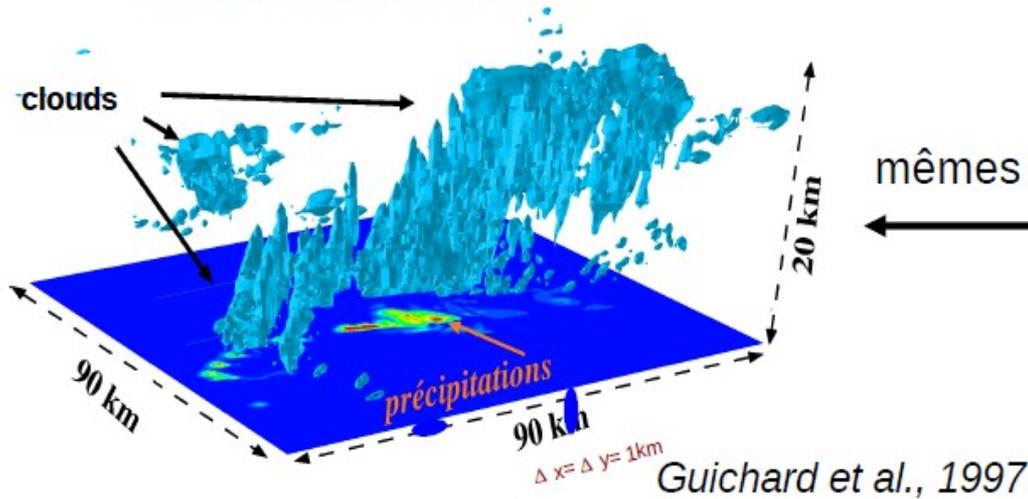
(Atkinson & al., 1996)



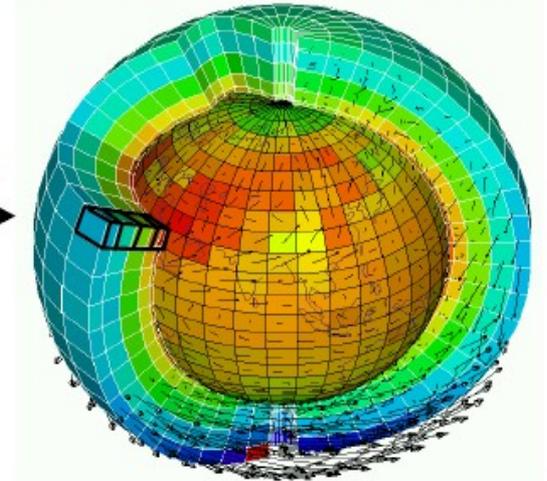
Amélioration de la représentation des processus dans les modèles

Développement de paramétrisations en se basant sur l'analyse fine des processus physiques

