

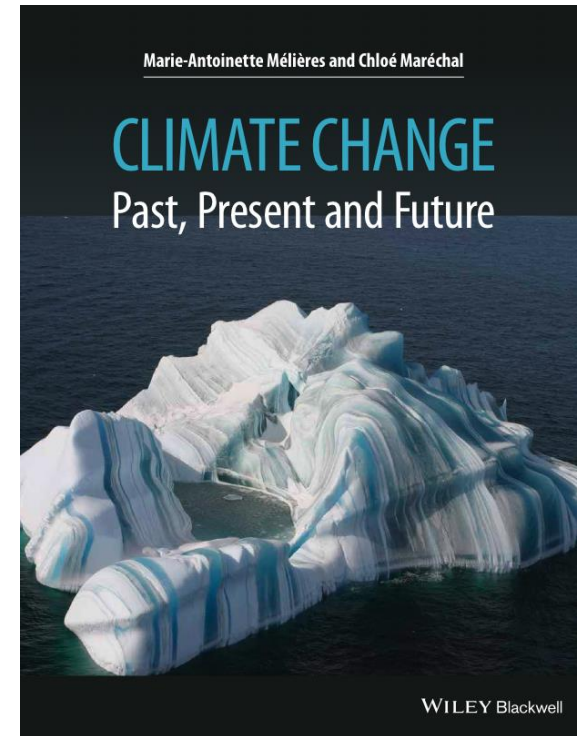
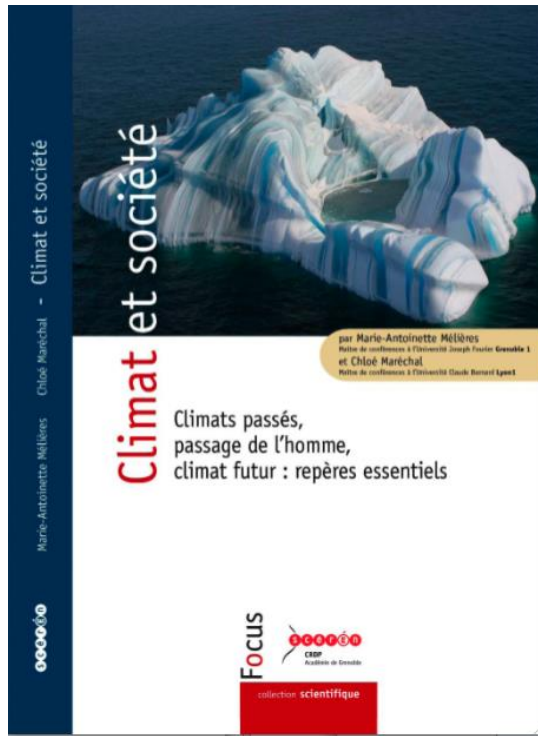
# Le changement climatique actuel est-il un événement exceptionnel ?



**Chloé Maréchal-Chenevier**, Maître de Conférences, Géochimiste  
Observatoire des Sciences de l'Univers de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1



« *Climate change : Past, Present and Future* »  
**Mélières M-A. and Maréchal C.**  
Wiley-Blackwell (USA), Mars 2015



« *Climats et société : climats passés, passage de l'homme, climat futur ; repères essentiels* »  
**Mélières M-A. et Maréchal C.**  
CRDP de l'Académie de Grenoble, 2010

# Introduction



## Le changement climatique actuel est-il un événement exceptionnel ?

- Histoire « actuelle » du climat  
→ à entendre sur le siècle passé, actuel, et au-delà : « actuel – futur »
- Qu'est-ce qu'un événement exceptionnel du fonctionnement de la Terre ?

Changement rapide et intense des paramètres caractérisant , ici, les enveloppes externes

**Atmosphère, Hydrosphère** (océans), **Lithosphère** « l'environnement »

= physique, chimie

**Biosphère**

= vie

dépend des spécificités de l'environnement

Magnitude et sens de variation des paramètres climatiques

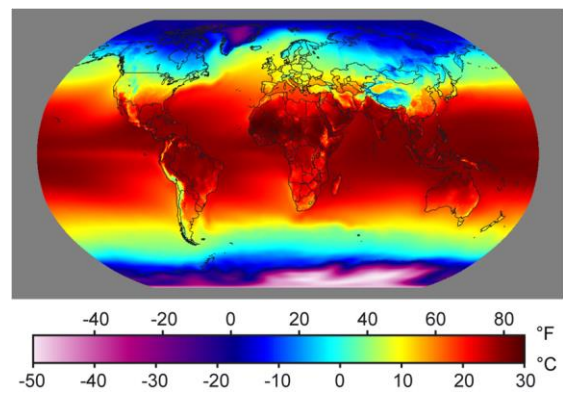
Crise ou non de la biodiversité



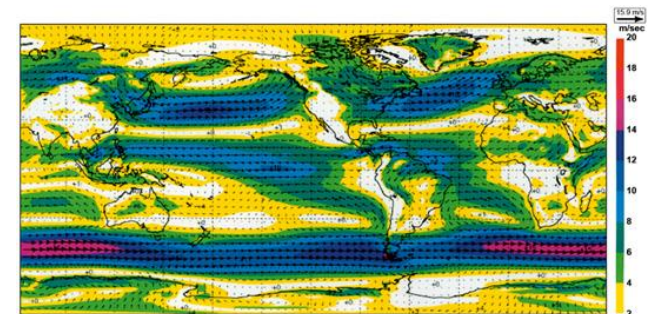
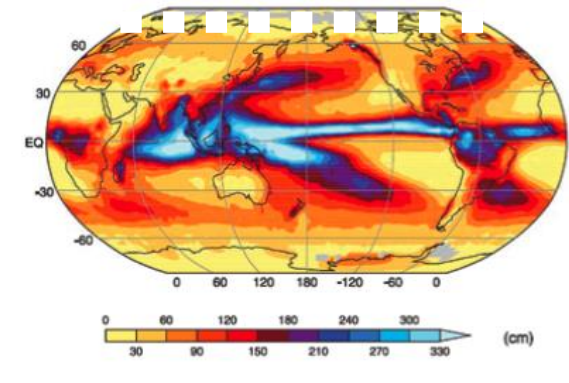
Qu'est-ce que le climat ?



# Une « machine » qui demande de l'énergie ...



-15°C  
27°C  
-50°C



**Le climat actuel** - moyenné sur l'année  
- moyenné sur la surface de la Terre (océans + continents)

nécessite de maintenir :



une **température** de  $\approx +15^{\circ}\text{C}$  : **390 W.m<sup>-2</sup>**



des **précipitations** de  $\approx 1$  m/an : **78 W.m<sup>-2</sup>**

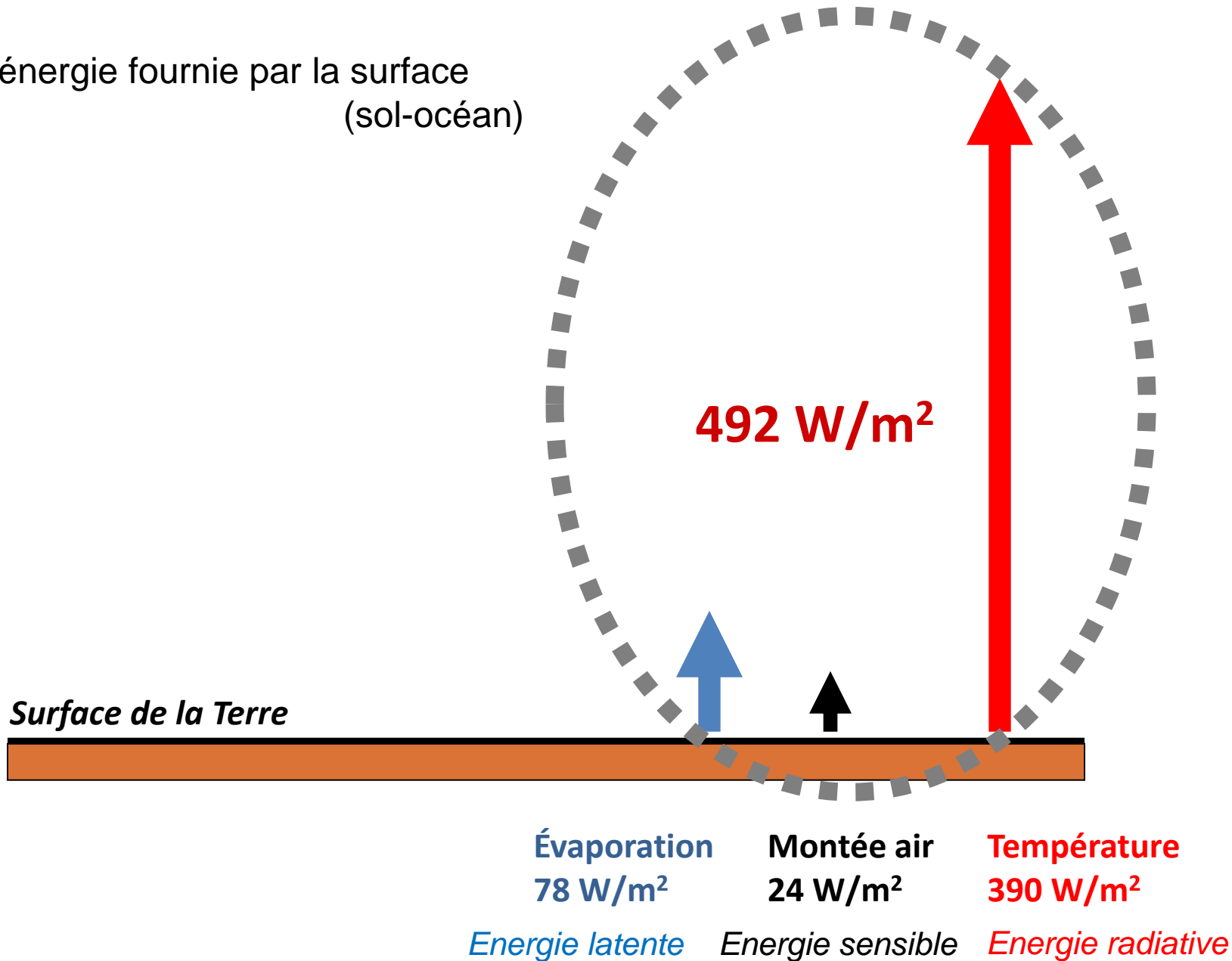


des **vents ascendants** : **24 W.m<sup>-2</sup>**

... soit au total **492 W.m<sup>-2</sup>**

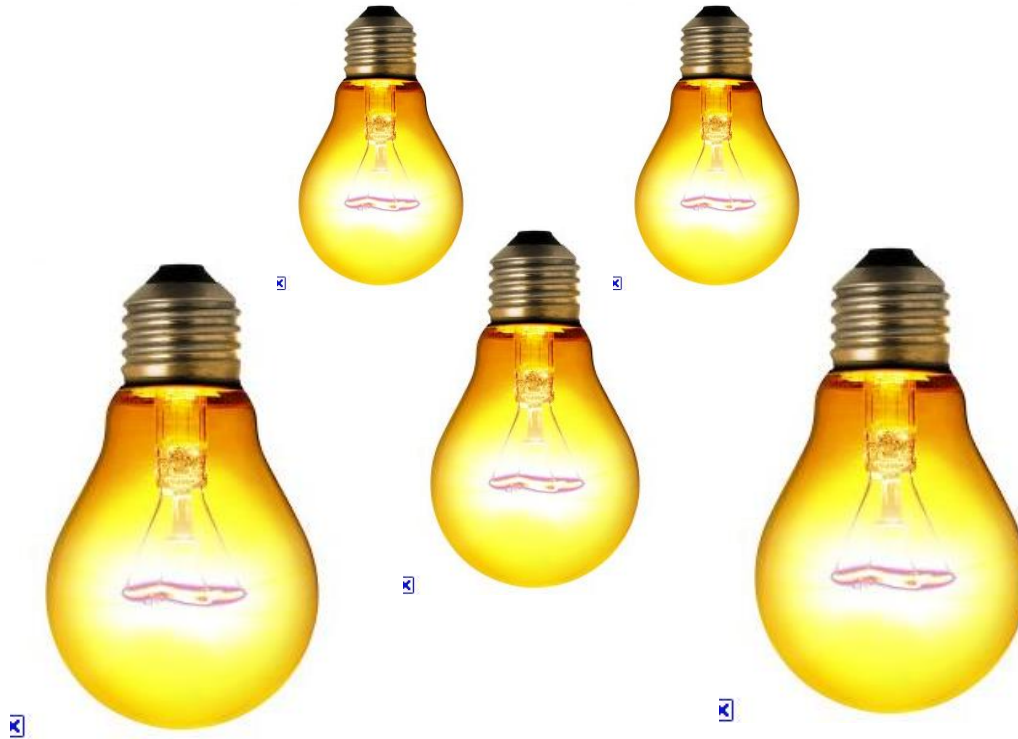


→ énergie fournie par la surface  
(sol-océan)



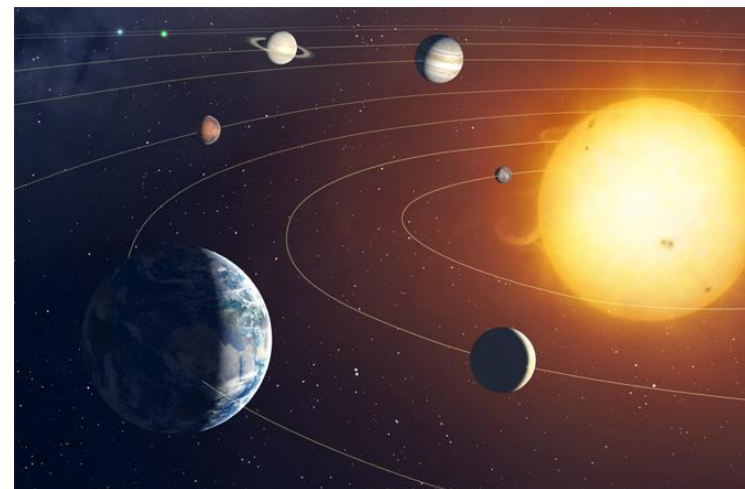
*Coût énergétique des trois postes du climat.*

*... soit près de 5 ampoules de 100 W par m<sup>2</sup>*

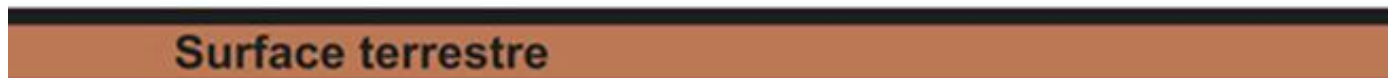


**1 mètre carré**

## Le pourvoyeur d'énergie : le Soleil



342 W.m<sup>-2</sup>



0,05 W.m<sup>-2</sup>

*Rapport du **flux d'énergie solaire** arrivant sur Terre et du **flux géothermique**.*

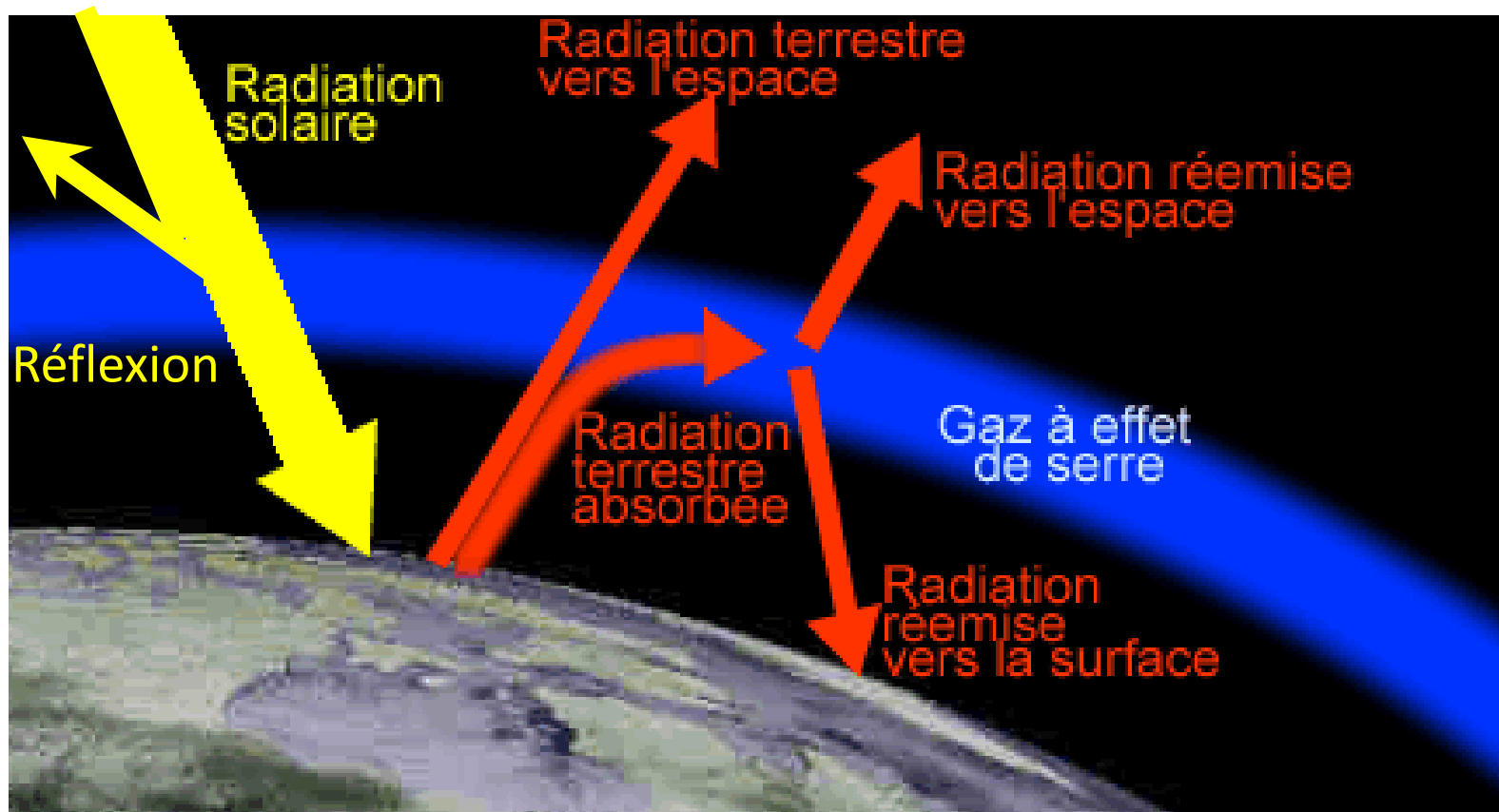
... mais 342 W.m<sup>-2</sup> n'est pas 492 W.m<sup>-2</sup>

Que se passe-t-il une fois l'énergie solaire reçue sur Terre ?

L'énergie solaire est en partie réfléchiée ...

Température de surface, sans effet de serre  $\approx -19^{\circ}\text{C}$

Température de surface, avec effet de serre naturel  $\approx +15^{\circ}\text{C}$

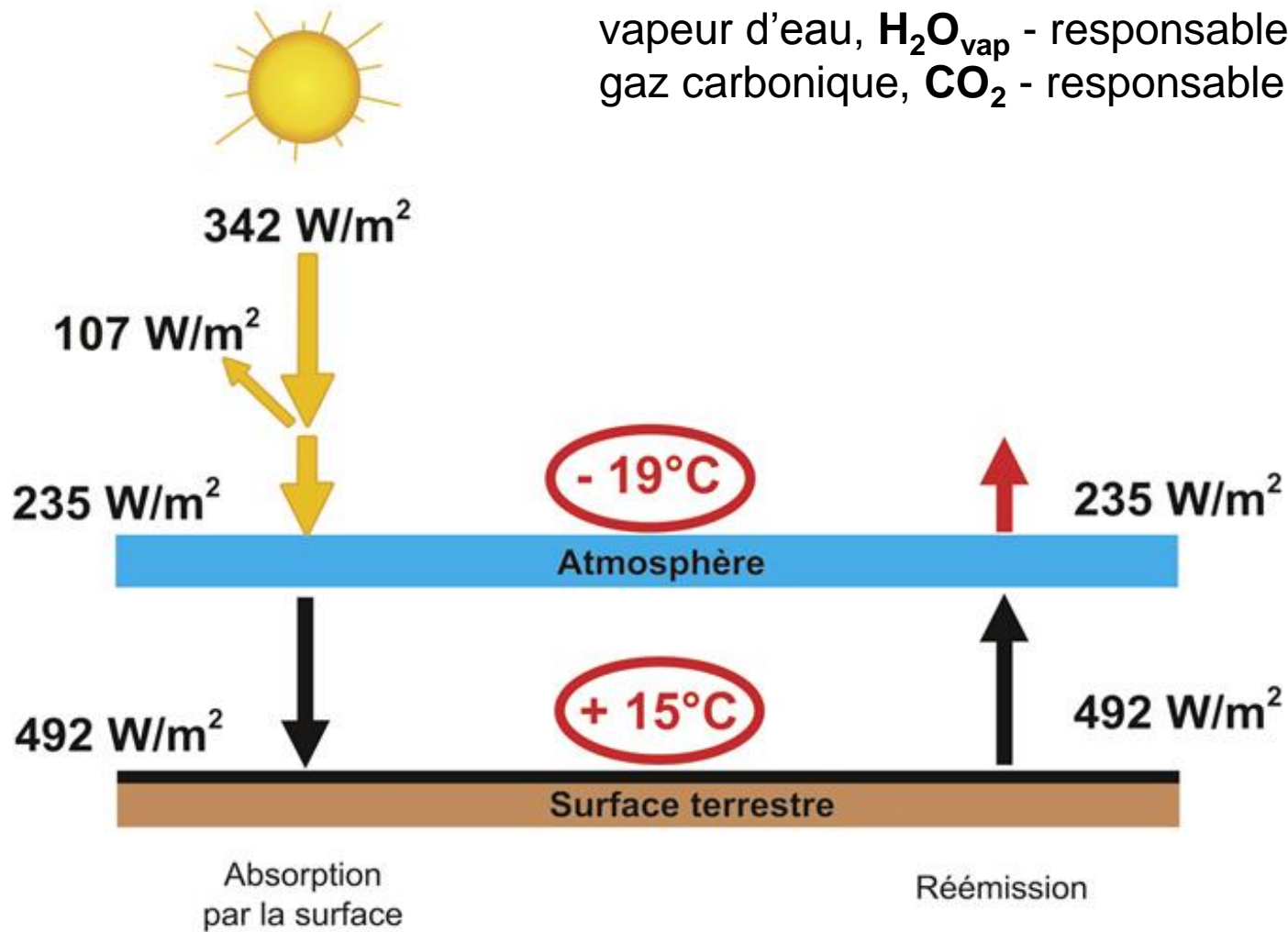


*Schéma du rôle de l'effet de serre dans le bilan énergétique en surface terrestre.*

*Le **rayonnement solaire** ( $0,2 - 3 \mu\text{m}$ ) est représenté en **jaune**,  
le **rayonnement infrarouge**, tellurique et atmosphérique ( $3 - >50 \mu\text{m}$ ), en **rouge**.*

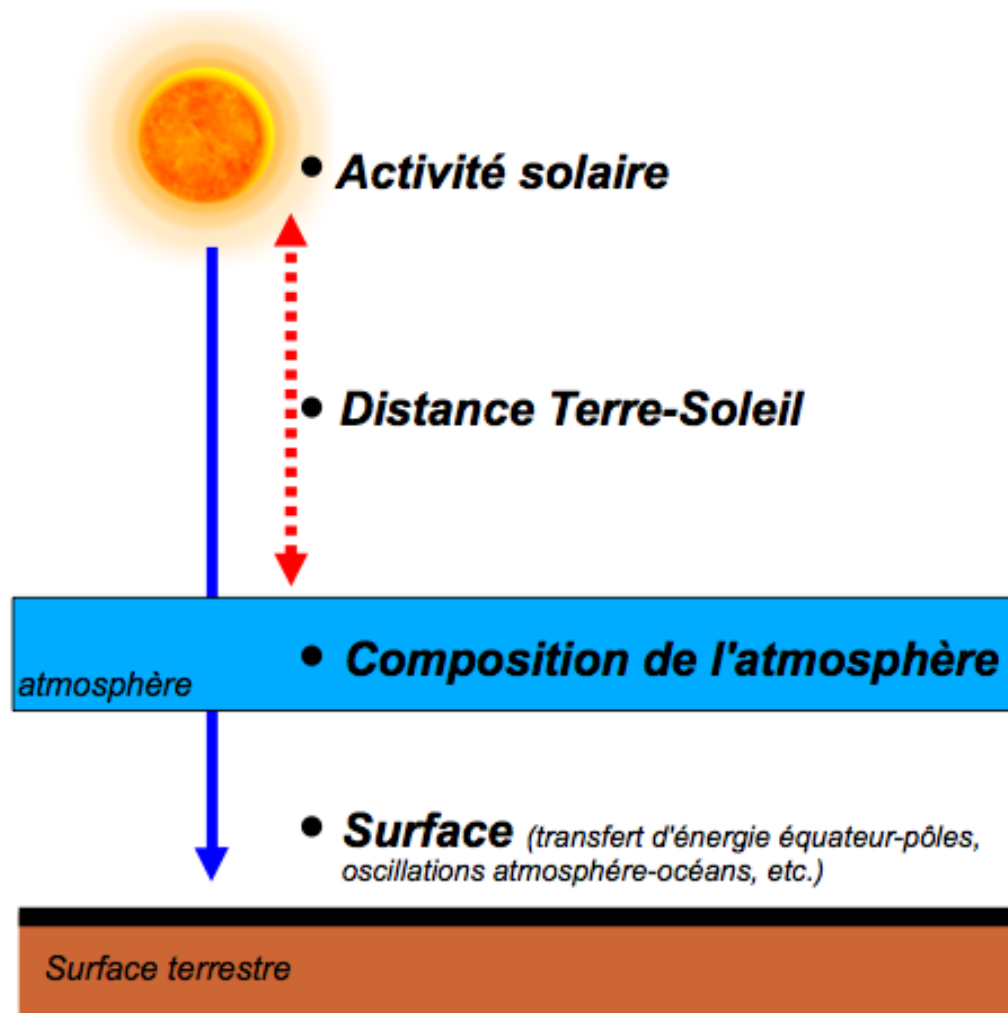
Effet de serre naturel :

vapeur d'eau,  $\text{H}_2\text{O}_{\text{vap}}$  - responsable au  $\approx 2/3$   
gaz carbonique,  $\text{CO}_2$  - responsable au  $\approx 1/3$

