

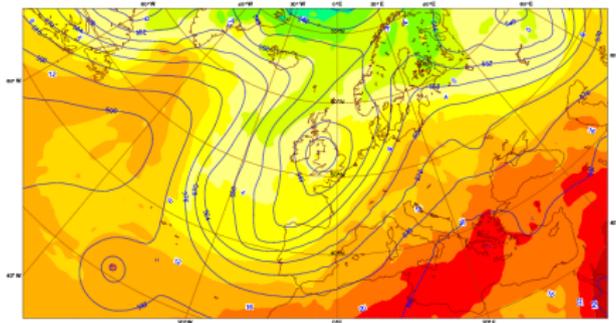
Les Mécanismes du Climat. Changements Anthropiques et Impacts ?

F. BOUCHET (ENS Lyon)

Changements de climat : changements de société ?
Lyon, Octobre 2012

Qu'est ce que le Climat ? Météo ou Climat ?

Monday 24 September 2012 00UTC ©ECMWF Forecast 1-048 VT: Wednesday 26 September 2012 00UTC
850 hPa Temperature / 500 hPa Geopotential

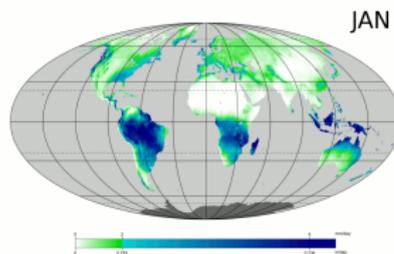
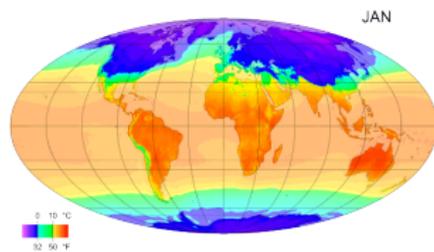


Météo : carte de température et de pression sur l'Europe (26/09/2012)

- Climat : mesure de moyennes, de quantités statistiques relatives à la température, les précipitations et autres variables caractérisant l'atmosphère.

Qu'est ce que le Climat ?

Climat comme Statistique de l'Etat de l'Atmosphère



Température et précipitations moyennes au cours de l'année
(animation Temp., animation Prec) (NCEP-NCAR)

- La météorologie est le temps qu'il fait, le climat est le temps moyen et ses fluctuations.

Outline

- 1 Les observations et les mécanismes du climat
 - Les observations du réchauffement climatique
 - Les principaux mécanismes du climat
 - Causes anthropiques du réchauffement climatique
- 2 Impact, risques et action
 - Incertitudes et projections
 - Impact
 - La nécessité et les formes de l'action
- 3 Compléments et réponse aux questions les plus courantes
 - Le climat sur les échelles de temps longues
 - Effets des cycles naturels et du soleil

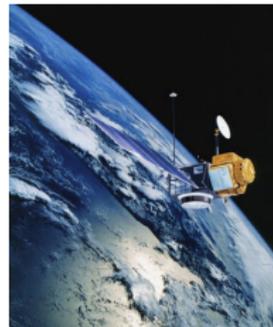
Les Mesures Climatiques



Ballon sonde radio



Bouées

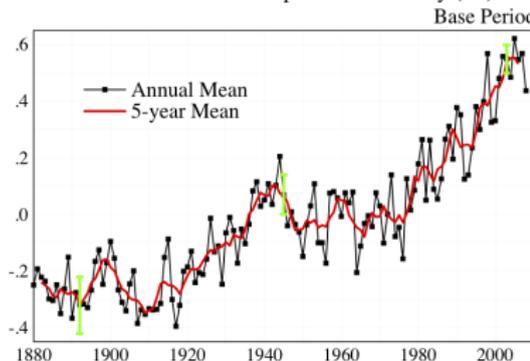


Topex-Poseidon

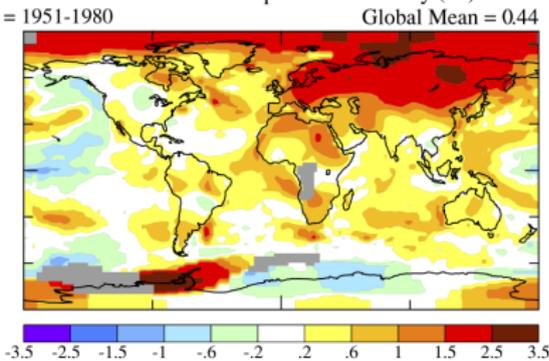
- Evolution historique des techniques et des mesures.
- Aspects méthodologiques.