Simulations LES/CRM

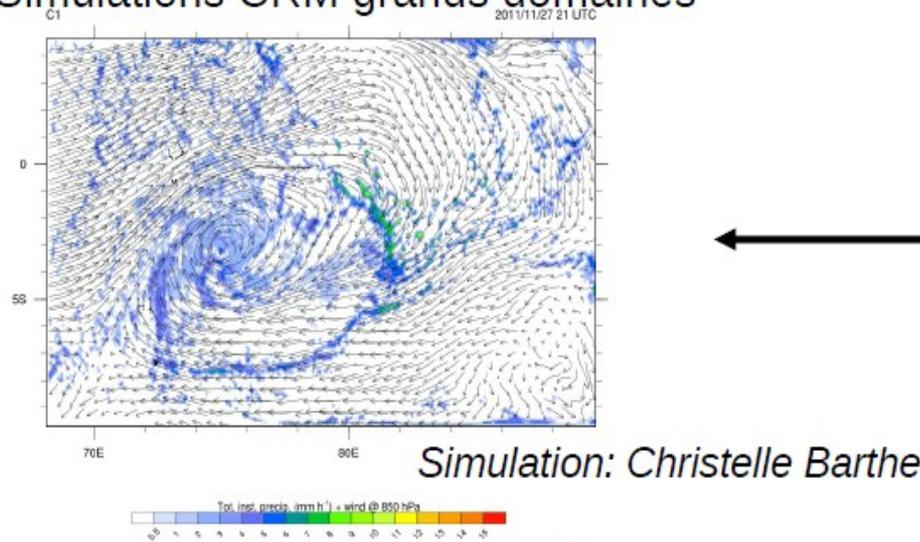


LMDZ en mode unicolonne

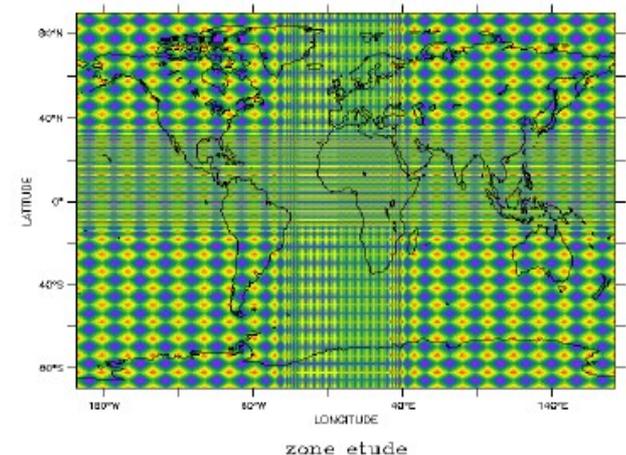


mêmes forçages

Simulations CRM grands domaines



LMDZ en mode zoomé/guidé et/ou initialisé



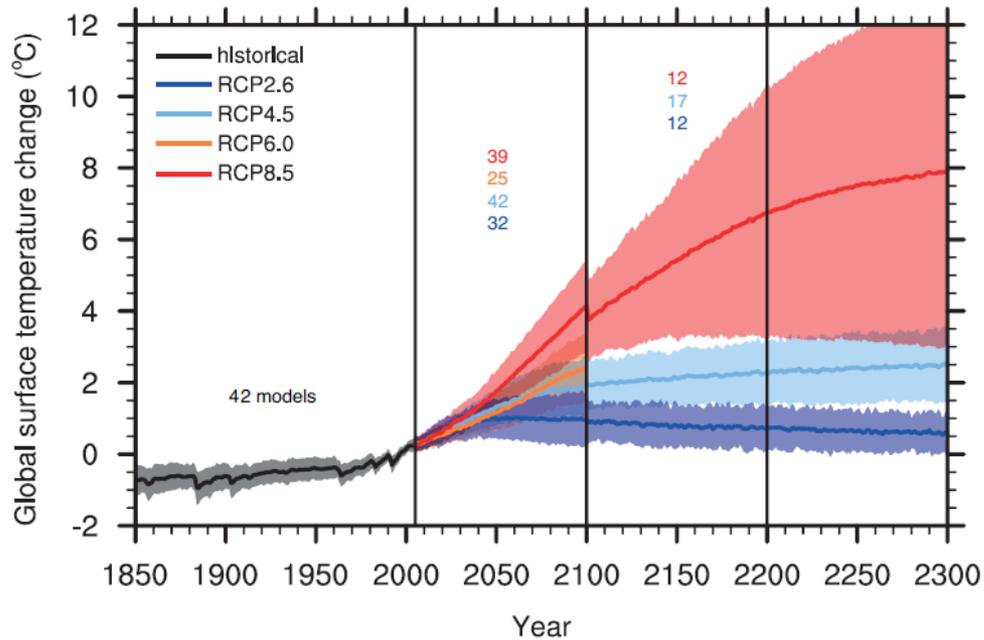
Comment et pourquoi développe-t-on des modèles climatiques?

- Il n'est pas possible de bâtir un modèle climatique (ou météorologique) complet à partir des lois physiques fondamentales
- Construire un modèle c'est construire une représentation simplifiée et approchée des phénomènes physiques dans le but de répondre à des objectifs donnés
- Cette représentation repose sur un découpage du système puis un raccordement des sous-parties
- Il y a des options très différentes pour faire les découpages, simplifications et approximations, qui doivent être cohérents pour un modèle mais peuvent être très différents d'un modèle à l'autre

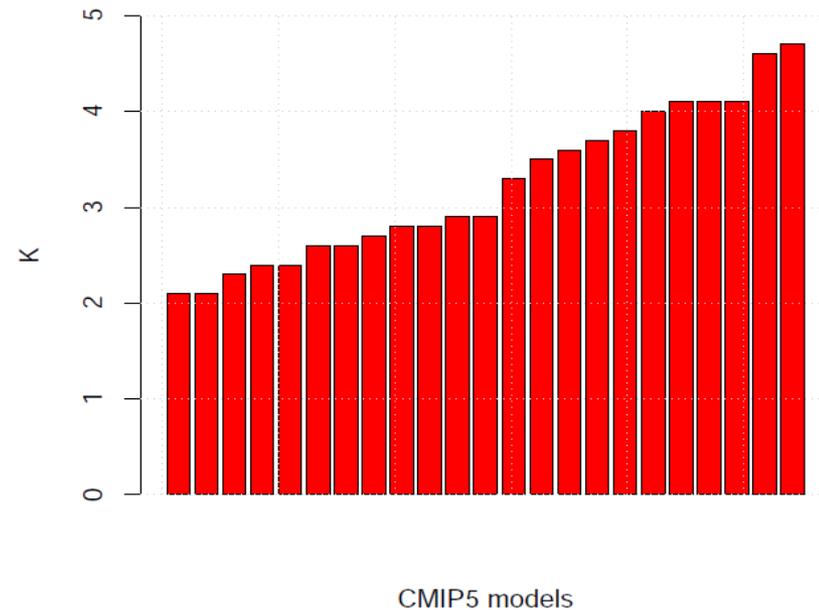
Amplitude du réchauffement Sensibilité climatique

Accroissement de la moyenne des températures de surface

Pour des scénarios « réalistes »