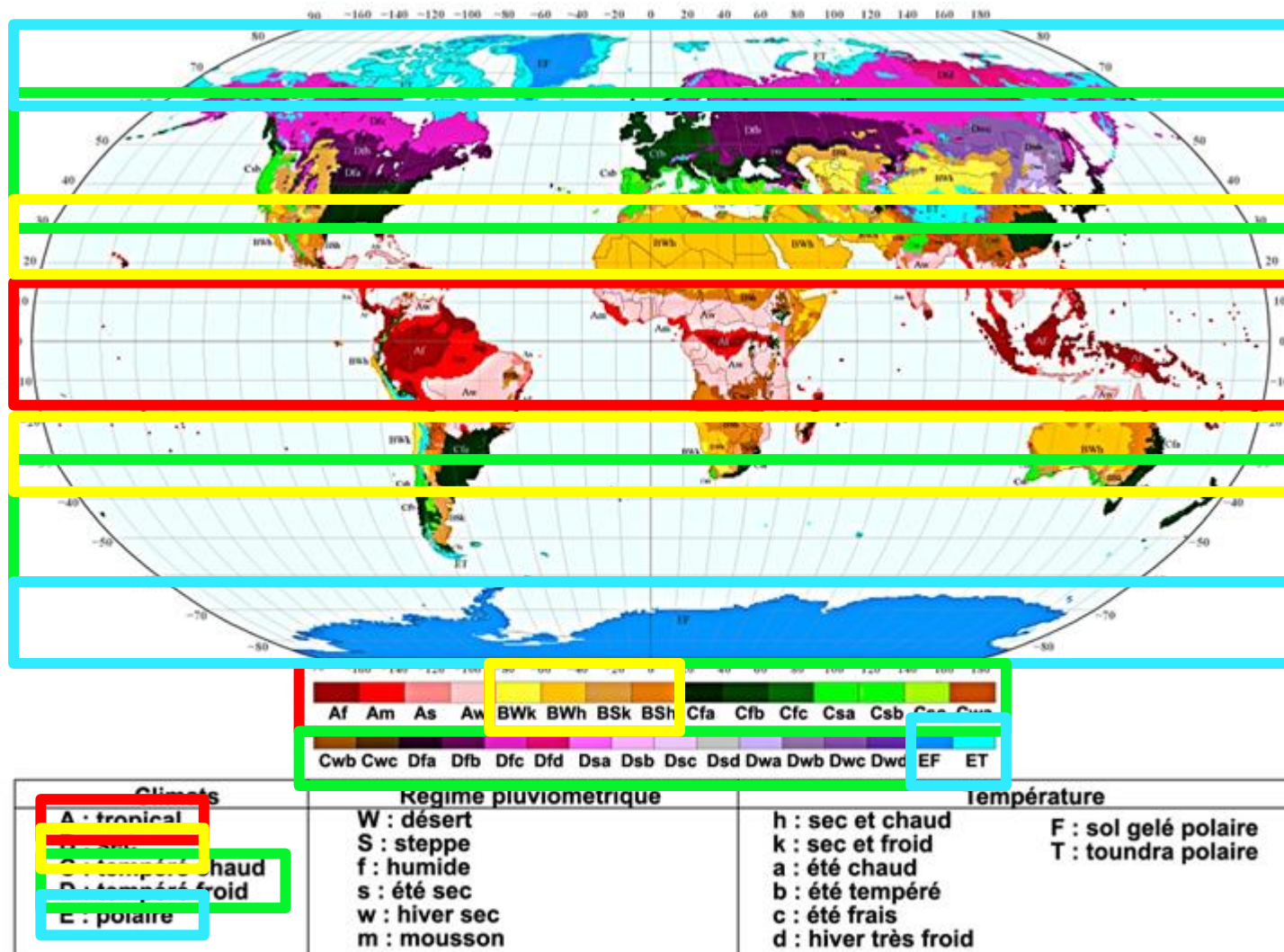


*Equilibre énergétique à la surface de la Terre.*

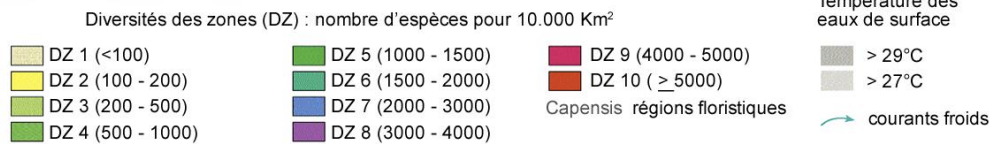
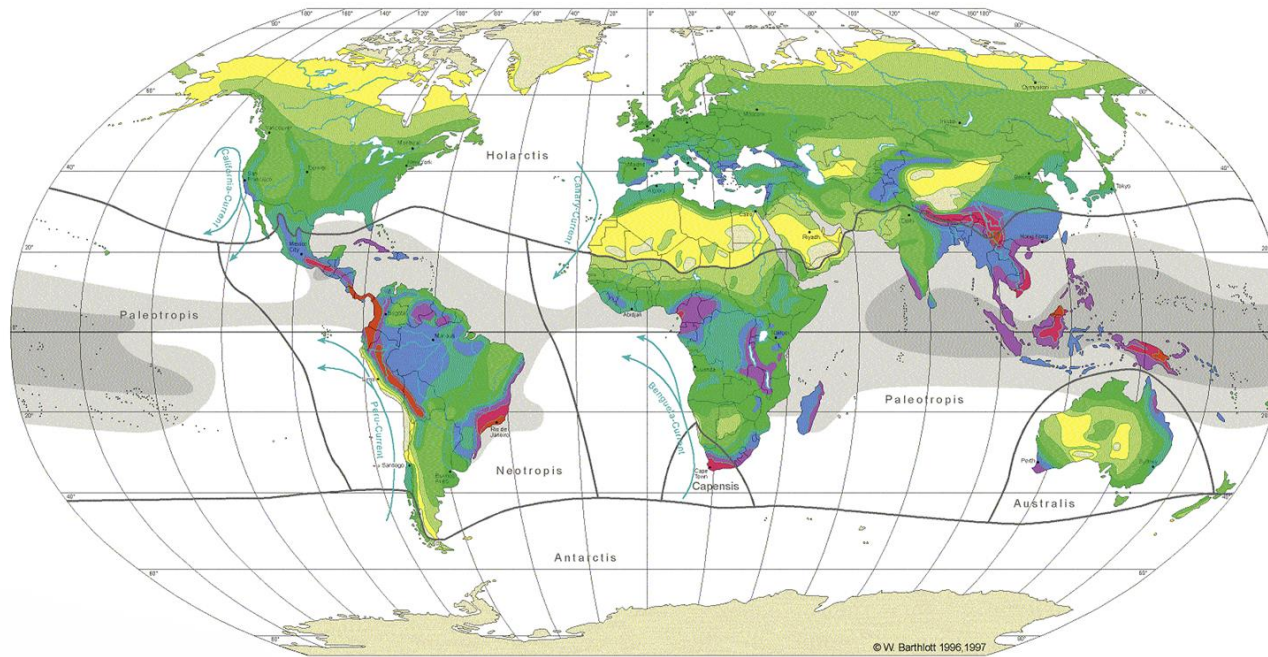
## Les principales causes des changements climatiques



## Le climat, écrin de la vie ...



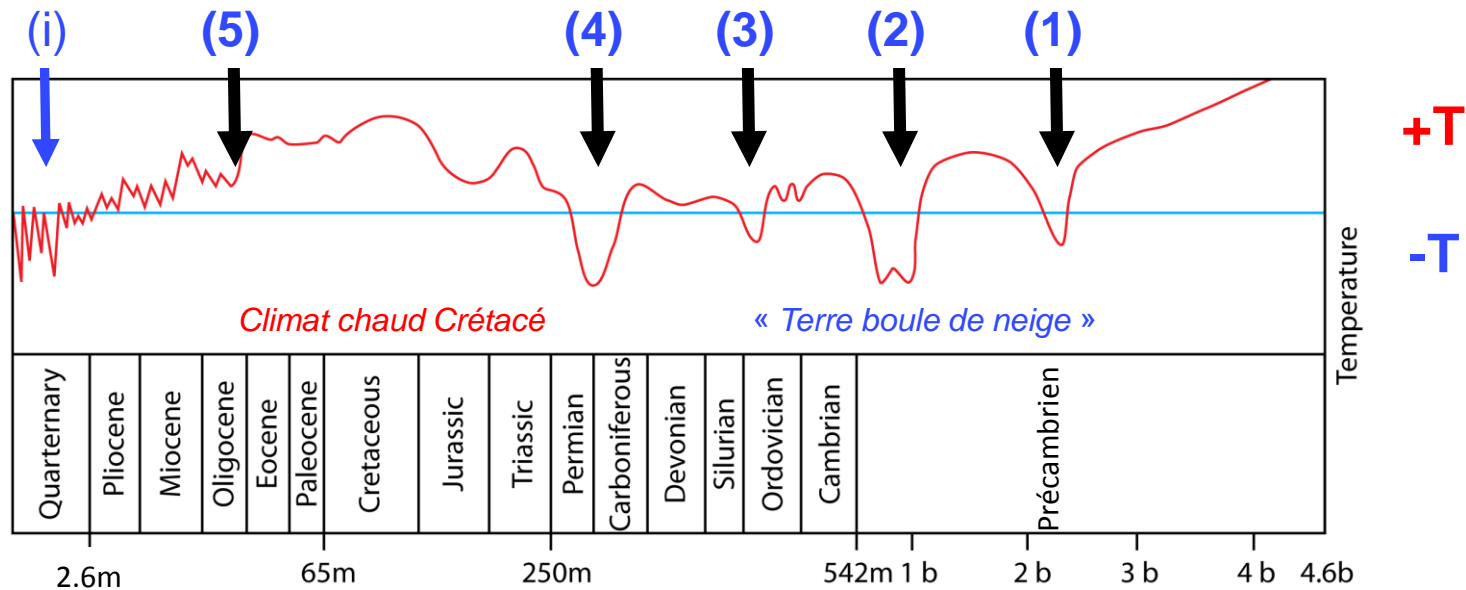
Répartition des différents climats définis selon la classification de Köpen-Geiger  
Kottek et al. (2006)



Répartition de la biodiversité caractérisée ici par le nombre d'espèces de plantes terrestres (vasculaires) présentes. Barthlott et al. (1997)



## Le climat à l'échelle des temps géologiques



Variation de température, échelle logarithmique (! Zoom sur les temps récents !)

- (1) La *glaciation huronienne* : -2,4 à -2,1 Ga
- (2) La *glaciation du néo-Protérozoïque* : 850 à 550 Ma BP  
(BP : « Before Present » = année 1950)
- (3) La *glaciation ordovicienne* : vers 440 Ma BP
- (4) La *glaciation permo-carbonifère* : 330 à 260 Ma BP
- (5) La *glaciation oligocène - ...* : depuis 35 Ma BP **actuelle**
- (i) Cycles « glaciaires-interglaciaires » du *Quaternaire* : depuis ≈ 3 Ma BP

# L'avènement de l'ère glaciaire au Cénozoïque (sur 50 Ma)

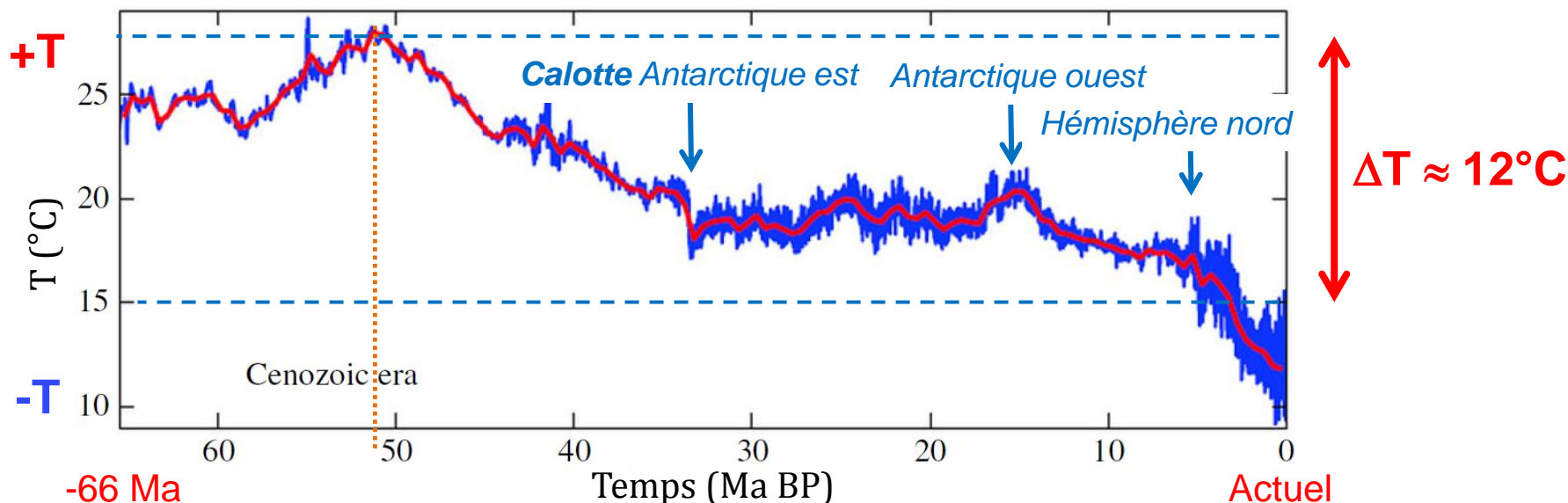
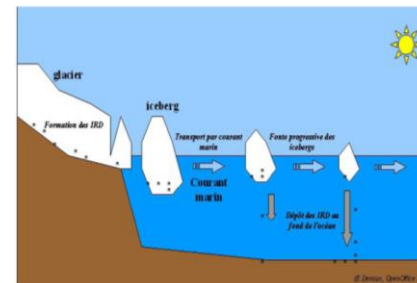
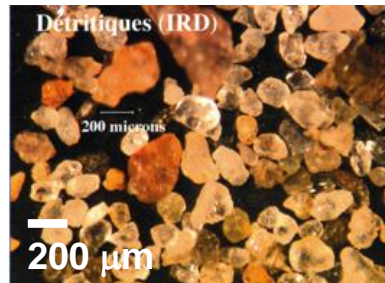


## Les variations des paramètres climatiques

### \* La température moyenne de surface

*! calotte de glace : eau d'origine météorique, épaisseur 2-4 km, repose sur un continent ≠ banquise !*

*Eléments détritiques grossiers (quartz) ou IRD (Ice Rafted Debris) et schéma de leur formation.*



*Evolution de la température globale de la surface de la Terre depuis 65 Ma.  
Hansen et al. (2013)*

*Test actuel de foraminifère benthique, *Heterostegina depressa*, en  $\text{CaCO}_3$ , 4,3 mm, dans lequel on mesure ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) soit  $\delta^{18}\text{O}$*



## Les conséquences de l'évolution climatique

### \* Impact sur la cryosphère

Apparition de calottes de glace : en Antarctique : **-35 Ma** (est), **-15 Ma** (ouest)  
aux hautes latitudes de l'hémisphère nord : **-5 Ma**

### \* Impact sur la biosphère

Evolution de la vie au Cénozoïque :

#### - Flore

- Explosion des « plantes en C4 »



*climats secs*

« plantes en C3 »



60% graminées

*climats tempérés*

- Apparition des prairies, savanes



*Paysage au Cénozoïque*

## - Faune

- Développement des mammifères capables de maintenir leur T° corporelle constante mieux adaptés au refroidissement climatique

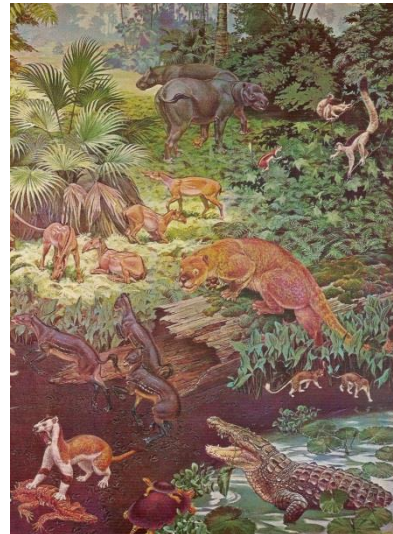


Crise biologique il y a  $\approx 65$  Ma (disparition 50% espèces)



Paléocène (66-56 Ma)

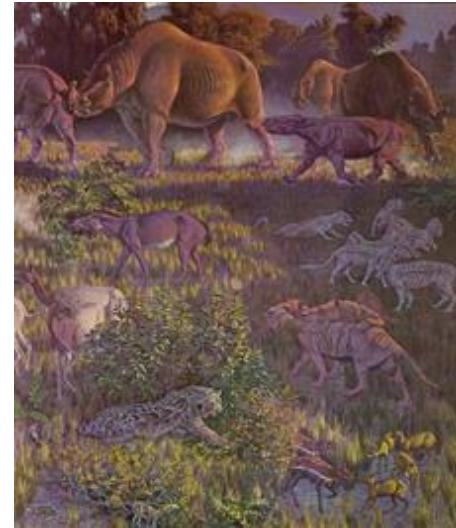
Apparition:



Eocène (56-34 Ma)

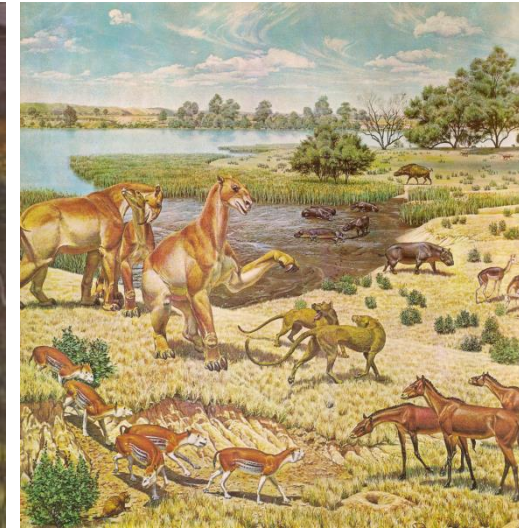
Ongulés  
**Primates**

Formes naines



Oligocène (34-23 Ma)

Augmentation de la taille



Miocène (23-5 Ma)

**Hominidés**  
(« grands singes »)

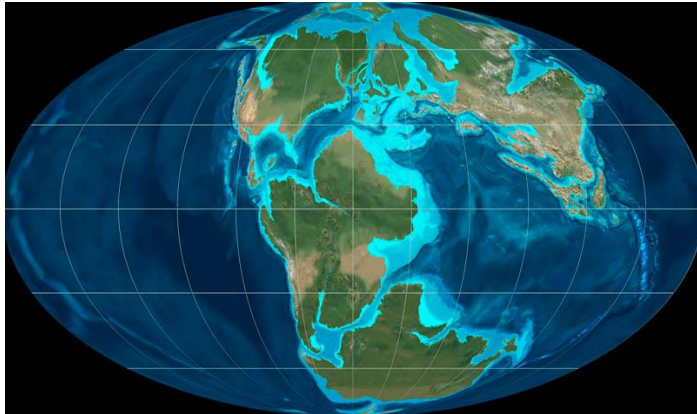
Les mammifères colonisent les milieux (terrestres) marins et aériens

- Faune adaptée aux changements de végétation et de climat
- Des dizaines de Ma d'évolution pour conduire à la flore et à la faune actuelle ...

## Les causes

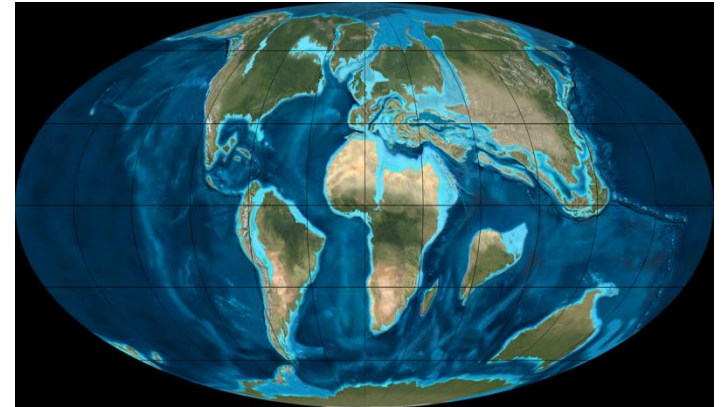
\* La dérive du continent Antarctique

- passage en position polaire

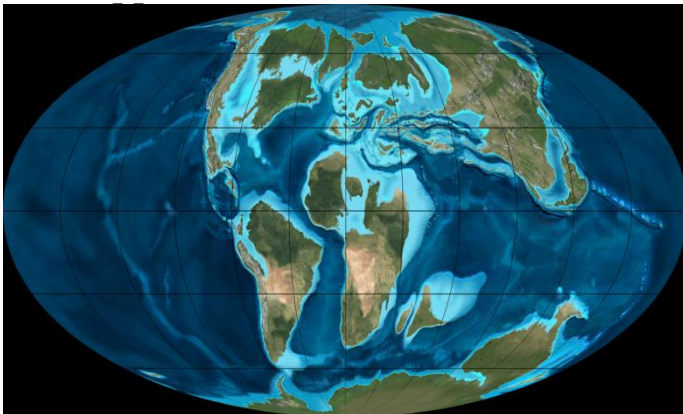


*Fin Jurassique  $\approx -150$*

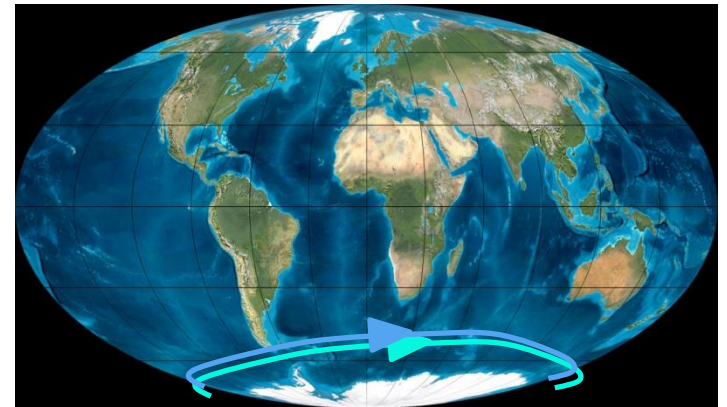
- puis isolement des autres continents



*Début Paléocène  $\approx -65$  Ma*



*Fin Crétacé  $\approx -90$  Ma*



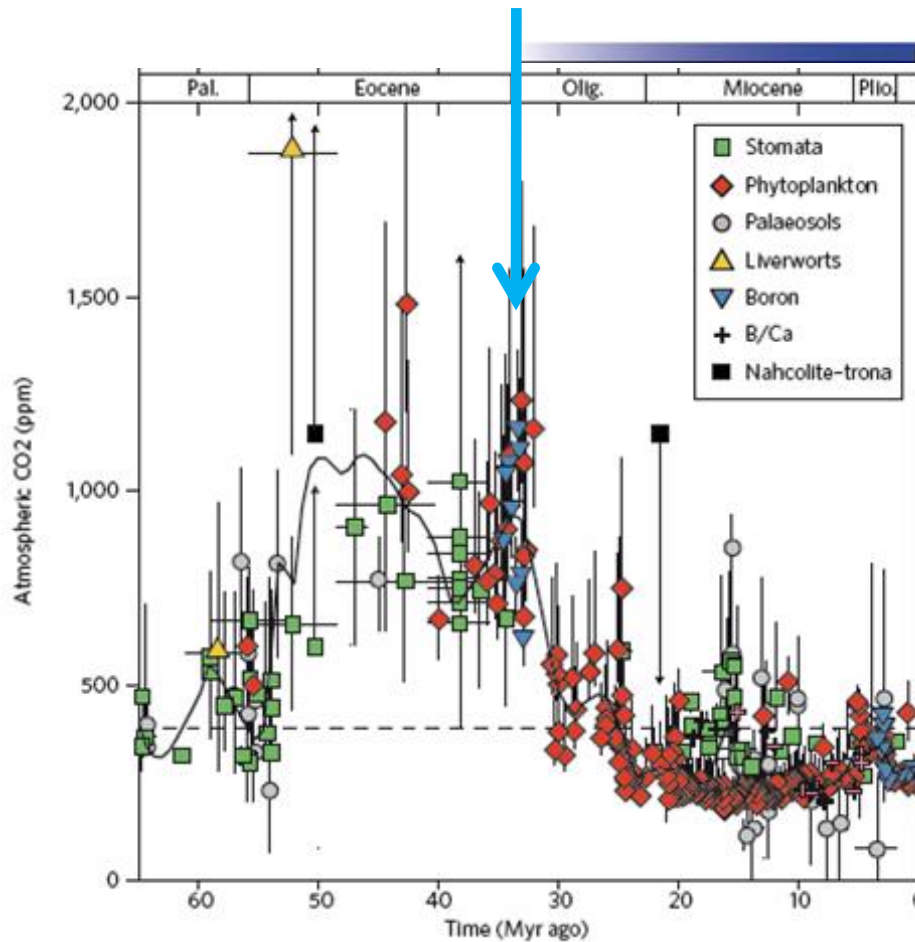
*Quaternaire  $\approx -2$  Ma*

→ Région la plus froide de la planète

= construction progressive de calotte(s) de glace

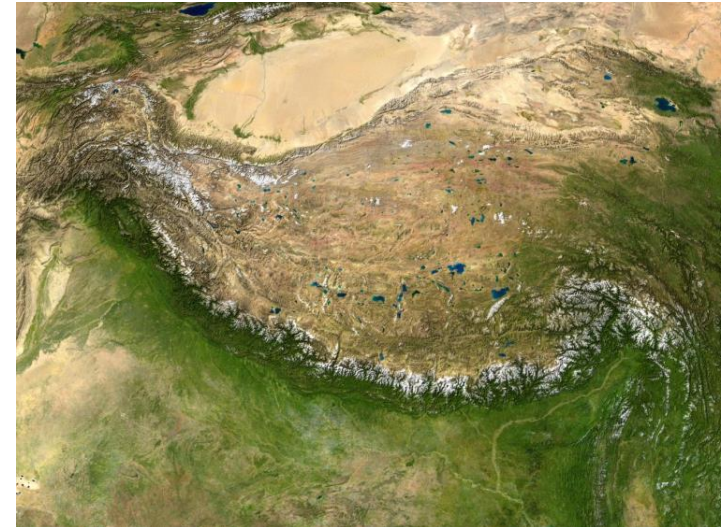
→ Isolement thermique du continent

## \* La diminution de la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique



Développement de la calotte antarctique

Collision Inde/Asie il y a  $\approx 50$  Ma



*Plateau tibétain*

$2,5 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup> à 5000 m :  
grande surface d'érosion à haute altitude

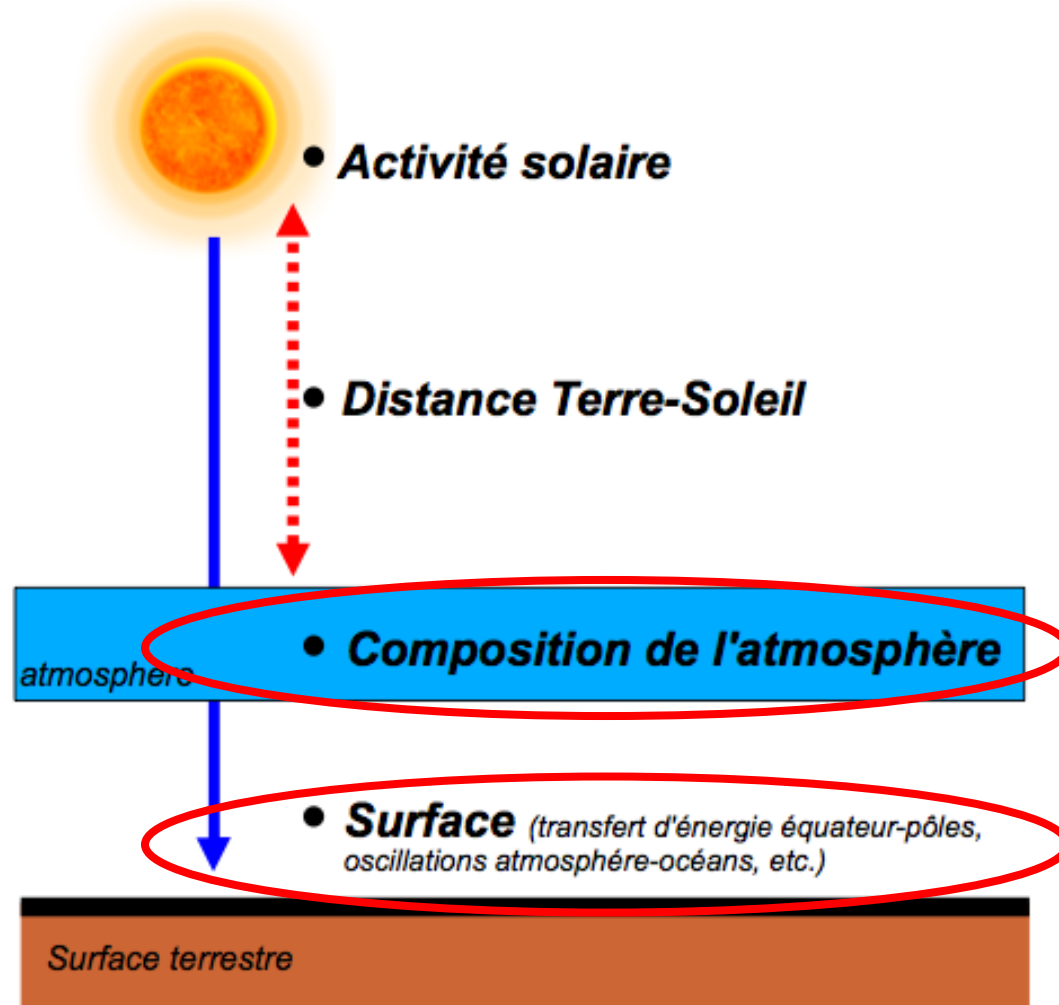
*Evolution du CO<sub>2</sub> atmosphérique au Cénozoïque reconstruite grâce à différents proxys marins et terrestres. La ligne tireté indique la teneur actuelle du CO<sub>2</sub> atmosphérique (390 ppmv).*