Evolution de la Température au cours du Siècle Dernier

Global Land-Ocean Temperature Anomaly (°C)

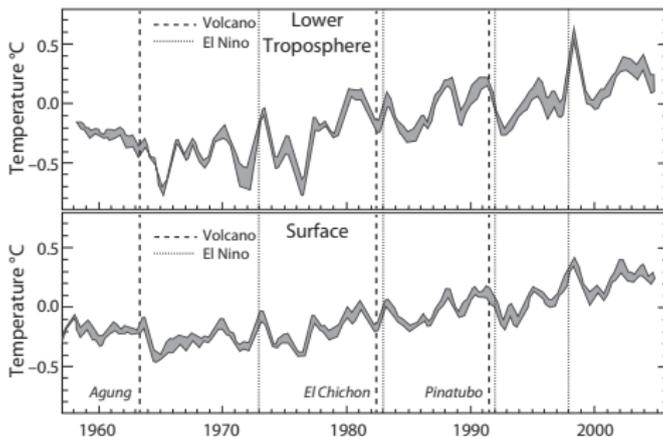


2008 Surface Temperature Anomaly (°C)



Température globale et anomalies de température en 2008

Mesures Directes ou par Satellite de la Température (C1)



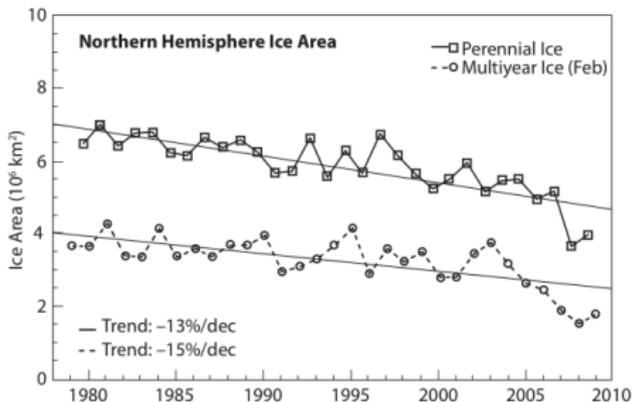
Température dans la basse troposphère (satellites et sondes) et en surface (NOAA, NASA et UKMO) (anomalies / 1979-1997) ; (G. Vallis)

Glace de Mer



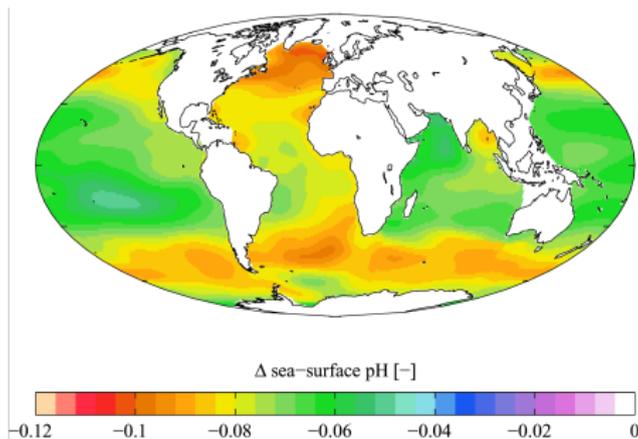
Vue satellite de la
Scandinavie en hiver

- Film sur la disparition de la glace arctique



Surface de mer de glace pour
l'hémisphère nord

Acidification de l'Océan (C2)

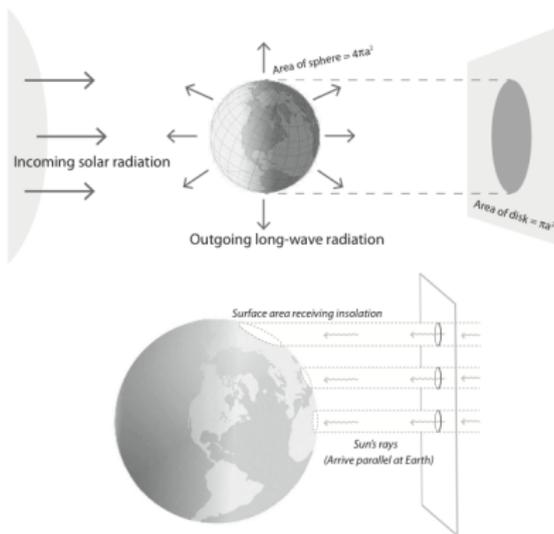


Variations de l'acidité des océans (1700-1990) (World Ocean Atlas)

Outline

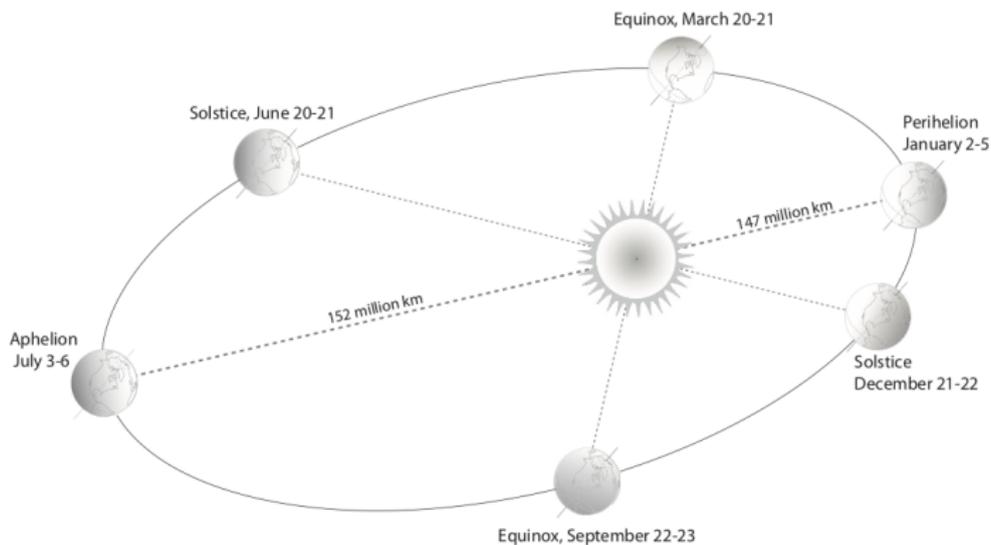
- 1 Les observations et les mécanismes du climat
 - Les observations du réchauffement climatique
 - Les principaux mécanismes du climat
 - Causes anthropiques du réchauffement climatique
- 2 Impact, risques et action
 - Incertitudes et projections
 - Impact
 - La nécessité et les formes de l'action
- 3 Compléments et réponse aux questions les plus courantes
 - Le climat sur les échelles de temps longues
 - Effets des cycles naturels et du soleil

