

SCA-2611 Introduction à la météorologie

LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Lecture facultative : Ahrens 2009, *Meteorology Today*,
pp. 439-499

Qu'est-ce que le *climat* ?

- ⦿ **La météo**, c'est le temps qu'il fait *aujourd'hui, maintenant*. La météo est la succession d'événements ponctuels se succédant dans le temps.
- ⦿ **Le climat**, c'est la *moyenne* de la météo pour une région, selon une période donnée.
 - Ex.: Les **normales climatiques** pour Montréal sont la moyenne des températures et des précipitations pour cette localité selon les mesures météorologiques prises sur une période de **30 ans**. Les normales climatiques présentement utilisées sont basées sur les données de la période 1970-2000.

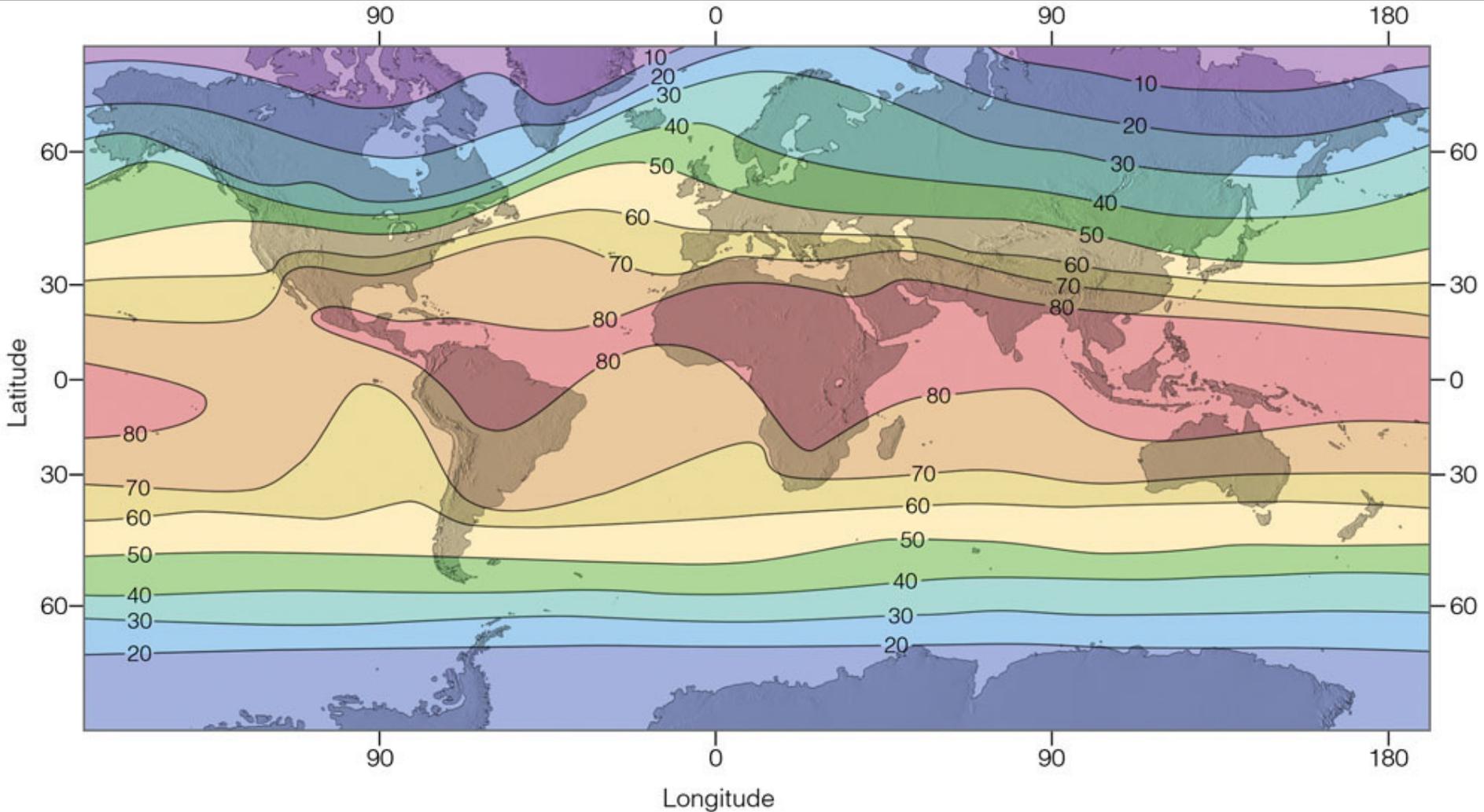
Les contrôles du climat pour une région donnée

- ⦿ L'intensité du rayonnement solaire et sa variation selon la latitude
- ⦿ La distribution des océans et des terres émergées
- ⦿ Les courants marins
- ⦿ Les vents dominants
- ⦿ La position moyenne des systèmes de hautes et de basses pressions
- ⦿ Les chaînes de montagnes
- ⦿ L'altitude

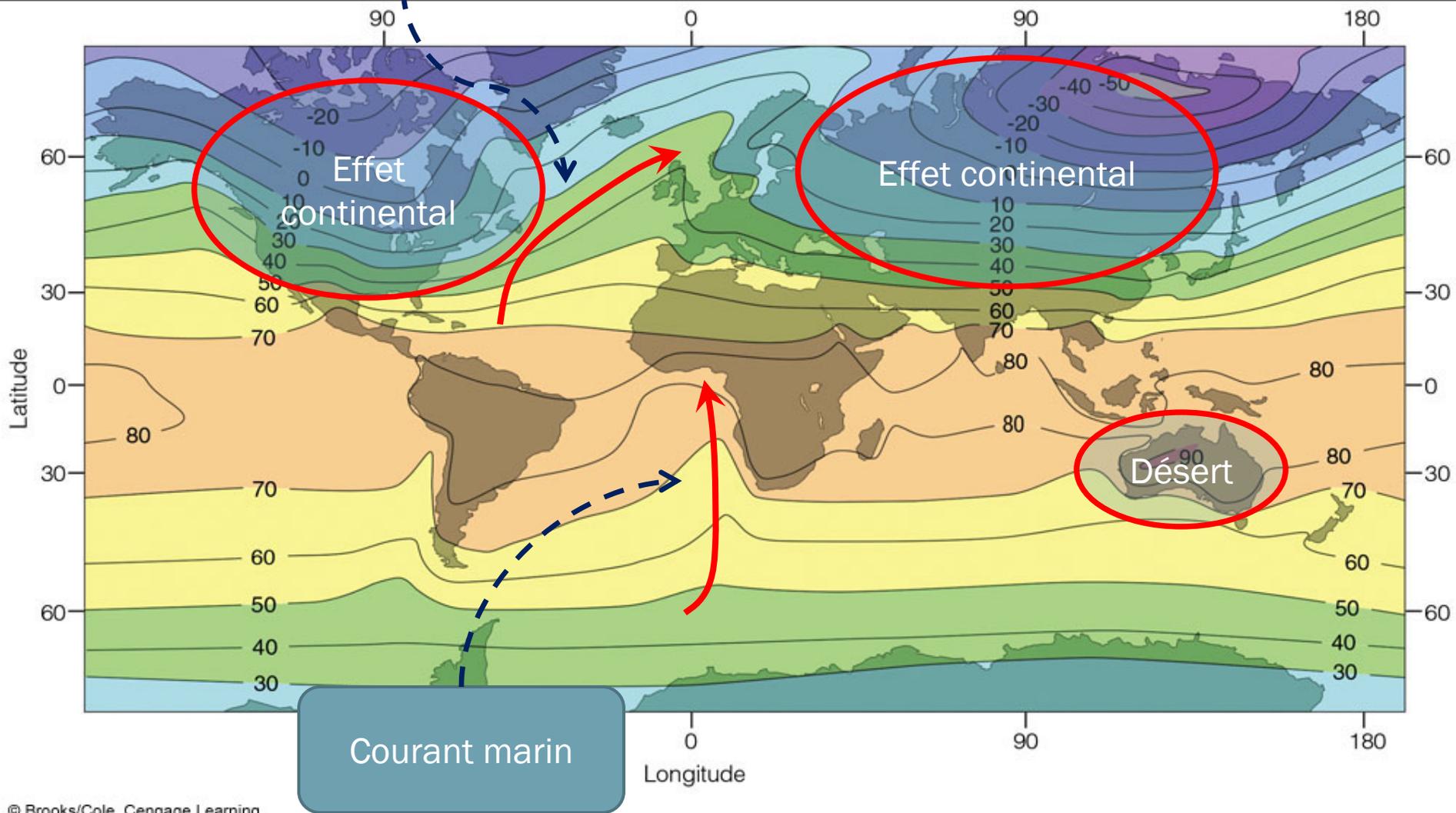
Distribution globale des températures moyennes

- Isothermes orientées est-ouest avec températures diminuant de l'équateur vers les pôles
- Déviations des isothermes dues aux contrastes terre-mer et aux courants marins
- Les températures les plus chaudes au monde sont dans les sous-tropiques de l'hémisphère Nord (et non pas le long de l'Équateur)
 - Branche descendante de la cellule de Hadley
 - Air sec, ciels clairs et ensoleillement direct et intense
- Les températures les plus froides se confinent à l'intérieur des grandes masses continentales durant l'hiver
 - Antarctique
 - Eurasie
 - Amérique du Nord
- L'hémisphère Sud est en moyenne un peu plus froid que l'hémisphère Nord
 - Présence de l'Antarctique
 - Moins de terres émergées, plus d'océan

Températures moyennes annuelles (°F)

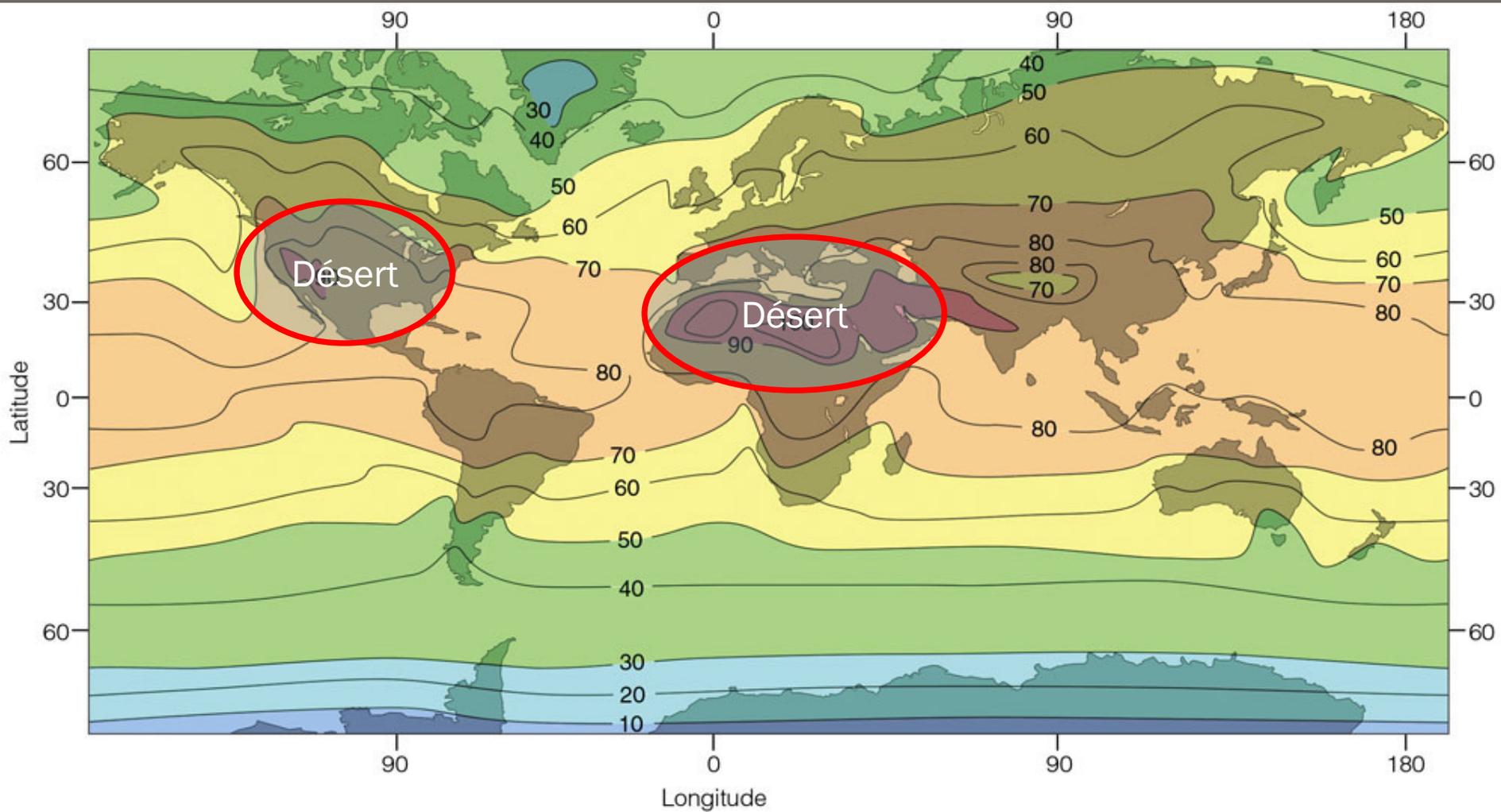


Courant marin
(Gulf Stream)



© Brooks/Cole, Cengage Learning

Températures moyennes de surface en janvier (°F)

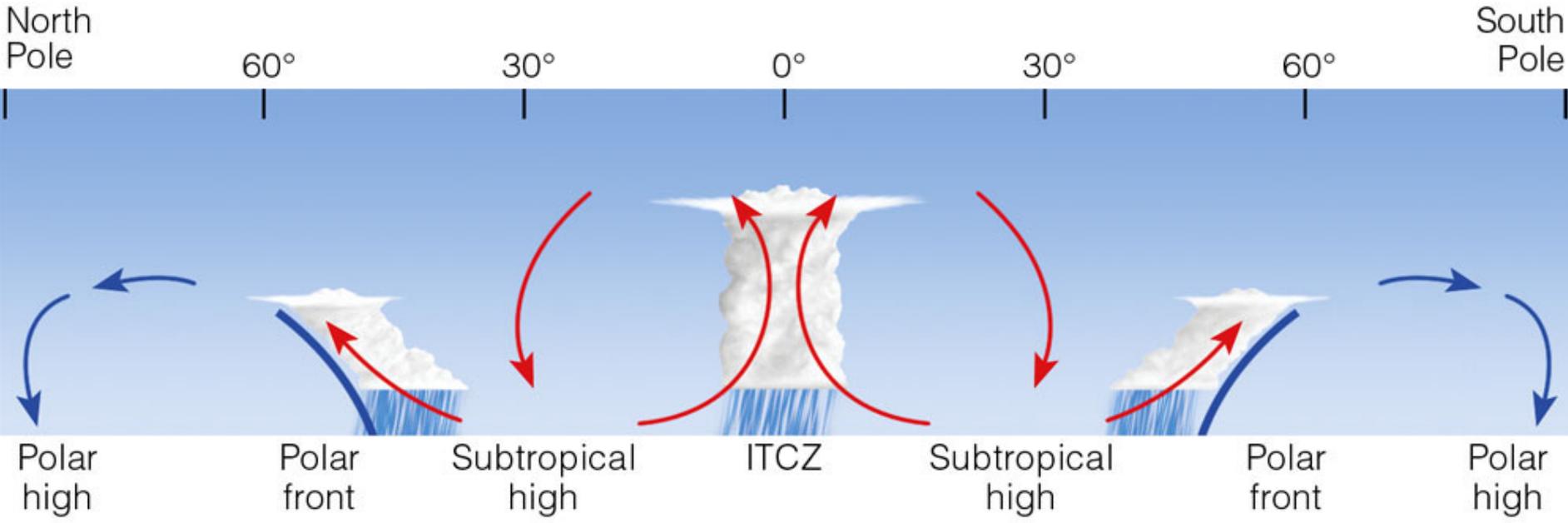


© Brooks/Cole, Cengage Learning

Températures moyennes de surface en juillet (°F)