Beerling et Royer (2011)

Les causes des variations climatiques :

$\Delta T \approx 12^\circ\text{C}$  sur 50 Ma

50 000 000 ans



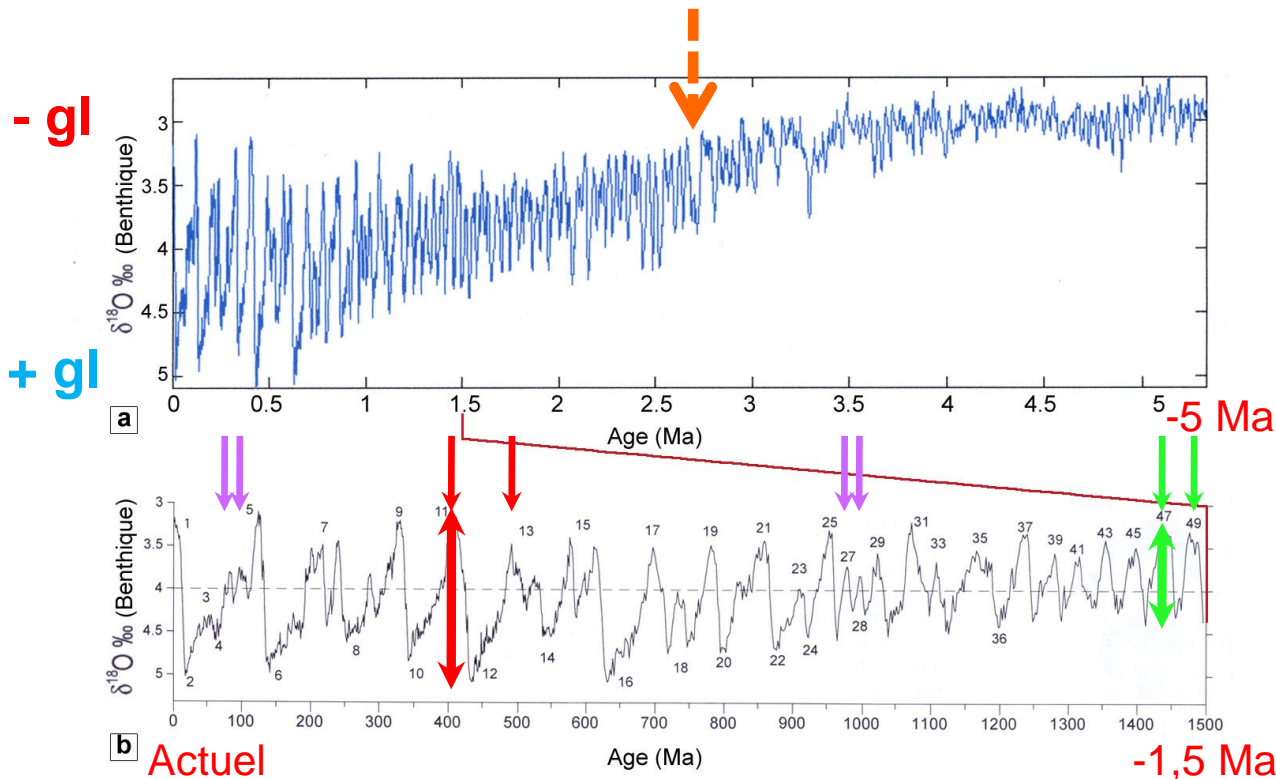


# Les alternances glaciaires/interglaciaires du Quaternaire (depuis 2,6 Ma)



## Les variations des paramètres climatiques

### \* Les enregistrements



Evolution depuis 5 Ma du signal isotopique  $\delta^{18}O$  des tests de foraminifères benthiques. Lisiecki and Raymo (2005)

Depuis 2,7 Ma BP :

- période  $\approx 40\ 000$  ans
- amplitude  $\rightarrow \Delta h \approx 50^{\text{aine}}$  m

Depuis 1 Ma BP (800 ka) :

- + période  $\approx 100\ 000$  ans
- amplitude  $\rightarrow \Delta h \approx 120$  m

Analyse en fréquence du signal climatique :

périodes  $\approx 22\ 000$  ans

41 000 ans

100 000 ans

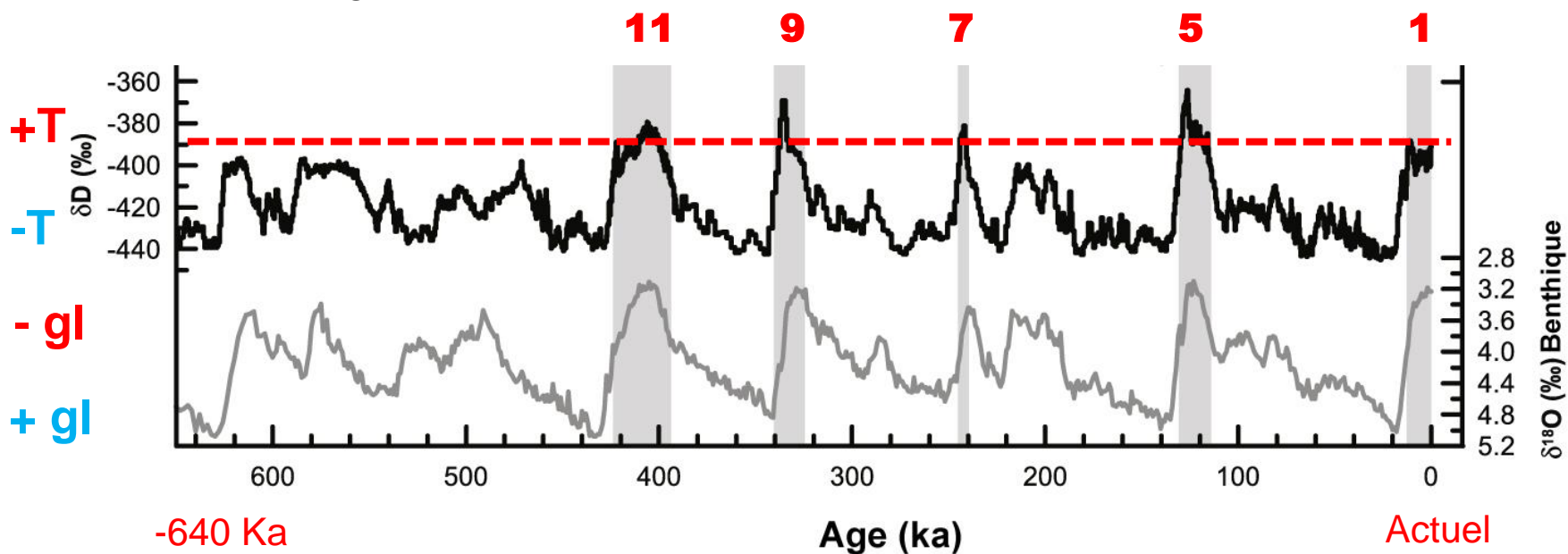
Existence d'une **cyclicité** depuis 2,7 Ma BP

## \* La température moyenne de surface

Nombreux enregistrements marins et continentaux

*l'Eémien*

*l'Holocène*



*Evolution du  $\delta D$  de la glace sur près de 800 000 ans grâce au forage EPICA au centre de l'Antarctique (Dôme C) – donne la température locale, en parallèle avec celle du  $\delta^{18}O$  des foraminifères benthiques*  
Jouvel et al. (2007)

### - Périodes interglaciaires / périodes glaciaires :

- Durée plus courtes  $\approx$  1000 à 30 000 ans
- Mise en place plus rapide  $\approx$  10 000 ans (contre  $\approx$  100 000 ans)

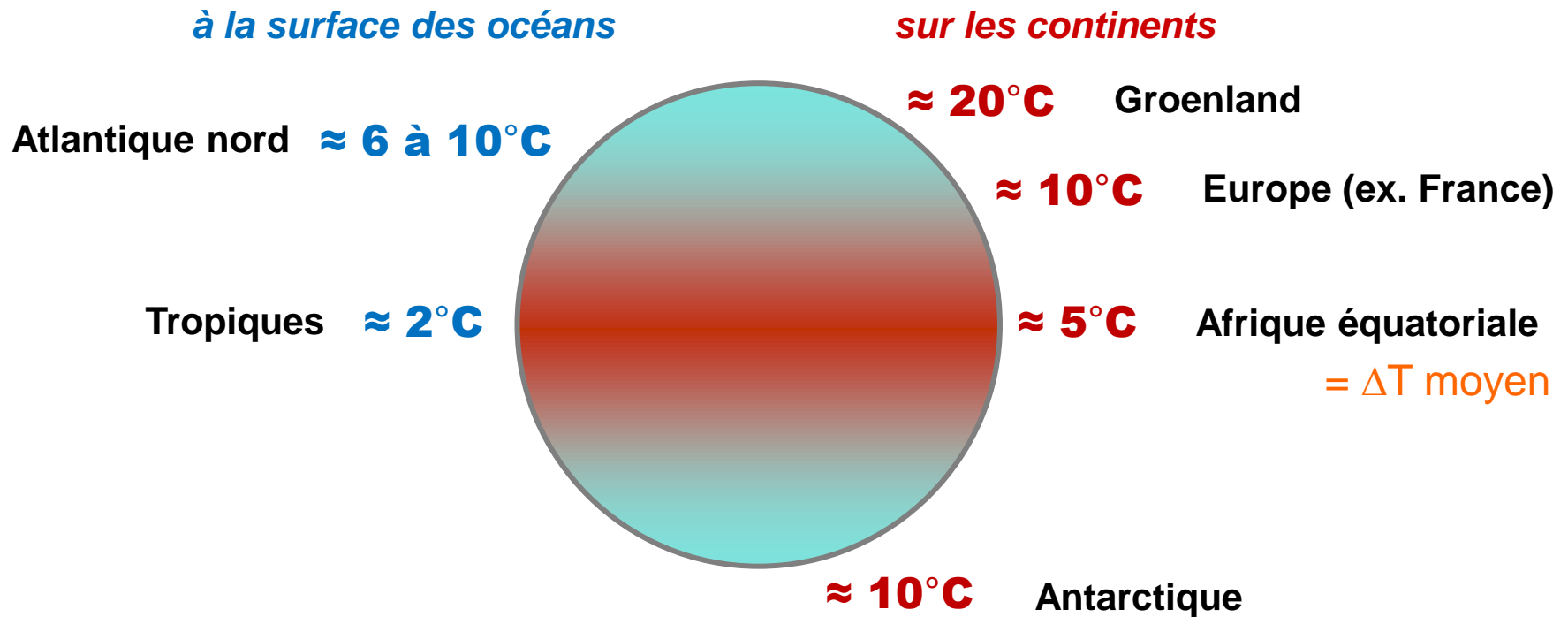
- 5 dernières périodes interglaciaires : les plus importantes

- Interglaciaire plus chaud que l'interglaciaire actuel ? L'Eémien (-125 Ka) : +2°C

- Variation de la température moyenne sur les derniers cycles climatiques (800 ka) :

**En 10 Ka à 100 Ka :  $\Delta T \approx 5^{\circ}\text{C}$**

- Refroidissement s'amplifie plus on se rapproche des pôles



*Variations de température moyenne en fonction des latitudes lors du passage d'une période interglaciaire à une période glaciaire.*

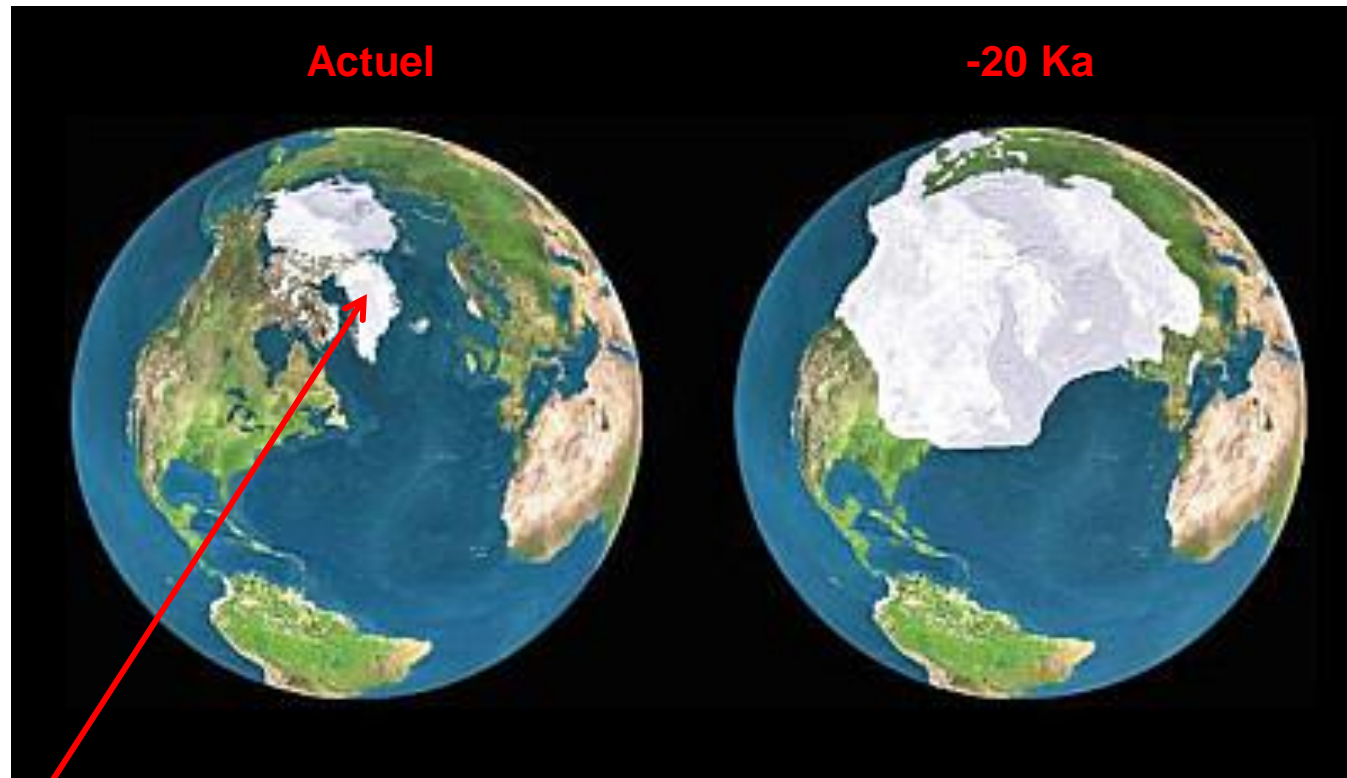
- Refroidissement plus marqué sur les continents que sur les océans

## Les conséquences des oscillations climatiques

\* Impact sur la cryosphère

Ex. Dernier Maximum Glaciaire (DMG) :  $\approx -20$  Ka

- Deux grandes calottes de glace en hémisphère nord (HN)



*Extension des calottes glaciaires et de la banquise actuellement et au DMG*

= 6 % du volume des calottes de l'hémisphère nord en période glaciaire

## - Des glaciers très développés



*Extension des calottes glaciaires et des glaciers sur l'Europe au DMG et type de végétation existant à cette époque.*

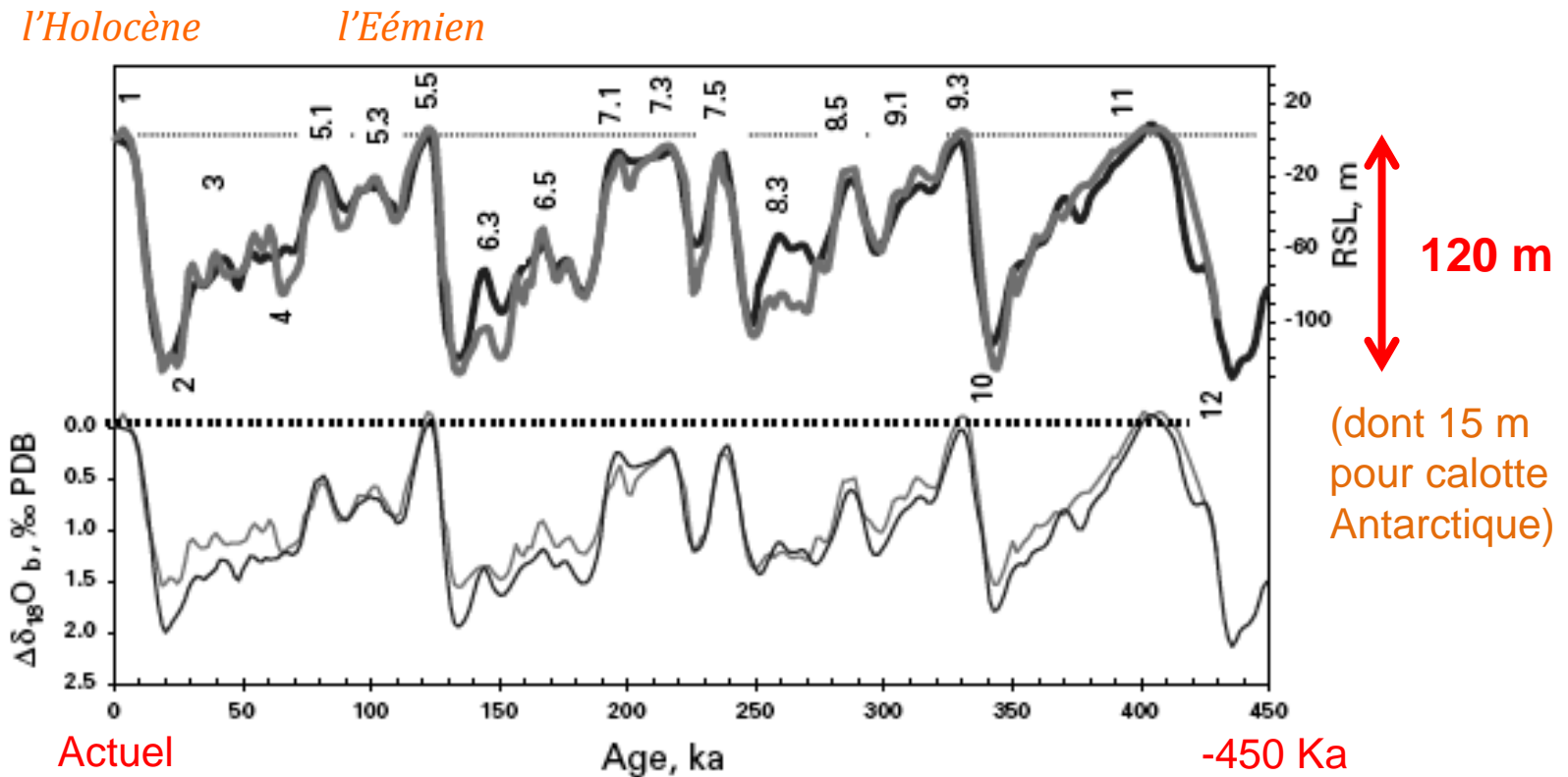


*Extension des glaciers alpins :*

- au DGM (Glaciation de **Würm** : -70 à -20 Ka) : en blanc pâle
- pendant la glaciation de **Riss** (-190 à -130 Ka) : pointillés
- à **l'actuel** : en blanc

## \* Impact sur les océans

- Un niveau des mers plus bas de 120 m en période glaciaire / interglaciaire



Variation du niveau marin reconstruit (RSL: **Reconstructed Sea Level**, en haut)  
à partir des variations du  $\delta^{18}\text{O}$  des foraminifères benthiques (en bas)  
pour les données de l’Atlantique nord (lignes noires) et du Pacifique (lignes grises).

Waelbroeck et al. (2002)

## \* Impact sur la biosphère

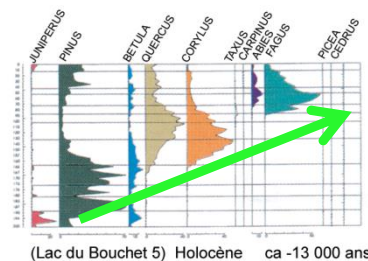
### - L'évolution des habitats

succession de végétation semblable à chaque interglaciaire

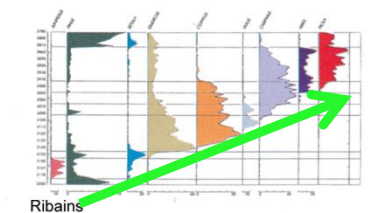
→ quasi-permanence du renouvellement des équilibres écologiques



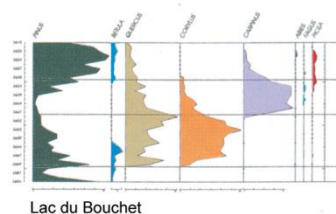
Temps ↑



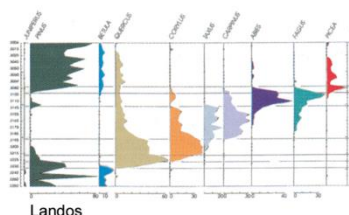
**MIS 1, 12 ka BP,**  
**Holocène**



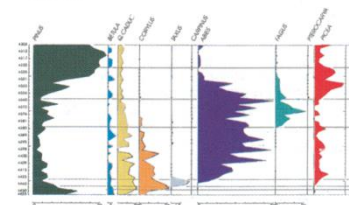
**MIS 5, 125 ka BP,**  
**Eémien**



**MIS 7, 245 ka BP**



**MIS 9, 340 ka BP**



**MIS 11, 430 ka BP**

*Evolution du couvert végétal en France (Massif Central) reconstituée grâce à l'analyse des pollens déposés dans les tourbes, au cours de l'interglaciaire actuel et des quatre interglaciaires précédents.*

De Beaulieu et al. (1997)

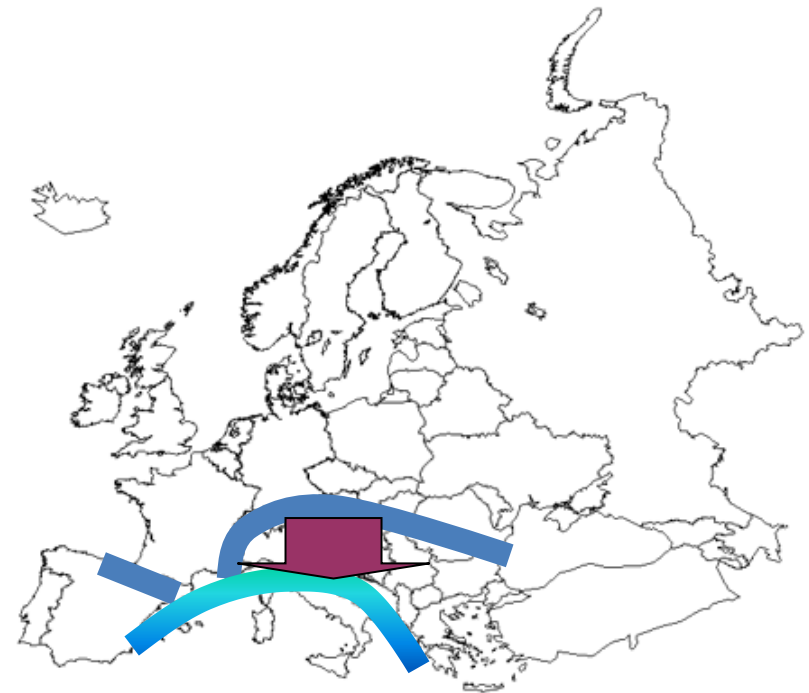
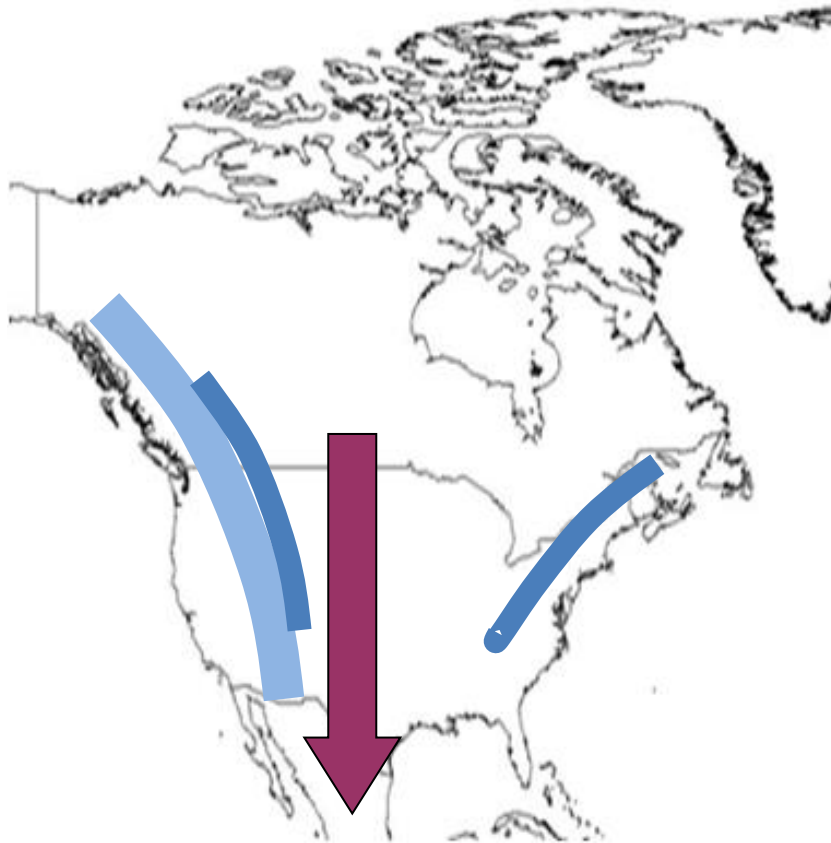


## - L'impact des barrières géographiques

Nombre actuel d'espèces en Amérique du nord et en Europe :