L'atmosphère Comme une Machine Thermique



Variation de l'ensoleillement avec la latitude

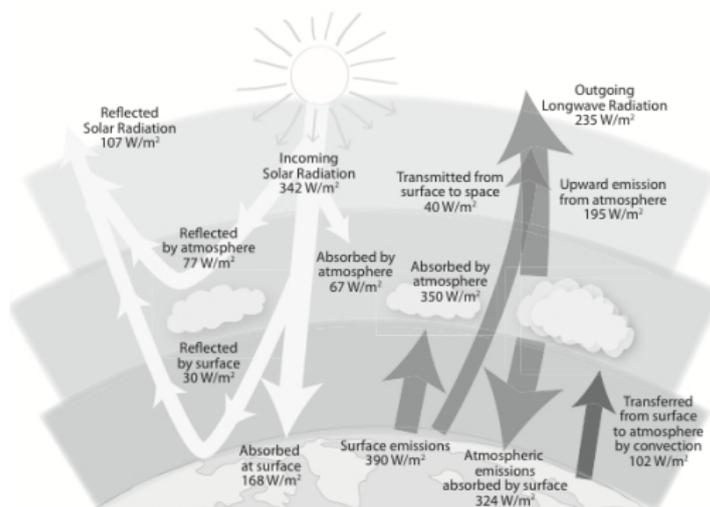
Variations Saisonnières et Annuelles de l'Ensoleillement



Obliquité et variations saisonnières

L'Effet de Serre

Un effet naturel assurant à la terre un climat clément



- Gaz à effet de serre rapides (eau) et pérennes (dioxyde de carbone CO_2 , méthane CH_4 , et acide nitrique N_2O).

Histoire de la Compréhension de l'Effet de Serre



J. Fourier, 1824, effet isolant de l'atmosphère

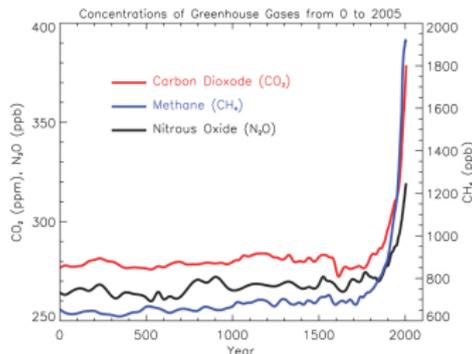
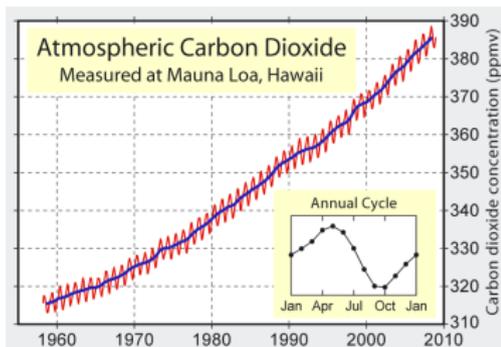


S. Arrhenius, 1896, calcul de l'effet de serre du CO₂

Les Causes Possibles du Réchauffement Climatique

- Causes directes (ensoleillement, astronomie).
- Perturbation du cycle du carbone.
- Perturbation du cycle de l'eau.
- Changement d'albédo (glace, végétation).
- Couplage avec l'océan.

La Concentration de CO₂ dans l'Atmosphère

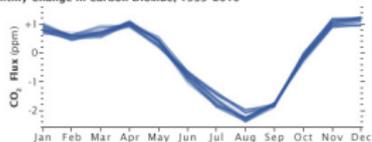


Concentration atmosphérique de CO₂, pendant les 30 et 2000 dernières années

- Croissance systématique. Le taux de croissance augmente.