Distribution globale des régimes de précipitation

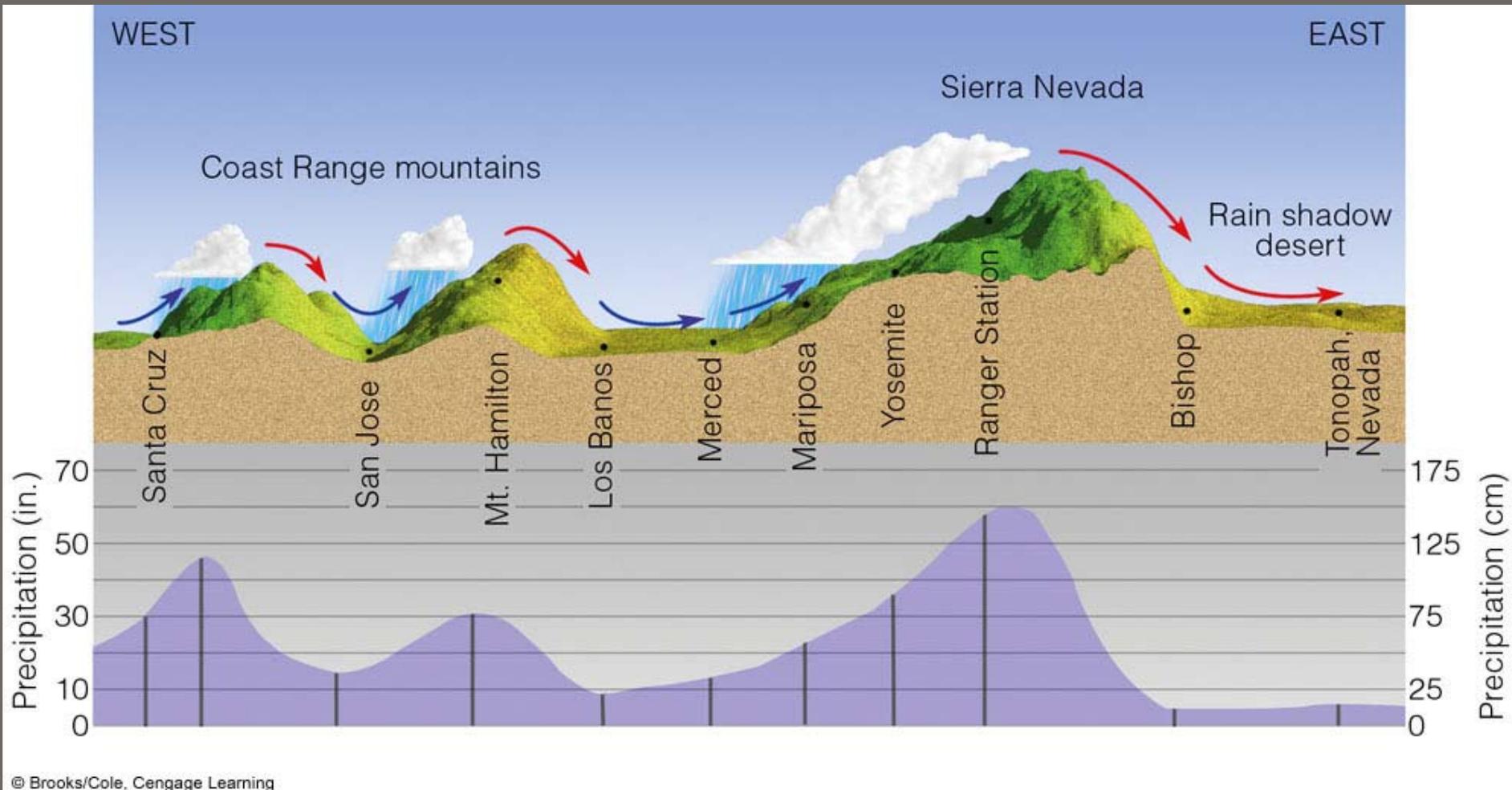
- À grande échelle, les régimes de précipitation de la planète sont gérés par la présence des cellules de hautes et basses pressions semi-permanentes
 - Basses pressions : ascension de l'air et temps pluvieux
 - Hautes pressions : subsidence de l'air et temps sec



Polar high | Polar front | Subtropical high | ITCZ | Subtropical high | Polar front | Polar high

All seasons dry	All seasons wet	Dry summer/wet winter	All seasons dry	Wet summer/dry winter	All seasons wet	Wet summer/dry winter	All seasons dry	Dry summer/wet winter	All seasons wet	All seasons dry
-----------------	-----------------	-----------------------	-----------------	-----------------------	-----------------	-----------------------	-----------------	-----------------------	-----------------	-----------------

L'effet des chaînes de montagnes sur la pluviosité



Les extrêmes de précipitations

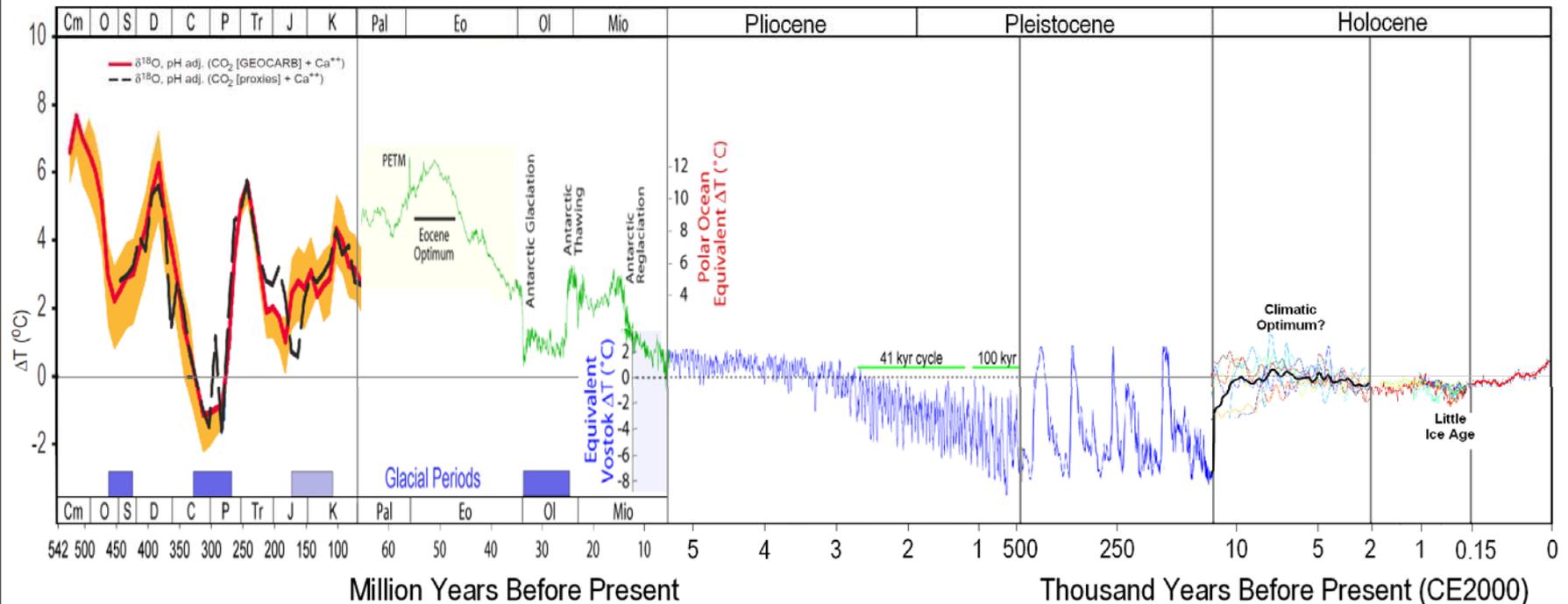
- ⊙ Les endroits *les plus pluvieux* de la planète sont systématiquement situés sur les flancs au vent des montagnes dans les régions tropicales
 - Cherrapunji (Inde, au pied des Himalayas), a reçu, lors de la mousson de 1861, 9300 mm de pluie en un seul mois !
- ⊙ Les endroits *les plus secs* sur la planète sont dans les régions polaires
 - L'humidité absolue est plus élevée en plein Sahara qu'en Antarctique !

Le climat de la Terre dans le passé

- ◎ Paléoclimatologie : étude des climats du passé
- ◎ Le climat de la Terre a été très différent dans le passé.
 - Durant les 2/3 des derniers 400 millions d'années, des preuves géologiques démontrent des concentrations de CO₂ jusqu'à 20x plus élevées, et des températures 8 °C à 15 °C plus chaudes qu'aujourd'hui.
 - L'autre 1/3 a subi des périodes de *glaciations* (nous sommes dans une telle période)

Les températures du passé (jusqu'à 500 millions d'années)

Temperature of Planet Earth



© Global Warming Art (<http://www.globalwarmingart.com>)

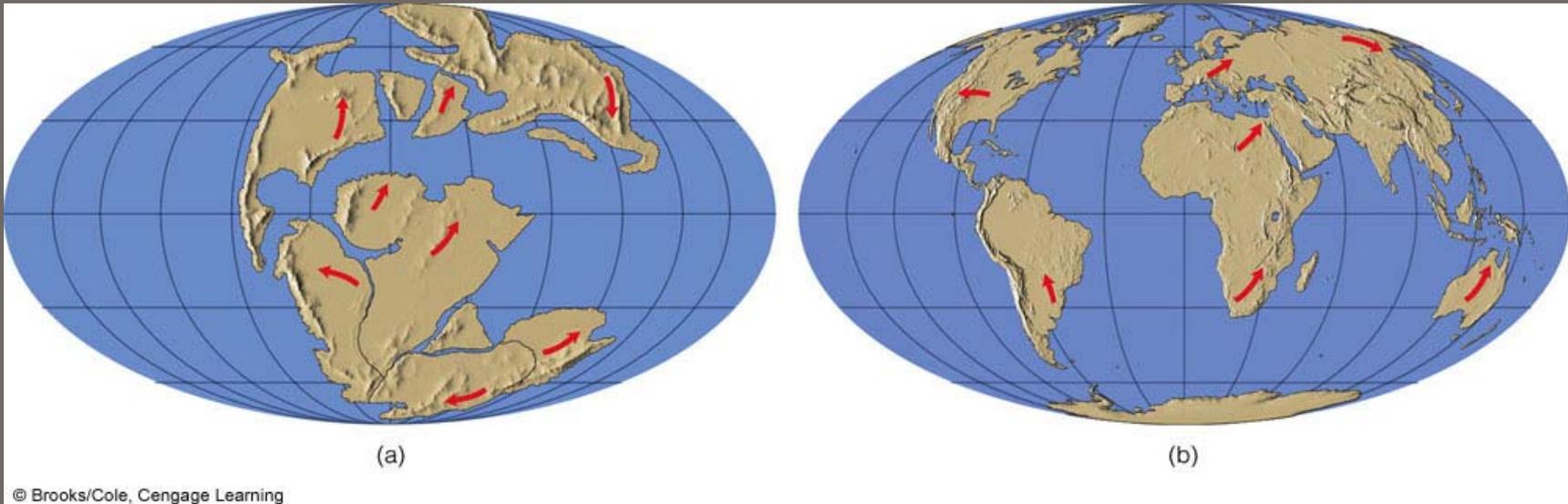
Faits saillants de l'histoire des climats de la Terre

- À l'échelle géologique, la planète a alterné entre des climats « chauds » (« hot house ») et « froids » (« cold house »), causant des variations globales de $\sim 5-10^{\circ}\text{C}$
- Les climats « chauds » semble être plutôt la norme depuis ~ 500 millions d'années
- Nous sommes présentement dans un climat « froid » depuis 2,5 millions d'années, caractérisé par des glaciations à intervalles de 100 000 ans, entre-coupées par des *périodes inter-glaciaires* plus chaudes

Faits saillants de l'histoire des climats de la Terre

- ⊙ L'historique du CO₂ est relativement bien corrélé avec celui des températures
- ⊙ Les alternances entre les climats « chauds » et « froids » seraient dues en partie à des périodes d'activité volcanique particulièrement intenses suivies d'accalmies
 - Volcanisme intense = émissions intense de CO₂ – les concentrations auraient atteint jusqu'à 20x celles d'aujourd'hui !
 - Accalmies = CO₂ réabsorbé par les océans
 - Ces cycles auraient duré des centaines de millions d'années : la dernière époque glaciaire avant celle que nous vivons date d'il y a 300 millions d'années
- ⊙ ...mais d'autres hypothèses sont possibles...