Arbres : **253**    **+ 100 %**  
Oiseaux : **725**    **+ ≈ 50 %**

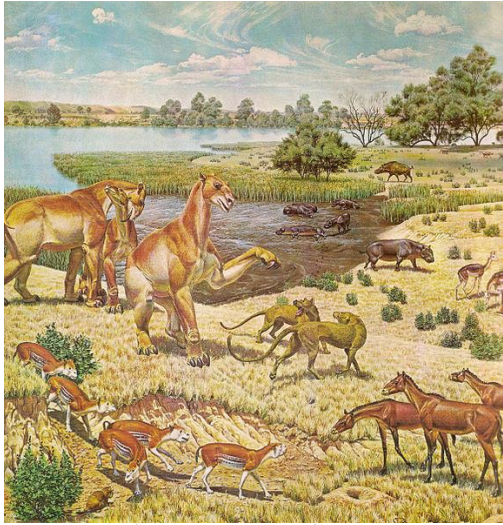
Arbres : **124**  
Oiseaux : **500**



*Schéma des **barrières géographiques** en Europe et en Amérique du Nord, et des **flux migratoires continentaux** qui en découlent lors de l'établissement d'une période glaciaire*

- Dans ce contexte climatique global apparaît le genre *Homo*

= des conditions de vie très différentes des dernières dizaines de millions d'années

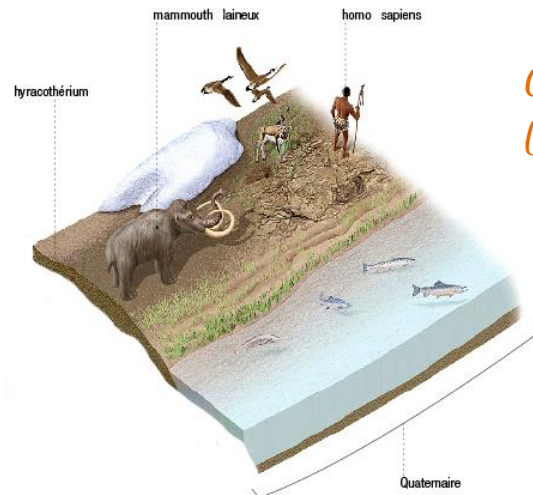
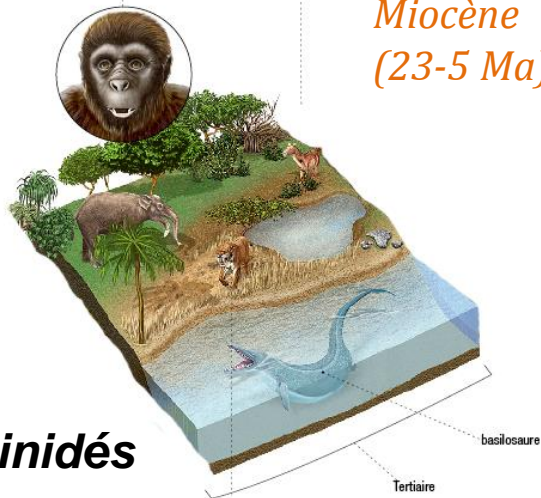


*Miocène  
(23-5 Ma)*



*Quaternaire  
(2,6 Ma-actuel)*

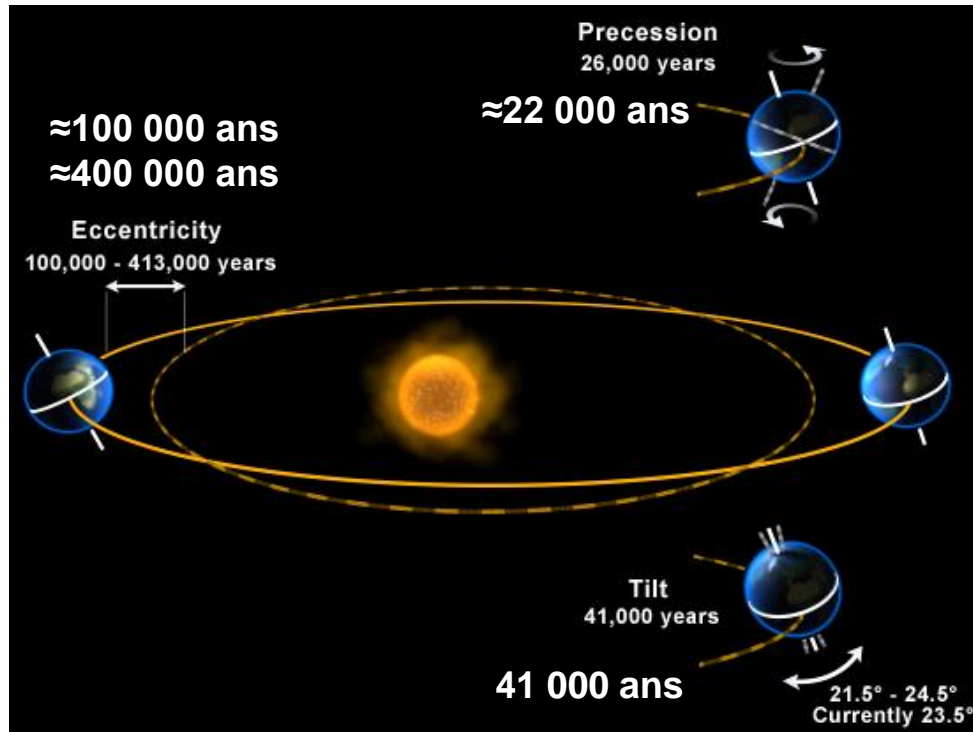
**Hominidés**



Avènement du **genre *Homo*** il y a  $\approx$  **-2,4 Ma**

*Reconstitutions des paléopaysages et de leur faune au Miocène (gauche) et au Quaternaire (droite)*

## Les causes



*Paramètres orbitaux responsables des alternances climatiques du Quaternaire, et leurs périodes.*

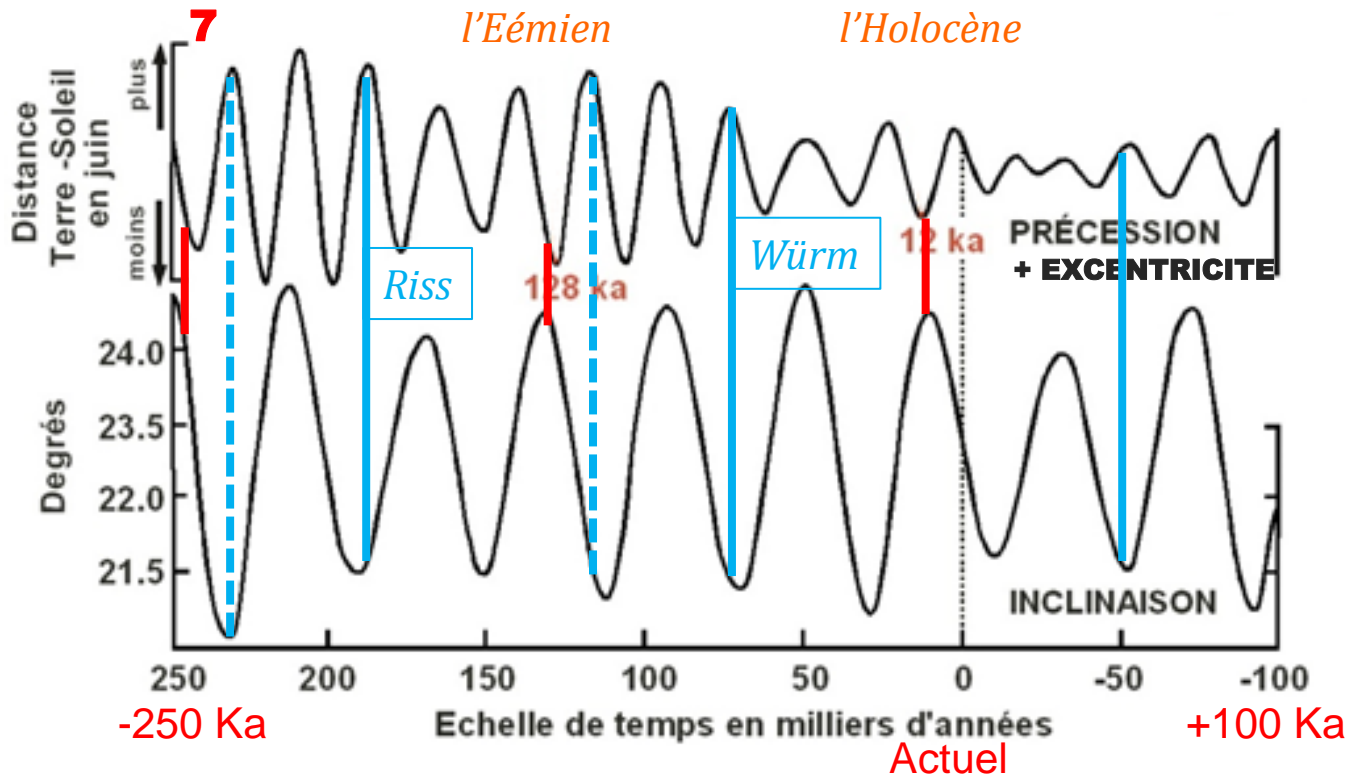
- l'**excentricité** de l'orbite terrestre,
- la **précession** et
- l'**inclinaison** de l'axe de rotation de la Terre

dictent l'évolution de l'insolation estivale de la surface terrestre aux moyennes latitudes de l'HN

= cause des oscillations climatiques

→ **Les paramètres orbitaux**

Les variations des 3 paramètres permettent de reconstituer les alternances passées :



Evolution au cours des derniers 250 ka et des prochains 100 ka :

(i) de la distance Terre-Soleil au solstice d'été dans l'HN

(*excentricité* de l'orbite terrestre et *précession* de l'axe de rotation de la Terre),

(ii) de l'*inclinaison* de l'axe de rotation de la Terre.

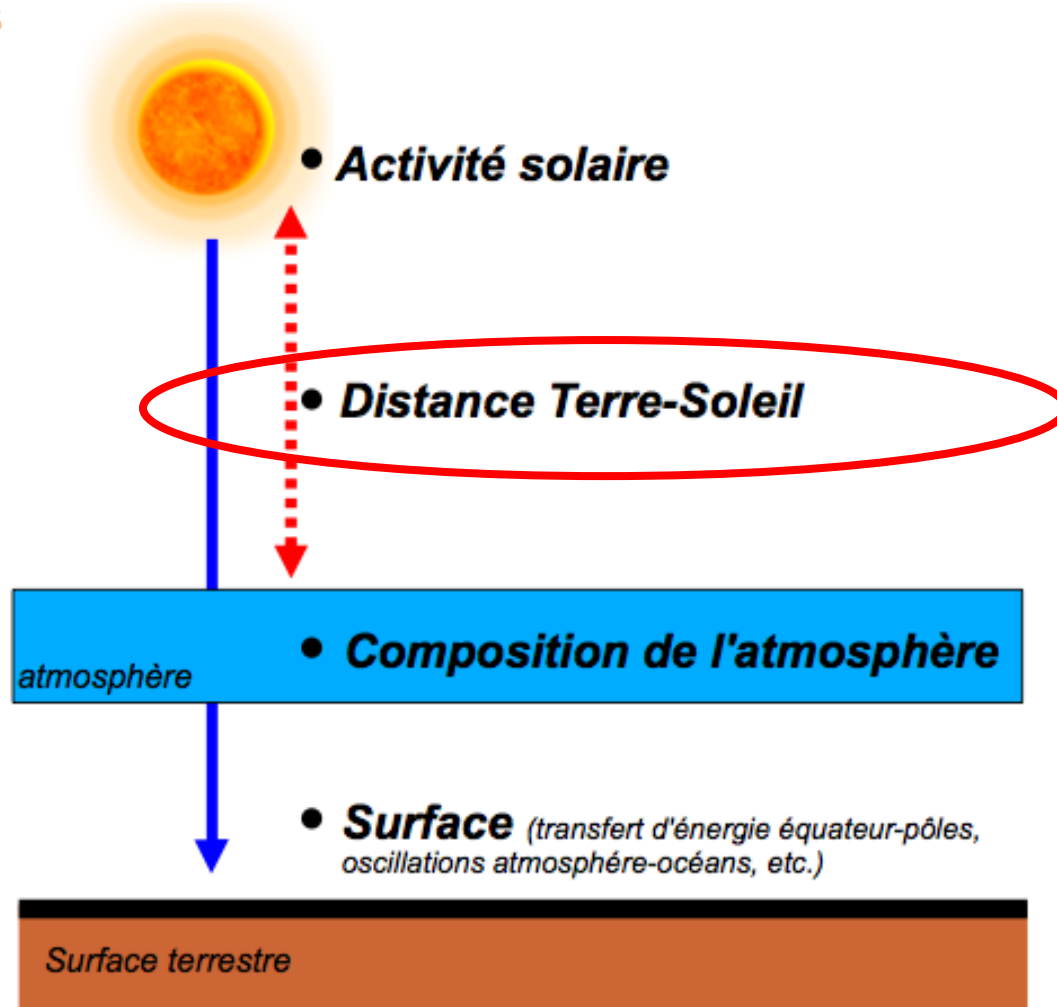
En opposition de phase : rapproché = **déglaciation** éloigné = **glaciation** possibles

Les alternances futures ? Prochaine initiation climatique : **glaciation** dans 50 000 ans

Les causes des variations climatiques :  $\Delta T \approx 5^\circ\text{C}$  sur 10 à 100 000 ans

50 000 000 ans

100 000 ans



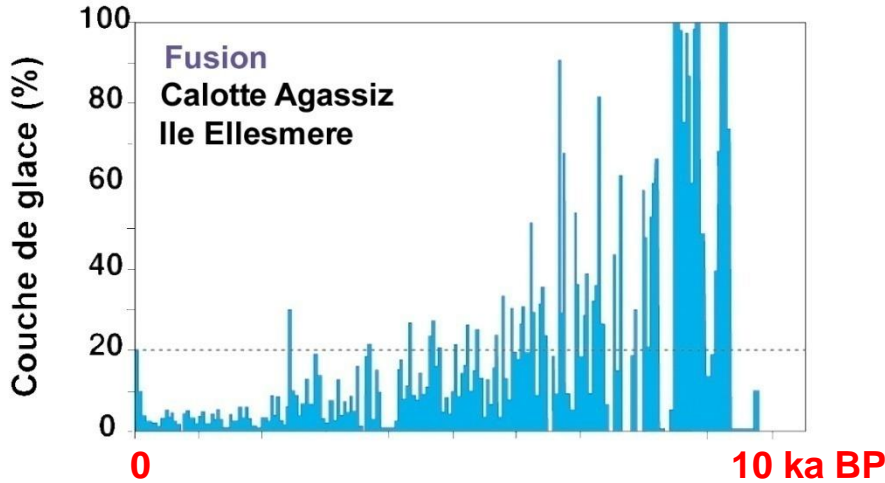
Durant l'Holocène, refroidissement (depuis  $\approx 10\ 000$  ans)  
et fluctuations climatiques ( sur  $\approx 600$  ans)



## La tendance de fond sur l'Holocène

### Les variations des paramètres climatiques

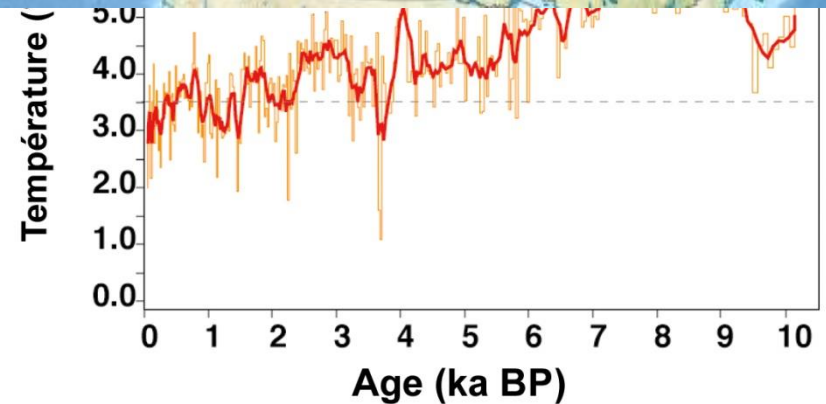
#### \* Les enregistrements



Nombre d'épisodes de fusion estivale dans la petite calotte glaciaire de l'île d'Ellesmer (Canada), l'Agassiz Ice Cap Koerner et Fischer (1990)

Depuis 10 000 ans, le climat s'est lentement refroidit jusqu'à maintenant :

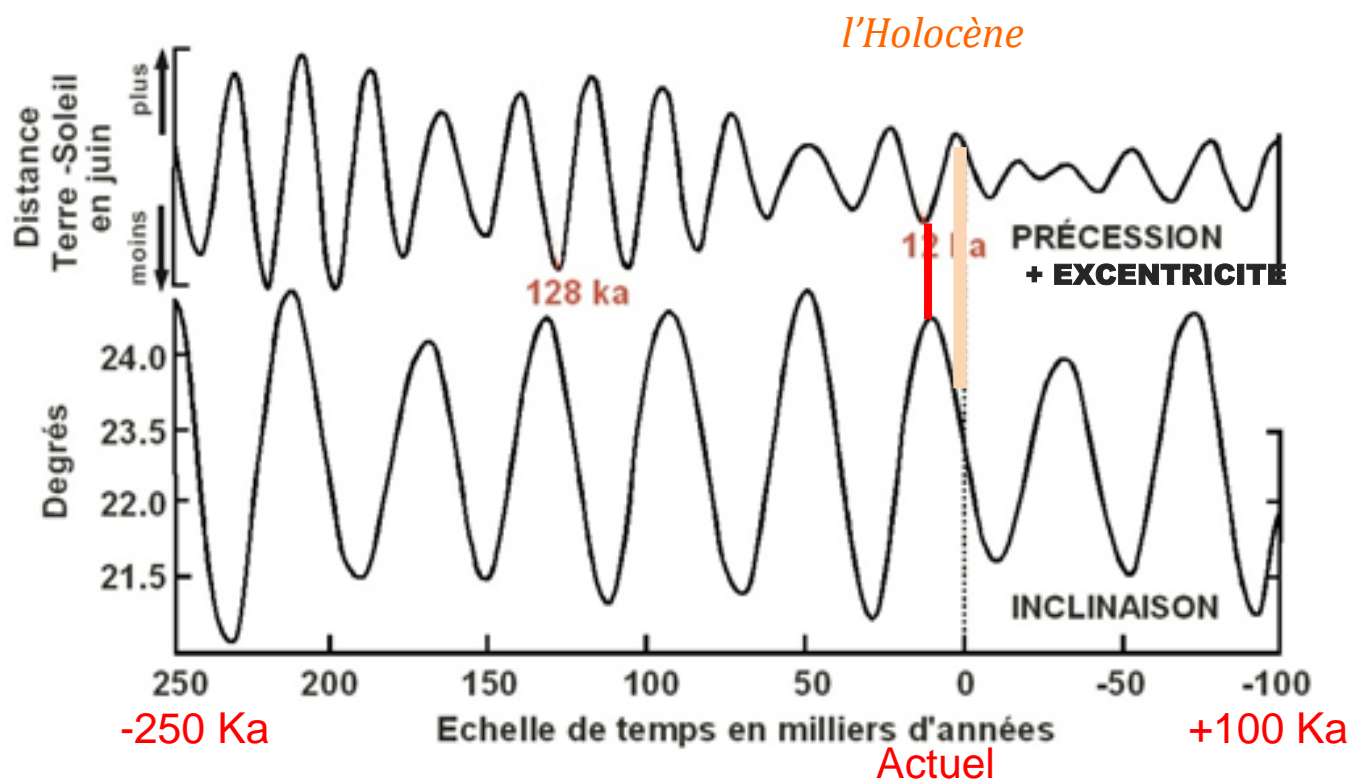
$$\Delta T \approx 1^\circ\text{C}$$



Température annuelle moyenne estimée à partir de mesures isotopiques dans une stalagmite de la grotte de Mo I Rana (Norvège) Lauritzen et Lundberg (1998)

## Les causes

### → Les paramètres orbitaux



Evolution au cours des derniers 250 ka et des prochains 100 ka :

(i) de la distance Terre-Soleil au solstice d'été dans l'HN

(*excentricité* de l'orbite terrestre et **précession** de l'axe de rotation de la Terre),

(ii) de **l'inclinaison** de l'axe de rotation de la Terre.

diminution progressive de l'insolation estivale dans l'HN

- depuis  $\approx 10\,000$  ans
- la distance Terre Soleil en juin a augmenté
  - l'inclinaison a diminué

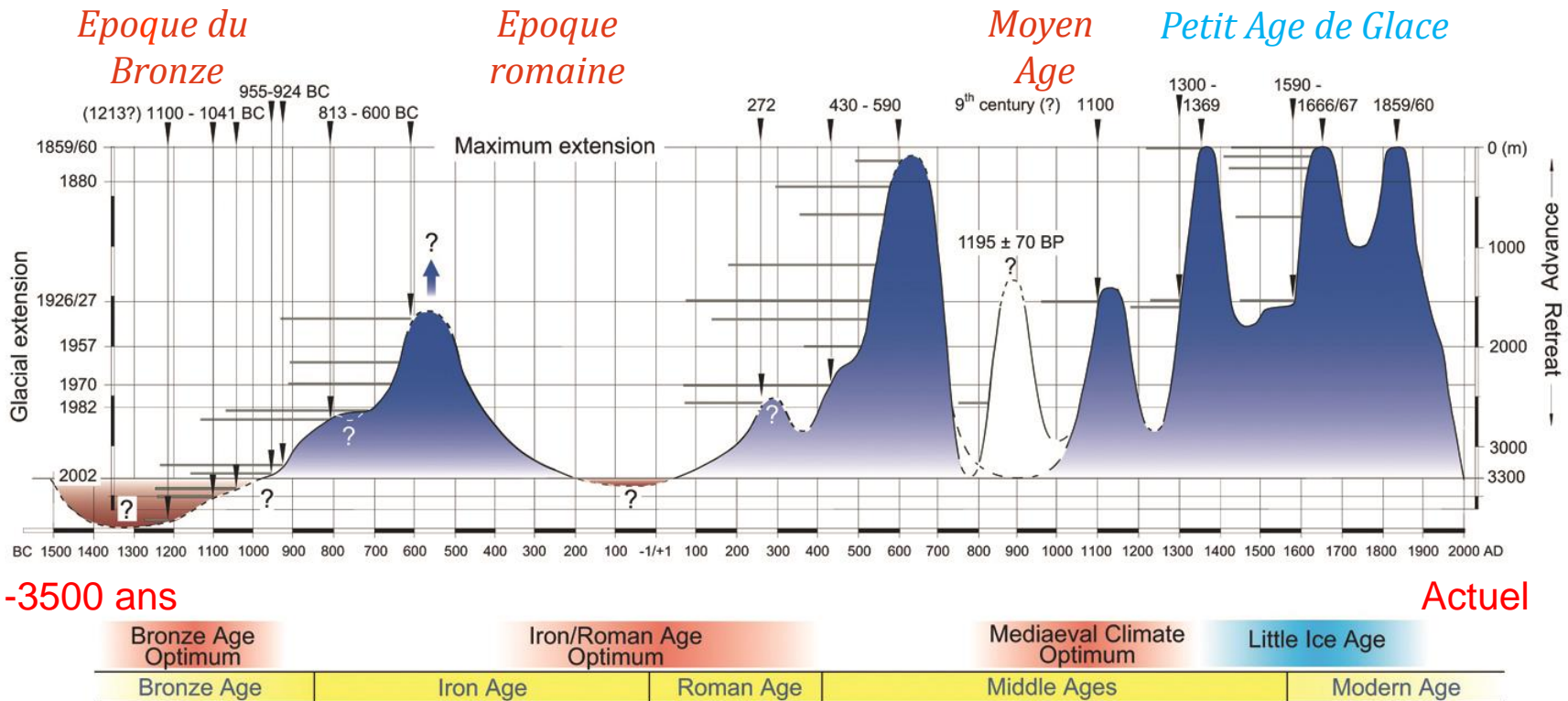


# Les Néoglaciations de l'Holocène : ex. du PAG

## Les variations des paramètres climatiques

\* Les enregistrements

Colonies vikings partant pour le « Greenland »

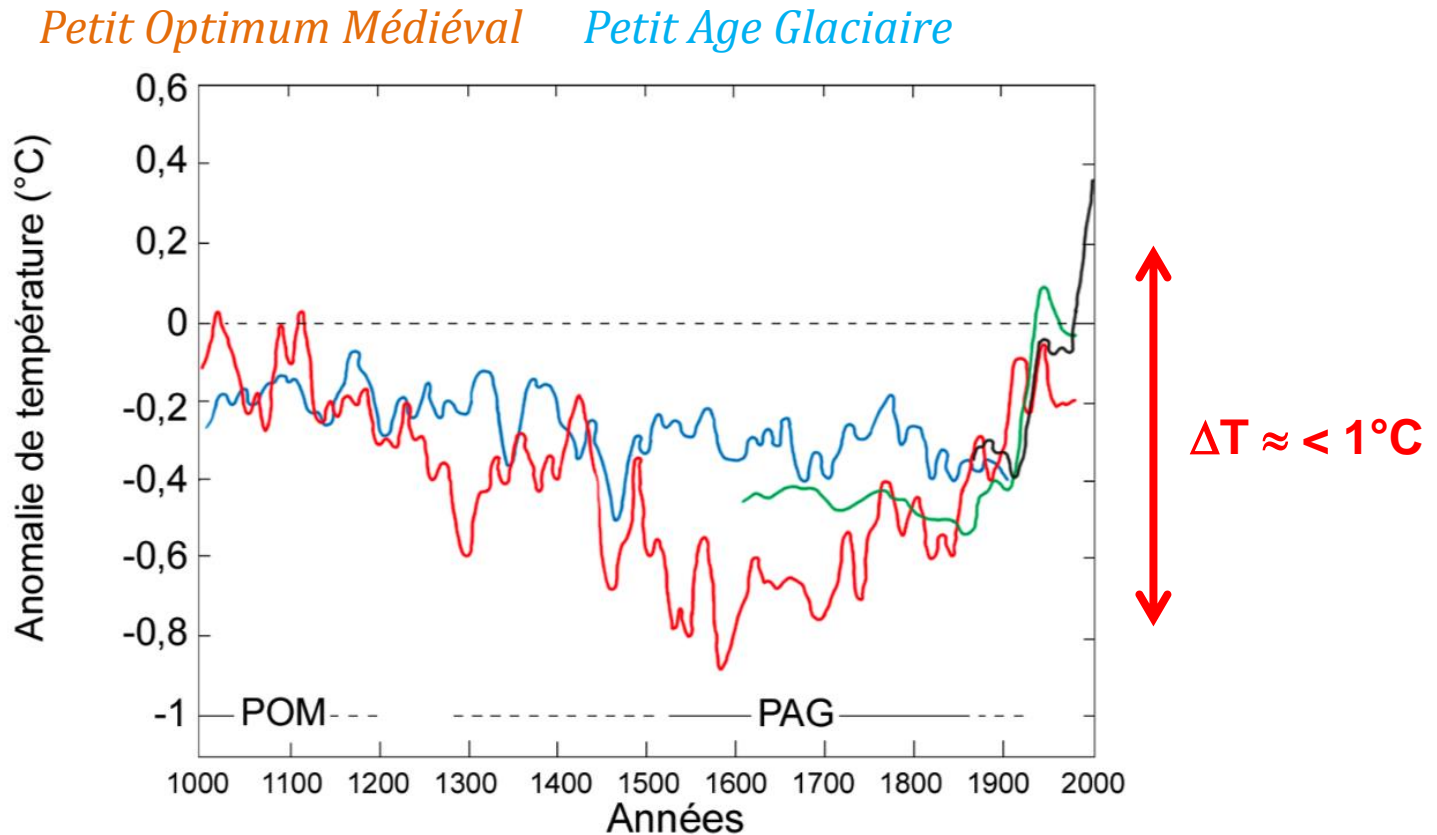


-3500 ans

Actuel

**Variations de la longueur du glacier d'Aletsch (Alpes suisses) sur les 3000 dernières années.**  
 L'extension maximale est atteinte au cours du PAG entre le 14<sup>ème</sup> et le 19<sup>ème</sup> siècle.  
 Depuis 1850, le front du glacier a régressé de plus de 3000 m.  
 Holzhauser et Zumbühl (2003)

