

Climat et paléoclimat

TERRE &
UNIVERS

Conférence Climathiques 2025

Guillaume Paris

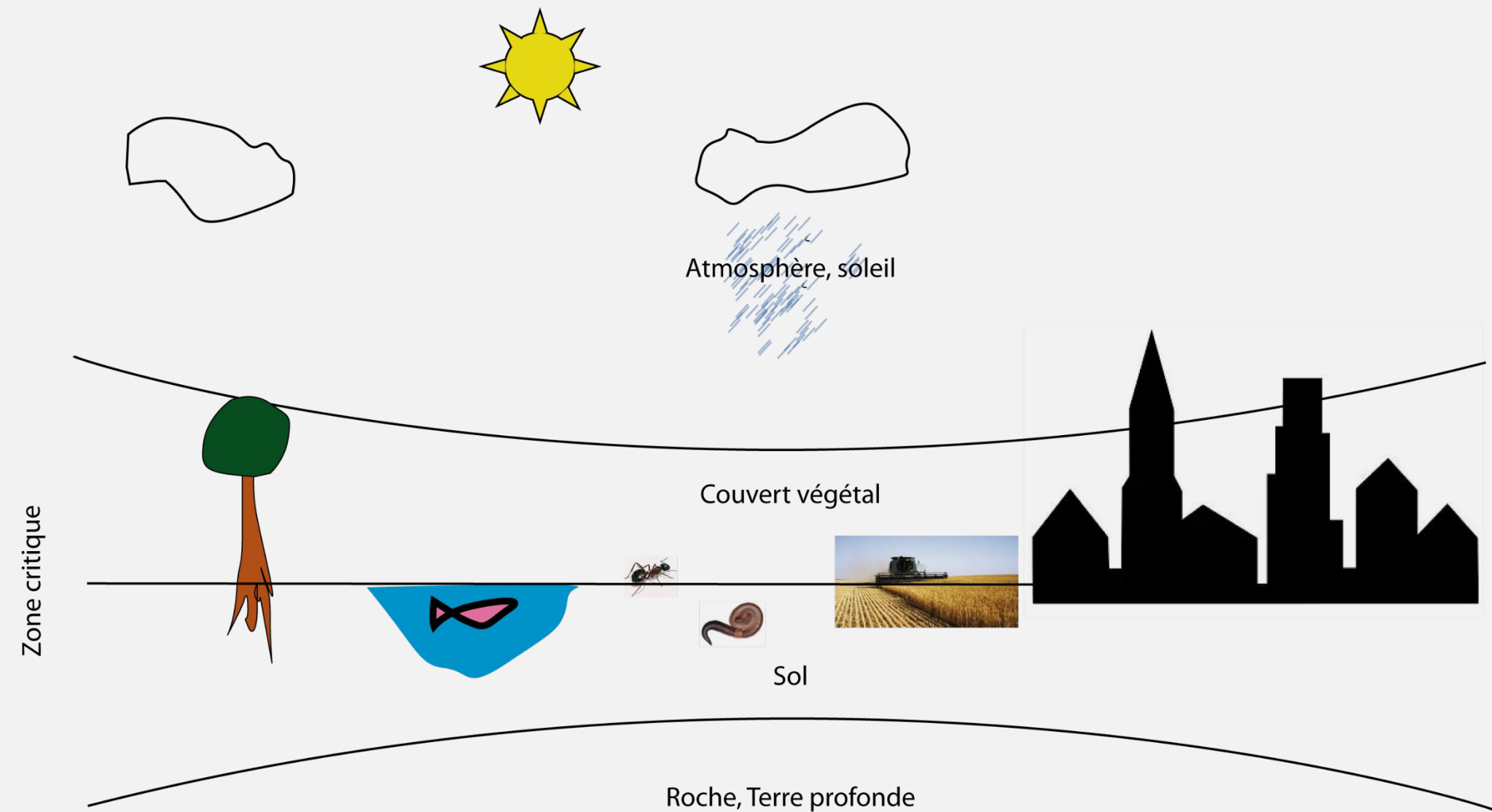
CRPG
UMR 7358 UL-CNRS



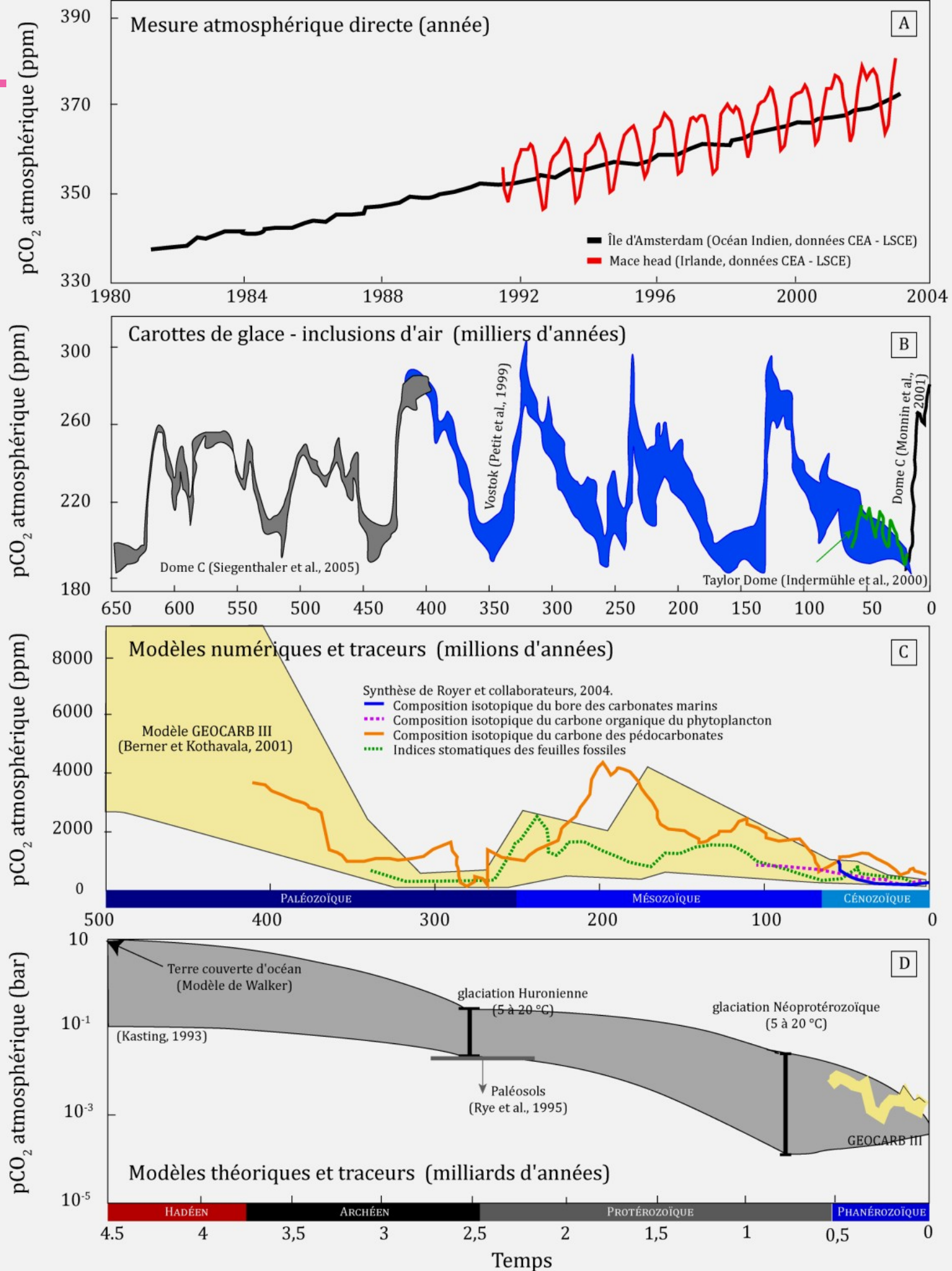
guillaume.paris@univ-lorraine.fr

L'humanité vit sur au sein d'une fine pellicule : la zone critique

Fruit de 4,4 milliards d'années d'interactions entre eau, roches, vie, Terre profonde et atmosphère, la zone critique est fragile.



Elle abrite nos ressources en eau, nos ressources alimentaires, elle dépend de la biodiversité et des conditions climatiques.