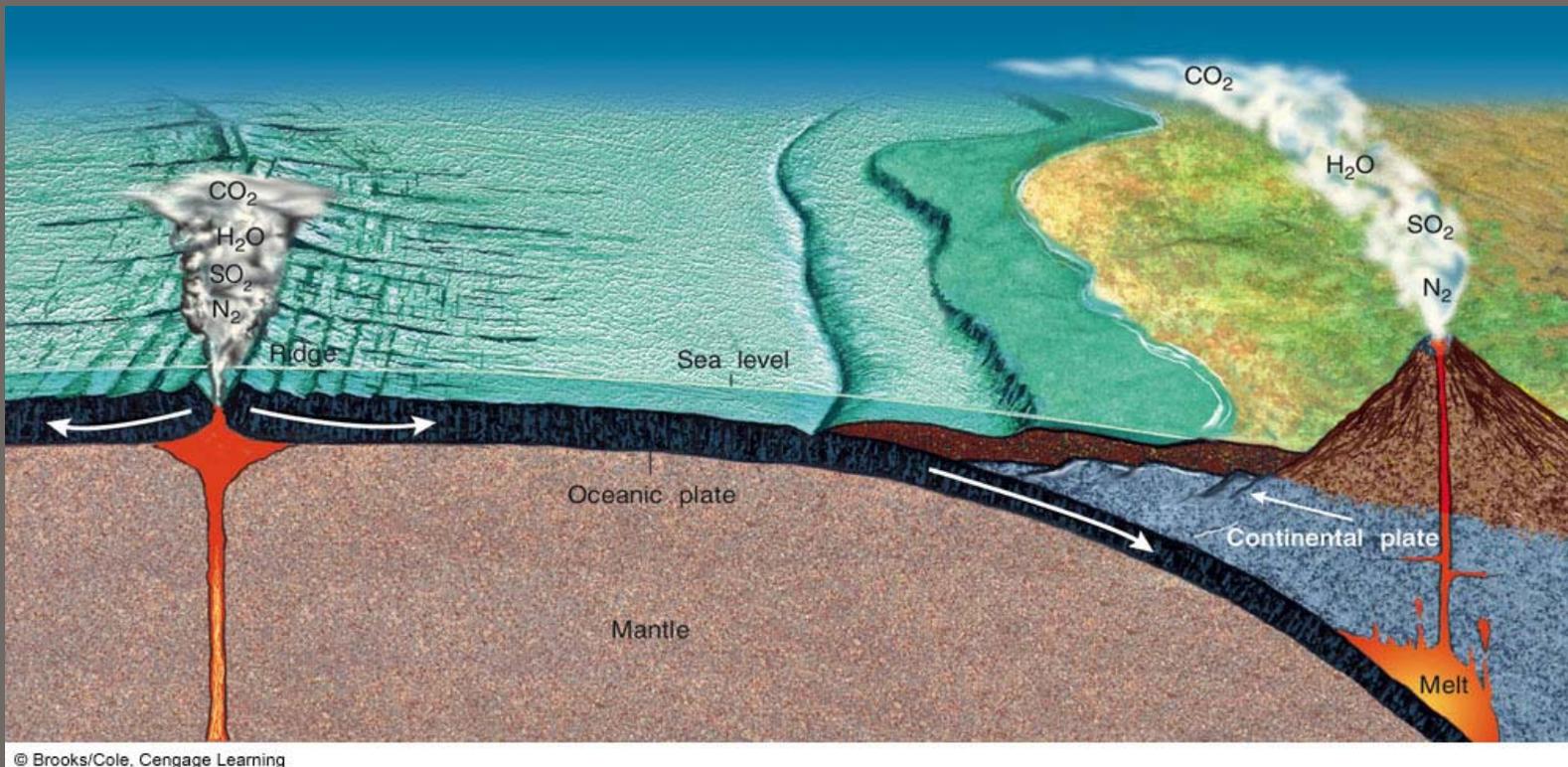
La croûte terrestre est divisée en une série de « plaques » flottant sur le manteau terrestre et se déplaçant à des vitesses de quelques cm par année.



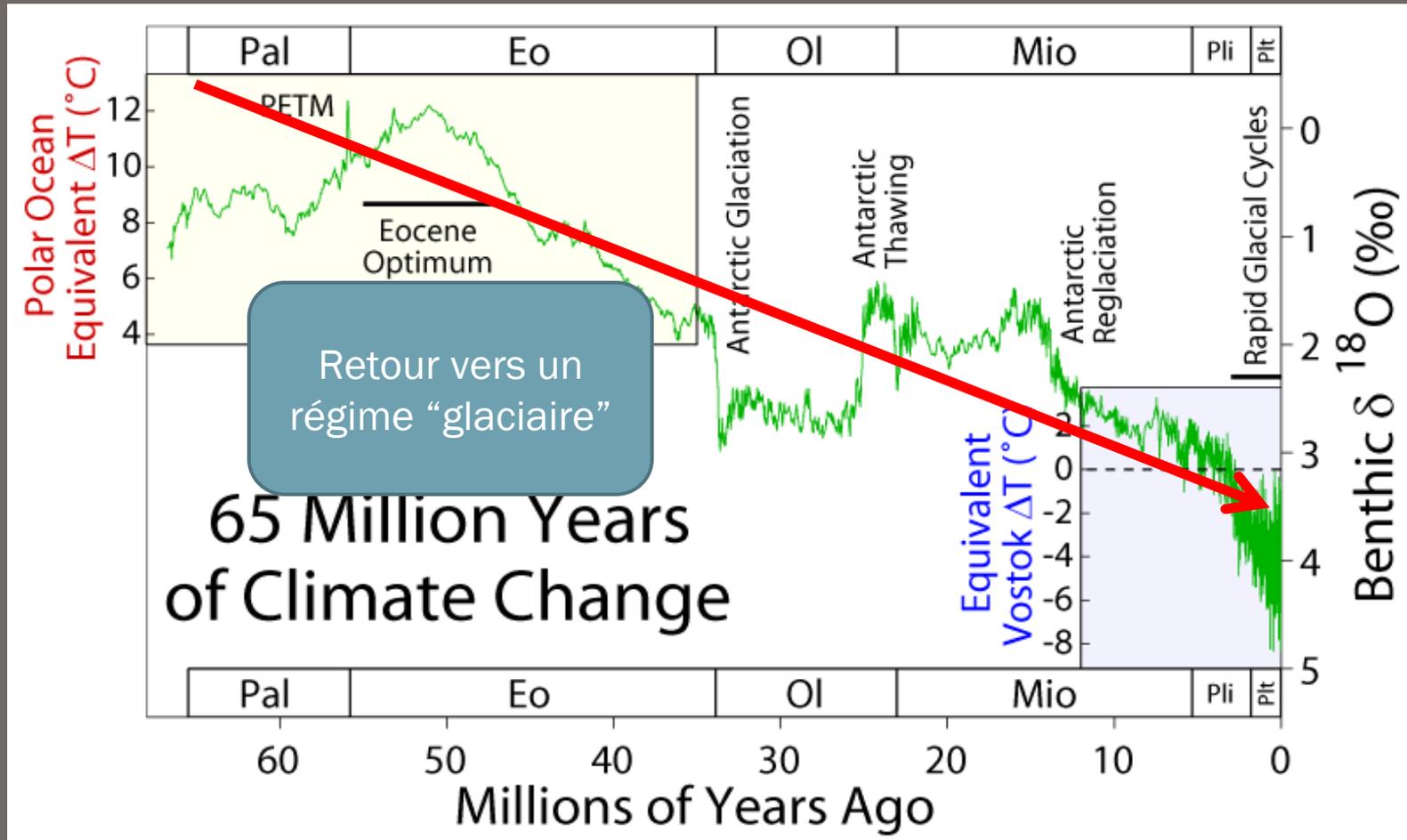
Lorsque ces plaques divergent l'une de l'autre à une plus grande vitesse, l'activité volcanique globale augmente sensiblement, augmentant les émissions de gaz carbonique, et forçant la Terre à se réchauffer.

Un telle activité volcanique semble avoir été déclenchée par le démantèlement du super-continent de la Pangée il y a 300 millions d'années, avec l'ouverture de l'océan Atlantique.

Avec le temps, le volcanisme s'est graduellement apaisé, et aujourd'hui nous vivons dans un climat de plusieurs °C plus froids qu'à cette époque lointaine.



Depuis 65 millions d'années



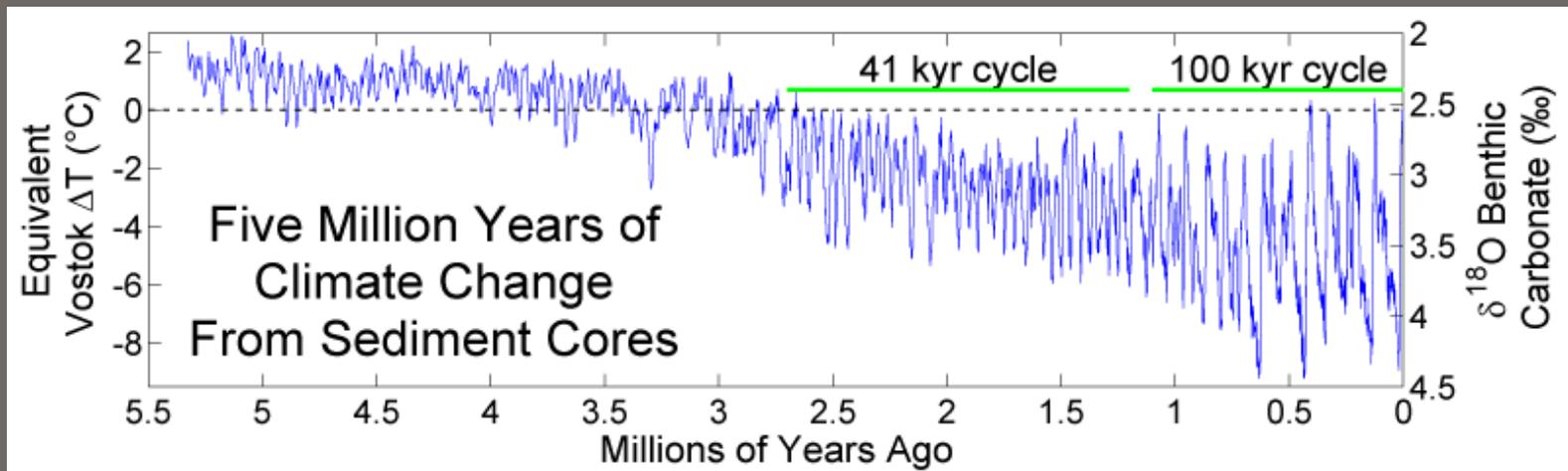
© Global Warming Art (<http://www.globalwarmingart.com>)

Les périodes glaciaires d'aujourd'hui

- ⦿ Depuis 2,5 millions d'années, la Terre est au prise avec une autre période de climat « froid » (la dernière étant il y a 300 millions d'années, juste avant le démantèlement de la Pangée et la ressurgence de volcanisme intense)
- ⦿ Cette période est caractérisée par des oscillations des températures globales de 5-6 °C selon des cycles d'environ 100 000 ans
- ⦿ Les périodes les plus froides sont nommées *périodes glaciaires*, et les périodes plus chaudes *périodes inter-glaciaires*.
- ⦿ Nous sommes présentement dans un inter-glaciaire qui a débuté il y a environ 8000 ans

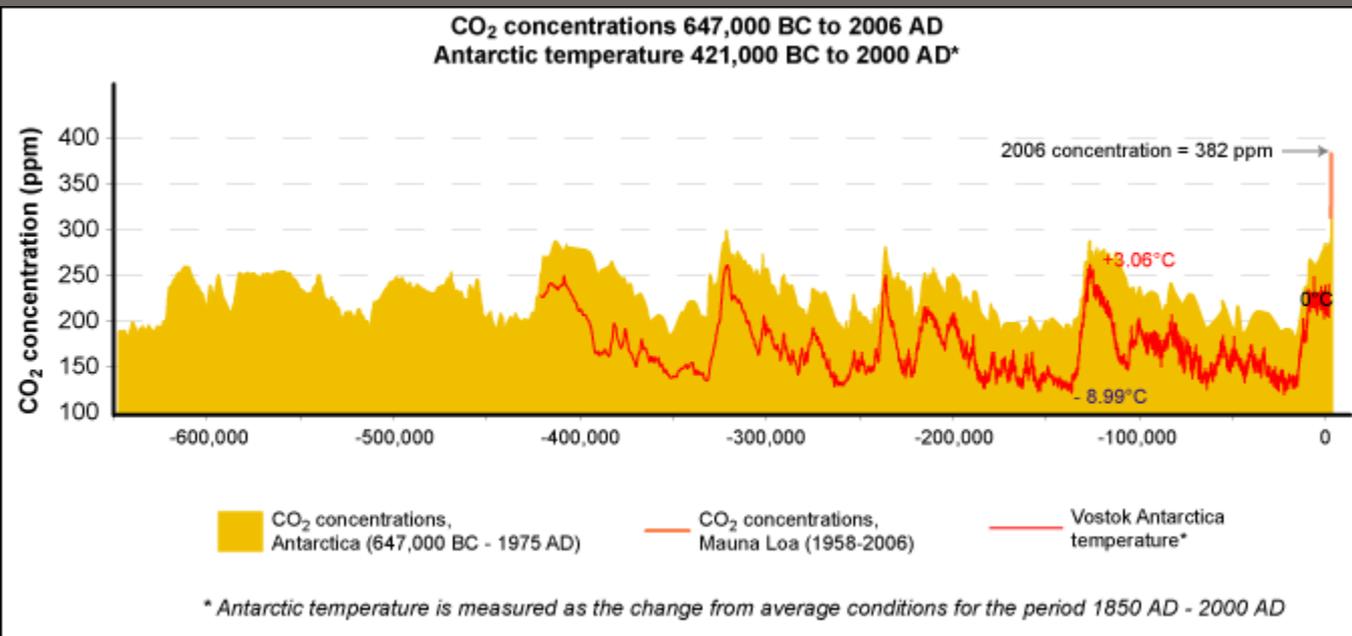
Le déclenchement des périodes glaciaires vers 2,5 millions d'années

Notez les oscillations de températures débutant vers 2,5 millions d'années...



© Global Warming Art (<http://www.globalwarmingart.com>)

Les périodes glaciaires d'aujourd'hui



Notez les cycles de 100 000 ans

Nous sommes présentement dans une période interglaciaire qui a débuté il y a 8000 ans.