## Les variations de température



*Reconstitution de l'anomalie en température sur le dernier millénaire utilisant les glaciers comme indicateurs (période de référence : 1950-1980).*

Mann et al. (1999), Moberg et al. (2005), Oerlmans (2005)

- Durant l'Holocène et son refroidissement, le climat a fluctué
- Dernier de ces « coups de froid » et le plus fort : le Petit Age de Glace

## Les conséquences de l'évolution climatique

### \* Impact sur la cryosphère



*Le glacier d'Aletsch (Alpes suisses).*



*Evolution du glacier du Charquini (16°S, 5392 m) dans la Cordillère de **Bolivie** (Andes tropicales). Les cordons de moraines du glacier indiquent les retraits successifs du glacier après l'avancée du PAG.*

### \* Impact sur la biosphère

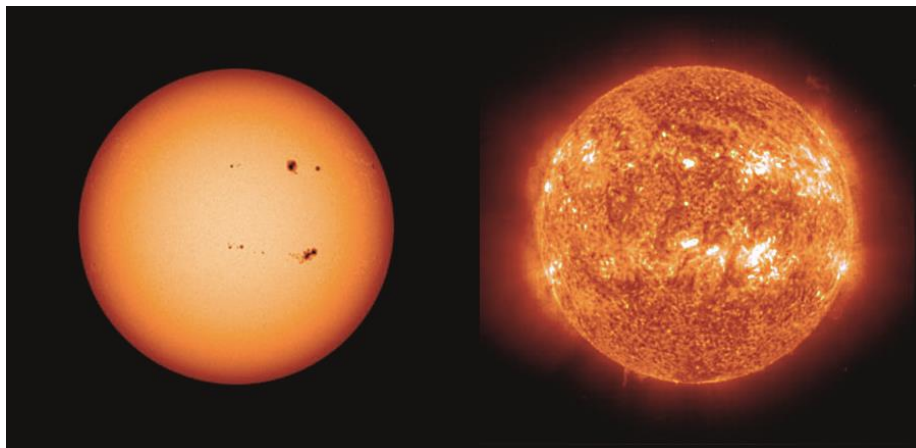


*Peinture de Bruegel l'Ancien [1525-1569]*



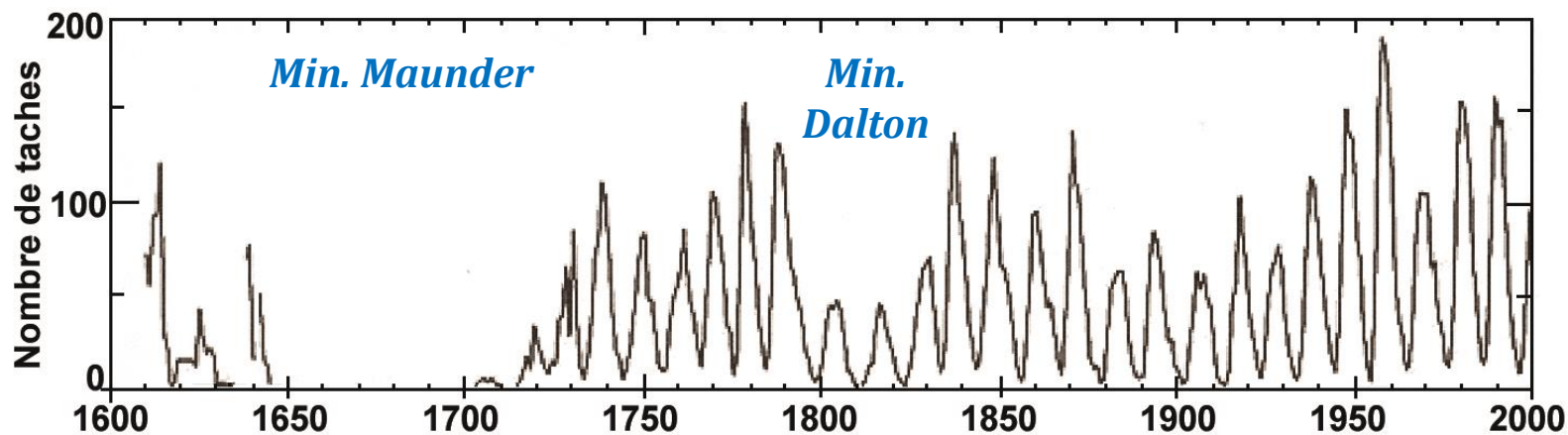
*Fondations vikings au Groenland*

## Les causes



Nb tâches élevé  
= Forte activité solaire

*Taches solaires 29/04/2000, en émission UV et en lumière naturelle*



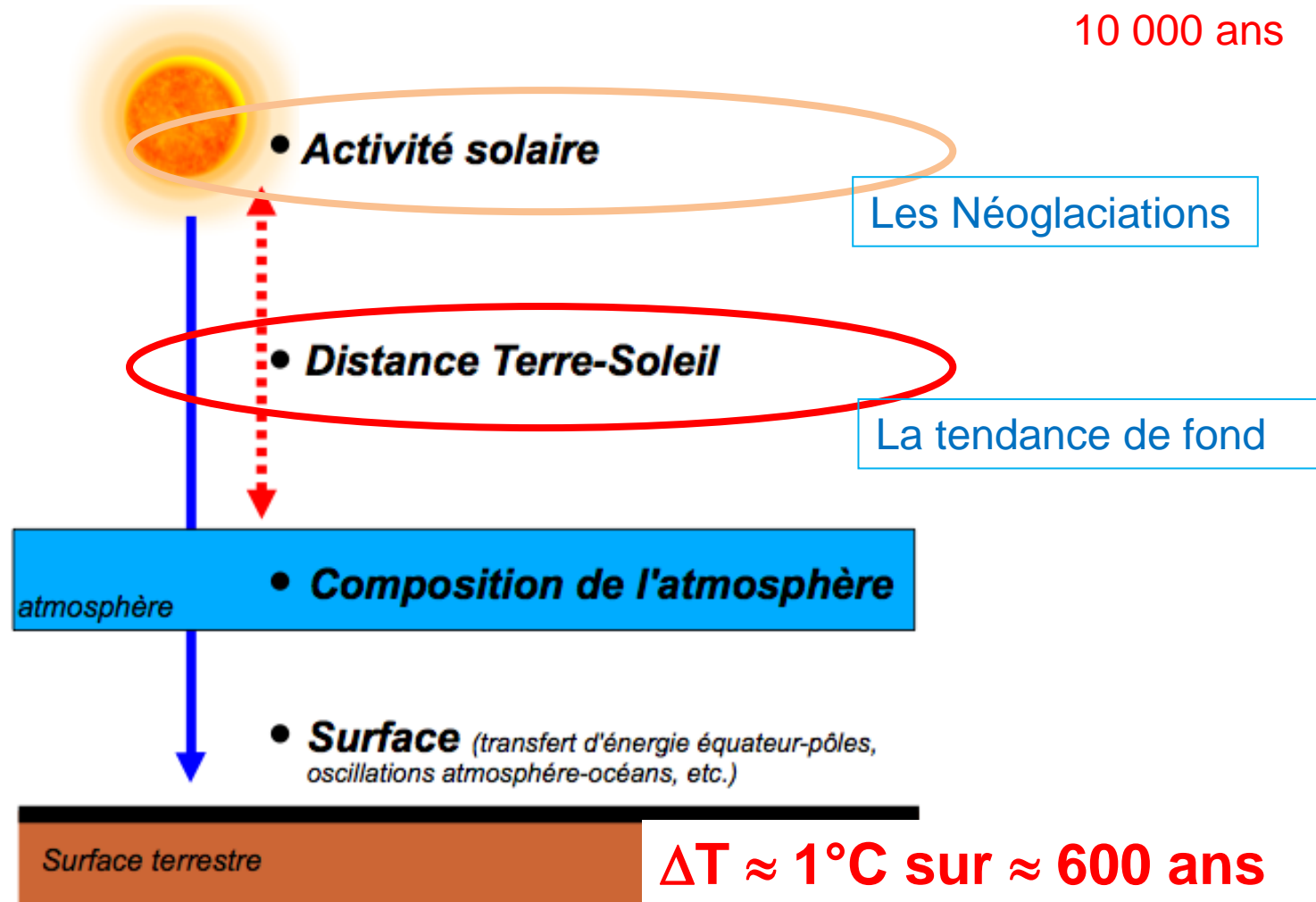
*Evolution du **nombre annuel de taches solaires** visibles à la surface du Soleil depuis 1610 .*

→ **Fluctuation de l'activité solaire**

Néoglaciations observées **depuis ≈ 5000 ans**

Les causes des variations climatiques :

$\Delta T \approx 1^\circ\text{C}$  sur 10 000 ans



600 ans

# Le changement climatique actuel et futur (sur 200 ans et plus)

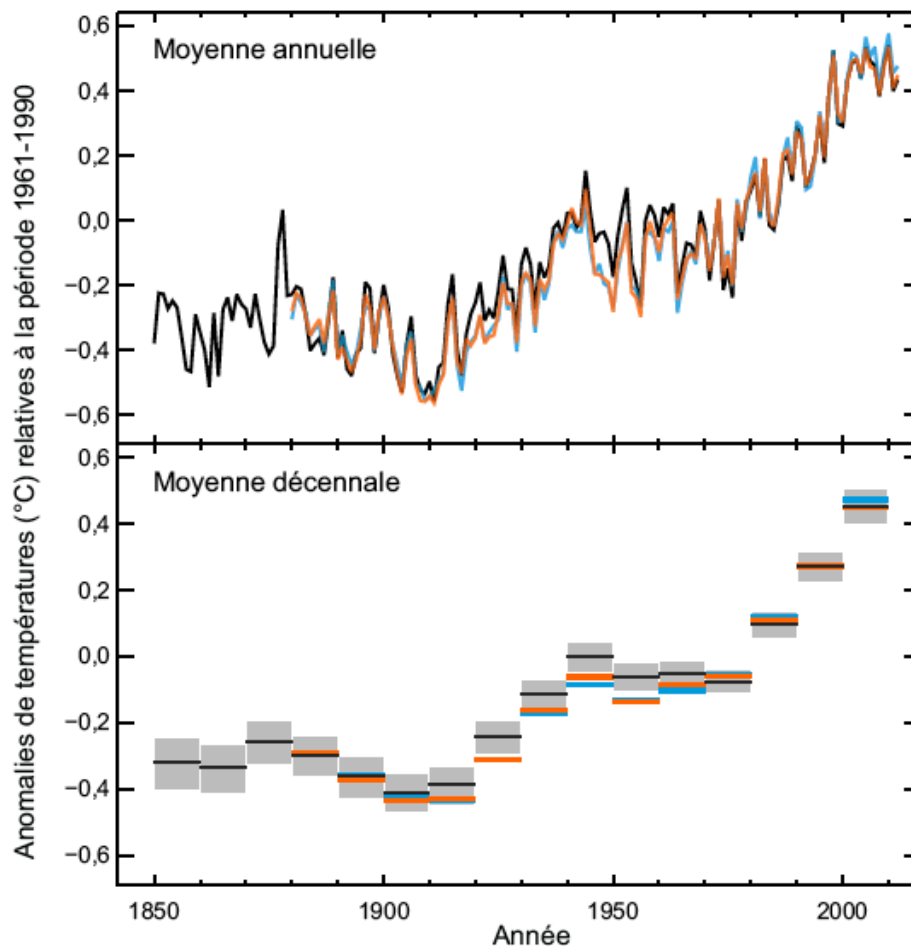


## Du début de l'ère industrielle à nos jours (1850-2010)

### Les variations des paramètres climatiques

#### \* Les enregistrements

#### Les variations de température



Depuis 150 ans,  
le climat se réchauffe

$$\Delta T \approx 1^{\circ}\text{C}$$

*Anomalies observées des température moyenne de la surface terrestre  
(terres émergées et océans) de 1850 à 2012.*

IPCC (2013)

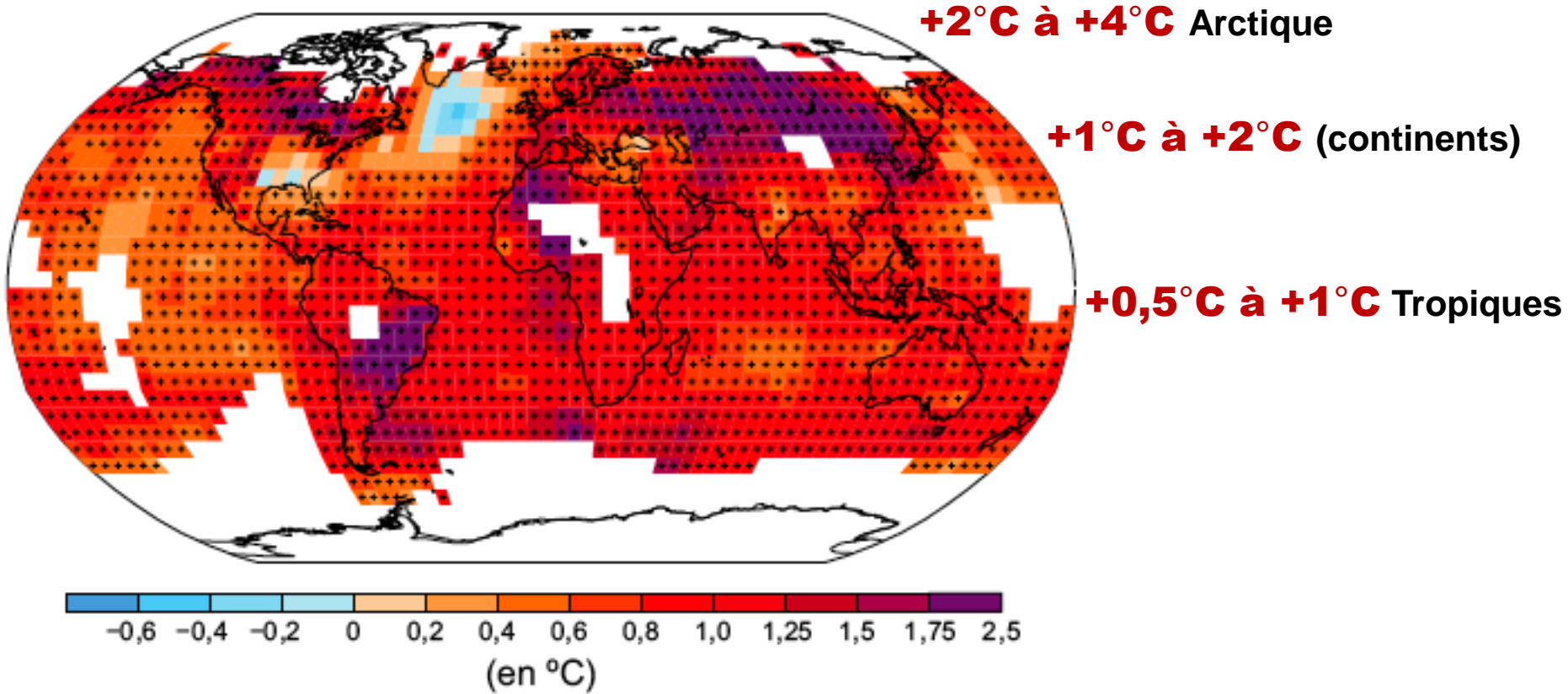
## La plus forte phase chaude des derniers millénaires



*La momie d'Ötzi, dont la dépouille a été retrouvée en 1991 à 3210 m dans les Alpes de l'Ötztal, entre l'Italie et l'Autriche, vivait il y a 5300 ans (gauche).  
Sa reconstitution est présentée ici (droite).*



- Réchauffement s'amplifie plus on se rapproche des pôles



*Evolution de la température moyenne en surface au cours du 20<sup>ème</sup> siècle (de 1901 à 2012).  
IPCC (2013)*

- Réchauffement plus marqué sur les continents que sur les océans

## Les conséquences du changement climatique

\* Impact du réchauffement sur la cryosphère



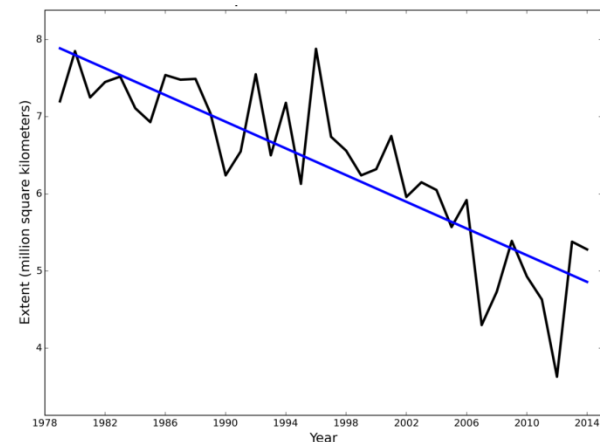
## - La banquise

### - Etendue

Septembre 1979



Septembre 2003



1979

2014

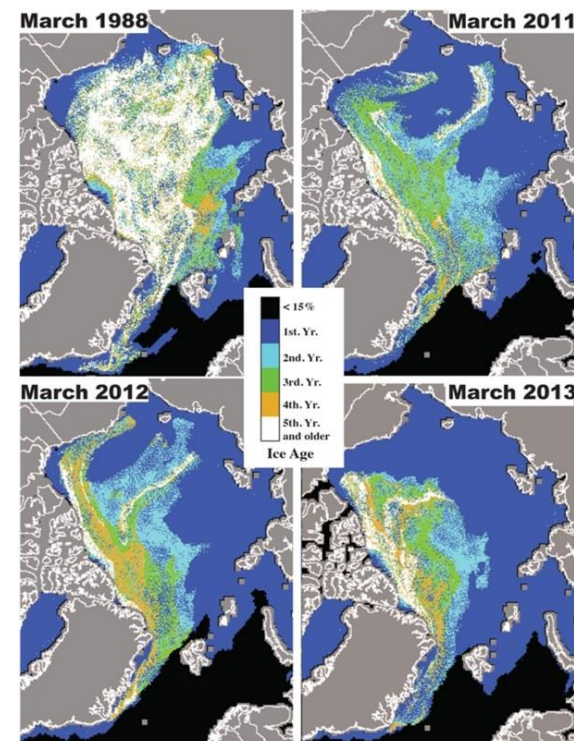
*Extension de la banquise arctique en septembre, de 1979 à 2014.*

*Vues satellite montrant la diminution de la superficie de la banquise arctique à la fin de l'été entre septembre 1979 et septembre 2003* ACIA, Impact of Warming Arctic

- Age Banquise de 4 ans : 1988 = 26% de la glace totale  
2013 = 7 %

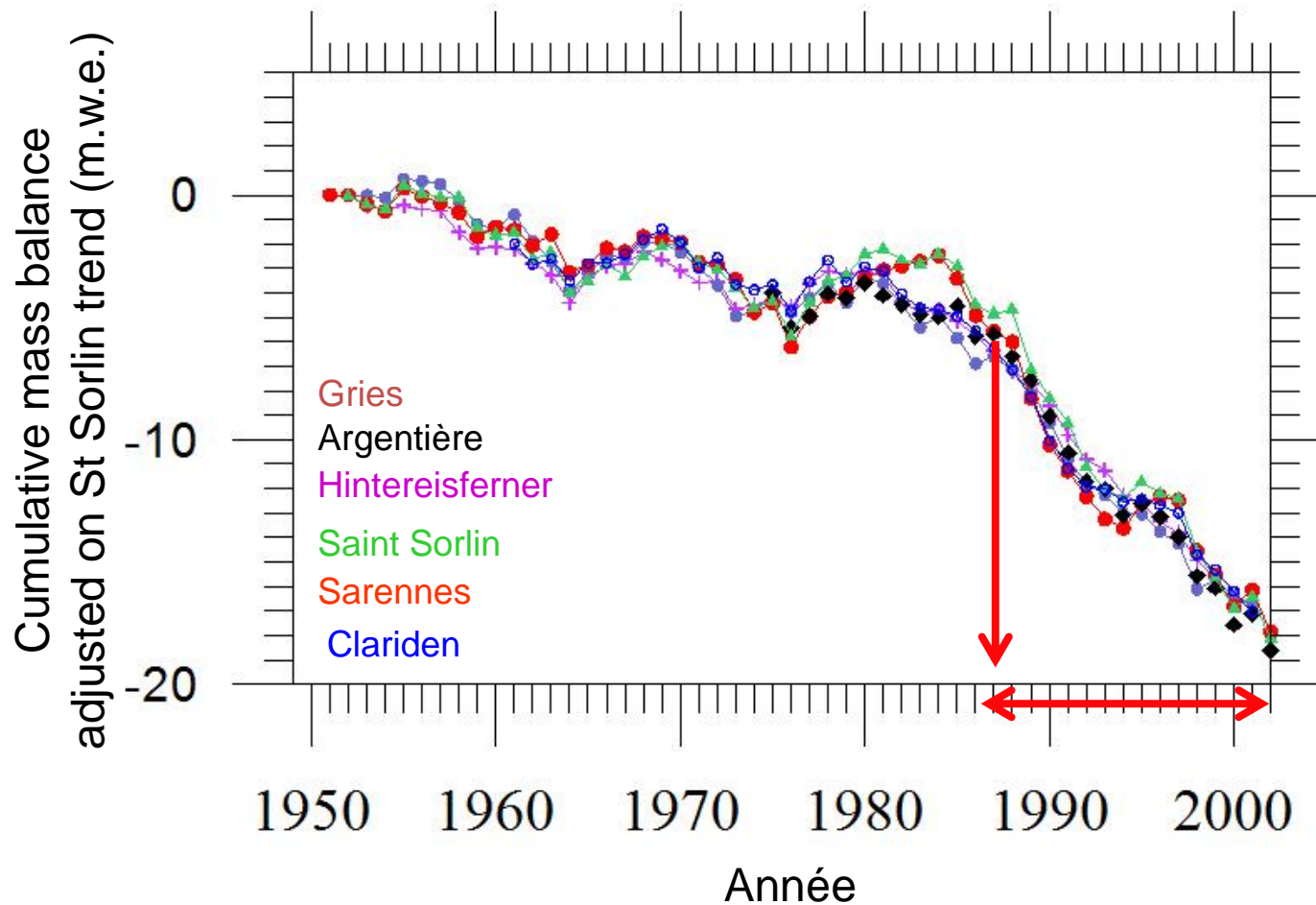
*Age de la banquise en Mars 1988, 2011, 2012 et 2013, déterminé par observations satellite.*  
Maslanik et al. (2011)

- Epaisseur 3m à 1,8m entre 1970 et 2000 : - 40 %



## - Les glaciers

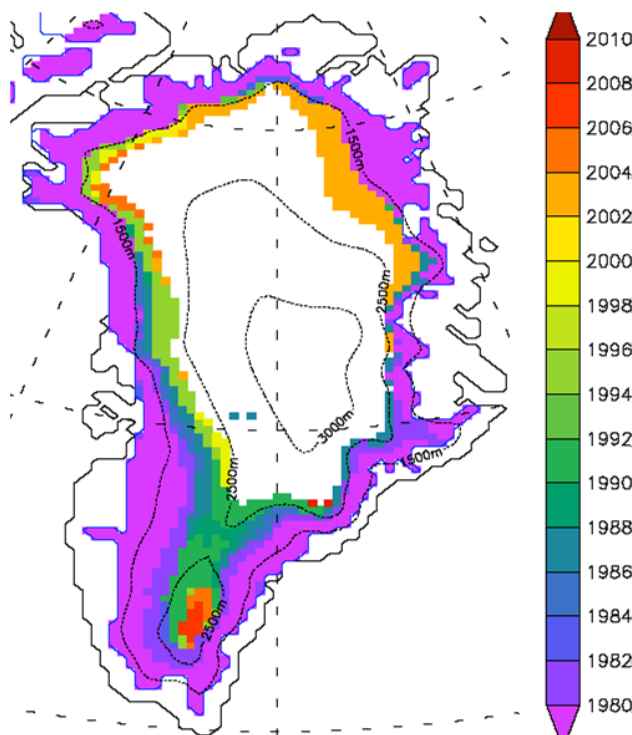
Perte d'épaisseur :  
**13 m en eq. eau en 15 ans**



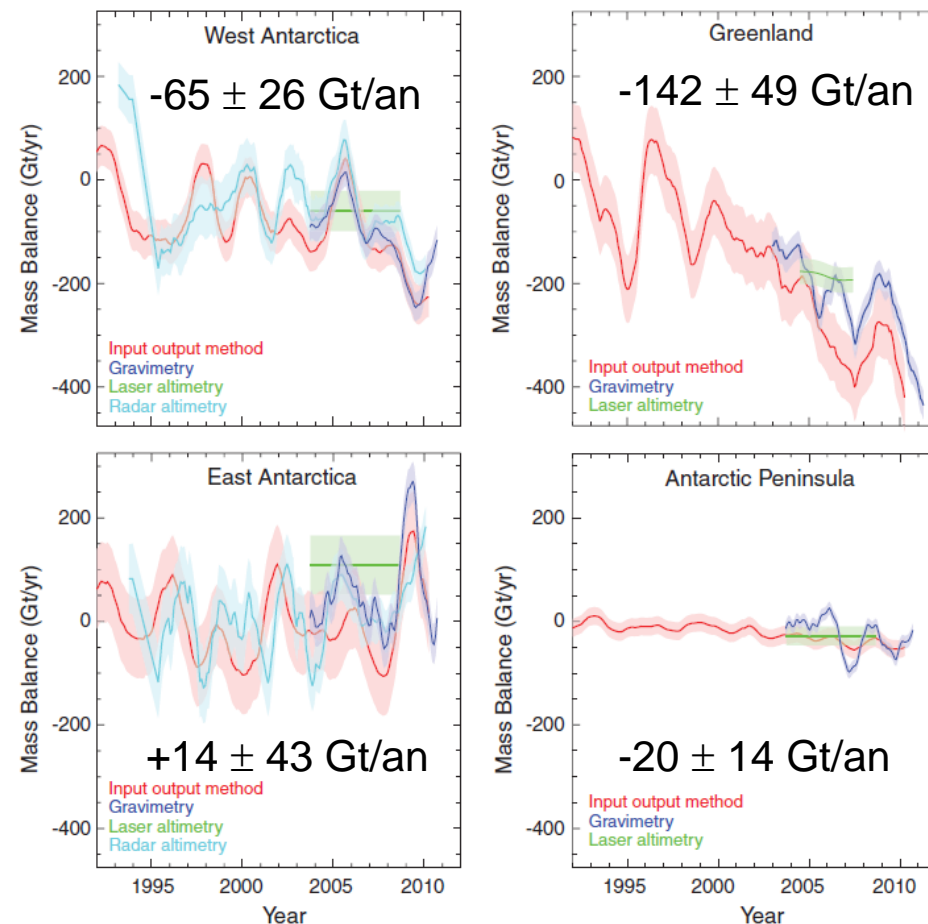
*Bilan en masse cumulé de six glaciers alpins, exprimé en mètre équivalent de hauteur d'eau (m. w. e.) et ajusté sur la tendance du glacier de St Sorlin. Vincent et al. (2004)*