Variations Saisonnières du CO_2 Atmosphérique (C3)

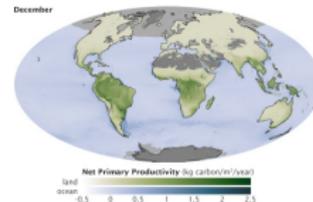
Monthly Change in Carbon Dioxide, 1959-2010



August

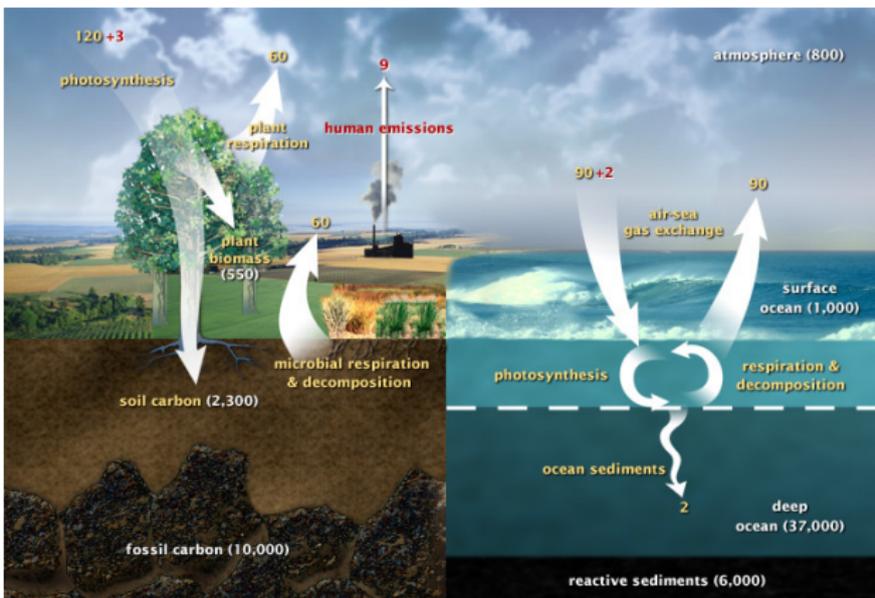


December



- Le cycle est plus marqué dans l'hémisphère nord.

Le Cycle du Carbone



Les flux et stocks de CO_2 , avec les contributions anthropiques

Un Exemple de Mesure du Cycle du Carbone (C4)

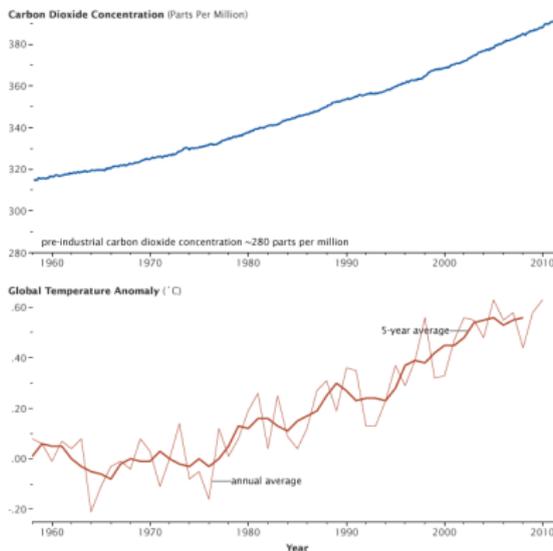


Changement des surfaces boisées (R. Simmon, NASA, données USGS)

Outline

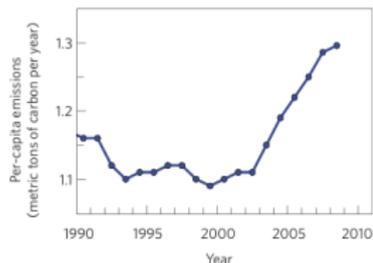
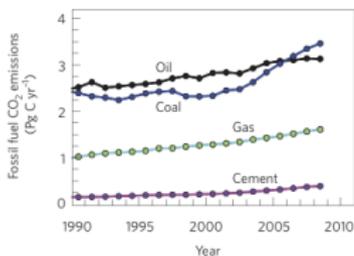
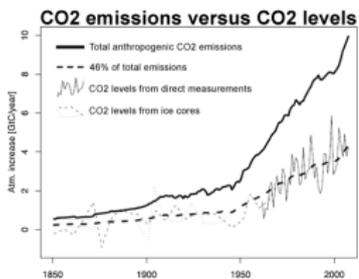
- 1 Les observations et les mécanismes du climat
 - Les observations du réchauffement climatique
 - Les principaux mécanismes du climat
 - Causes anthropiques du réchauffement climatique
- 2 Impact, risques et action
 - Incertitudes et projections
 - Impact
 - La nécessité et les formes de l'action
- 3 Compléments et réponse aux questions les plus courantes
 - Le climat sur les échelles de temps longues
 - Effets des cycles naturels et du soleil

Accroissement du CO₂ et Augmentation de Température



Evolution du CO₂ et de la température moyenne globale

Croissances des Emissions Anthropiques de CO₂



CO₂ fossile émis et CO₂ atmosphérique

- La taux d'augmentation de la concentration atmosphérique est un peu moins de la moitié du taux d'émission.
- Où va le carbone complémentaire ? **Océan ou biomasse ?**