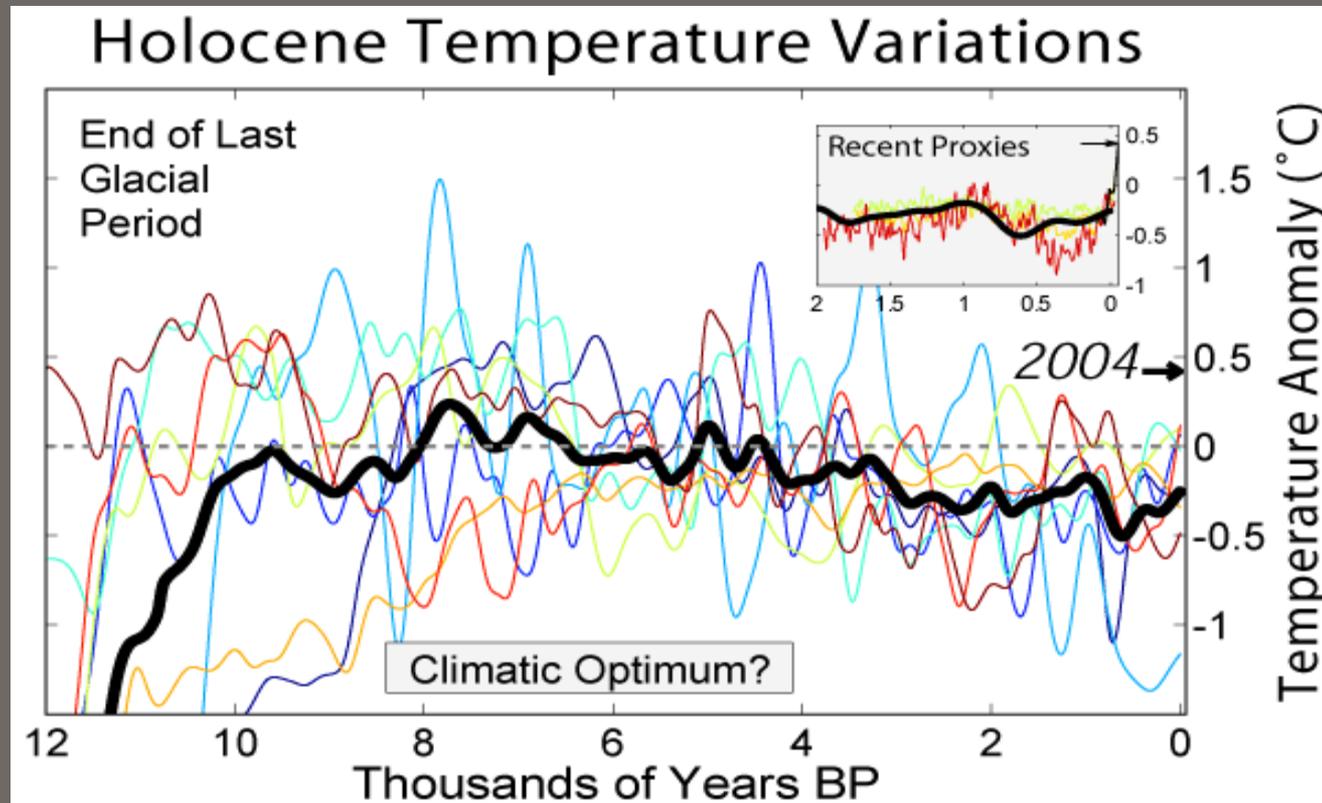
L'hémisphère Nord il y a 18 000 ans

... Au creux de la dernière période glaciaire



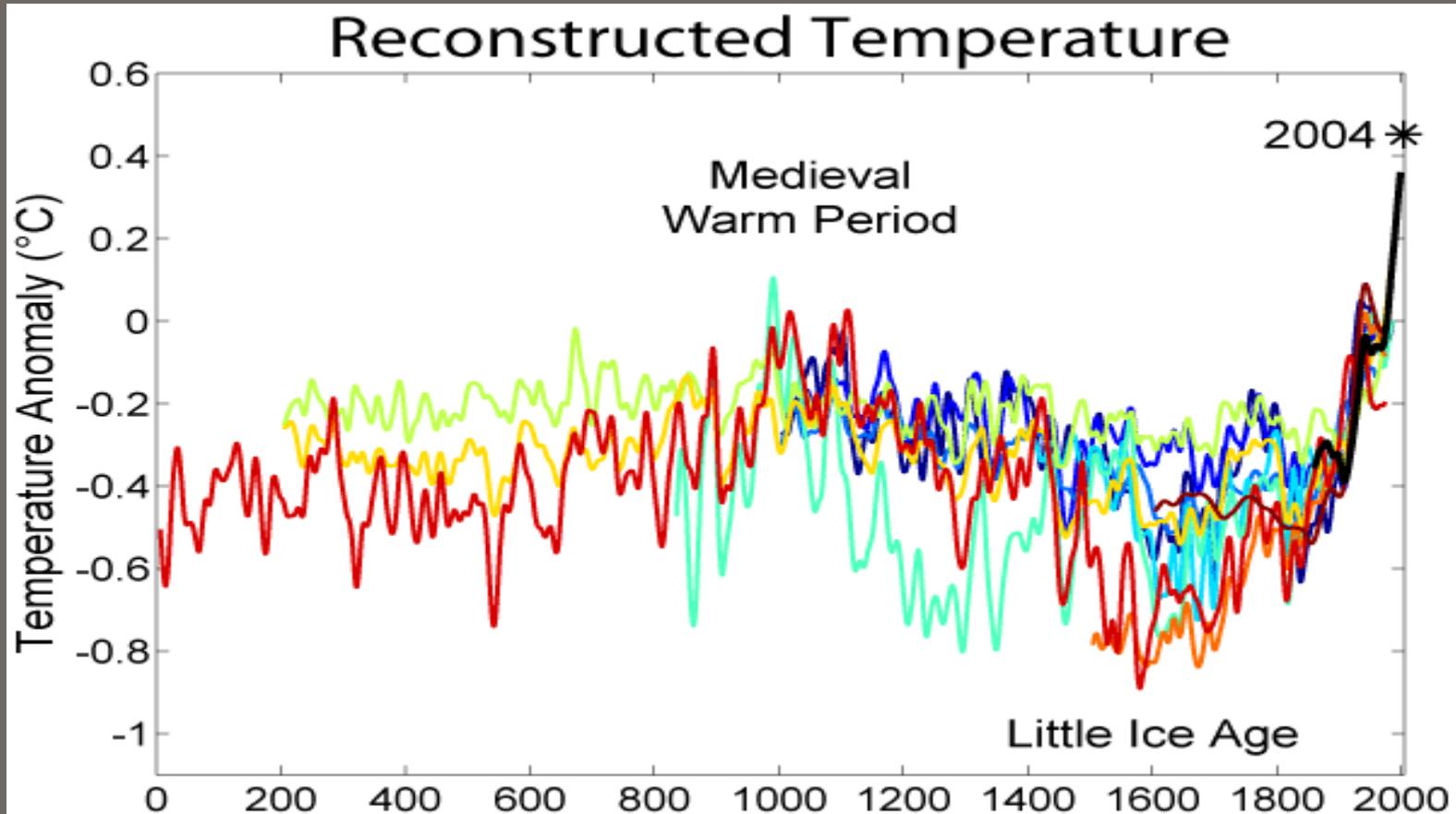
© Brooks/Cole, Cengage Learning

Le « rebondissement » des températures à la sortie de la dernière époque glaciaire



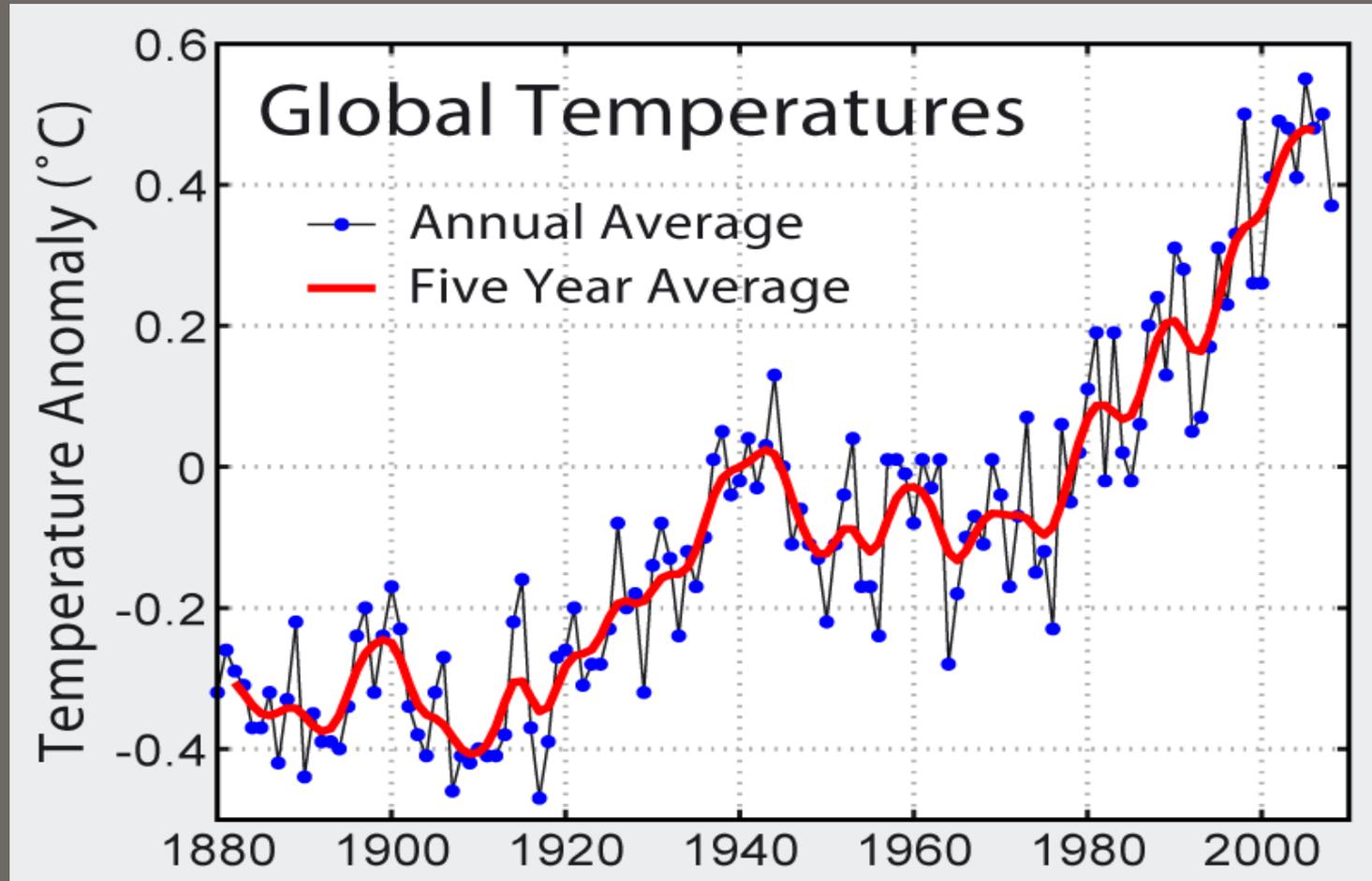
© Global Warming Art (<http://www.globalwarmingart.com>)

Le températures de l'hémisphère Nord depuis 2000 ans



© Global Warming Art (<http://www.globalwarmingart.com>)

Les températures globales depuis 120 ans



Qu'observe-t-on depuis 120 ans ?

- Une première augmentation entre 1900-1940
- Stagnation des températures entre 1940-1980
- Reprise accélérée du réchauffement depuis 1980

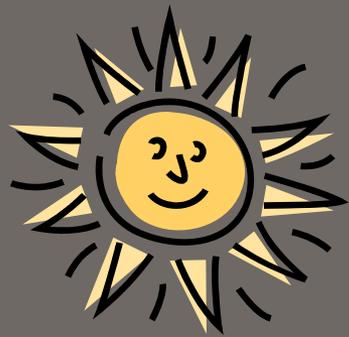
Réchauffement inhabituel ?

- ⦿ Les températures depuis 1990 n'ont probablement jamais été aussi chaudes depuis au moins 2000 ans
- ⦿ Encore plus important : *le taux de réchauffement* depuis 1980 est sans précédent et est 20x plus rapide que le réchauffement subit depuis la fin de la dernière période glaciaire il y a 14 000 ans
 - 2°C par siècle depuis 1980 comparativement 1°C par millénaire depuis la dernière période glaciaire.

Comment le climat change-t-il ?

- ⦿ Ultimement, le climat de la planète change lorsqu'il y a *déséquilibre à long terme* entre l'énergie reçue du Soleil et celle ré-émise vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge.
- ⦿ Tout changement climatique se résume à cela !

Équilibre climatique



Ondes courtes
(lumière visible)



=



Ondes longues
(infrarouge)

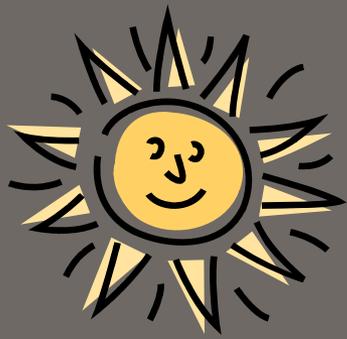
Climat normal

Espace

Atmosphère

Déséquilibre climatique

Âge glaciaire : + froid



≠

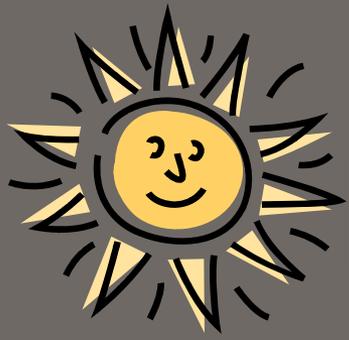


Espace

Atmosphère

Ondes courtes
(lumière visible)

Ondes longues
(infrarouge)



Déséquilibre climatique

Augmentation de l'effet de serre: + chaud



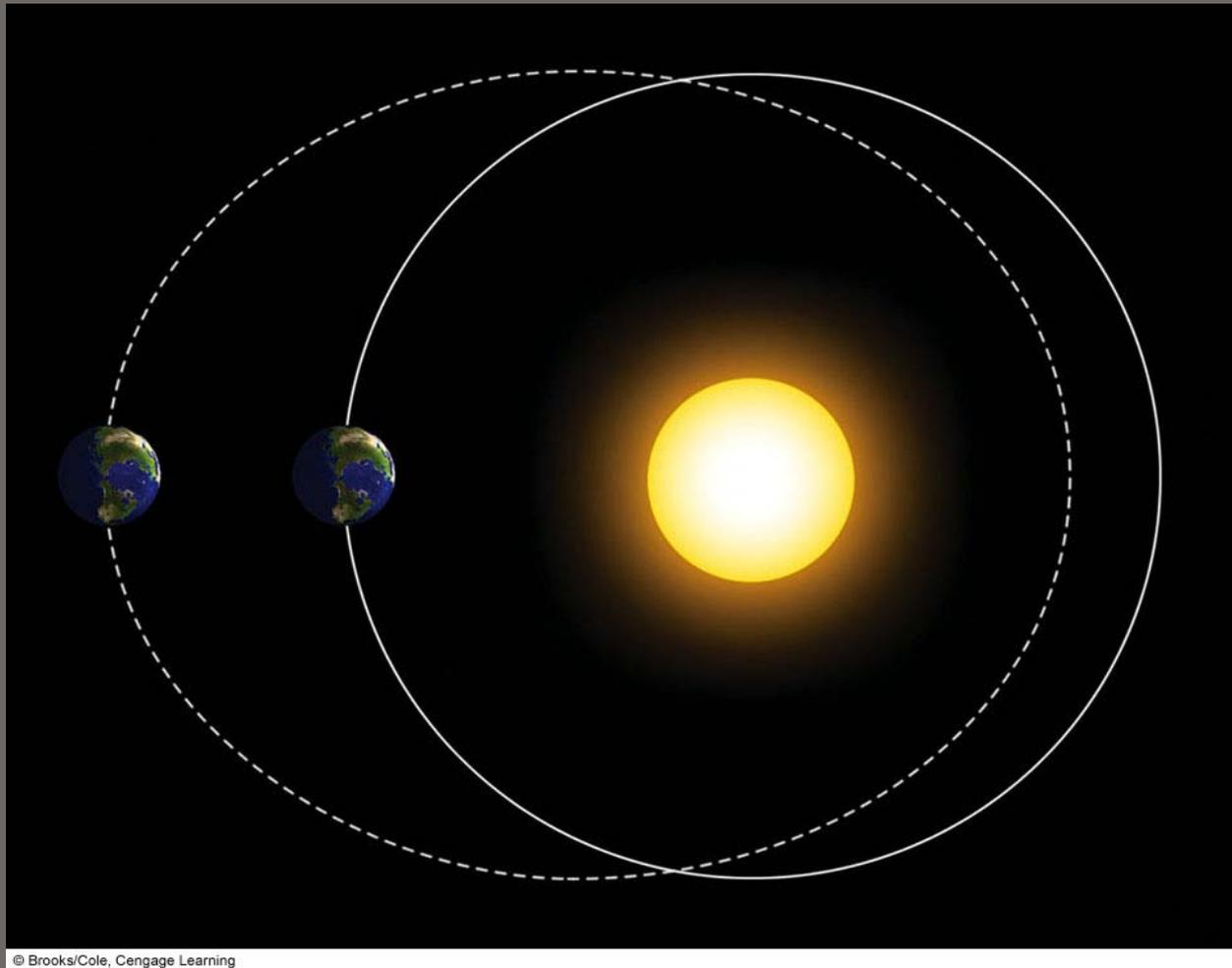
Facteurs causant un changement global du climat