## - Les calottes

Entre 1992 et 2011 :



*Evolution de la surface de fusion de la calotte du Groenland. Gallé (2008)*



*Vitesse de fusion des quatre principales régions des calottes antarctiques et groenlandaise, en **Gt de glace/an**, déduite de données altimétriques (satellite), interférométriques, et gravimétriques, entre 1992 et 2011. Shepherd et al. (2012)*

→ Contribution estimée à une montée moyenne du niveau marin de  $0,59 \pm 0,2$  mm/an

## \* Impact du réchauffement sur les océans

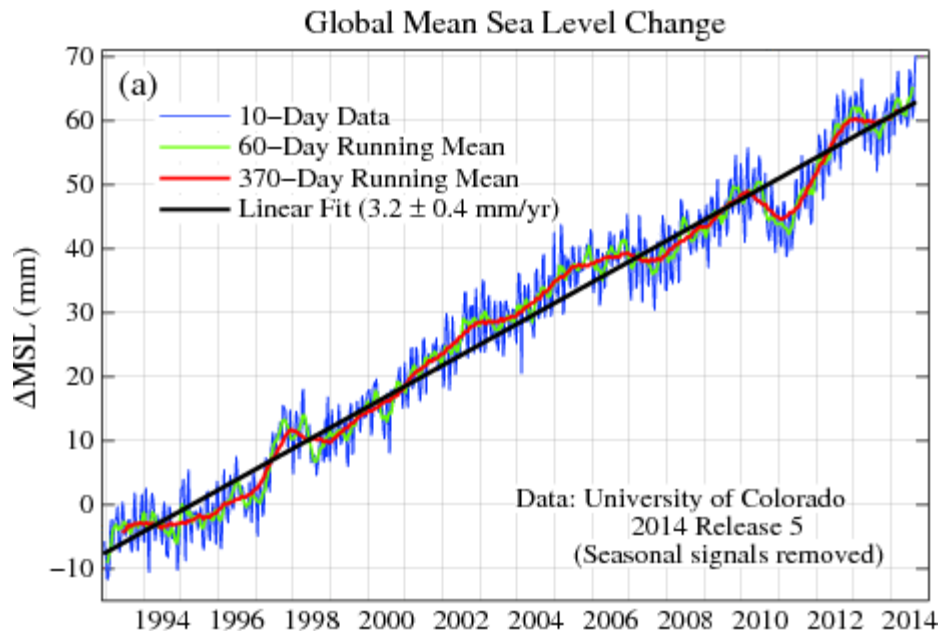


## - Le niveau marin

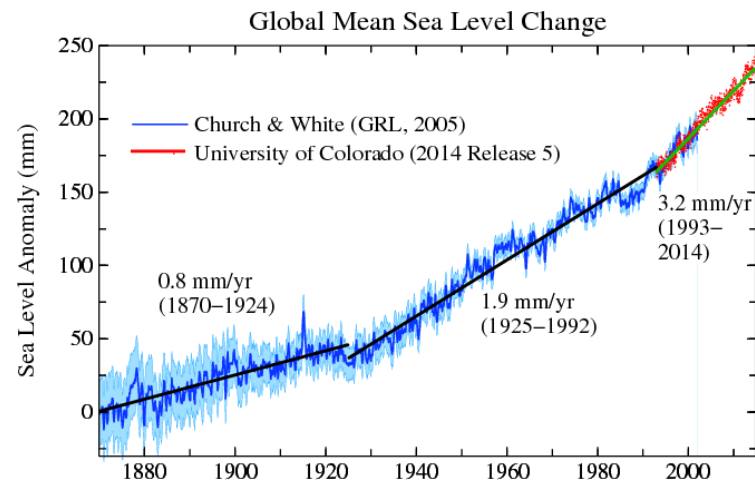
**$3,2 \pm 0,4$  mm/an**

Du à :

- Fonte calottes et glaciers
- Expansion thermique des océans



*Evolution du niveau moyen de la mer de 1991 à 2014,  
d'après des mesures satellites.  
University of Colorado (2014)*



*Evolution du niveau moyen de la mer de  
1870 à 2014, d'après des mesures de  
marégraphes (bleu) puis par satellites  
(rouge). University of Colorado (2014)*

→ **Accélération**  
de la remontée

## - L'acidification de l'océan

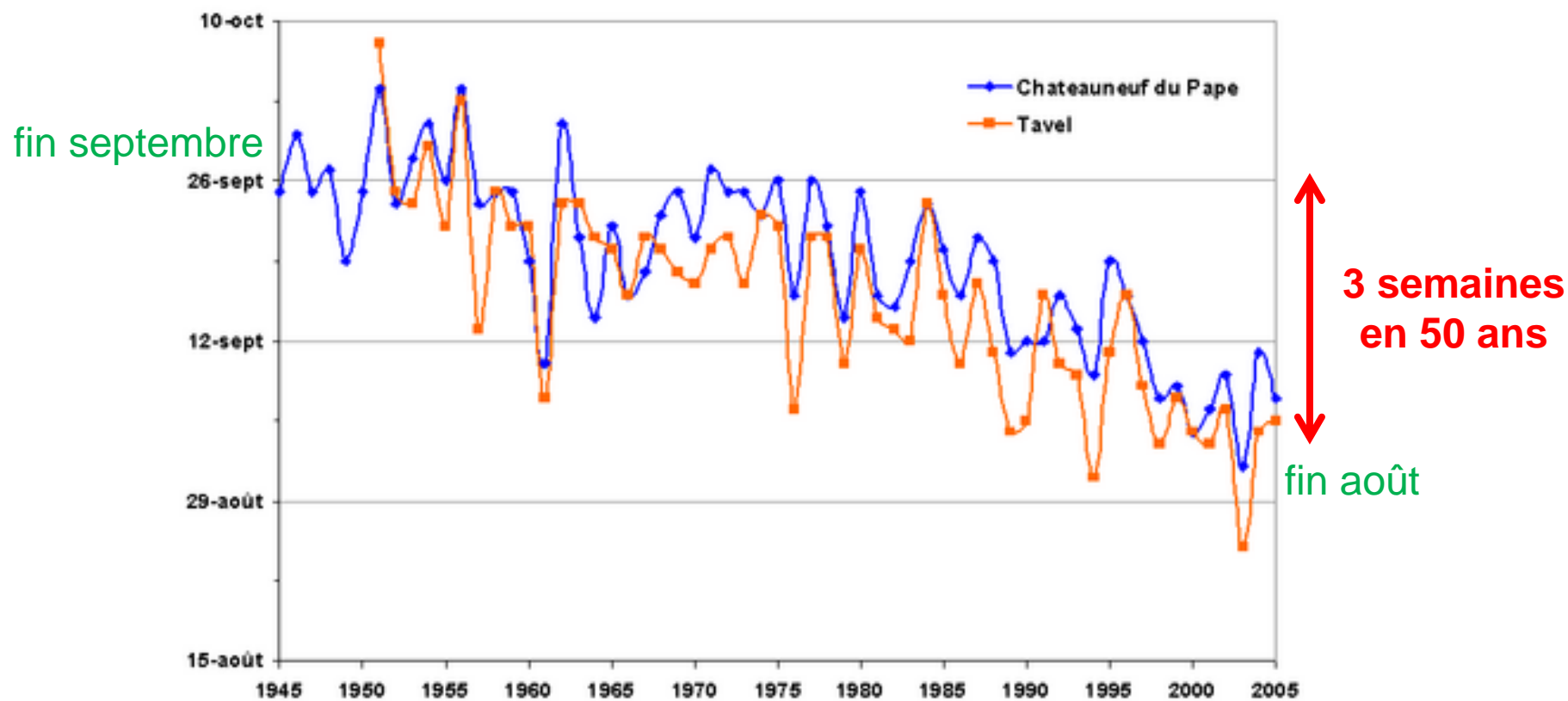
Suite à la dissolution du  $\text{CO}_2$

## \* Impact du réchauffement sur la biosphère



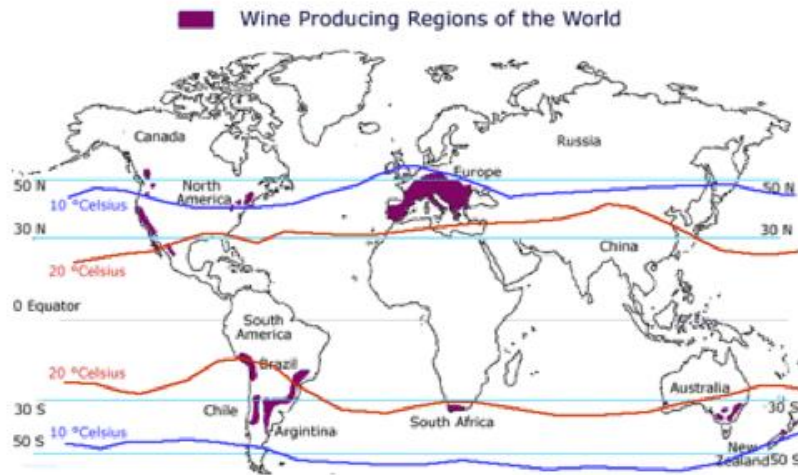


## - Influence de l'avancée de la saison chaude sur le cycle de développement de la flore

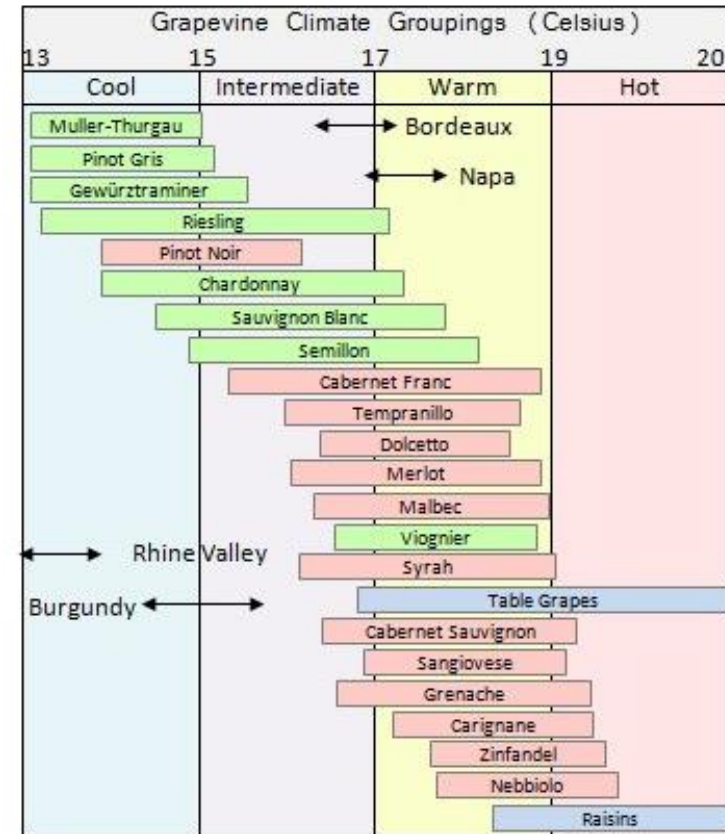


*Evolution des dates de début de vendanges pour les appellations d'origine contrôlée Tavel et Chateauneuf du Pape (côte du Rhône), pour 1945-2005.*  
Syndicat Intercommunal de l'Appellation Châteauneuf du Pape.

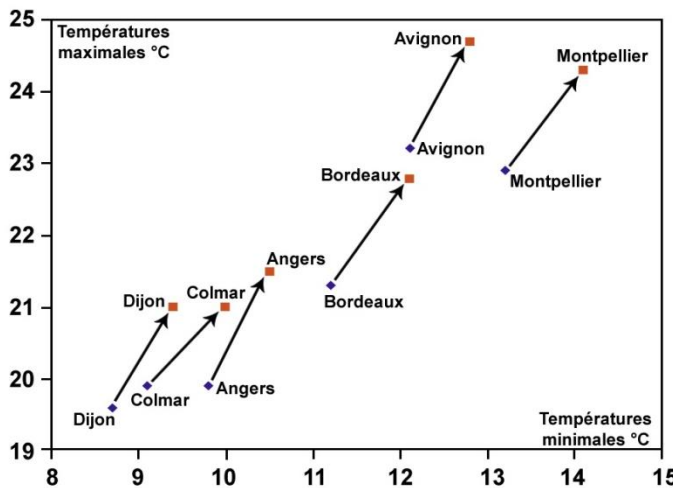
... et l'impact de l'augmentation de température sur la viticulture ...



≈ 2°C



Régions productrices de vin dans le monde.



◆ t: 1972-1986  
■ t: 1987-2002

En 15 ans :  
T min ≈ +1°C  
T max ≈ +1,5°C

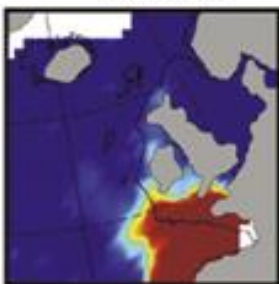
Tableau de tolérance des cépages à la température. Jones et al. (2012)

Evolution des températures maximales et minimales, moyennées d'avril à juillet, entre 1972-1986 (bleu) et 1987-2002 (rouge), de six régions viticoles françaises INRA Avignon

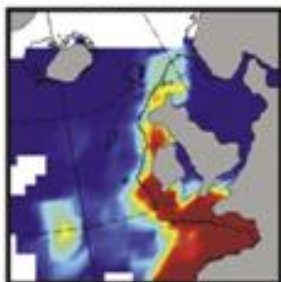
## - Influence de la modification des habitats : la migration

- Dans les océans, ex. plancton

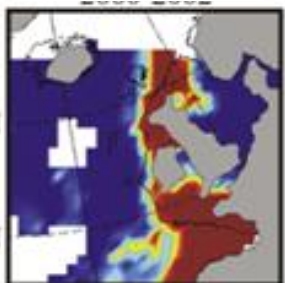
1958-1981



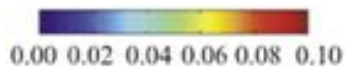
1982-1999



2000-2002



*Déplacement des **copépodes** (zooplancton marin) d'eaux chaudes à tempérées en Atlantique nord-est.*  
Beaugrand et al. (2002)



échelle : indice d'abondance par catégorie

- Sur les continents, ex. insectes



**Entre 1972 et 2004 :  
+87 km vers le Nord**



1969-1979



2005

*Aire de répartition de la **Processionnaire du pin** entre 1969-1979 (gauche) et 2005 (centre), avec sa progression de 1972 à 2009 (droite).*

Robinet et al. (2007)

- Sur les continents, ex. papillons et oiseaux

Entre 1990 et 2008, déplacement vers le nord :

des isothermes : 250 km

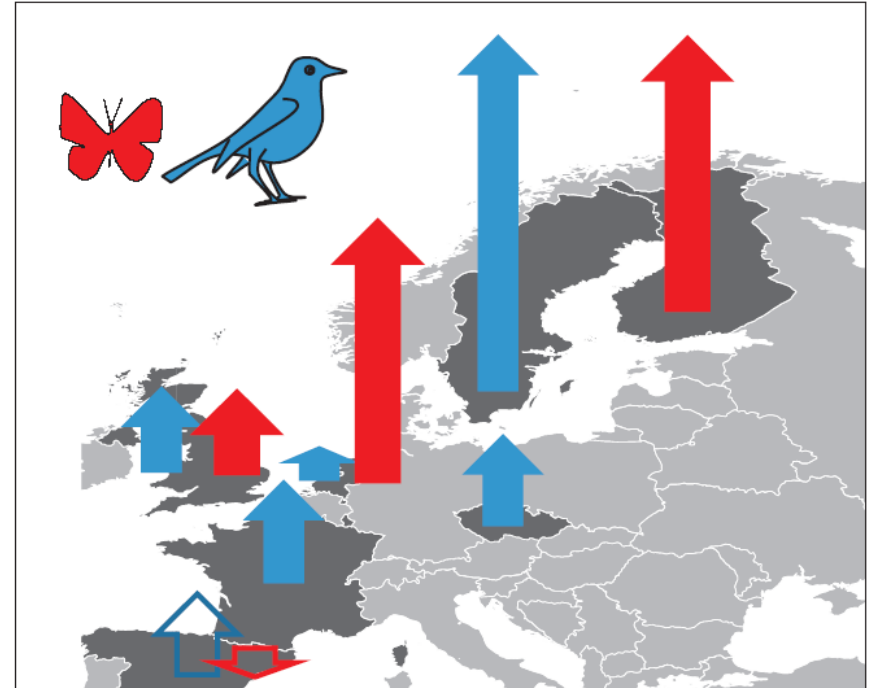
des **papillons** : 115 km

des **oiseaux** : 40 km = « retard » plus grand



**cycle de vie plus court**  
**= évolution rapide,**  
**meilleure adaptation**

**organismes ectothermes**



*Community Temperature Index (CTI) pour les papillons (rouge) et les oiseaux (bleu) entre 1990 et 2008 en Europe. La taille des flèches est proportionnelle au changement de CTI et leur direction indique le sens du déplacement. Devictor et al. (2012)*

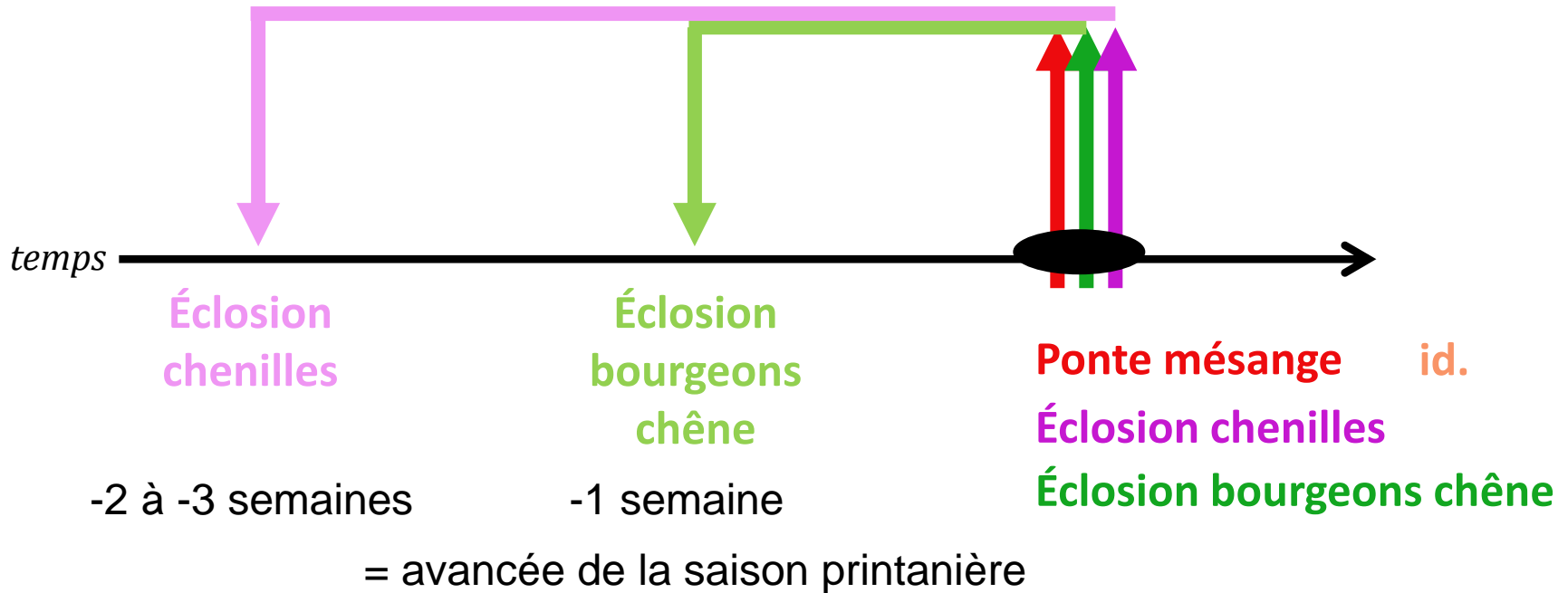
→ Capacité des insectes volants à coloniser rapidement un environnement plus chaud se retrouve lors des grandes transitions climatique-glaciaire-interglaciaire

## - La désynchronisation des écosystèmes

Décalage de l'offre et de la demande de nourriture lors de la période de reproduction

Ex. le chêne, les chenilles et la mésange (Pays Bas)

Évolution sur les 2 dernières décennies



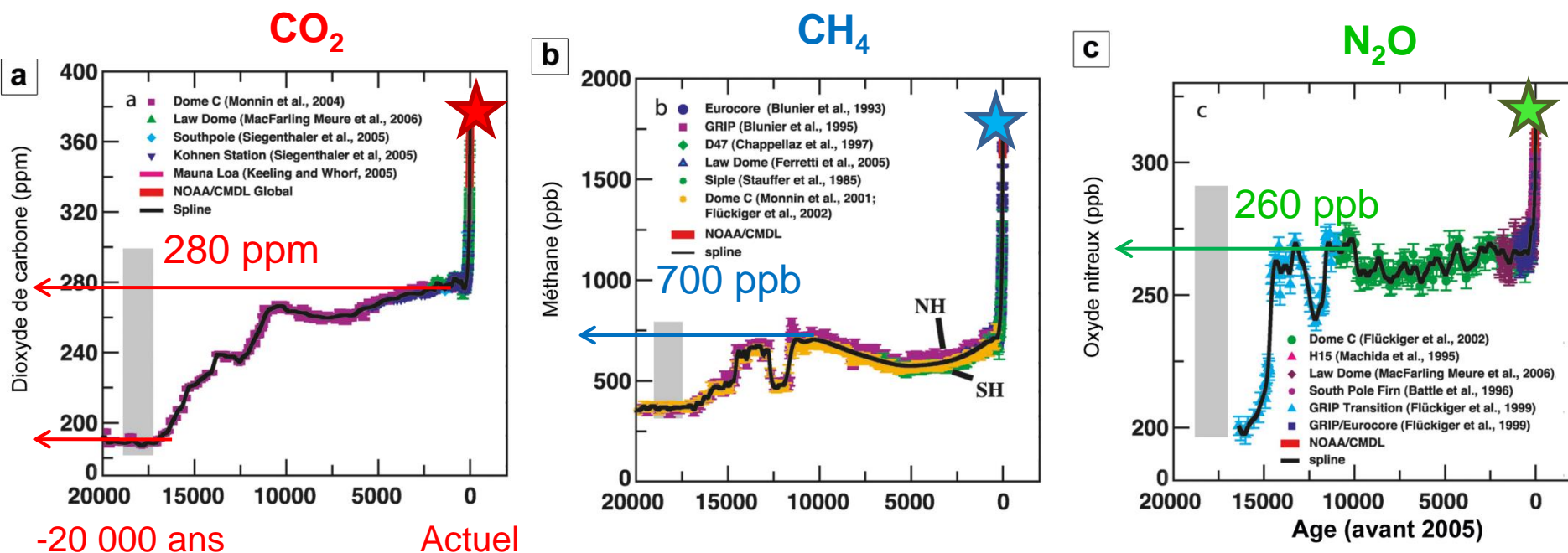
## Les causes

Le réchauffement du 20<sup>ème</sup> siècle : origine naturelle ou humaine ?

\* Les émissions de GES liées à l'activité humaine

- Teneur de GES naturellement présents avant l'ère industrielle

... depuis 20 000 ans (chiffre de couleur) :



Evolution du (a)  $\text{CO}_2$ , (b)  $\text{CH}_4$  et (c)  $\text{N}_2\text{O}$  atmosphériques depuis 20 000 ans (analyses de carottes de glace et échantillons atmosphériques).

La zone grisée indique l'amplitude du changement des concentrations entre l'ensemble des époques glaciaires et interglaciaires depuis 650 000 ans.