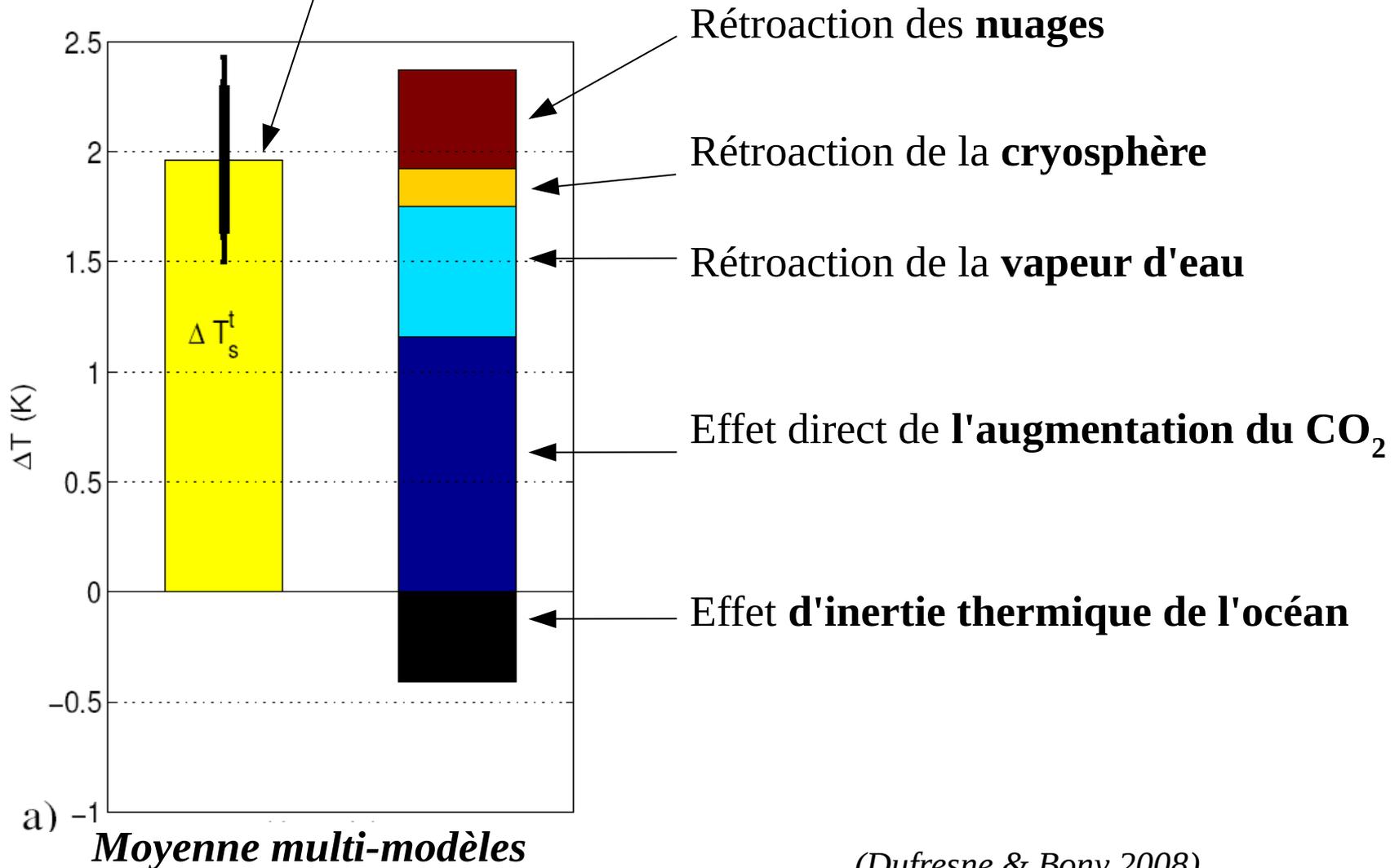


Pour un doublement de CO₂



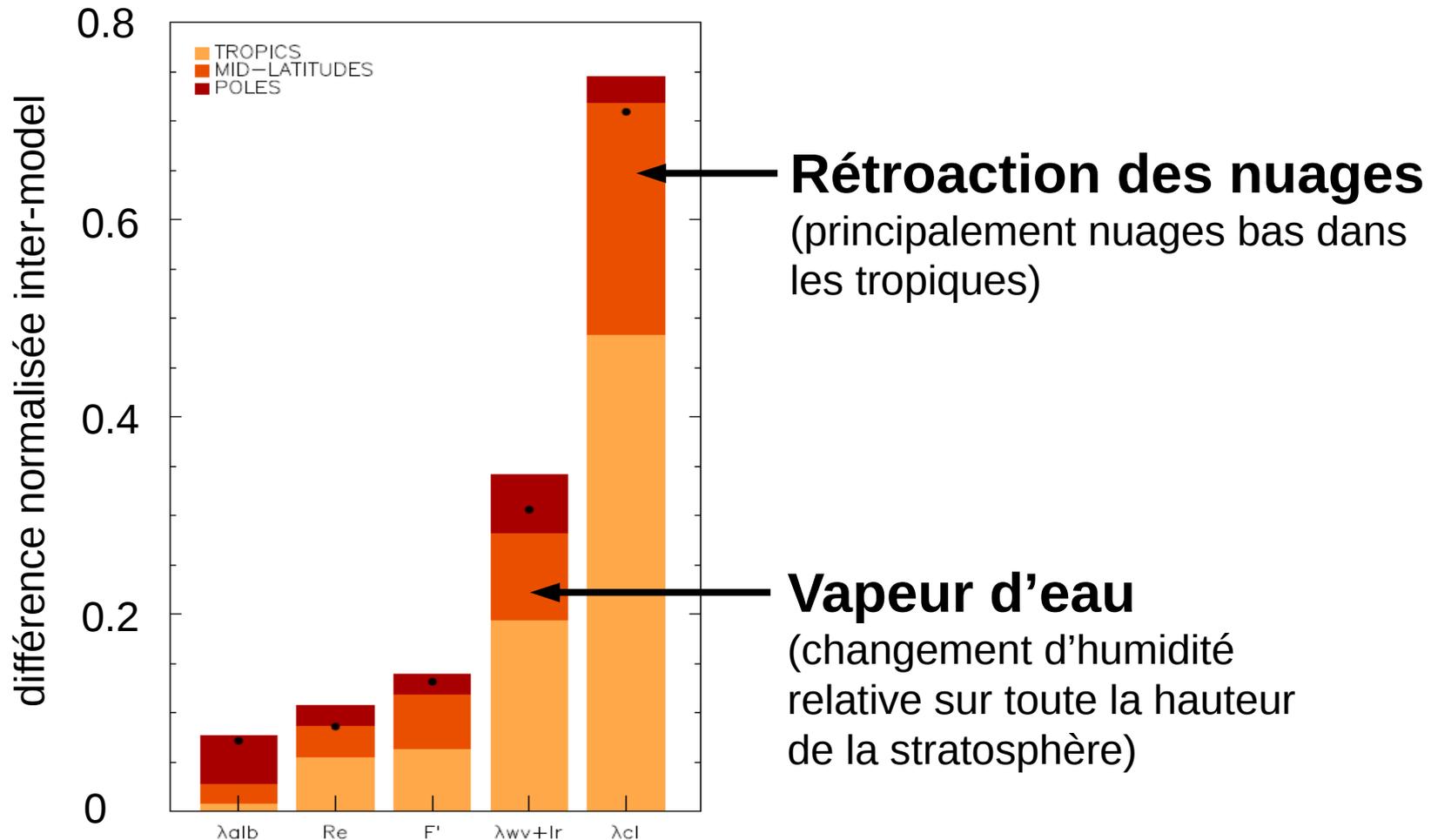
Accroissement de CO₂ et température

Réchauffement global pour un doublement de CO₂ en 70 ans



Accroissement de CO₂ et température

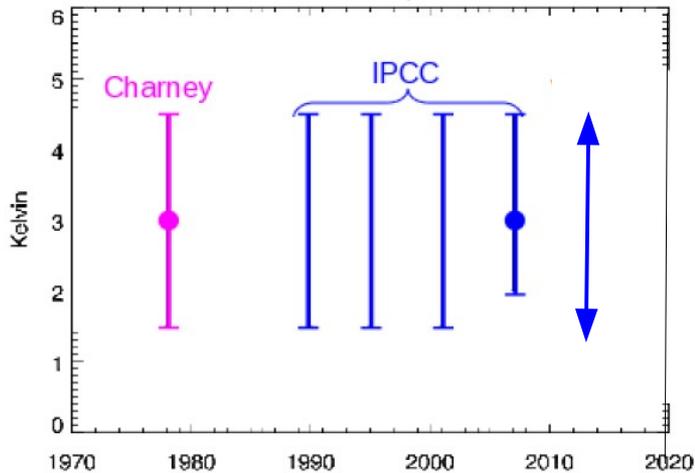
Origines de la dispersion entre les modèles