Sources fossiles de CO₂

Emissions par habitant

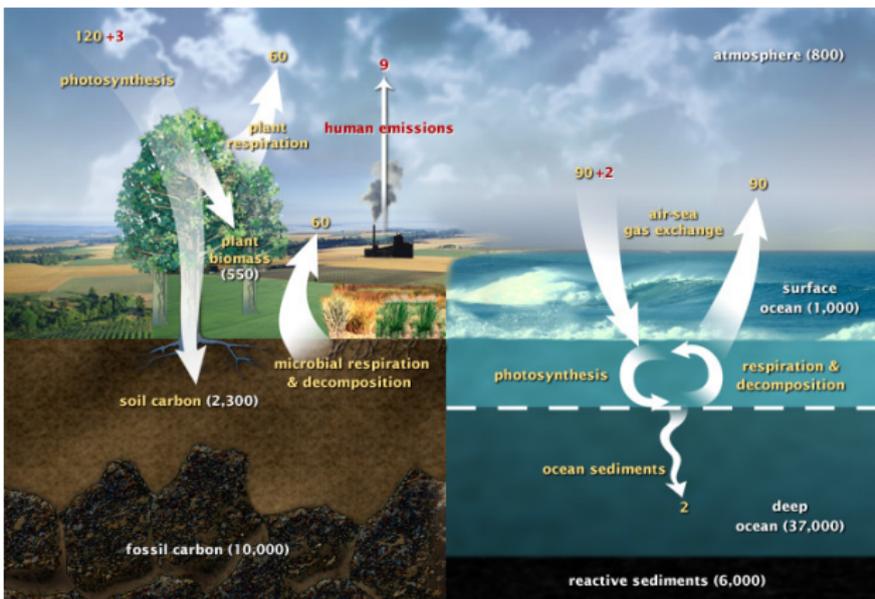
Océan (C5)

- Mesures dans l'océan beaucoup plus faciles que pour la biomasse terrestre (beaucoup plus homogène).
- Beaucoup d'incertitudes sur les flux.
- Mesure de l'âge des masses d'eau et du mélange avec les taux de fréons et de tritium. Déduction du CO₂. Difficile, il faut aussi tenir compte de la biologie qui affecte le CO₂.
- Mesure directe du taux de CO₂ anthropique dans l'océan (par exemple mesure isotopique) : difficile aussi.
- **Estimation du taux de dissolution : 2 Gton/an** (soit environ 1/3 du taux d'émission anthropique). Les modèles donnent les mêmes ordres de grandeur.

Puits Terrestres du Carbone

- Océan 2Gton/an de CO_2 . Donc 1.5 Gton/an absorbés par la biomasse terrestre (sources fossiles : 8,5 Gtons/an).
- Ni les mécanismes ni les lieux de ces puits sont connus de façon certaine.
- Fertilisation par le taux de carbone plus élevé. Effet direct. Est ce vrai ? Dans quelle proportions ?
- Effet limitant à cause du manque d'azote conduisant à une fertilisation plus faible.
- Autre mécanisme : saison de croissance plus longue grâce à l'augmentation de la température, reforestation des latitudes tempérées, diminution des feux naturels.
- Total : Emissions anthropiques 550 Gton (carburants fossiles : 350 Gton, déforestation : 250 Gtons).

Le Cycle du Carbone

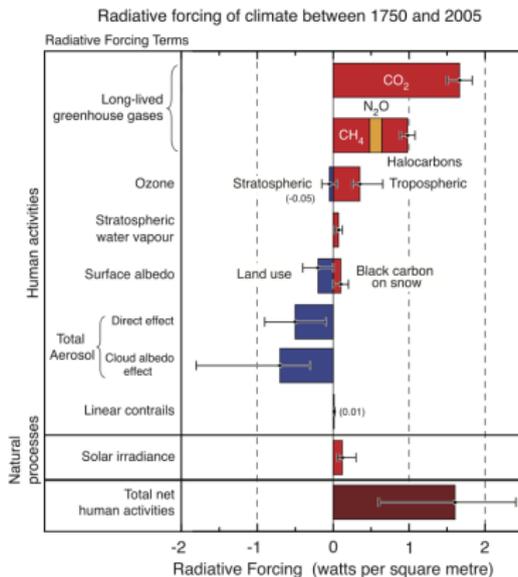


Les flux et stocks de CO_2 , avec les contributions anthropiques

La Notion de Rétroaction

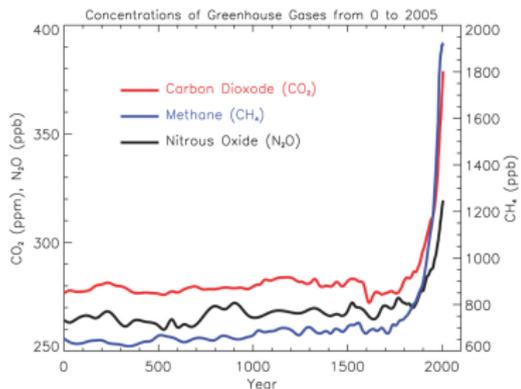
- Rétroaction négative : les océans et la végétation ont agi comme des puits de carbone pendant ces dernières décennies.
- Rétroaction positive : effet des glaces (glaciers arctiques, antarctiques et glaciers) et de leur albédo.
- Rétroaction positive : eau.
- Rétroaction négative : aérosols.