## - L'homme à l'origine de l'évolution des GES

Evolution du **CO<sub>2</sub> atmosphérique** de 1970 à 2001:

- noir : Mauna Loa (Hawaï, 19°N)

- bleu foncé : Baring Head (Nouvelle Zélande, 41°S)

et du **O<sub>2</sub> atmosphérique**

-rouge : Alert (Canada, 82°N)

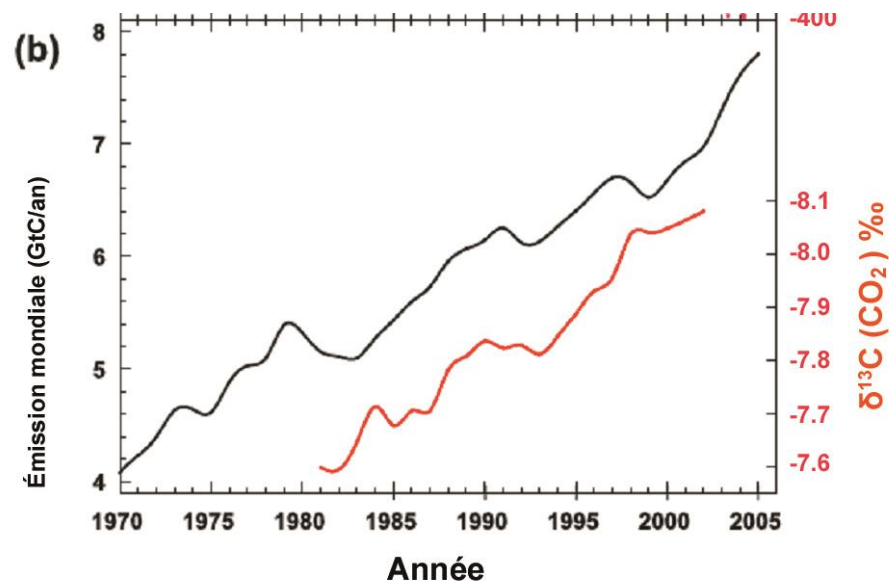
- bleu : Cape Grim (Australie, 41°S). IPCC (2007)

combustion de la matière organique :  
 $\text{CH}_2\text{O} (\text{glucides}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

**Emissions annuelles de CO<sub>2</sub>**  
dus aux combustibles fossiles  
et aux cimenteries (noir),

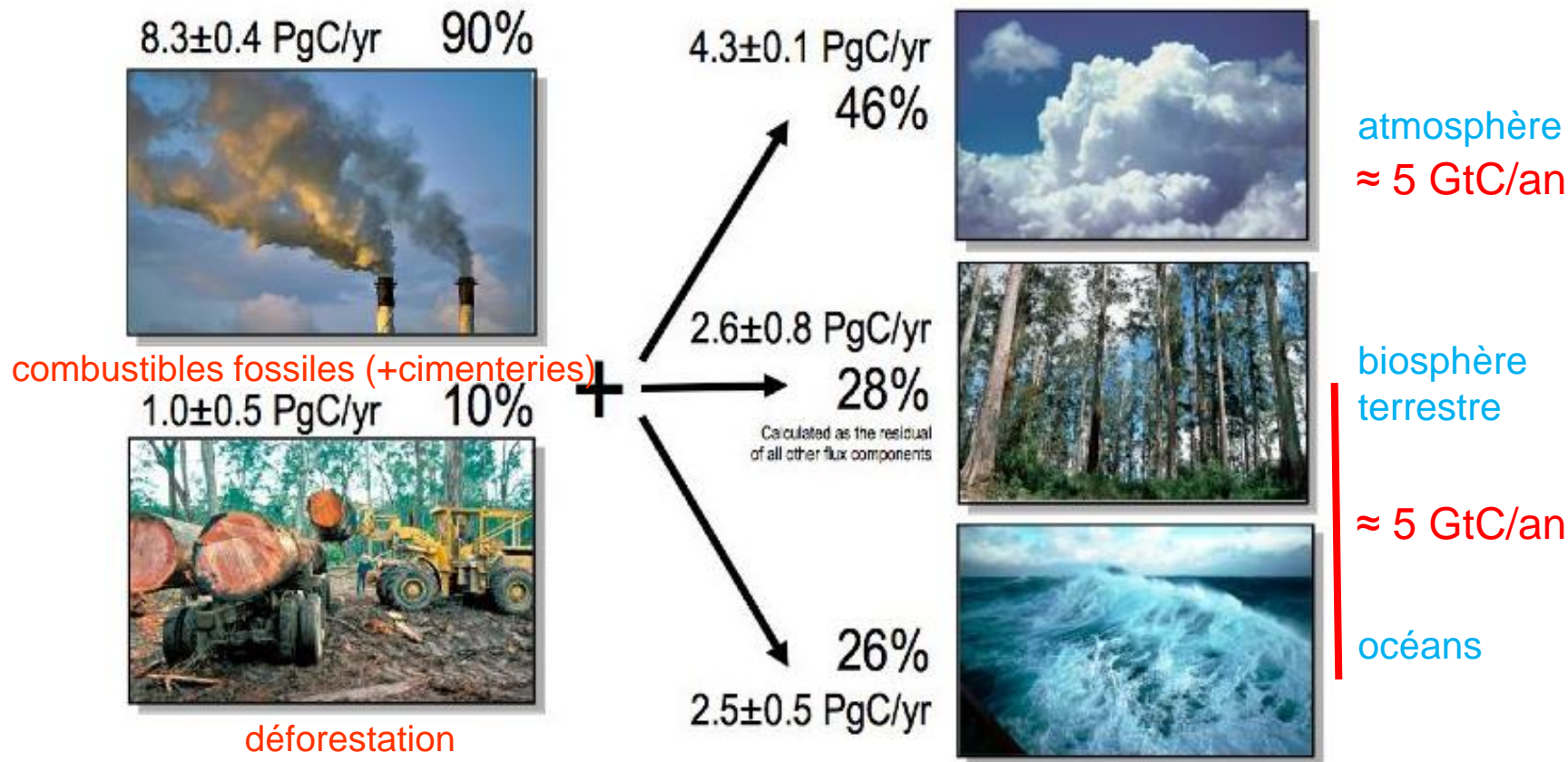
et évolution de la moyenne annuelle du  $\delta^{13}\text{C}$   
du **CO<sub>2</sub> atmosphérique** à Mauna Loa (rouge).  
IPCC (2007)

La matière organique a un faible  $\delta^{13}\text{C}$



– Devenir des GES anthropiques émis : absorption par biosphère terrestre et océans

≈ 10 GtC/an



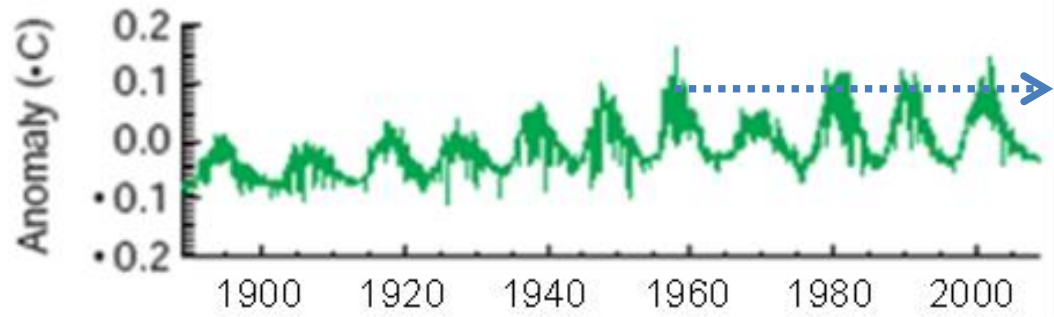
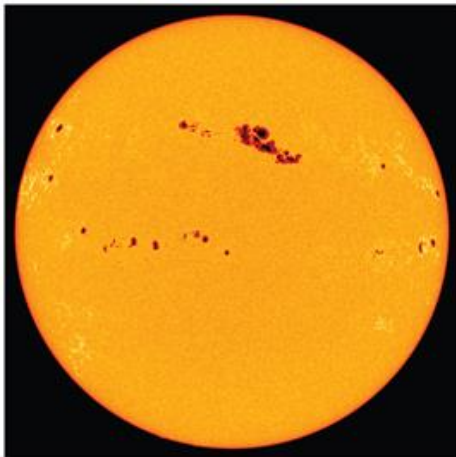
Devenir des émissions anthropogéniques de CO<sub>2</sub> (moyenne 2002-2011), en pétagramme de carbone par an (1 Pg = 10<sup>15</sup> g = 1 GtC). Global Carbon Project (2012)

Flux échangés naturellement entre la surface de la Terre et l'atmosphère : ≈ 200 GtC/an  
→ ne peuvent absorber, en surplus des flux naturels,  
que la moitié du CO<sub>2</sub> émis par l'homme aujourd'hui : ≈ 5 GtC/an



## \* Les causes naturelles : Soleil et volcans

### - L'activité solaire



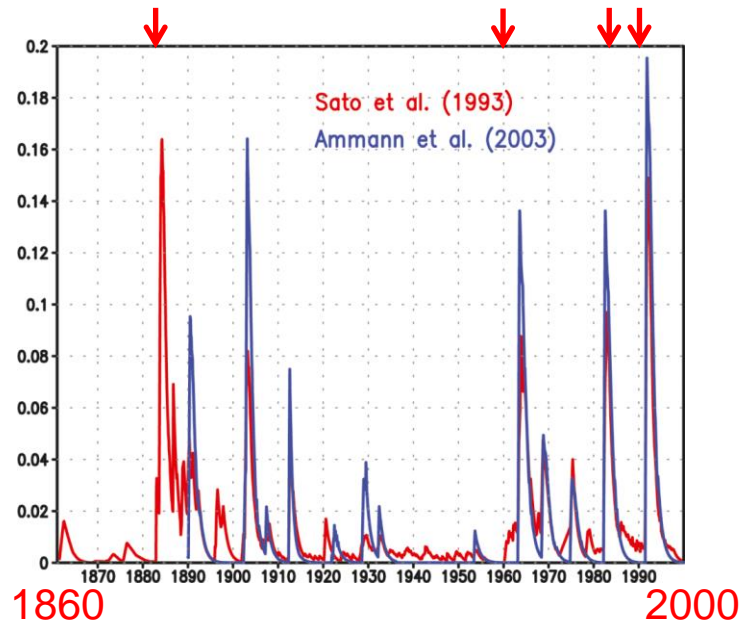
*Contribution calculée de l'activité solaire sur la température globale, de 1890 à 2010. Lean (2010)*

### - L'activité volcanique

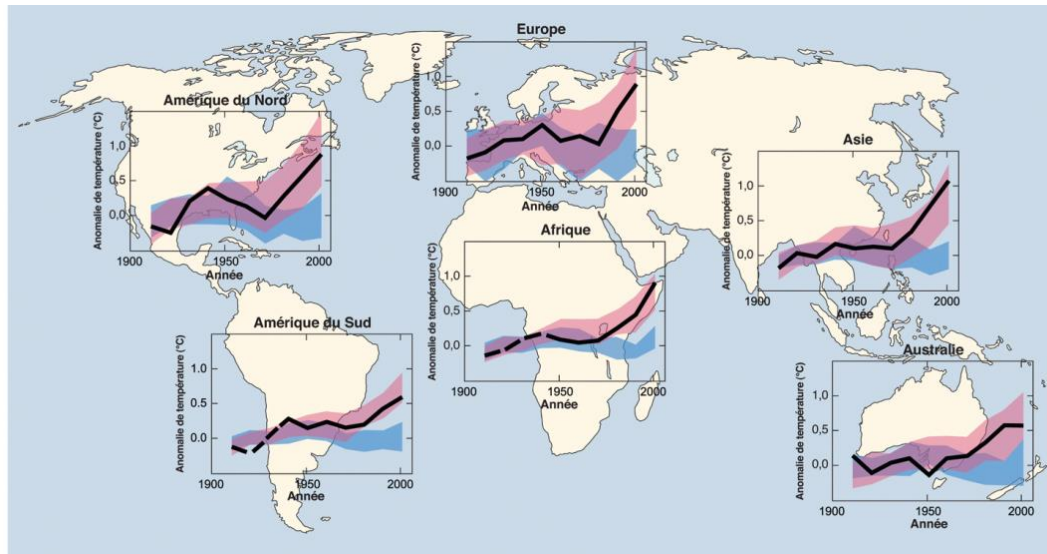


*Indice relatif à l'épaisseur de la couche d'aérosols sulfatés injectés dans la stratosphère lors des éruptions volcaniques explosives. IPCC (2007)*

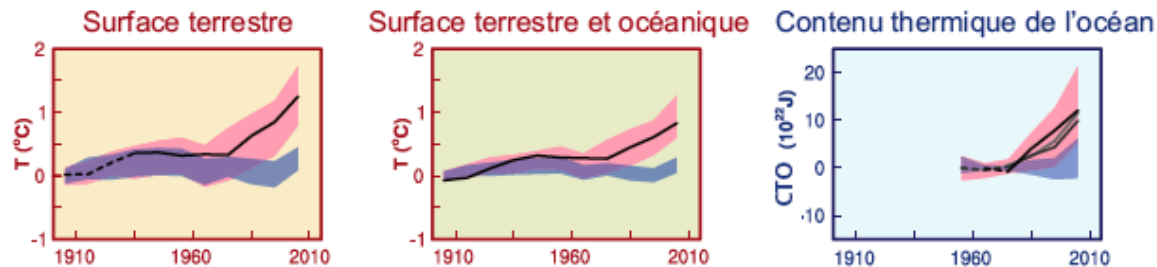
Krakatoa, Indonésie, 1883  
Pinatubo, Philippines, 1991  
El Chichon, Mexique, 1982  
Mont Agung, Indonésie, 1963



\* La cause : le rôle prépondérant de l'homme



IPCC (2007)



IPCC (2013)

≡ Observations

■ Modèles n'utilisant que les forçages naturels

■ Modèles utilisant les forçages naturels et anthropiques

Comparaison entre l'évolution de la **température de surface mesurée (courbe noire)** et **l'évolution simulée** par un ensemble de modèles climatiques : ceux-ci intègrent soit seulement les **forçages naturels** (courbe bleue : activités solaire et volcanique), soit à la fois les **forçages naturels et anthropiques** (courbe rose).

$\Delta T$  observé

Contribution  $\Delta T$  :

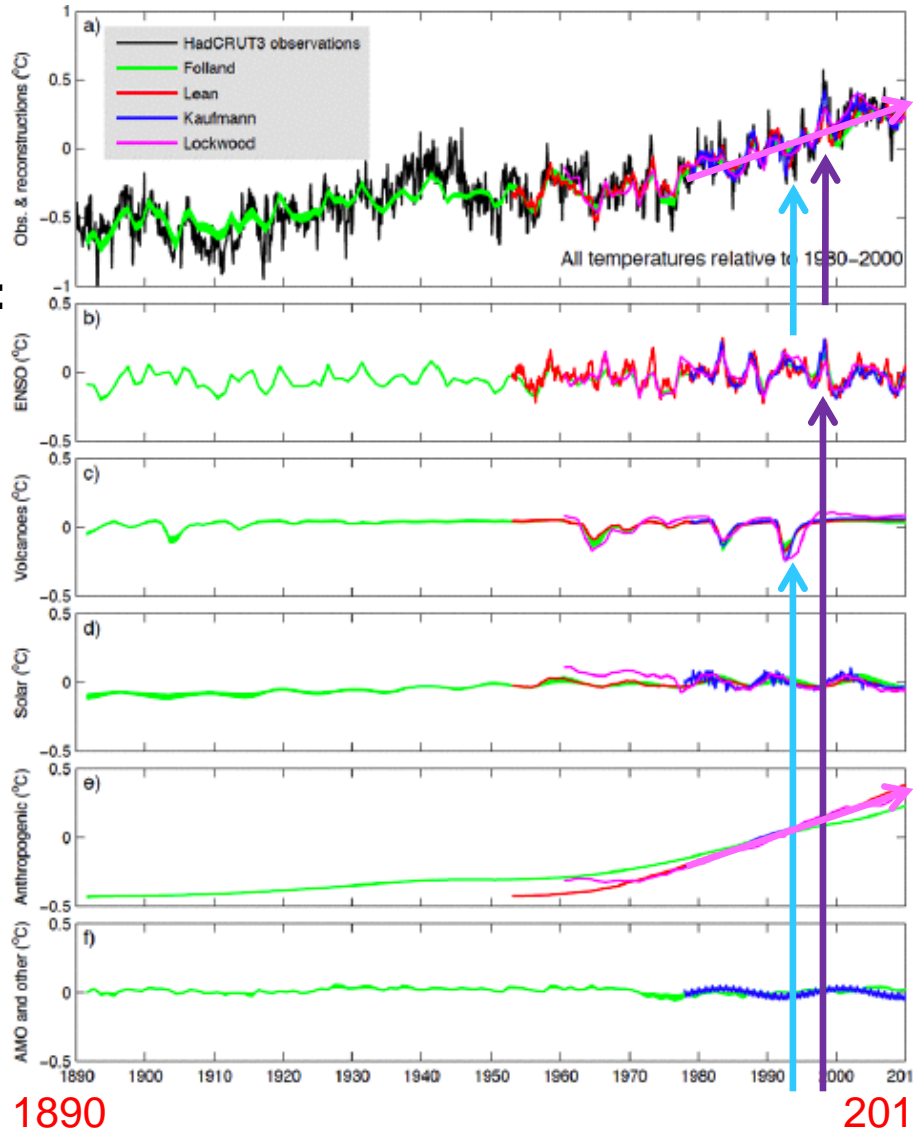
ENSO

Volcanisme

Activité solaire

Activité anthropique

Autre



→ L'activité humaine

1890

2010

(a) Observations des variations relatives de température depuis 1890 (**noir**), et contributions aux changements de température moyenne globale par : (b) ENSO (El Nino Southern Oscillation) (c) volcanisme (d) activité solaire (e) activité anthropique (f) autres facteurs (Atlantic Multidecadal Oscillation, Arctic Oscillation ...). IPCC (2013)

## Dans le futur (2010-2100)

# Les variations des paramètres climatiques

### \* Les scénarios futurs

#### - Les émissions de CO<sub>2</sub>

$$\text{CO}_2 \text{ émis} = \text{Em}_{\text{globe}} \times \text{N}_{\text{globe}}$$

**Em** : émission moyenne de CO<sub>2</sub> par habitant

**N** : nombre d'habitants

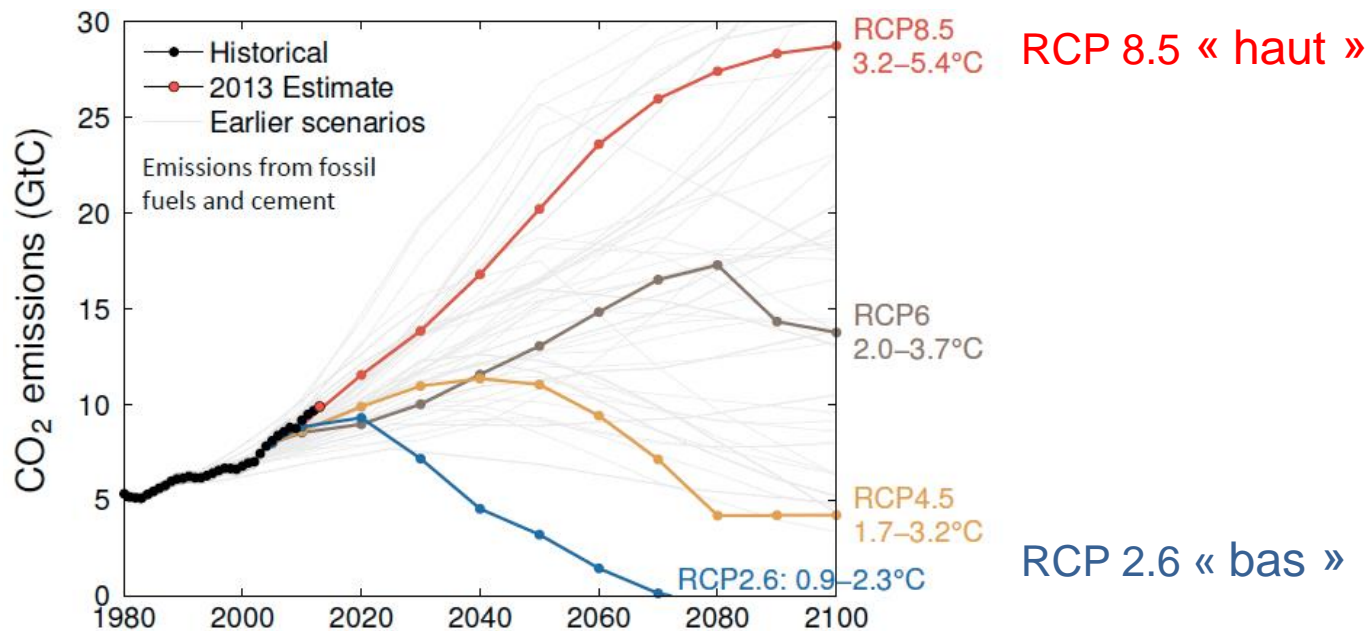
- consommation d'énergie par habitant

- évolution de la population

- économie

- nouvelles technologies ...

Plusieurs familles de scénarios :

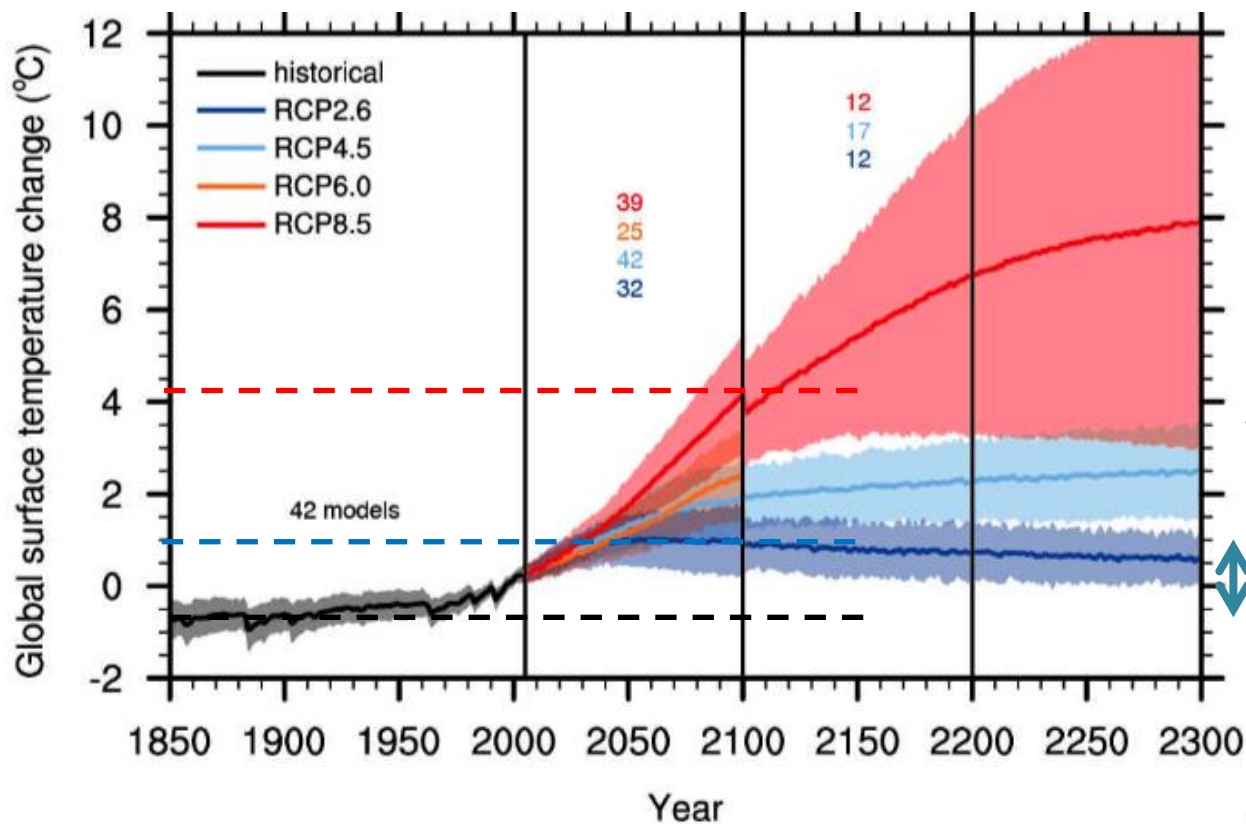


Emissions historiques de CO<sub>2</sub> (**noir**) et scénarios 2013. IPCC (2013)

**RCP 8.5 : ≈ 2100 GtC**

Emissions cumulées globales de CO<sub>2</sub> en 2100 : **RCP 2.6: ≈ 800 GtC**

## - Le réchauffement



En  $\approx 100$  ans (2000-2100),  
le climat se réchauffera

$$\Delta T \approx +1^\circ \text{ à } +4^\circ \text{C}$$

RCP 2.6 RCP 8.5

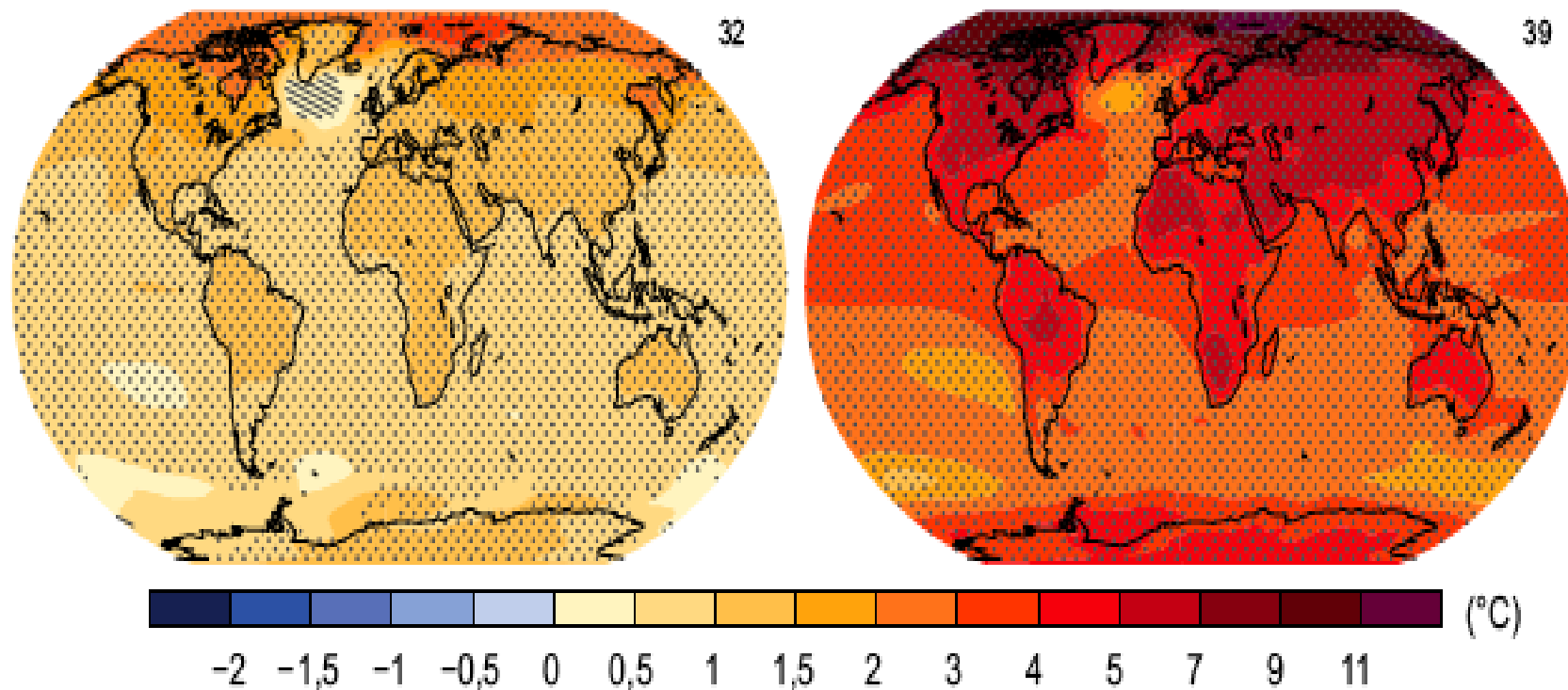
En  $\approx 250$  ans (1850-2100),  
le climat se réchauffera

$$\Delta T \approx +2^\circ \text{ à } +5^\circ \text{C}$$

*Evolution de la température moyenne à la surface du globe en fonction des différents scénarios de référence. En noir, mesures sur la période historique. IPCC (2013)*

Scénario RCP2.6

Scénario RCP8.5

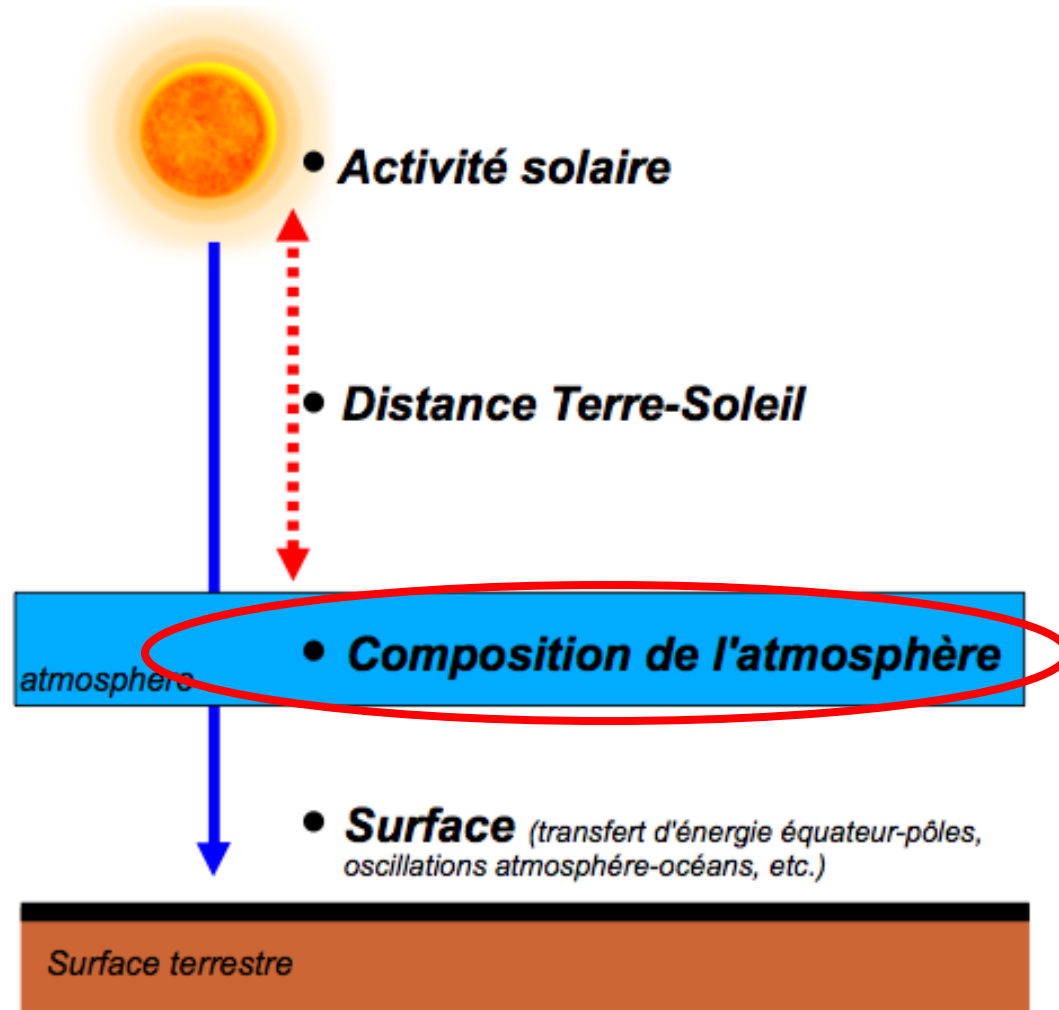


*Evolution projetée de la  $T^{\circ}$  moyenne de surface au cours du 21<sup>ème</sup> siècle par rapport à la période 1980-2000 dans le cadre des scénarios A2 et B1. IPCC (2013)*