- ⦿ Comment perturber cet équilibre ?
 - Changements dans le rayonnement solaire incident
 - Changements dans la surface terrestre
 - Changements dans la composition chimique de l'atmosphère
- ⦿ Ces trois facteurs sont appelés des *facteurs de forçage climatiques*

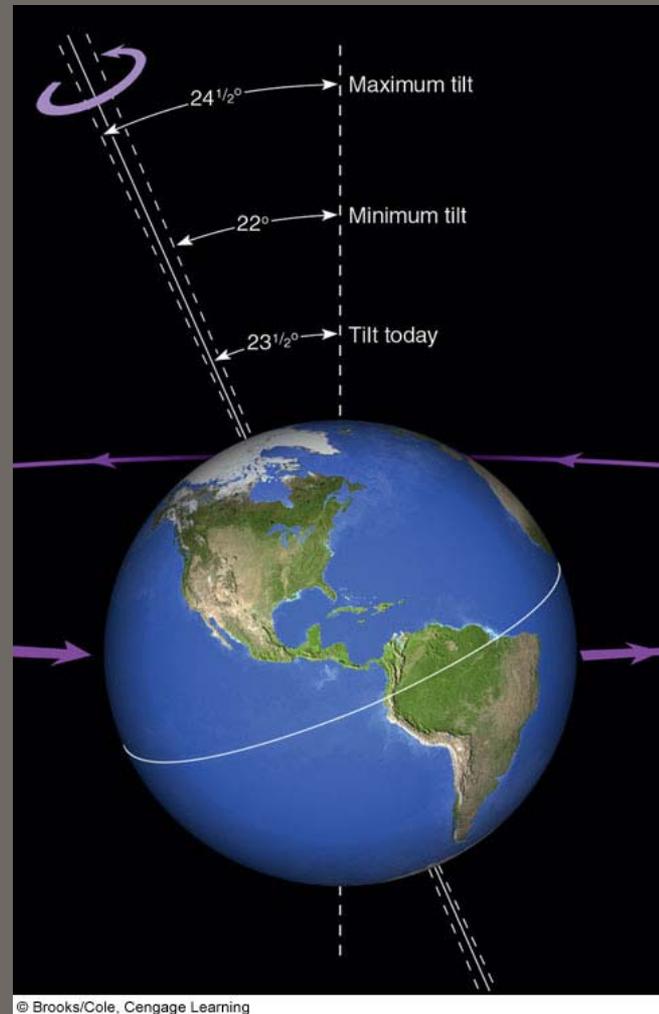
Changements climatiques : Les cycles de Milankovitch

- ⦿ Oscillations de l'orbite terrestre selon trois paramètres
 - L'excentricité (100 000 ans)
 - L'obliquité de l'axe de rotation (41 000 ans)
 - La précession (23 000 ans)
- ⦿ Ces changements de l'orbite terrestre sur des milliers d'années causent une redistribution de l'énergie solaire dans les régions polaires durant l'année

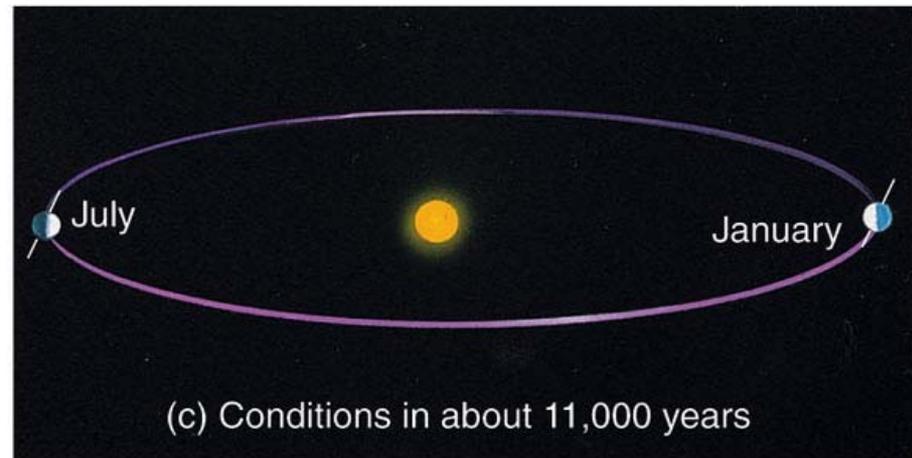
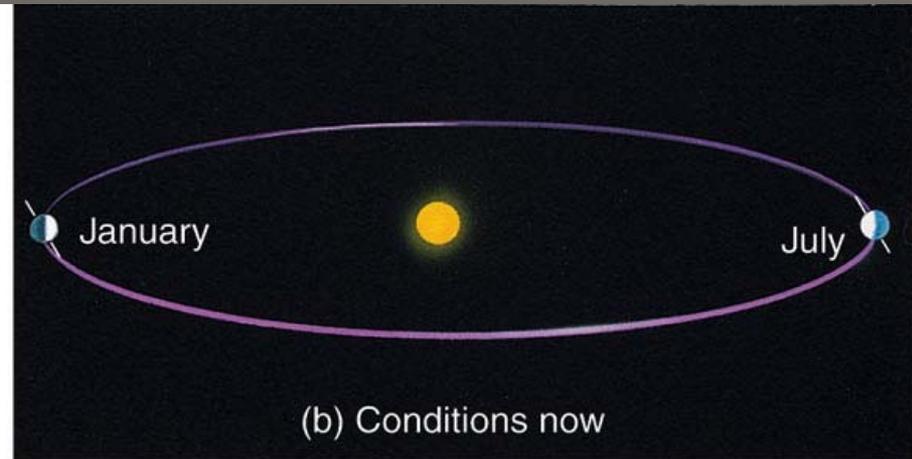
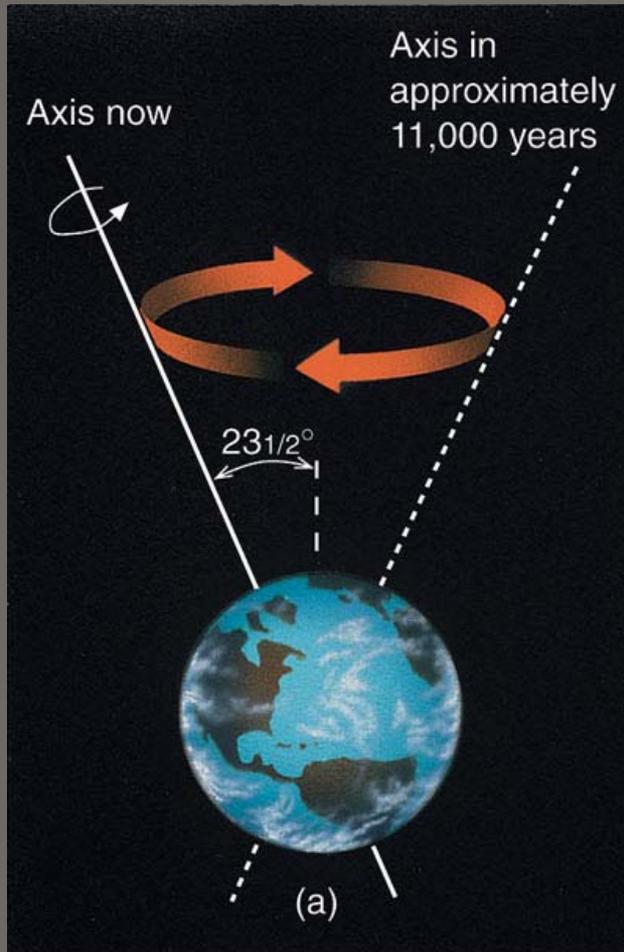
L'eccentricité de l'orbite terrestre (cycles de 100 000 ans)



L'obliquité de l'axe de rotation de la Terre (cycles de 41 000 ans)



La précession de l'orbite terrestre (cycles de 23 000 ans)



© Brooks/Cole, Cengage Learning

Les cycles de Milankovitch

- ⊙ Le *déclenchement* d'une période glaciaire serait donc dû à une configuration orbitale de la Terre telle que
 - Les étés sont courts et frais
 - Les hivers sont longs et doux (plus de chutes de neiges lors des hivers doux !)
 - La neige accumulée au court de l'hiver précédent n'a pas le temps de fondre durant l'été
 - La neige s'accumulant au sol d'année en année refroidit encore plus le climat en réfléchissant davantage le rayonnement solaire
 - Ce mécanisme n'est pas suffisant, toutefois, pour expliquer la chute de 5-7 °C d'une période glaciaire. Il faut un *mécanisme amplificateur* (« feedback »)
- ⊙ L'*amplification* de la période glaciaire, une fois commencée, semble être causée par l'absorption accrue de CO₂ par les océans plus froids (donc plus solubles), et par une activité biologique plus intense.

Changements climatiques : Changements dans la surface terrestre

- Nous avons vu que la configuration des continents change sensiblement sur des centaines de millions d'années (tectonique des plaques)
- Ces configurations sont parfois favorables pour les glaciations en déplaçant les masses continentales vers les régions polaires (afin que la neige puisse éventuellement s'accumuler). Ainsi, il y a 300 millions d'années, l'unique super-continent de la Pangée s'étendait jusqu'au Pôle Sud et d'énormes *inlandsis** s'y sont formés.
- Puis, lors de son démantèlement il y a 200 millions d'années, le volcanisme global a brusquement augmenté, augmentant du coup les émissions de CO₂ et l'effet de serre planétaire, et la fin de l'époque glaciaire précédente.

* *Inlandsis* : calotte glaciaire continentale

Changements dans la composition chimique de l'atmosphère

- ⦿ Nous avons déjà vu que des gaz tels la vapeur d'eau, le CO_2 , le CH_4 (méthane ou gaz naturel), provoquent un effet de serre naturel très important, qui réchauffe la planète de 33°C
- ⦿ Cet effet de serre est très probablement essentiel au maintien de la vie sur Terre (telle que nous la connaissons)
- ⦿ Il est connu depuis plus de 100 ans que toute variation dans les concentrations atmosphériques de ces gaz provoque un déséquilibre immédiat dans le bilan énergétique de la planète – un *forçage climatique* tel qu'évoqué plus haut.

Autre facteur de changement climatique : les *rétroactions*

- ⦿ Une rétroaction (« feedback » en anglais) est un processus qui amplifie ou diminue la réponse initiale à une perturbation.

Les rétroactions du climat

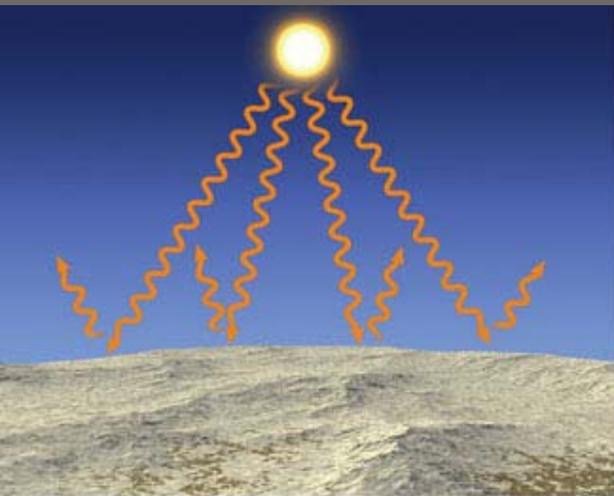
⊙ Albédo-neige

- Au départ : surface couverte de neige
- Réchauffement graduel = fonte de la neige
- Fonte de la neige = réflectivité de la surface diminuée
- Moins de réflectivité = plus d'absorption des rayons solaires = réchauffement amplifié
- Encore plus de fonte de neige, etc.

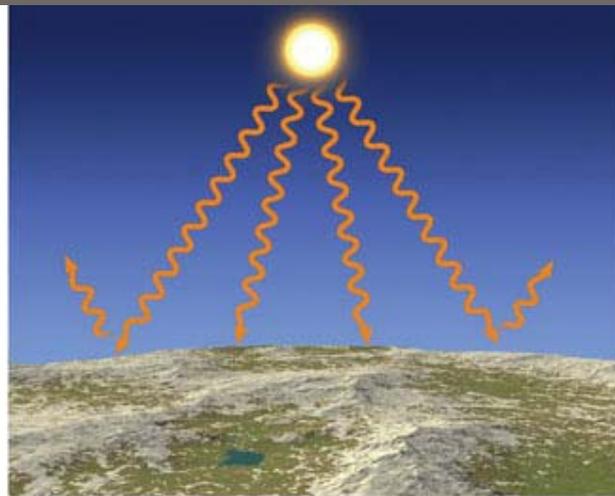
⊙ Température-vapeur d'eau

- Au départ : la Terre qui se réchauffe dû une augmentation de gaz à effet de serre (GES)
- Augmentation des températures = plus d'évaporation des océans
- Plus de vapeur d'eau dans l'atmosphère = amplification de l'effet de serre
- Plus d'effet de serre = réchauffement accru, etc.