Comparaison de l'Effet des Facteurs de Réchauffement

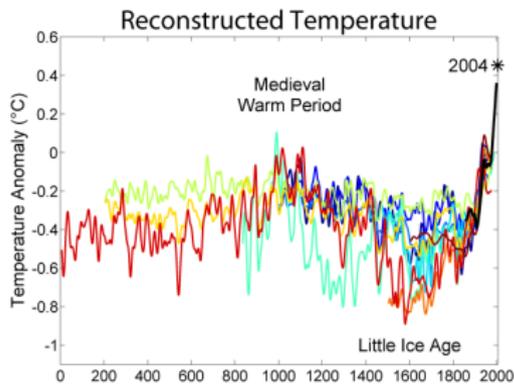


Facteurs de réchauffement (ou refroidissement) depuis 1750 (forçage en 2005, en W/m^2 , IPCC)

Accroissement du CO₂ et Augmentation de Température



Concentration de CO₂
atmosphérique (IPCC)



Température (R.A. Rohde,
NOAA)

Le CO_2 Anthropique Explique le Réchauffement Actuel

- Les mécanismes de base du climat sont compris.
- Nous observons un réchauffement en ce moment du à l'augmentation anthropique des gaz à effet de serre, en particulier le CO_2 .
- Ce réchauffement, de l'ordre de 1°C pour les décennies passées, est prédit de quelques degrés dans les décennies qui viennent.
- Les mécanismes naturels du cycle du carbone (océan, atmosphère) sont pour l'instant une rétroaction positive (stabilisatrice).
- Pouvons nous faire des projections pour l'avenir ? Quel sera l'ampleur des changements ? Ces rétroactions peuvent-elles devenir négatives ?

Outline

- 1 Les observations et les mécanismes du climat
 - Les observations du réchauffement climatique
 - Les principaux mécanismes du climat
 - Causes anthropiques du réchauffement climatique
- 2 **Impact, risques et action**
 - **Incertitudes et projections**
 - Impact
 - La nécessité et les formes de l'action
- 3 Compléments et réponse aux questions les plus courantes
 - Le climat sur les échelles de temps longues
 - Effets des cycles naturels et du soleil

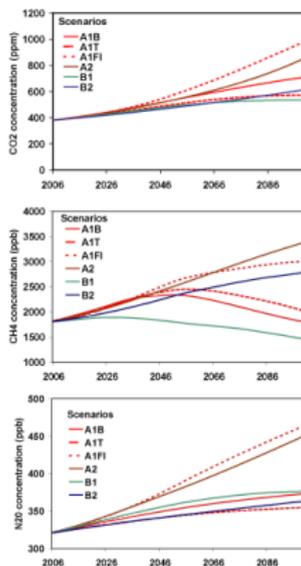
De Nombreuses Sources d'Incertitude pour la Prédiction

- Rôle de l'homme ?
- Rôle à long terme des océans, de la végétation, des glaces ?
- Rétroactions positives et négatives et leur quantification.

Comment Répondre à ces Incertitudes ?

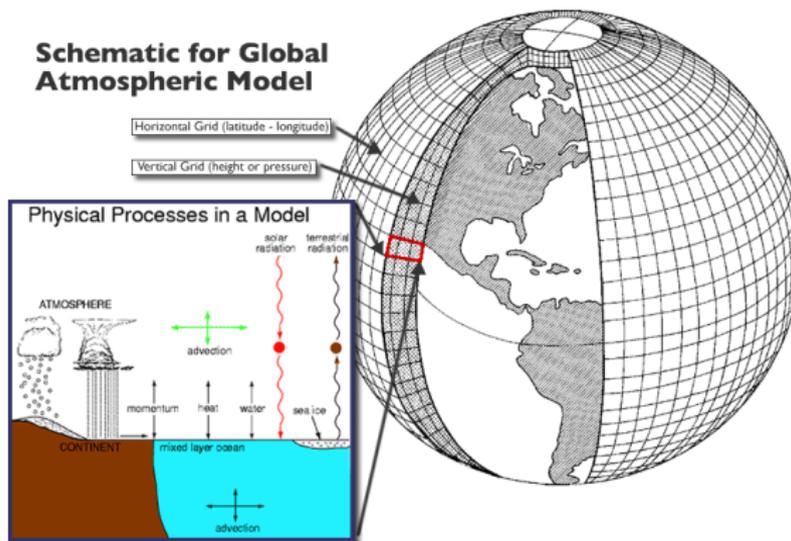
- Scénario d'émission.
- Modèles.
- Une meilleure observation et compréhension des climats actuels.
- Etude des climats passés.

Différents Scénarios d'Emission (C7)



Exemples de scénario d'émission du GIEC (SRES)

Qu'est ce qu'un Modèle Climatique ?



- Sommes nous capables de prédire le climat futur grâce à ces modèles ? Cela dépend beaucoup de l'échelle de temps considéré et la question posée.
- Film océans GFDL-NOAA

Outline

- 1 Les observations et les mécanismes du climat
 - Les observations du réchauffement climatique
 - Les principaux mécanismes du climat
 - Causes anthropiques du réchauffement climatique
- 2 **Impact, risques et action**
 - Incertitudes et projections
 - **Impact**
 - La nécessité et les formes de l'action
- 3 Compléments et réponse aux questions les plus courantes
 - Le climat sur les échelles de temps longues
 - Effets des cycles naturels et du soleil

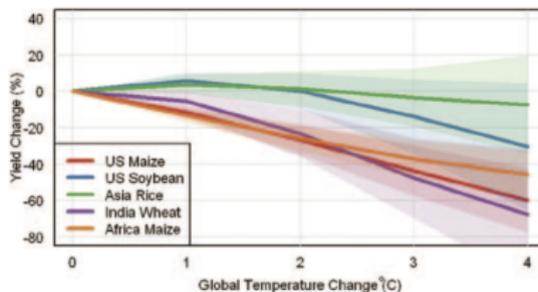
Evaluation des Impacts Futurs

- Changements de température.
- Précipitations.
- Événements extrêmes (inondations, vagues de chaleur).
- Feux.
- Niveau des océans et côtes maritimes.
- Ecosystèmes.
- Agriculture.
- Etc.