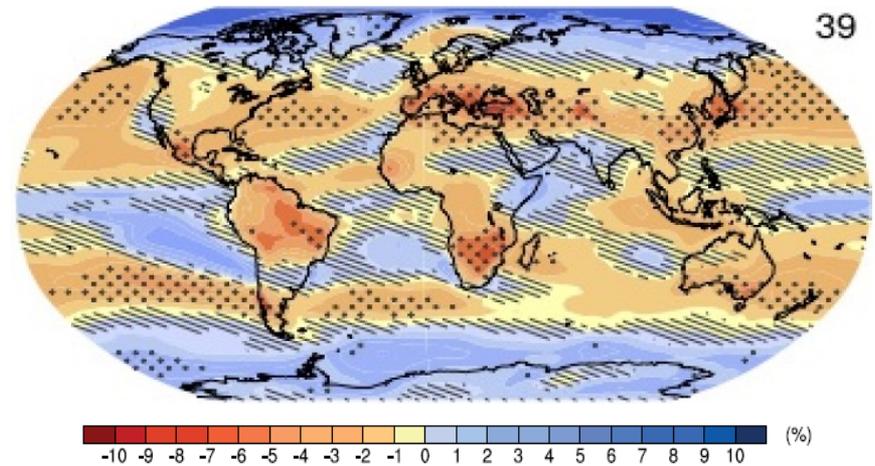
(Vial et al. 2013))

Des incertitudes demeurent: amplitude du réchauffement

Dispersion de l'estimation de la sensibilité climatique

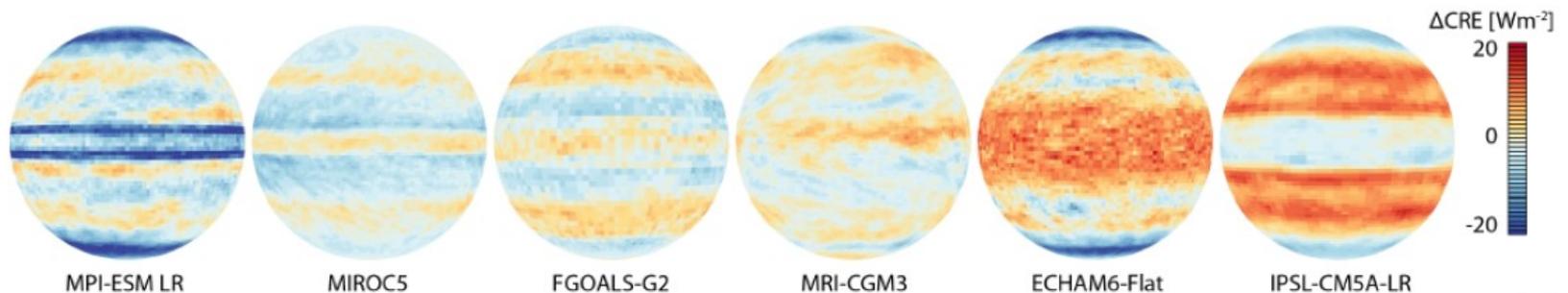


Changement de la fraction nuageuse



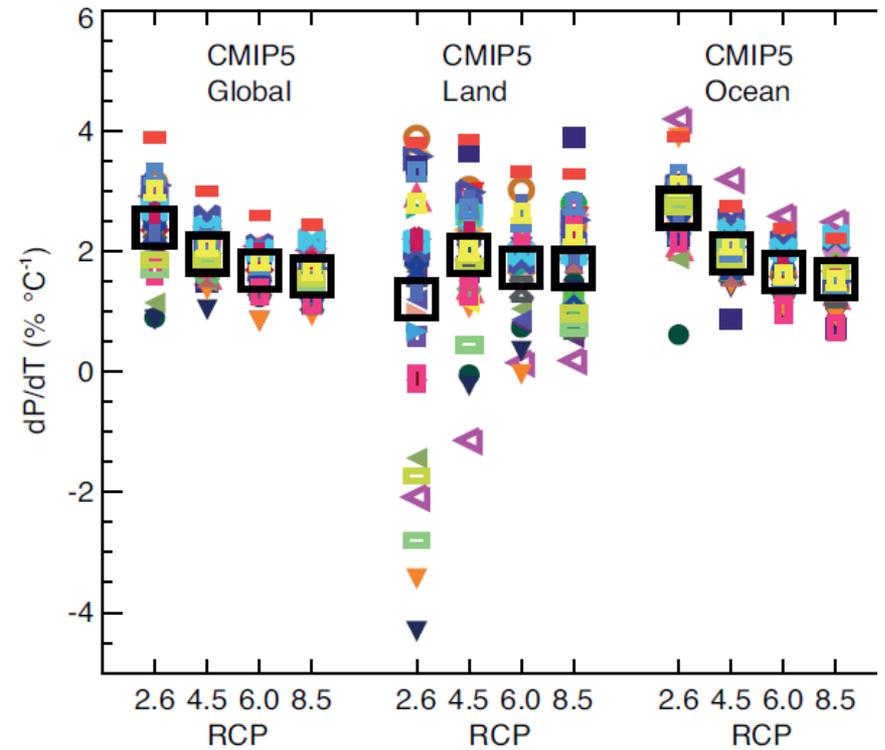
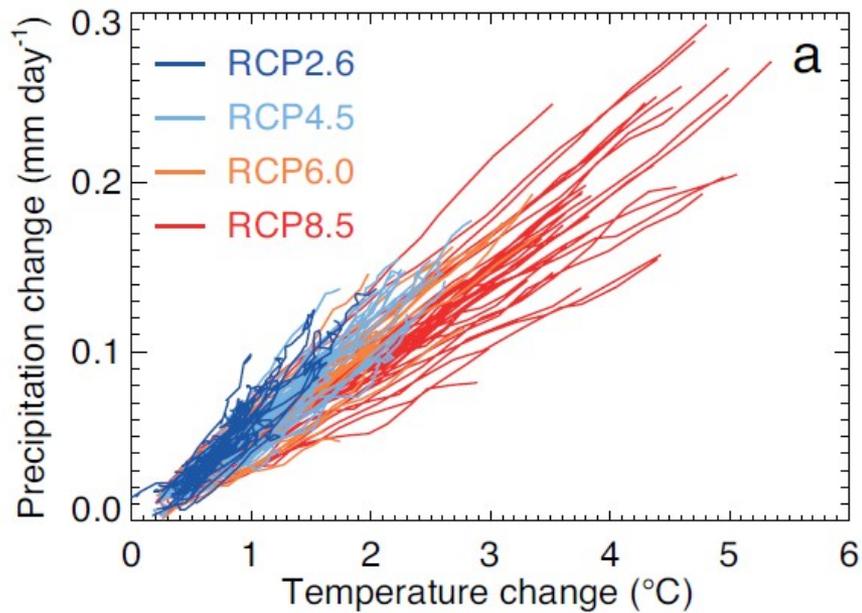
La **dispersion** de l'estimation de la sensibilité climatique **ne s'est pas réduite**