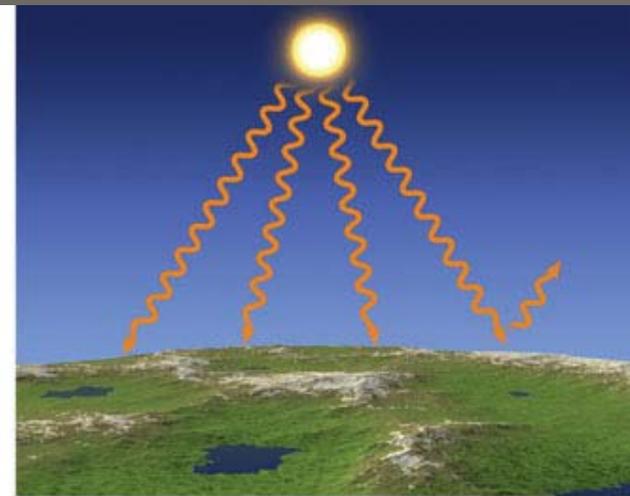
Feedback albédo-neige



- (a)
- High surface albedo
 - Low absorption of sunlight
 - Gradual surface warming



- (b)
- Lower surface albedo
 - Higher absorption of sunlight
 - Surface warming increases



- (c)
- Very low surface albedo
 - Much higher absorption of sunlight
 - Surface warming enhanced

© Brooks/Cole, Cengage Learning

Les changements climatiques : en résumé

- ⦿ Somme toute, un *changement climatique* peut se résumer comme suit
 - Un *facteur de forçage climatique* provoque un déséquilibre initial dans le bilan énergétique de la planète, la forçant à se réchauffer ou se refroidir
 - Le changement initial de température provoquera ensuite une *réponse* du système climatique à travers les diverses *rétroactions* de ce système («
feedbacks »)
 - Retenez ceci : la *majorité* des incertitudes liées aux changements climatiques est liée à ces rétroactions extrêmement complexes du système climatique

Le système climatique

Hydrosphère
(Océans, rivières)



Atmosphère



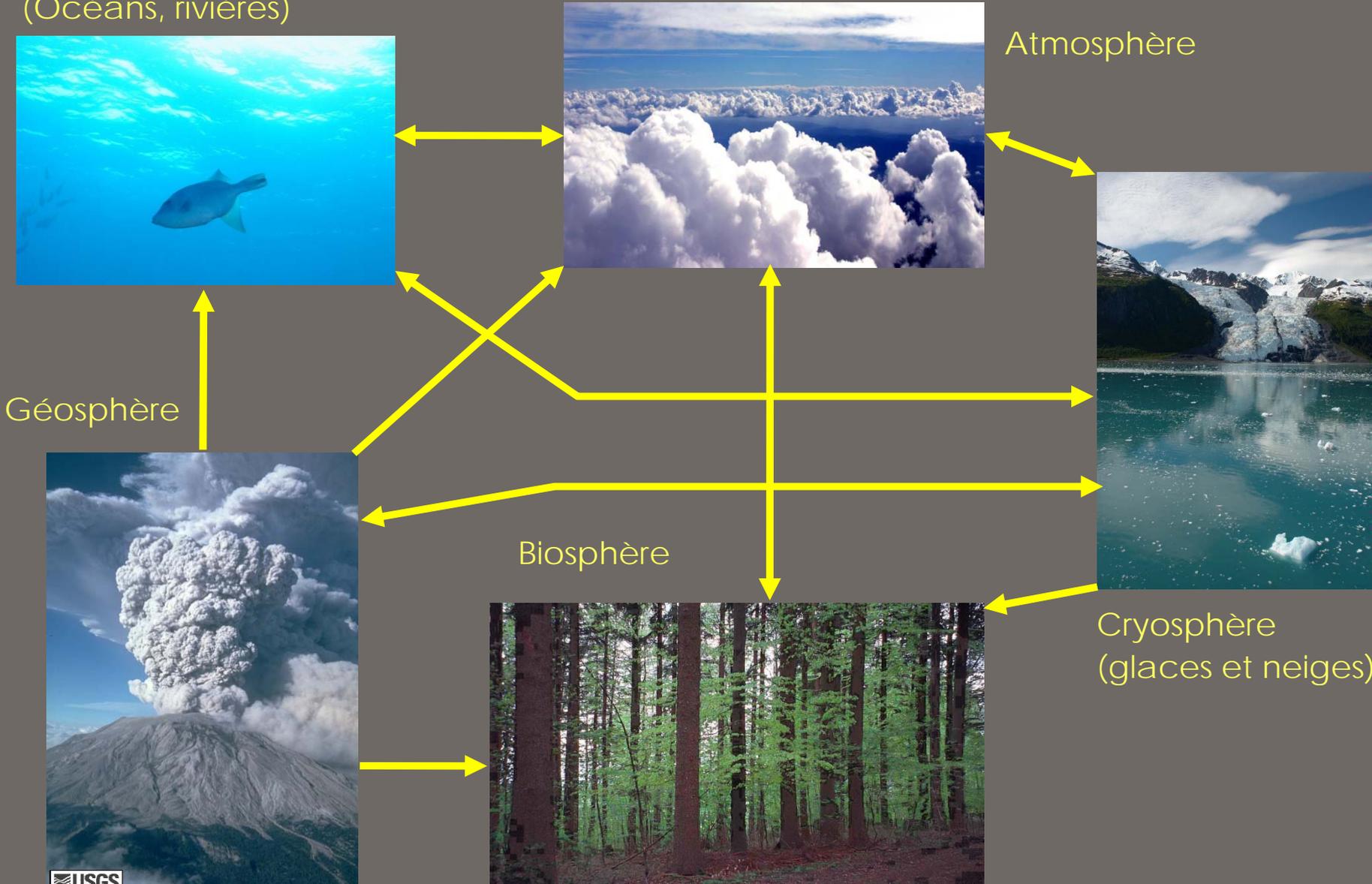
Géosphère



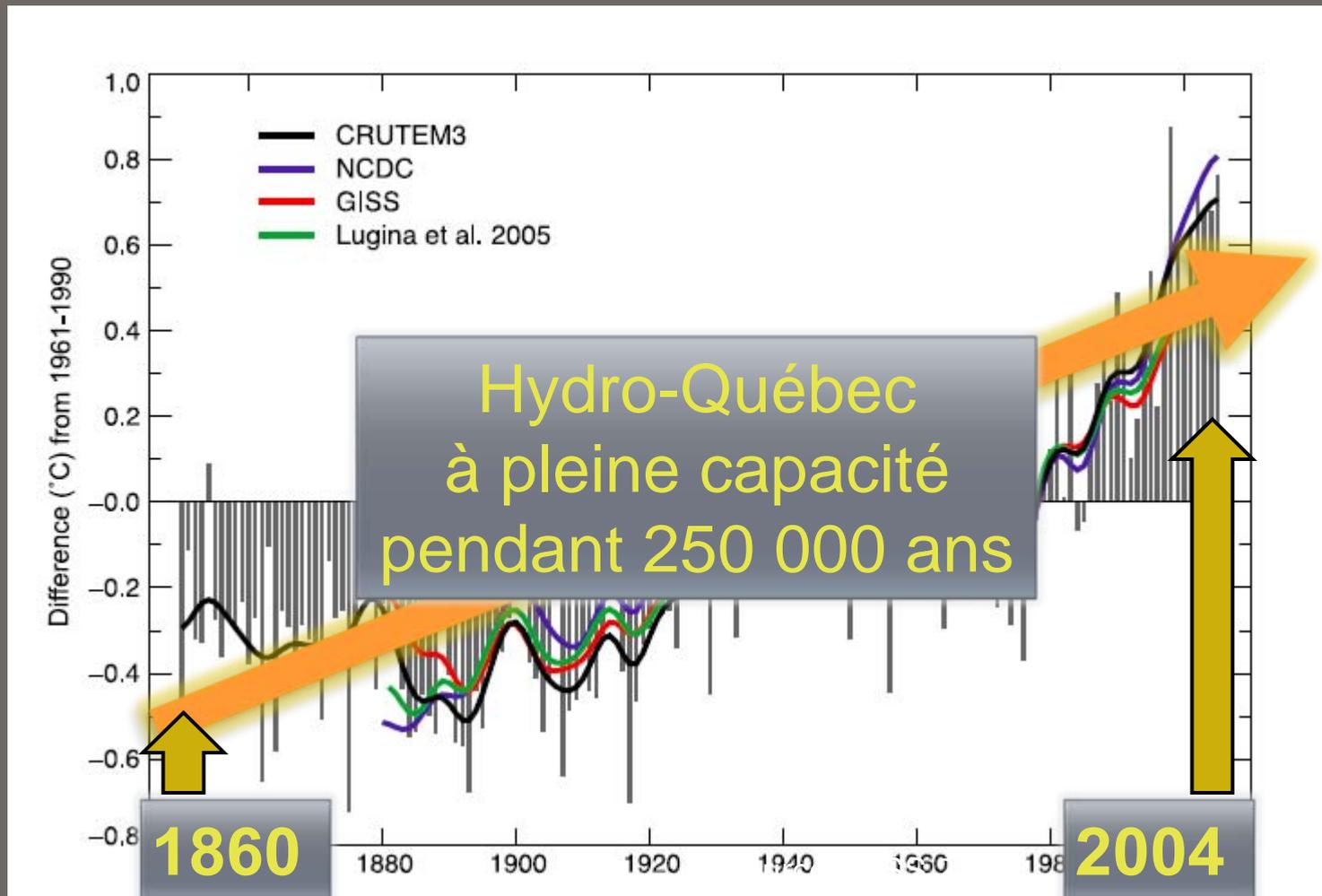
Biosphère



Cryosphère
(glaces et neiges)



Le réchauffement depuis 1860



Les températures du globe depuis 1880

Voir l'animation: [a5_1881_2003_6fps.mp4](#)

Autres preuves *indépendantes* que les températures augmentent

- ⦿ Fontes des glaciers à l'échelle globale
- ⦿ Diminution du couvert des glaces dans l'Arctique
- ⦿ Augmentation du niveau de la mer

Fontes des glaciers

Muir and Riggs Glaciers



Pedersen Glacier



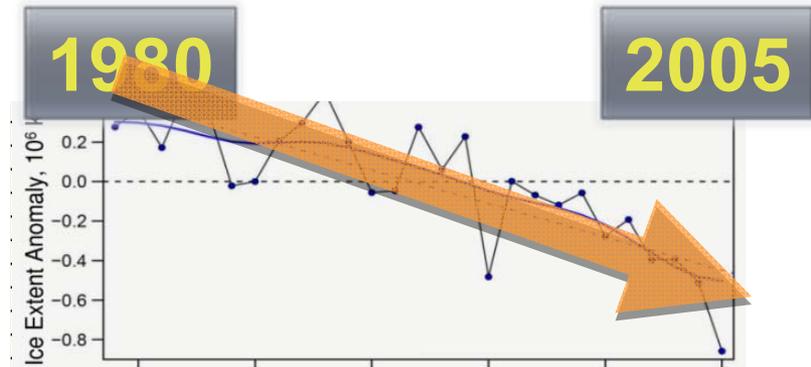
Fontes des glaces dans l'Arctique

Voir l'animation:

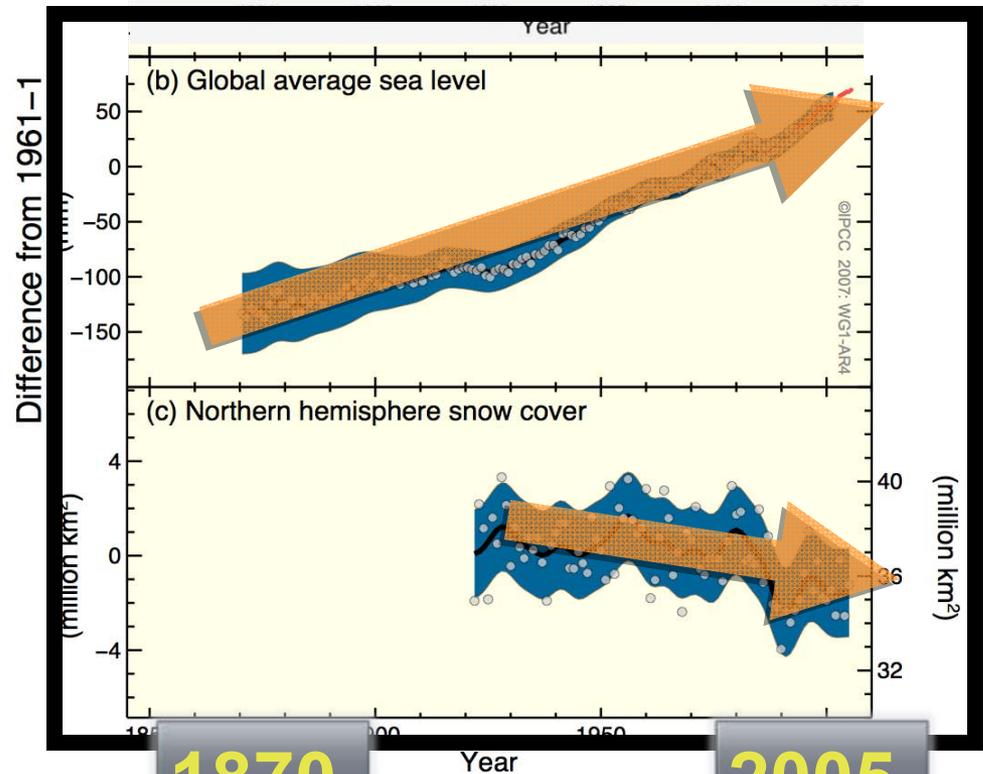
[a003563_2008SealceSequencesparta1280x720_30.ipod.mp4](#)

Source : NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio Thanks to Rob Gerston (GSFC)