Ecosystèmes

- Possibilité d'adaptation, parfois, mais pas toujours (population adaptées aux climats montagnards, etc.).
- Décalages entre les rythmes des différentes espèces.
- Dépend de façon essentiel du lieu et de l'écosystème.

Agriculture



Effets d'un accroissement de température sur l'agriculture

- Croissance plus rapide des végétaux associée à un taux de CO_2 plus élevé.
- Pas nécessairement positif. Extrêmes plus intenses (vagues chaude, sécheresse, inondation).
- **Globalement impact négatif. Croissance de cet impact négatif avec l'accroissement de température.**

Outline

- 1 Les observations et les mécanismes du climat
 - Les observations du réchauffement climatique
 - Les principaux mécanismes du climat
 - Causes anthropiques du réchauffement climatique
- 2 **Impact, risques et action**
 - Incertitudes et projections
 - Impact
 - La nécessité et les formes de l'action
- 3 Compléments et réponse aux questions les plus courantes
 - Le climat sur les échelles de temps longues
 - Effets des cycles naturels et du soleil

Les Réponses pour Limiter les Changements Climatique et S'Adapter

- Limitation directe des émissions de gaz à effet de serre pérennes (CO₂, méthane).
- Adaptation aux changements les plus néfastes et aux risques accrus.
- Amélioration de notre compréhension du système climatique et de nos capacités de prévision et d'anticipation.

Comment Réduire l'Emission de Gaz à Effet de Serre ?

- Réduire le demande d'énergie et de biens de consommation.
- Amélioration de l'efficacité énergétique.
- Développer les sources d'énergie sans carbone (énergies renouvelables, solaire, éolien, hydroélectrique, géothermique, etc.).
- Captures du CO_2 .

Quelles sont les Questions Pertinentes ?

- A quels niveaux de réchauffement les risques sont-ils acceptables étant donné le coût pour les limiter ?
- Quels niveaux d'émissions permettront de laisser la terre à ce niveau de réchauffement ?
- Pour garder un niveau de CO_2 constant pendant quelques décennies, il faut réduire de 80% les niveaux d'émission de CO_2 dans les pays développés.
- Ce qui compte, ce sont les émissions cumulées de CO_2 et non pas le rythme.

Comment Rendre cette Action Efficace (C9)

- Associer un prix aux émissions de carbone (taxe carbone, droits d'émission).
- Réglementation des émissions.
- Aides gouvernementales aux politiques de réduction du carbone (chauffage des particuliers, développement de technologies propres, etc.).
- Développer l'information et l'éducation autour de ces problèmes.

Pourquoi Agir s'il y a Toujours des Incertitudes sur les Risques (1) ?

- Les éléments certains ou avérés comme très probable suffisent à conduire à l'action.
- Même en améliorant la connaissance des risques, un certain degré d'incertitude subsistera nécessairement.
- L'incertitude n'est pas une raison pour l'inaction.
- Les risques sont tels, qu'un effort d'assurance sur l'avenir est attitude la plus raisonnable.
- L'émission de CO₂ a un impact irréversible sur le climat qui durera pendant des siècles ou des millénaires.

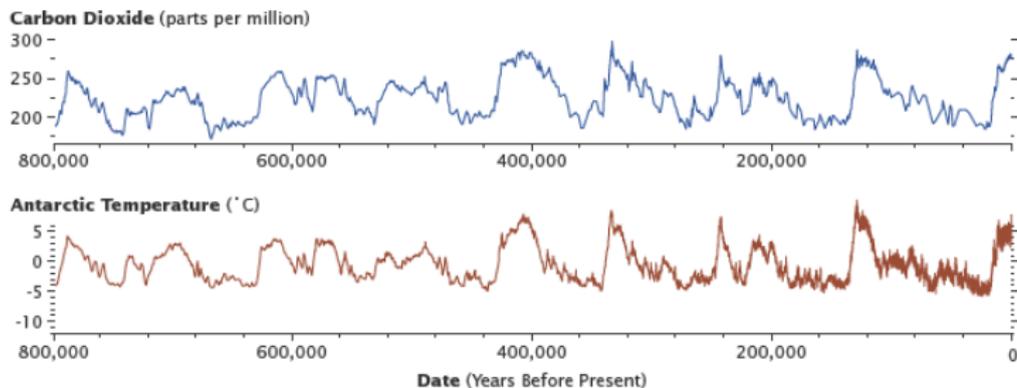
Pourquoi Agir s'il y a toujours des Incertitudes sur les Risques (2) ? (C10)

- Il s'agit toujours de peser les risques et les bénéfices, comme dans la plupart des actions et entreprises humaines.
- Plus tôt la réduction d'émission de gaz à effet de serre sera engagée, et moins elle sera coûteuse.
- Nous devons avant tout ne pas nous engager dans des décisions qui nous contraignent à long terme dans des politiques potentiellement dangereuses.
- La réduction de l'émission de CO₂, si elle s'avérait inutile malgré toutes les conclusions actuelles contraires, pourrait être stoppée du jour au lendemain.