Et dans un monde plus simple? Réponse de l'effet radiatif des nuages à un **accroissement uniforme de température** de 4K pour des **aqua-planètes**



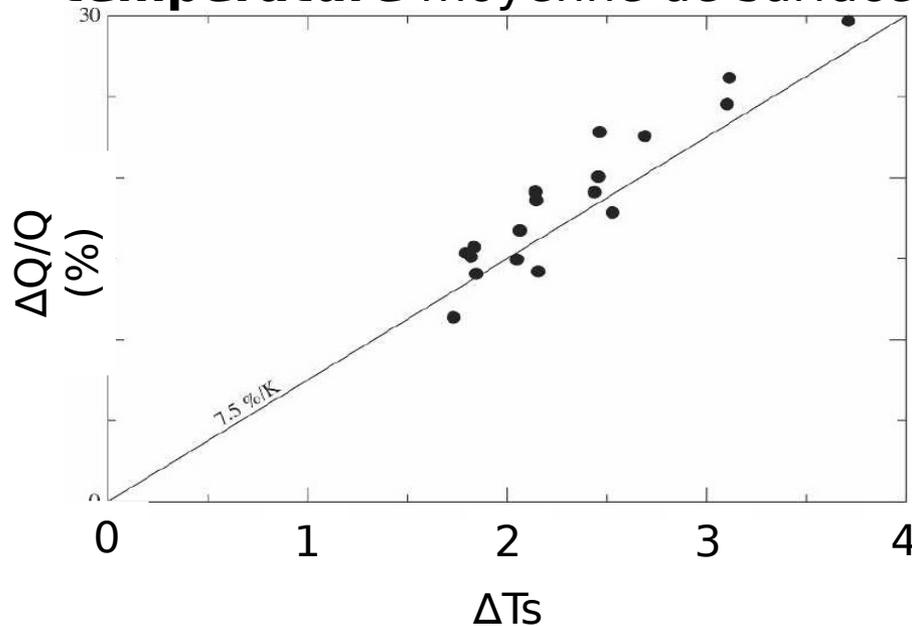
[Stevens & Bony, 2013]

Évolution de la moyenne des précipitations



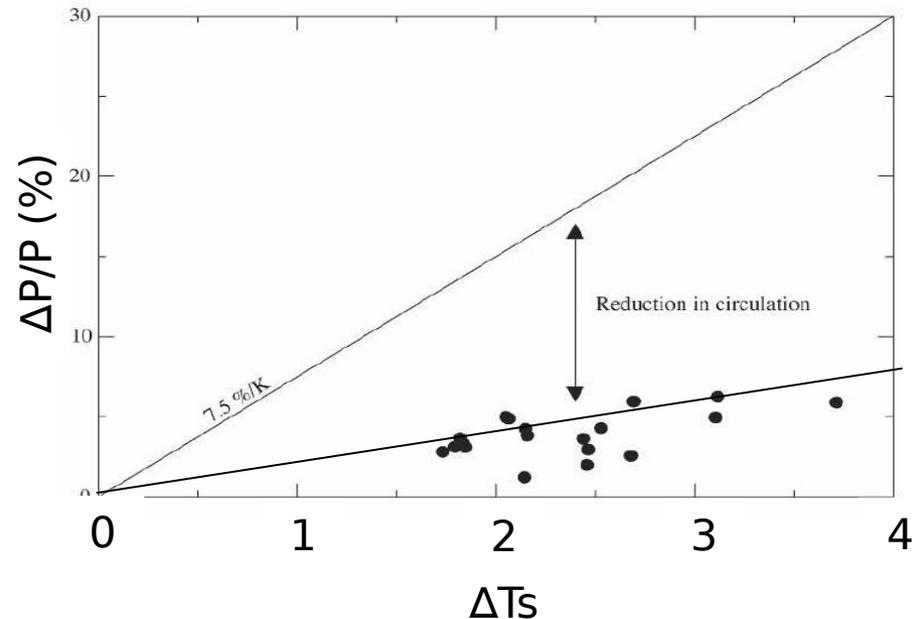
Les changements de précipitations dus à l'accroissement de température

Changement de la **quantité de H₂O** vs changement de la **température** moyenne de surface



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

Changement **précipitations** vs changement de la **température** moyenne de surface