Diminution des glaces de mer de l'hémisphère nord



Élévation du niveau de la mer

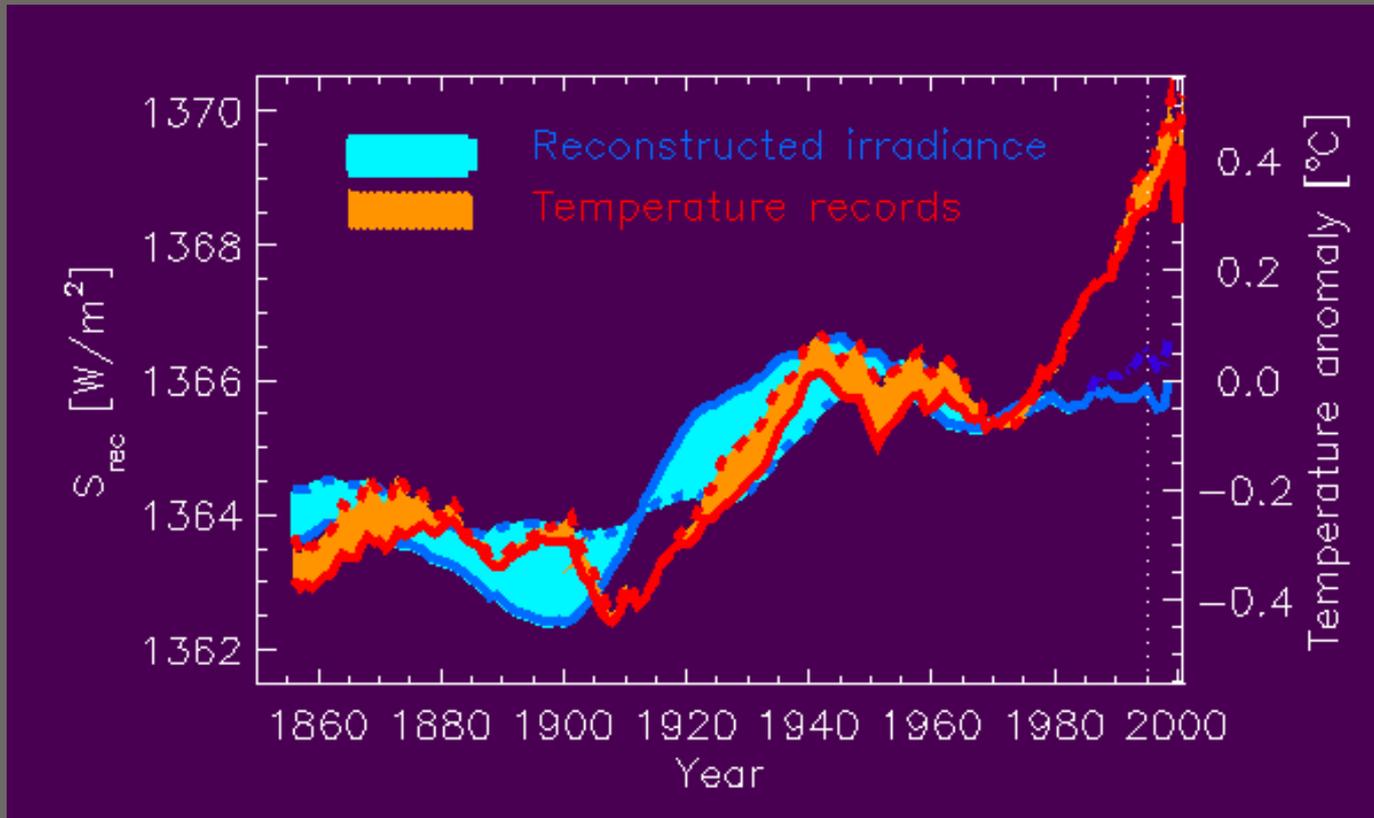


Diminution de la couverture de neige de l'hémisphère nord

Toutes ces observations
indépendantes pointent vers un
seul fait :

- ⦿ La Terre se réchauffe
- ⦿ La Terre se rechauffe *rapidement*
- ⦿ La certitude scientifique de ce fait est *quasi-totale*

Est-ce la faute du soleil ?

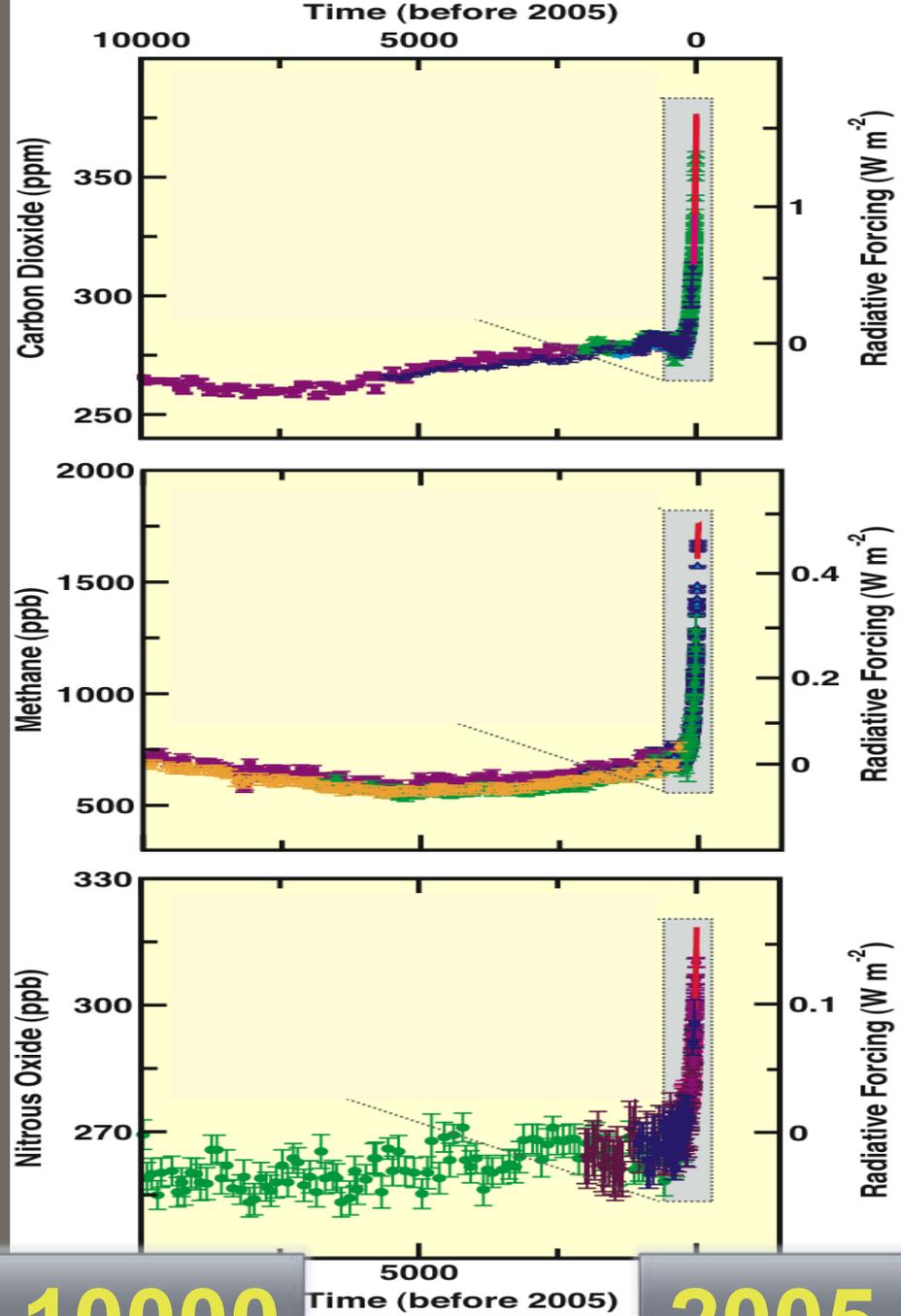


Le Soleil a probablement été responsable d'une *partie* du réchauffement du début du XX^e siècle, mais *pas* depuis 1980

Ce n'est pas le soleil car...

- ⦿ Rayonnement solaire stable depuis 1950
- ⦿ L'augmentation des températures est 2x plus forte pour les températures minimales la nuit et durant l'hiver, plutôt que les températures maximales le jour et durant l'été

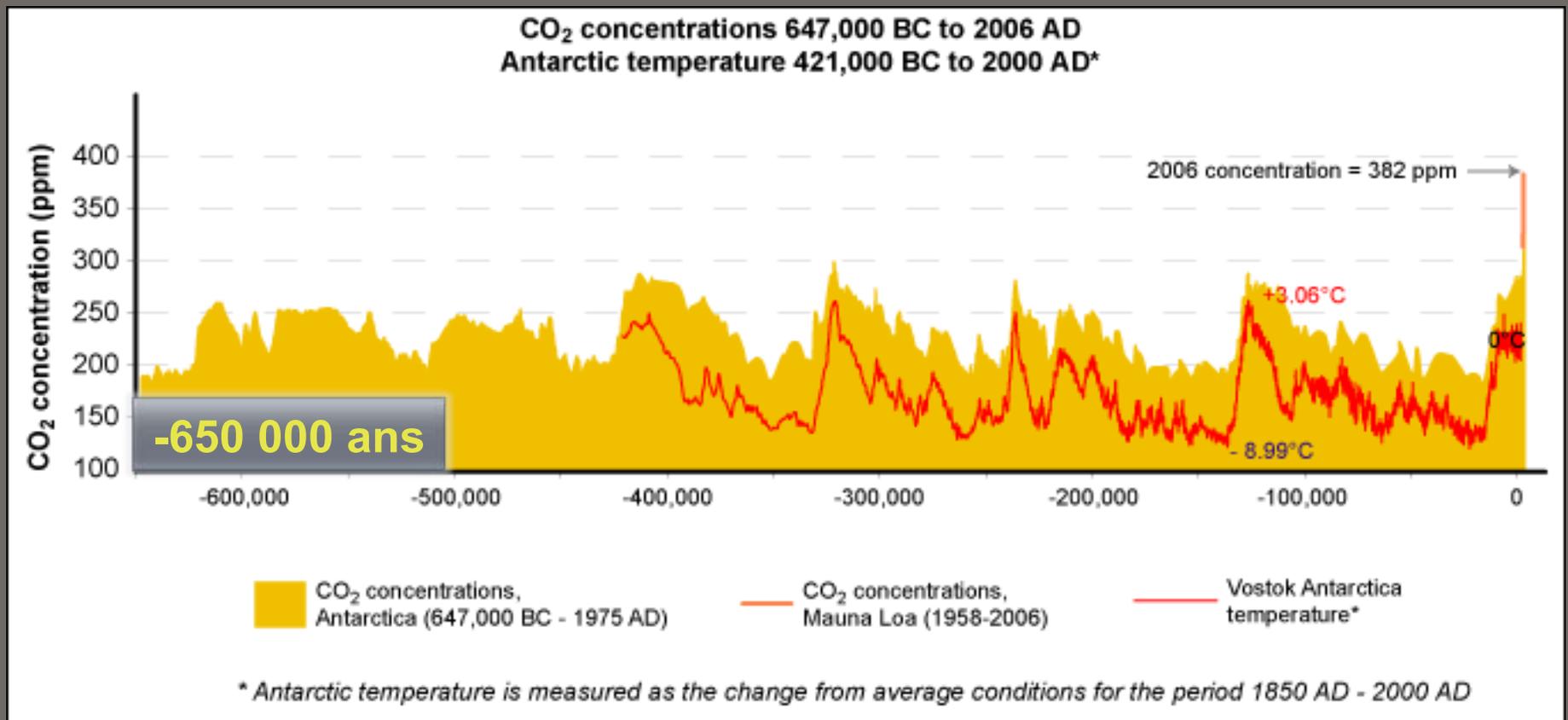
Est-ce la faute des gaz à effet de serre rejetés par l'humain ?



Source : GIEC 2007

Histoire du CO₂ depuis 650 000 ans

Depuis *au moins* 650 000 ans, les concentrations en CO₂ on oscillé entre 180 and 300 ppm (parties par million). Remarquez qu'aujourd'hui, nous dépassons 382 ppm, une concentration inégalée...

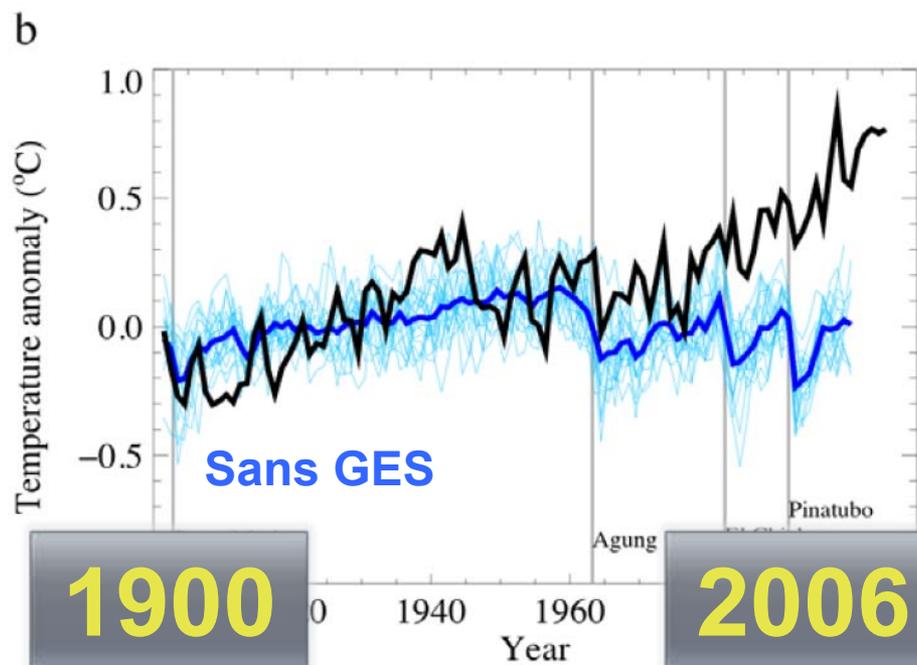
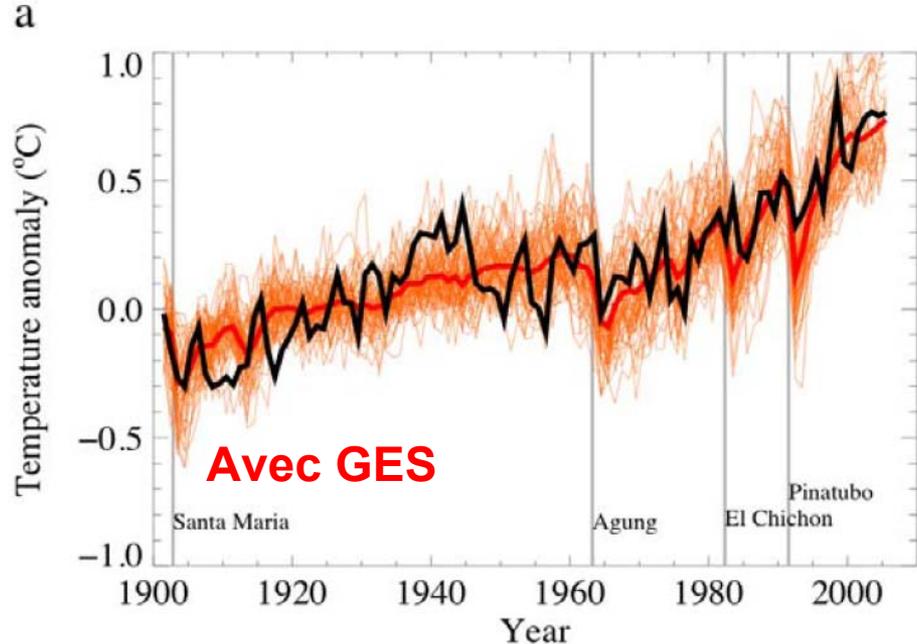


Ce que nous savons des GES

- ⦿ Les concentrations de GES ont toutes augmenté dès le début de l'ère industrielle et cela coïncide avec le réchauffement planétaire (sans en être une preuve !)
- ⦿ Les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère n'ont jamais été aussi élevées depuis au moins 650 000 ans
- ⦿ Il faut probablement remonter à plus de 15-20 millions d'années pour voir de telles concentrations produites naturellement dans l'atmosphère
- ⦿ Avec des analyses isotopiques, il est possible de prouver hors de tout doute que le CO₂ additionnel dans l'air depuis 200 ans est bel et bien le résultat de la combustion de carburants fossiles par l'humain, et non une source naturelle

La cause du réchauffement?