Outline

- 1 Les observations et les mécanismes du climat
 - Les observations du réchauffement climatique
 - Les principaux mécanismes du climat
 - Causes anthropiques du réchauffement climatique
- 2 Impact, risques et action
 - Incertitudes et projections
 - Impact
 - La nécessité et les formes de l'action
- 3 Compléments et réponse aux questions les plus courantes
 - Le climat sur les échelles de temps longues
 - Effets des cycles naturels et du soleil

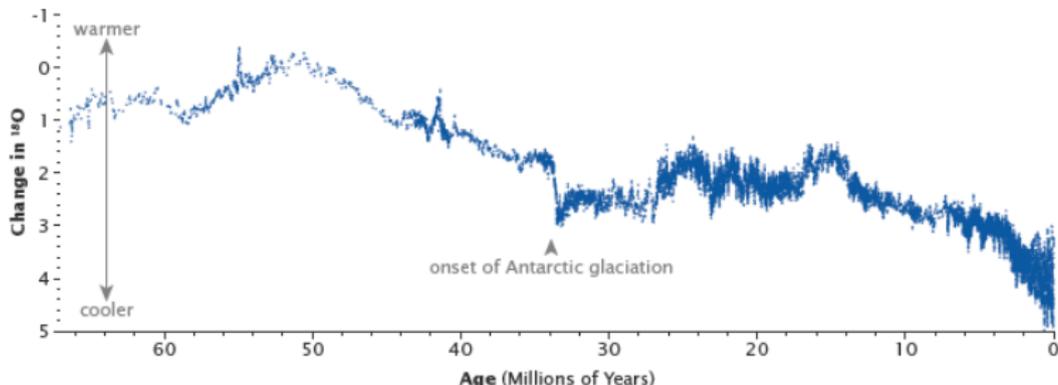
Le Cycle Glaciaire-Interglaciaire du Carbone (C11)



Corrélation entre CO_2 atmosphérique et température

- Les changements de température précèdent ceux de CO_2 (800 ans). Le CO_2 est une rétroaction positive (biomasse).

Le Cycle Lent du Carbone (C12)



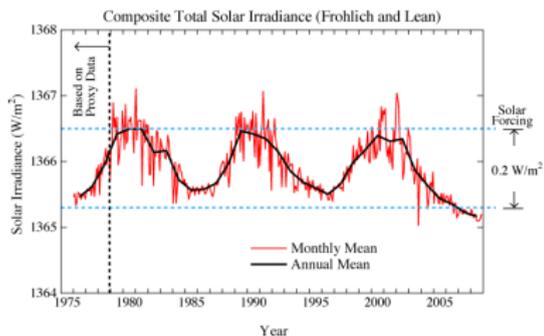
Taux d'oxygène lourd/léger (corrélé à la température).

- 50 millions d'années : **apparition de l'Himalaya** conduisant.
- $\text{CO}_2 \rightarrow$ acide carbonique \rightarrow érosion \rightarrow carbonate de calcium \rightarrow sédiments.

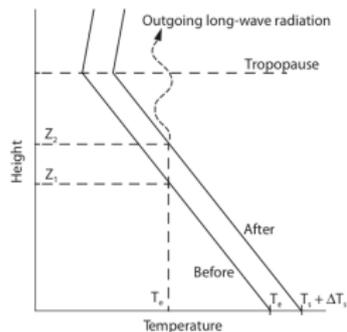
Outline

- 1 Les observations et les mécanismes du climat
 - Les observations du réchauffement climatique
 - Les principaux mécanismes du climat
 - Causes anthropiques du réchauffement climatique
- 2 Impact, risques et action
 - Incertitudes et projections
 - Impact
 - La nécessité et les formes de l'action
- 3 Compléments et réponse aux questions les plus courantes
 - Le climat sur les échelles de temps longues
 - Effets des cycles naturels et du soleil

Le Soleil Cause-t-il le Réchauffement Actuel? (C13)

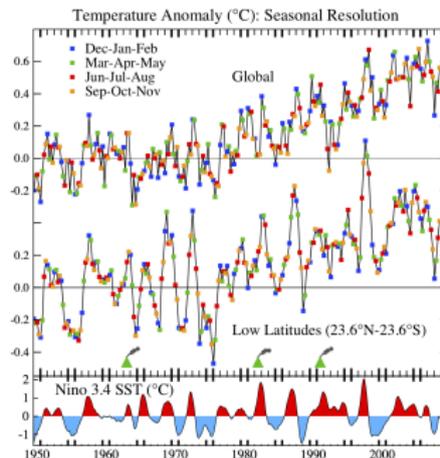


Variations de
l'ensoleillement



Variation de la structure atmosphérique
pour un forçage par effet de serre

Le Réchauffement Actuel est-il un Cycles Naturel? (C14)



Moyennes saisonnières des anomalies de températures de basses altitude globales (/ 1951-1980)

- El Nino et les éruptions volcaniques sont des exemples de mécanisme naturels de variations climatiques.