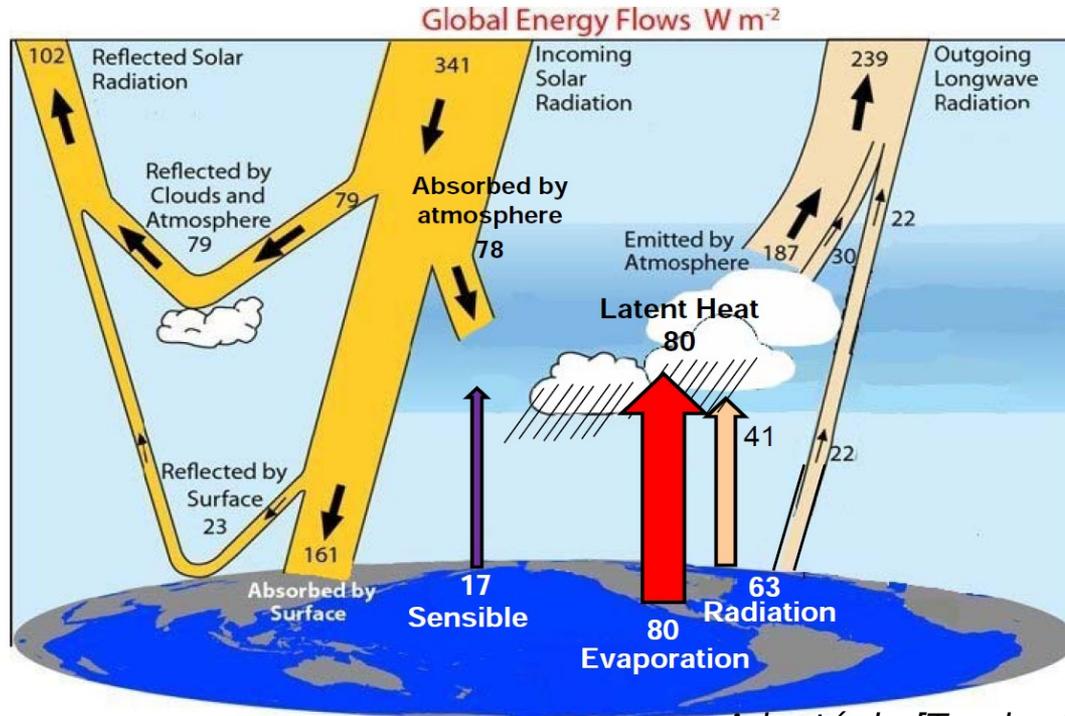
$$\Delta P/P (\%) \approx 1.5 \Delta T_s$$



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

Rôle des processus dans le système climatique

Changement de la moyenne des précipitations



Solaire:
•Aérosols
absorbants
•Vapeur d'eau

Infrarouge:
•Vapeur d'eau
•CO₂

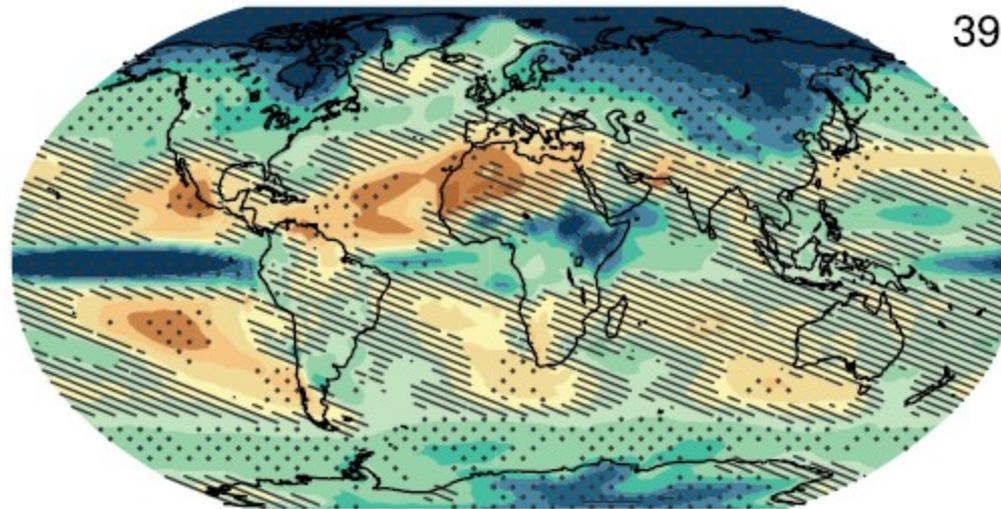
Adapté de [Trenberth & Fasullo, 2012]

Précipitation et changement de précipitations:

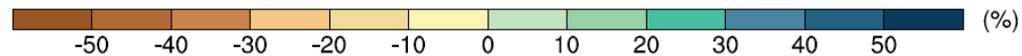
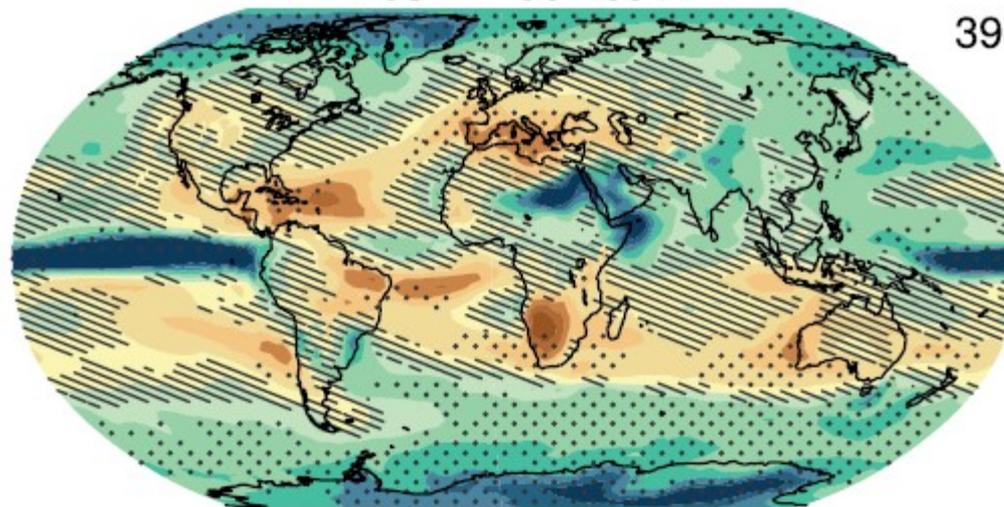
- Importance du bilan d'énergie dans l'atmosphère
- Semble également important à l'échelle de grandes régions
- Étudier les processus qui contrôlent la pluie ne veut pas dire étudier uniquement les processus de formation de la pluie