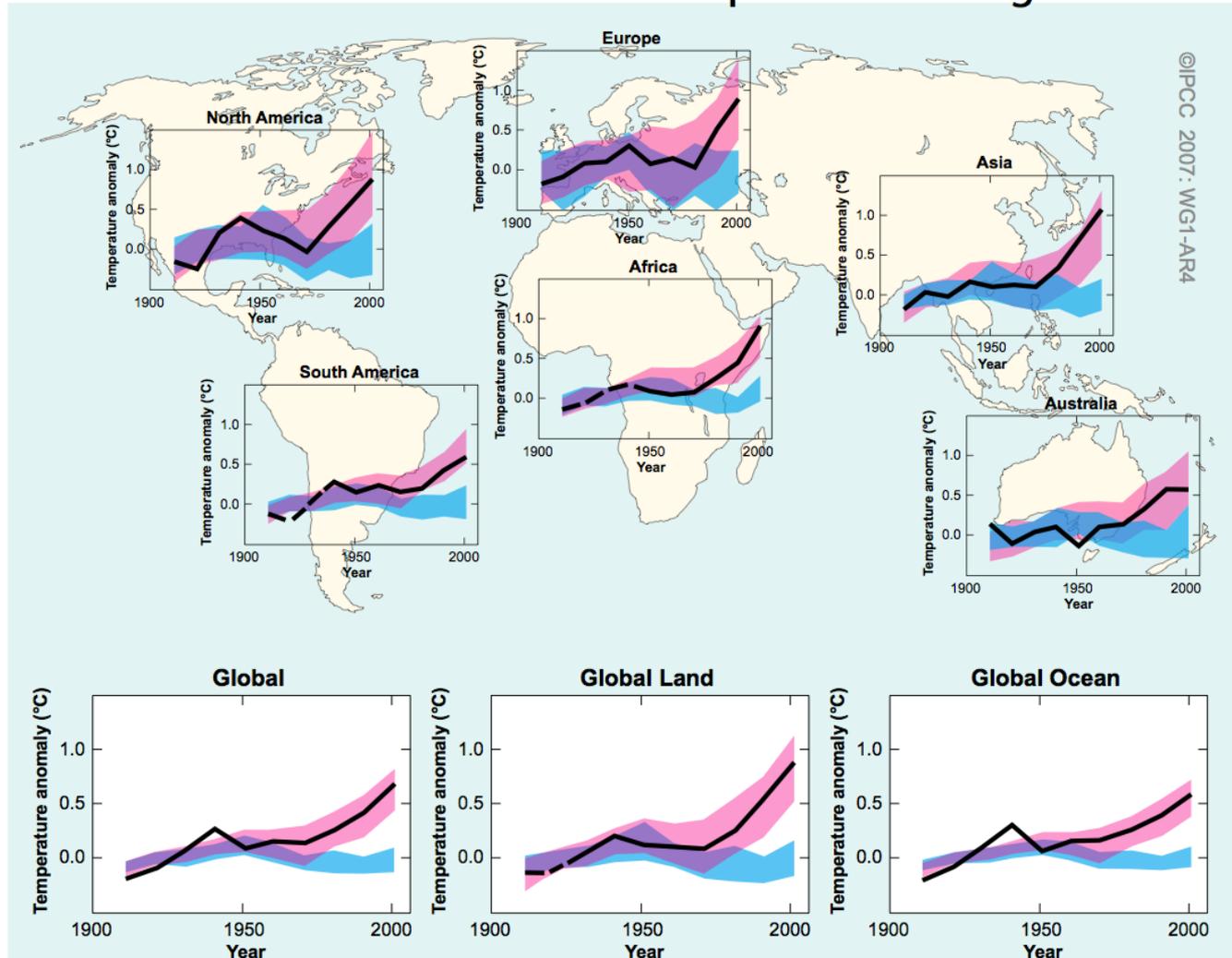
- Le réchauffement est-il:
 - ☑ concordant avec ce que l'on s'attend de la réaction du climat aux ajouts de GES ?
 - ☒ Non-concordant avec d'autres causes alternatives mais néanmoins plausibles ?



À l'échelle des continents...

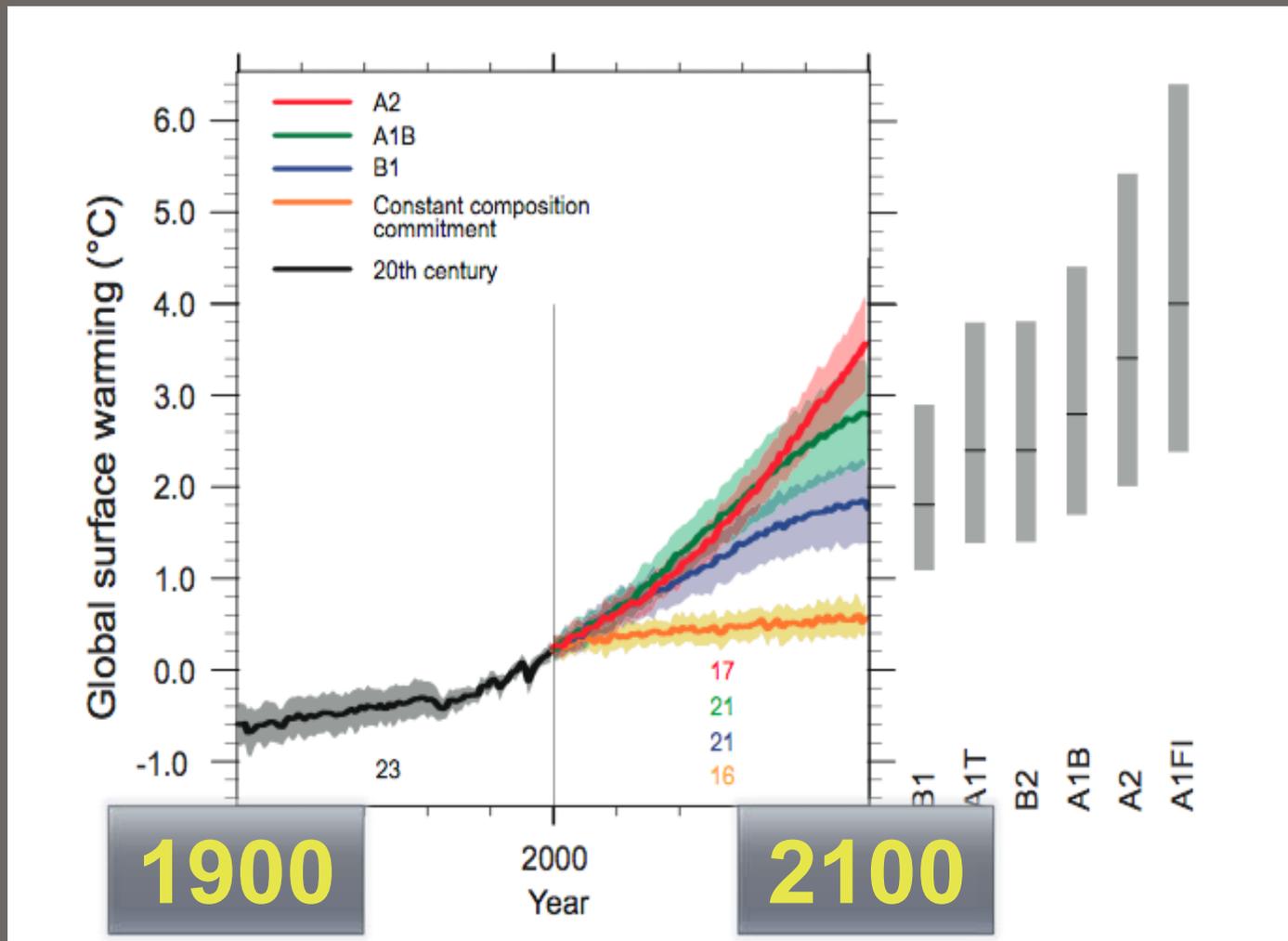
Source : GIEC 2007

Global and Continental Temperature Change

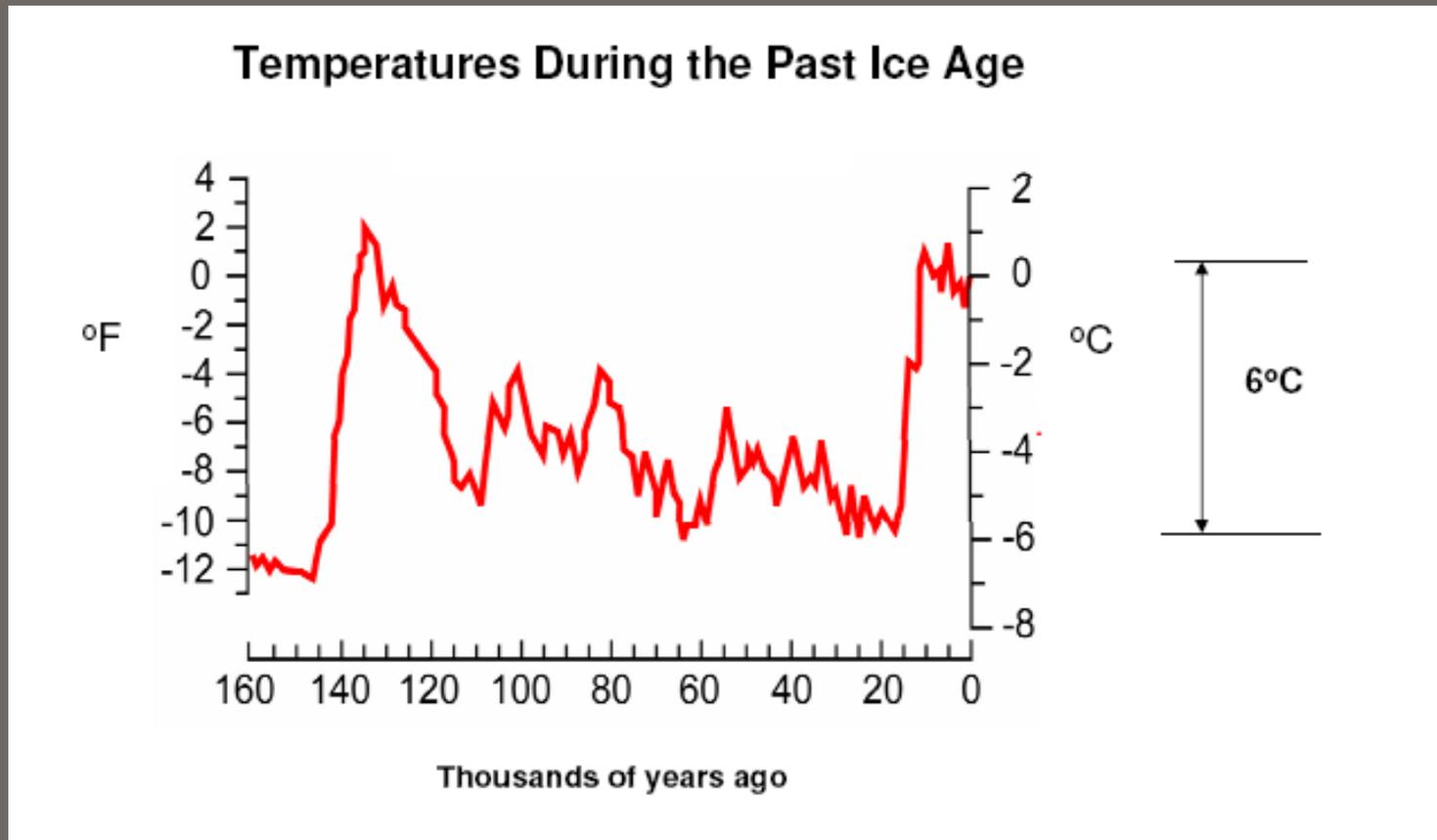


Les scénarios climatiques plausibles : la température

Fourchette de
1.8°C - 4.0°C
selon la sévérité
des scénarios
sociaux-
économiques



Quelques « petits » degrés de réchauffement : est-ce si grave ?



Le climat de la dernière glaciation était « à peine » 6°C plus froid qu'aujourd'hui !

Sensibilité climatique

AOGCM	Equilibrium climate sensitivity (°C)	Transient climate response (°C)
1: BCC-CM1	n.a.	n.a.
2: BCCR-BCM2.0	n.a.	n.a.
3: CCSM3	2.7	1.5
4: CGCM3.1(T47)	3.4	1.9
5: CGCM3.1(T63)	3.4	n.a.
6: CNRM-CM3	n.a.	1.6
7: CSIRO-MK3.0	3.1	1.4
8: ECHAM5/MPI-OM	3.4	2.2
9: ECHO-G	3.2	1.7
10: FGOALS-g1.0	2.3	1.2
11: GFDL-CM2.0	2.9	1.6
12: GFDL-CM2.1	3.4	1.5
13: GISS-AOM	n.a.	n.a.
14: GISS-EH	2.7	1.6
15: GISS-ER	2.7	1.5
16: INM-CM3.0	2.1	1.6
17: IPSL-CM4	4.4	2.1
18: MIROC3.2(hires)	4.3	2.6
19: MIROC3.2(medres)	4.0	2.1
20: MRI-CGCM2.3.2	3.2	2.2
21: PCM	2.1	1.3
22: UKMO-HadCM3	3.3	2.0
23: UKMO-HadGEM1	4.4	1.9

- Concept central dans l'évolution du climat
- Le réchauffement global en surface (à l'équilibre) obtenu suite à un doublement de la concentration de CO₂
- Dans AR4 : la sensibilité climatique est de l'ordre de :

3°C pour 2X CO₂

Quel maximum le système climatique peut-il tolérer ?

- ⦿ Il serait souhaitable d'éviter un seuil de concentration de GES au-delà duquel les impacts seront « néfastes »
- ⦿ Quel est ce seuil ? → la plupart des auteurs tendent à converger (pour l'instant) vers **~ 2 °C**
- ⦿ Correspond à **~ 450 ppm de CO₂**
- ⦿ Il faut atteindre un maximum de 11 GtC/année avant 2020, puis diminuer en-deça de 2 GtC/année avant 2100
- ⦿ Très peu de marge de manœuvre...car nous émettons déjà 7 GtC/année et nous augmentons à chaque année...

Projection des impacts du changement climatique