Les causes des variations climatiques :

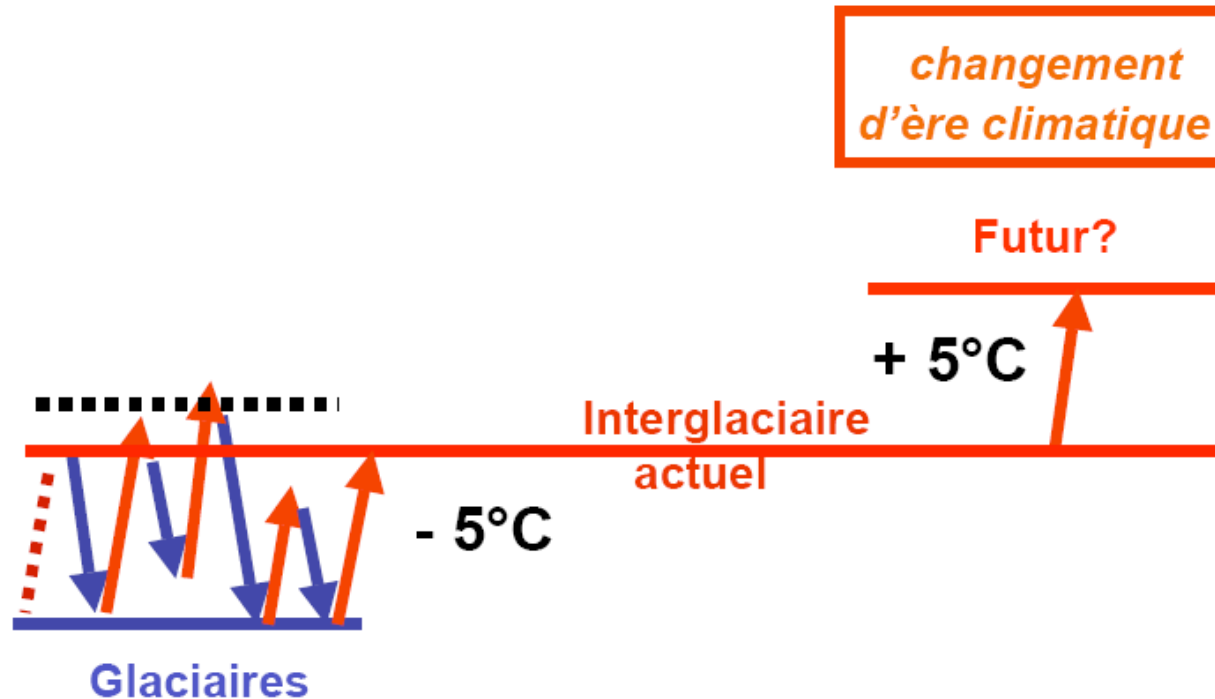
$\Delta T \approx 5^\circ\text{C}$  en 250 ans

250 ans



## Les conséquences du réchauffement climatique en cours

L'importance du changement climatique à l'aune des leçons du passé



*Oscillations glaciaire/interglaciaire depuis près de 3 millions d'années*

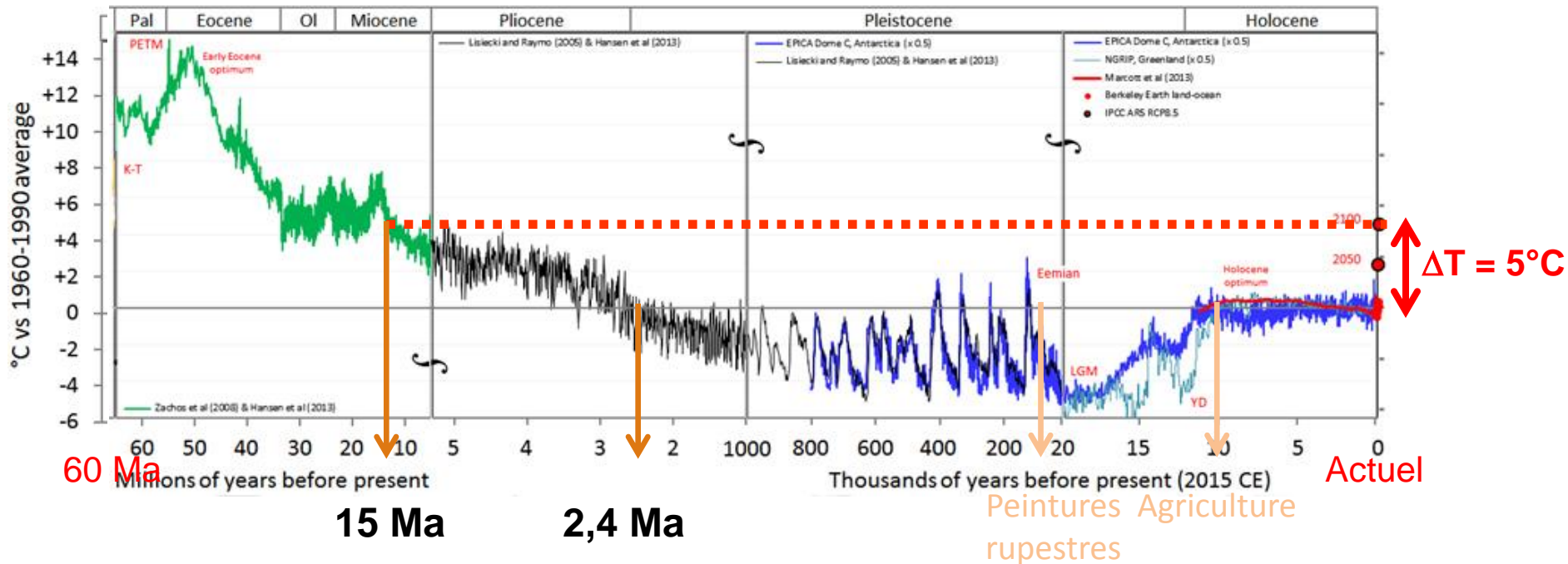
*Fin 21<sup>ème</sup> siècle?*

*Schéma comparant l'évolution de la température moyenne sur la surface de la Terre au cours des oscillations glaciaires-interglaciaires, qui existent depuis près de 3 Ma, avec le réchauffement qui pourrait être atteint à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle.*

Mélières et Maréchal (2010)



Cette nouvelle ère n’a pas eu son équivalent depuis de nombreux millions d’années...  
à une époque où le genre *Homo* n’existait pas ...



Température de surface terrestre estimée sur les derniers 65 Ma (échelle logarithmique).

Avènement du Genre *Homo*

Il y a 56 millions d'années,  
un réchauffement analogue à l' « actuel » ?

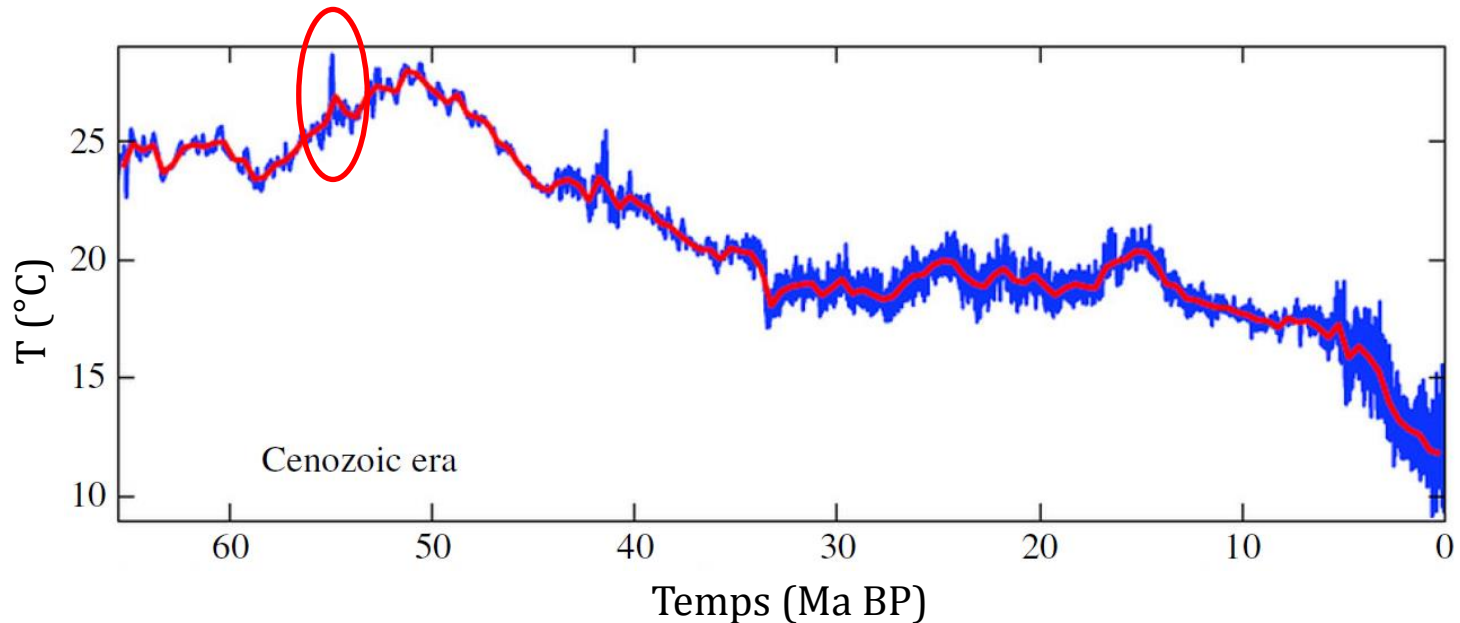


= L'événement du PETM : Paléocène/Eocène Thermal Maximum

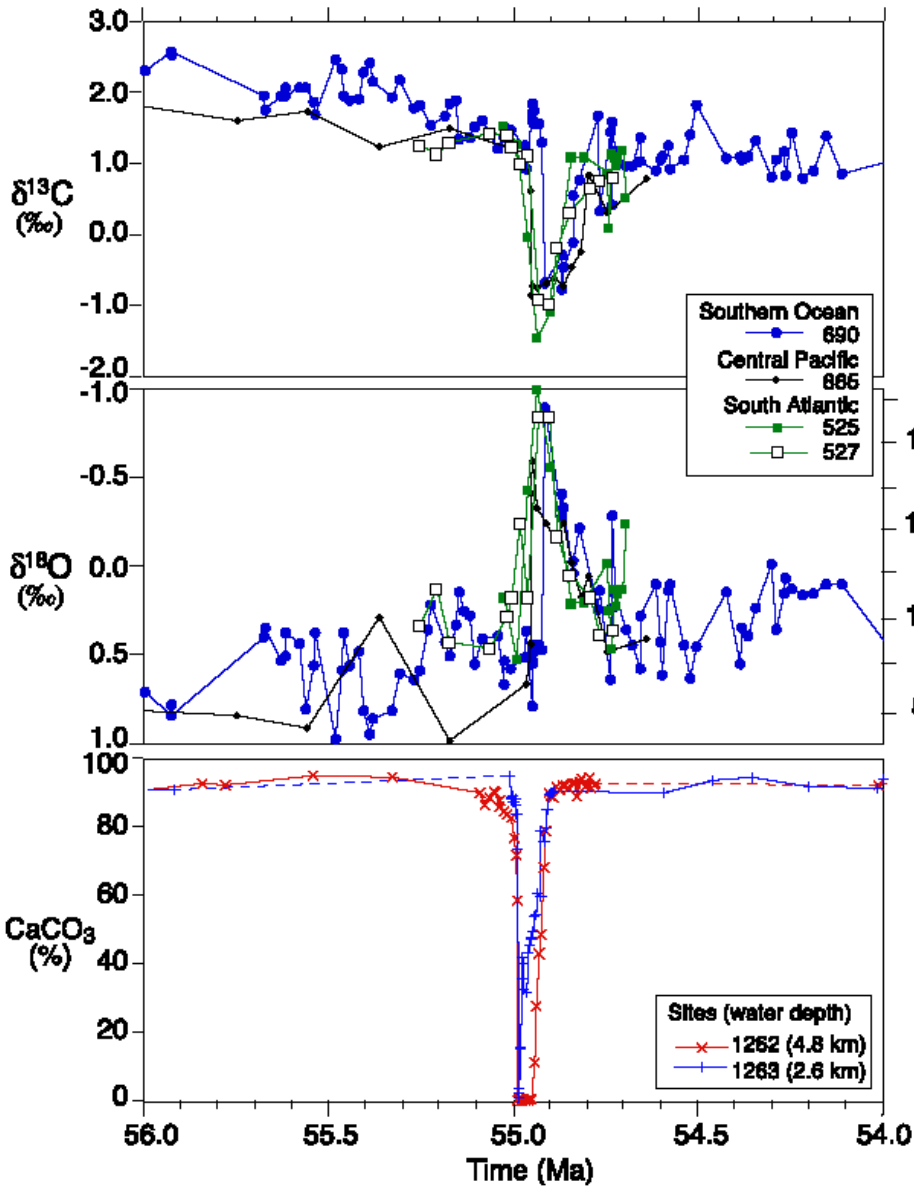
## Les variations des paramètres climatiques

\* Les enregistrements

Les variations de température



*Evolution de la température globale de la surface de la Terre depuis 65 Ma. Hansen et al. (2013)*



IPCC (2007)

**CIE** : Carbon Isotopic Excursion

Relâchement massif de C avec un  $\delta^{13}\text{C}$  bas, donc enrichi en  $^{12}\text{C}$

Émissions cumulées :

4500 à 7000 GtC en 5000 à 20 000 ans



**En < 1000 ans,**  
le climat se réchauffe

**$\Delta T \approx 5^\circ\text{C}$**

8 Retour à l'équilibre en 130 000 ans

Dissolution des carbonates marins  
(acidification des océans)

## Les causes

Anomalie  $\delta^{13}\text{C}$  à  $-2,5\text{‰}$  :

**dissociation hydrates de méthane :**  
raisonnable



Mass C in Holocene  
Carbon Cycle  $\delta^{13}\text{C}$  ‰PDB

- Land biota ~  $-25\text{‰}$
- Atmosphere ~  $-6\text{‰}$
- Soil C ~  $-25\text{‰}$
- DOC ~  $-20\text{‰}$

10 k Gt Hydrate ~  $-60\text{‰}$

36,000 Gt Dissolved Inorganic Carbon ~  $0\text{‰}$

Mantle ~  $-7\text{‰}$

Mass C (Gt) to produce  
a  $-2.5\text{‰}$   $\delta^{13}\text{C}$  anomaly

Hydrate ~  $60\text{‰}$   
(1,200 Gt)

Land biota ~  $-25\text{‰}$   
(2500 Gt)

Mantle ~  $-7\text{‰}$   
(40,000 Gt)

feux de biomasse :  
insuffisant



volcanisme :  
énorme



*Masse de carbone à l'Holocène et son  $\delta^{13}\text{C}$  (gauche)  
et masse de carbone nécessaires **pour produire une anomalie  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-2,5\text{‰}$ .***

*D'après Dickens et al. (1995)*

→ **Les paramètres orbitaux ?**

## Les conséquences du changement climatique

### \* Impact de l'événement hyperthermique sur la biosphère

- Extinction de foraminifères benthiques : -35 à -50% en 1000 ans
- Diversification des foraminifères planctoniques
- Période de migration importante sur le globe (flore et faune)
- Radiation des mammifères
- Nanisme

*Reconstitution de *Sifrhippus sandrae* (droite) avec un cheval moderne de Morgan (gauche) (1,5 m, 450 kg)*



### Un analogue à l' « actuel » ?

#### \* Les variations des paramètres climatiques

Magnitude et échelle de temps comparables

#### \* L'impact sur la vie

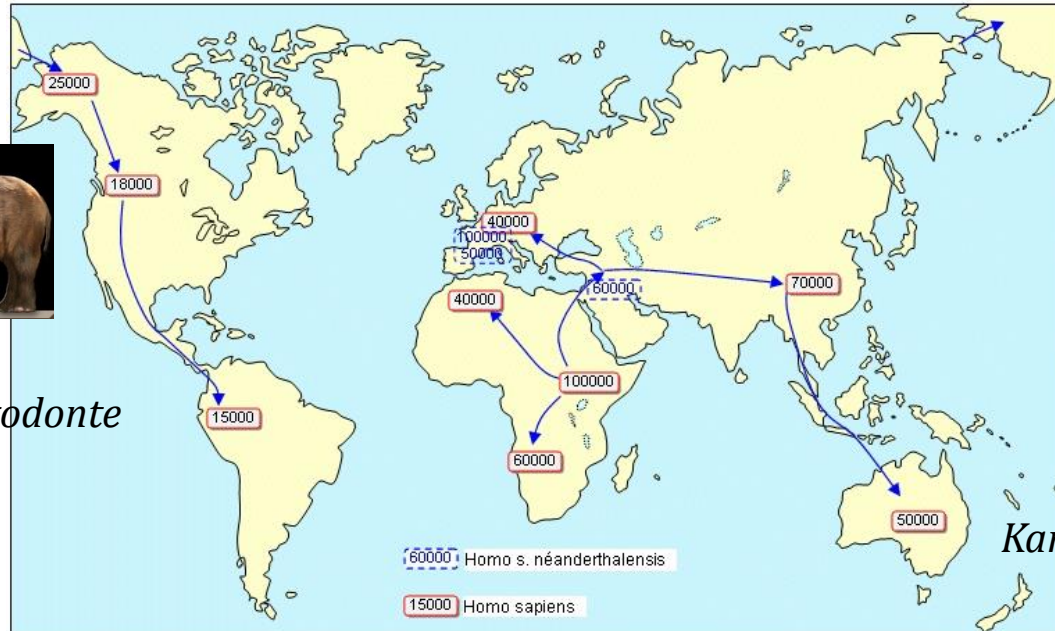
- PETM : bouleversement de l'équilibre écologique

Extinctions, radiations, migrations, adaptations biologiques évolutives

- Actuel : chgt climatique alors qu'équilibre écologique déjà bouleversé (déséquilibre)

« **Extinction de l'Holocène** » ou sixième extinction en masse de l'histoire de la Terre  
Causée par l'homme

- Début Holocène : disparition brutale de la mégafaune dans les territoires nouvellement conquis par *Homo sapiens*



**Amérique du nord**  
mammoth laineux, mastodonte



**Ours à face courte**

**Australie**  
Kangourous, wallabies,  
koalas ... géants

*Migration d'homo sapiens*

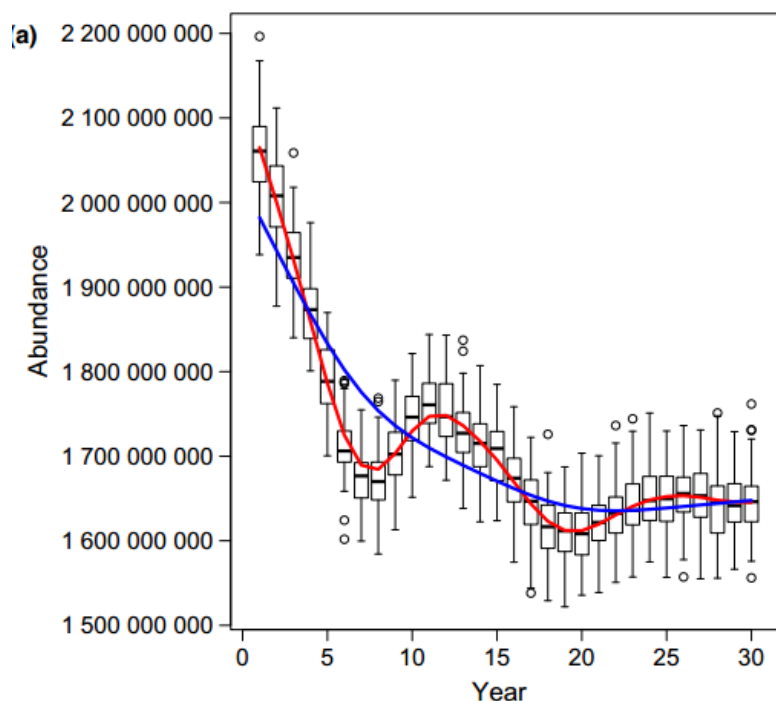
- Début XIXème siècle et en accélération depuis années 1950 : disparitions importantes dans les écosystèmes tropicaux humides (maximum de biodiversité)

taux d'extinction actuel :  $\approx 100$  à  $1000$  fois  $>$  taux moyen naturel

## Ex. Oiseaux en Europe

En 30 ans, **1/5 de la population des oiseaux a disparu**

(420 millions sur > 2 milliards), en particulier pour les espèces communes



*Abondance des oiseaux de 144 espèces en Europe, de 1980 à 2009.*

*Les régressions à partir de modèles à degré de liberté 10 (rouge) et 3 (bleu) ont été tracées.*

*Inger et al. (2014)*



Alouette: -46%



Étourneau : -58%

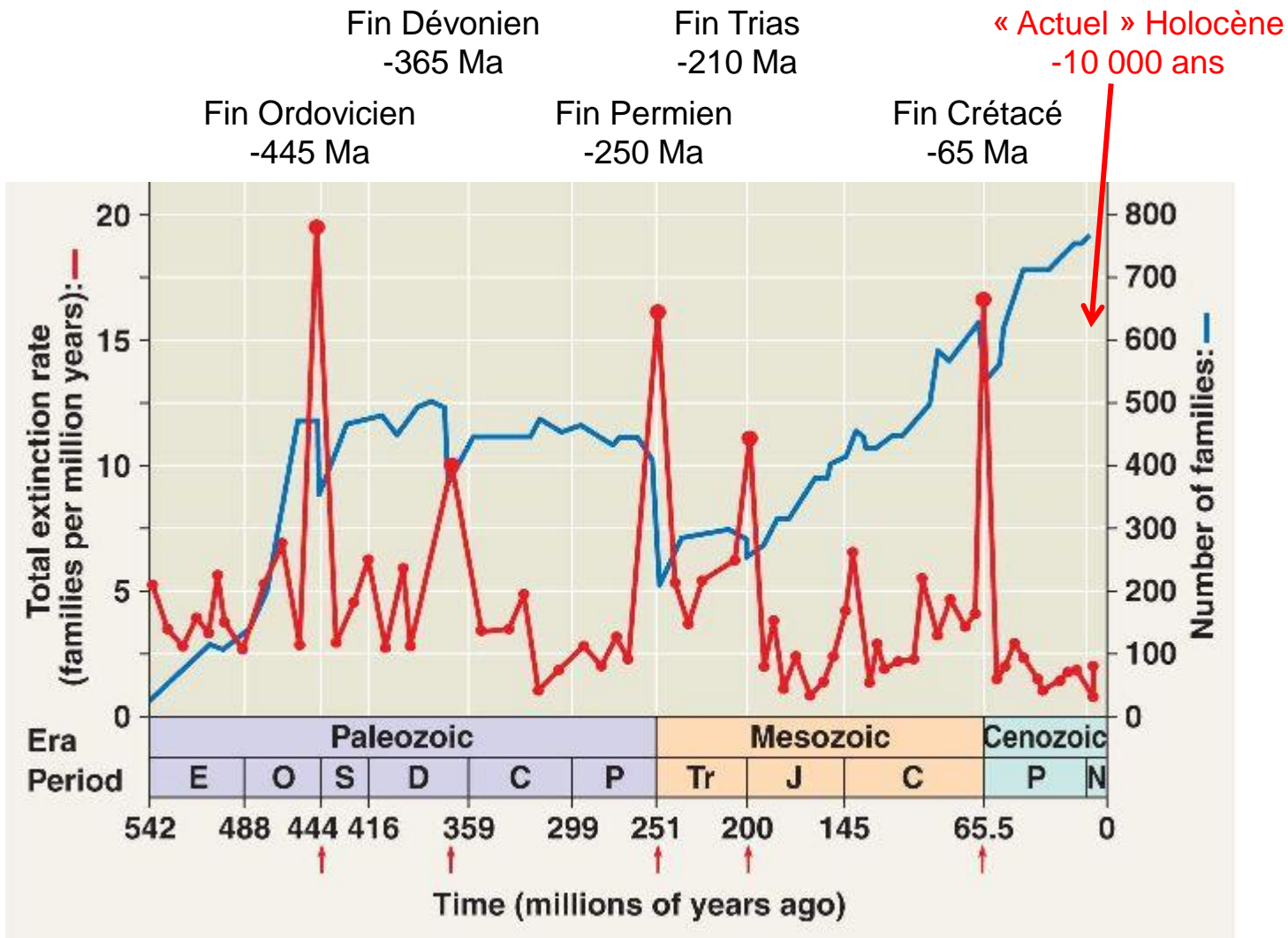


Moineau : -61%



Tourterelle : -77%.











*Vitesse d'extinction (familles/Ma – en rouge) et nombre de familles totales (en bleu) au cours des temps géologiques.*

# Synthèse et Conclusion



En résumé (ordres de grandeur) :  Refroidissement  Oscillations, fluctuations  Réchauffement

Période	$t_0$	$\Delta T$	$\Delta t$		impact vie	causes
<b>Cénozoïque</b>	-66 Ma	12°C	50 Ma		dvpt herbes et savanes époque des mammifères → avènement ère glaciaire	tectonique ?
<b>PETM</b>	-56 Ma	4-7°C	<1 Ka		extinctions, radiations migrations, nanisme → transition époque géologique	orbitale ? + hydrates
<b>Quaternaire</b>	-2,6 Ma	5°C	10-100 Ka		extinctions, radiations migrations	orbitale
<b>Holocène</b>	-12 Ka	1°C	10 Ka		migrations	orbitale
	-5 Ka	1°C	600 a		migrations, disparitions	solaire
	-10 Ka				extinction	humaine
<b>Actuel-Futur</b>	-150 a	5°C	250 a		tx extinction > tx radiation  → transition époque géologique : « Anthropocène » ?	humaine

## Le changement climatique actuel est-il un événement exceptionnel ?

**Oui, sans équivoque**

- Qu'est-ce qu'un événement exceptionnel du fonctionnement de la Terre ?

**Changement rapide** et intense des paramètres caractérisant , ici, les enveloppes externes

**Atmosphère, Hydrosphère** (océans), **Lithosphère** « l'environnement »

= physique, chimie

**Biosphère**

= vie



Magnitude et sens de variation des paramètres climatiques

Crise ou non de la biodiversité

→ *Extinction de l'Holocène*  
6<sup>ème</sup> de l'histoire de la Terre

Magnitude importante au regard des variations climatiques passées

Sens opposé aux alternances climatiques depuis 3 Ma

→ *Nouvelle ère climatique ?*