Distribution géographique et saisonnière du changement de précipitations

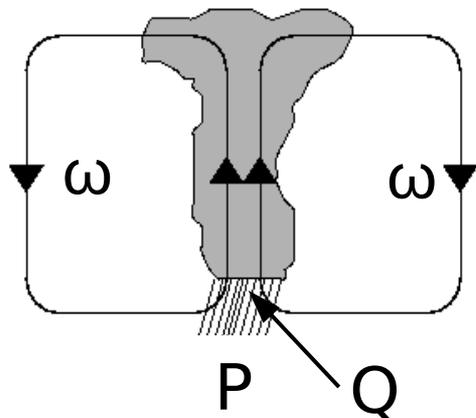
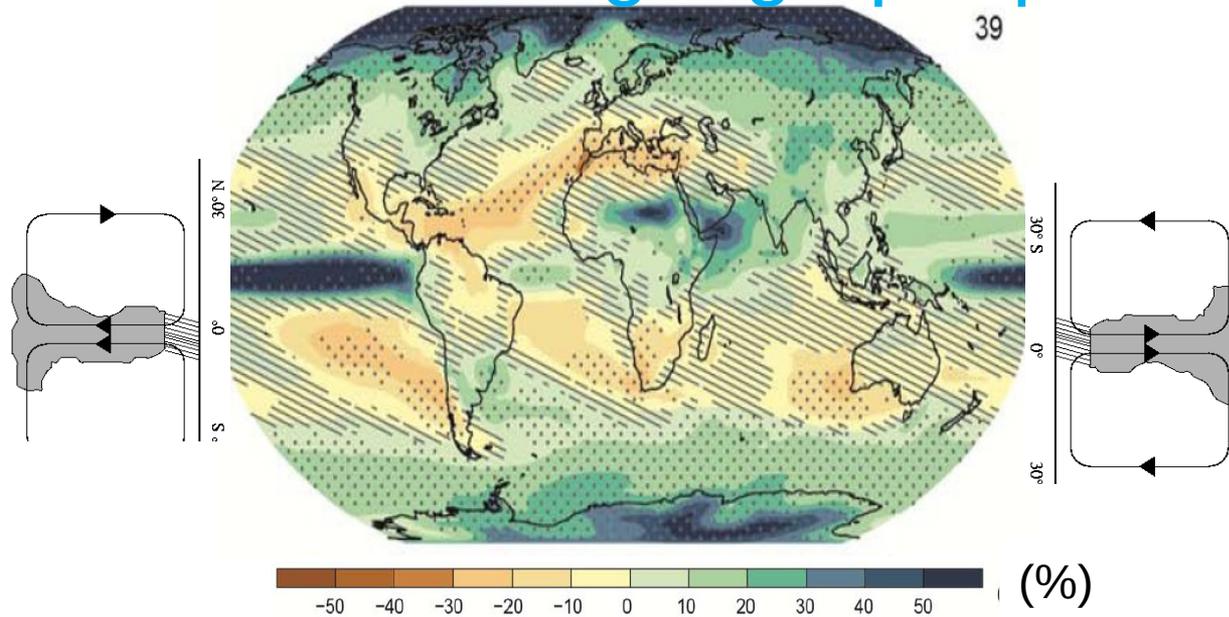
2081-2100 - DJF



2081-2100 - JJA



Changements des précipitations: distribution géographique



Variation des
précipitations

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

Variation

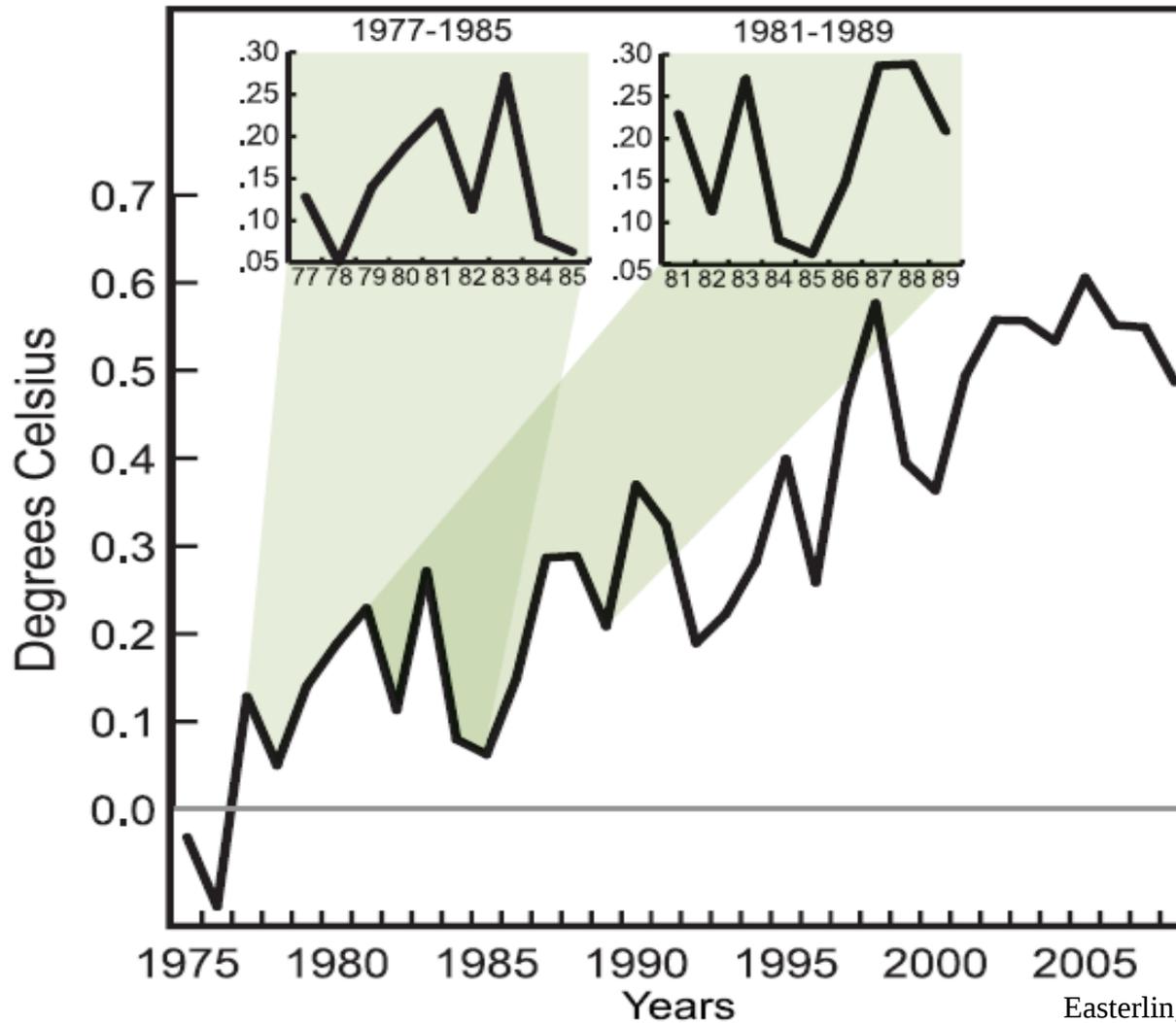
thermodynamique

Variation

dynamique

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

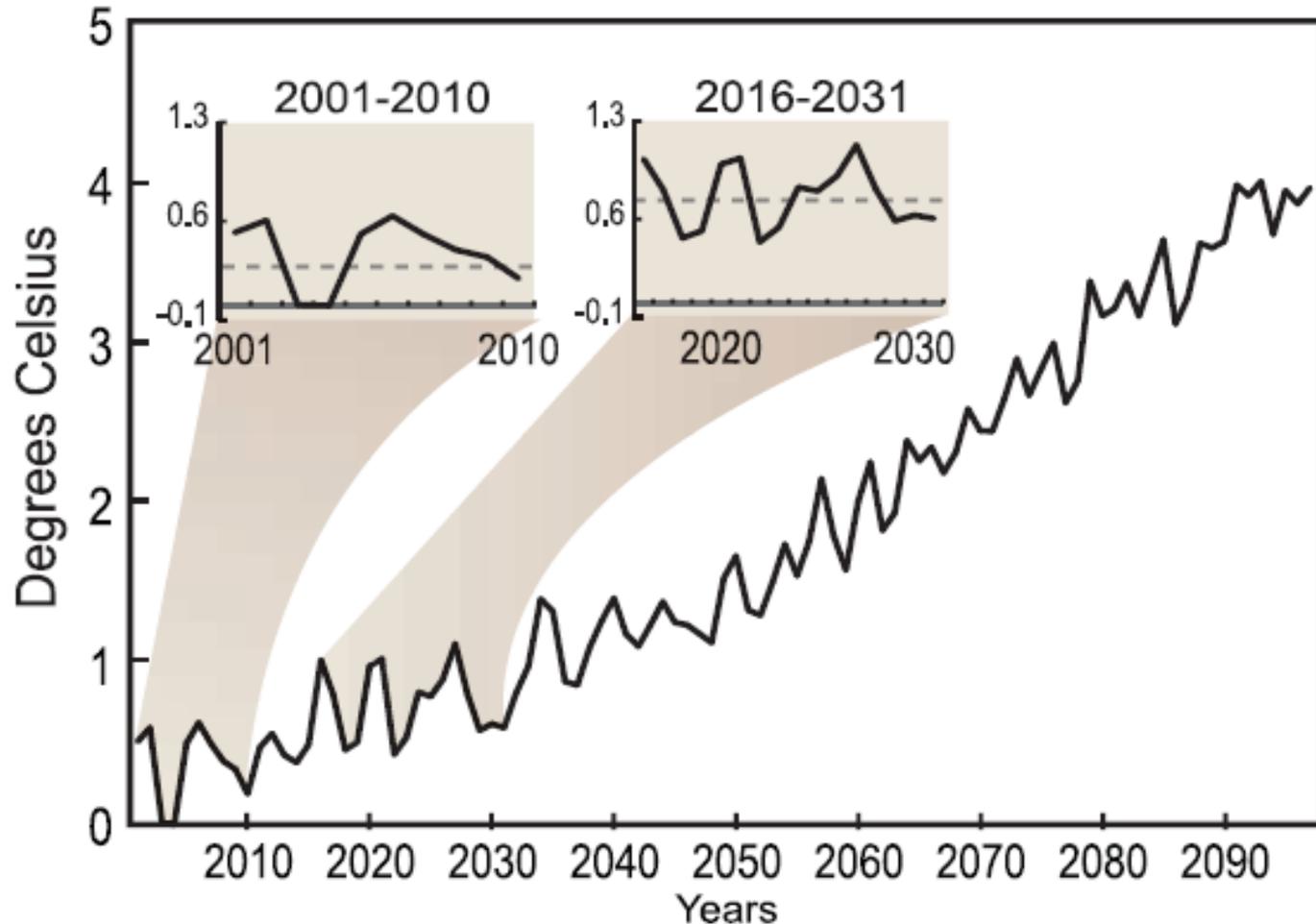
Observée



Les variations du climat sont elle régulières?

Variations et variabilité du climat

Simulée



Conclusions

- 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 ou aux courtes échelles de temps décennies, plus les aspects variabilités 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