Echelle humaine

Cycles G-IG

Million d'années
(tectonique)

Histoire de la
Terre

Le CO₂
atmosphérique,
des variations à
toute échelle de
temps

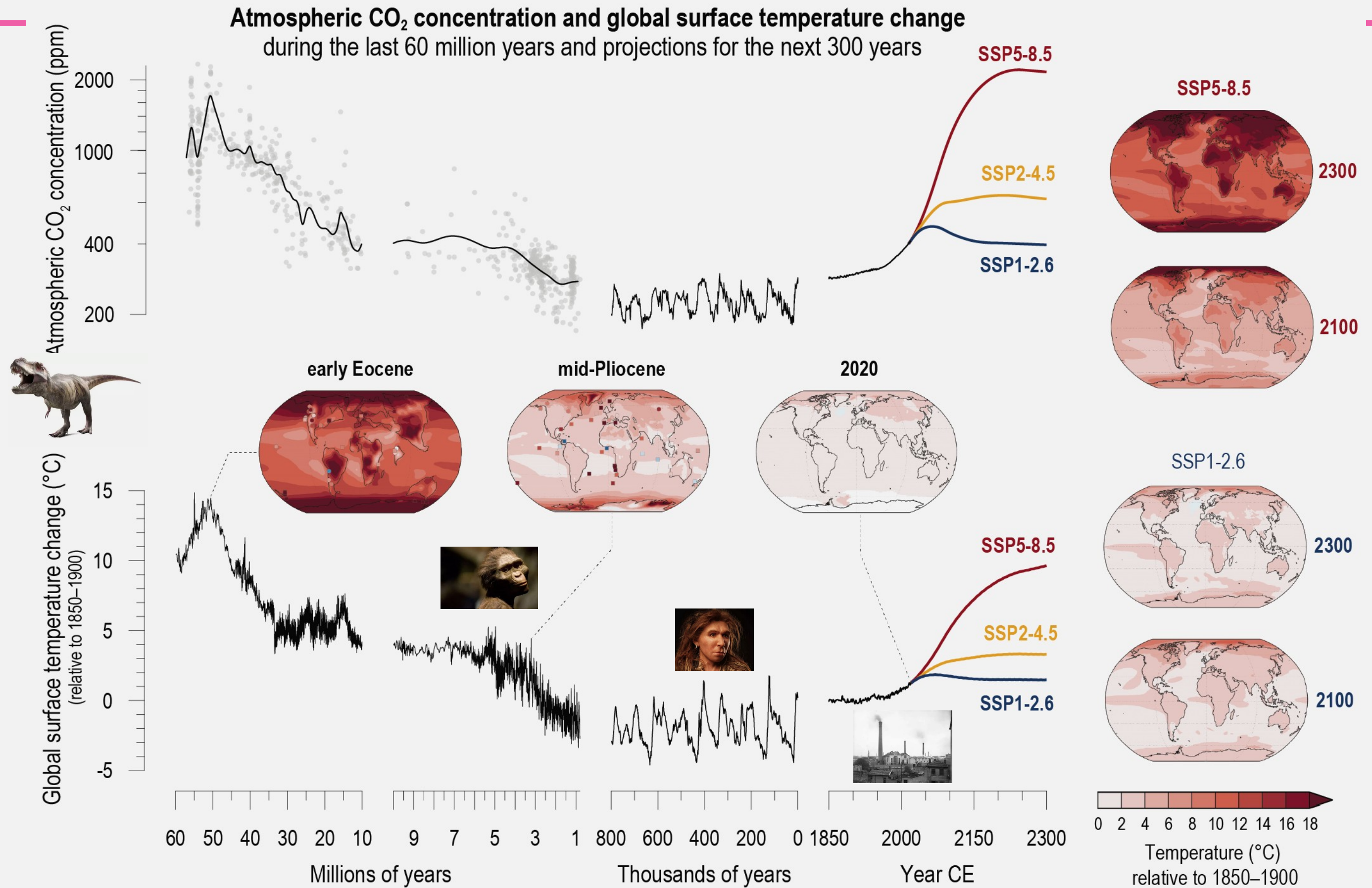
Echelle de temps 1 :
histoire de la terre - 10⁷-10⁸ années
dégazage et recyclage mantellique,
tectonique des plaques

Echelle de temps 3 :
moyen terme, 10³-10⁵ années
échanges atmosphère-océan,
forçage astronomique

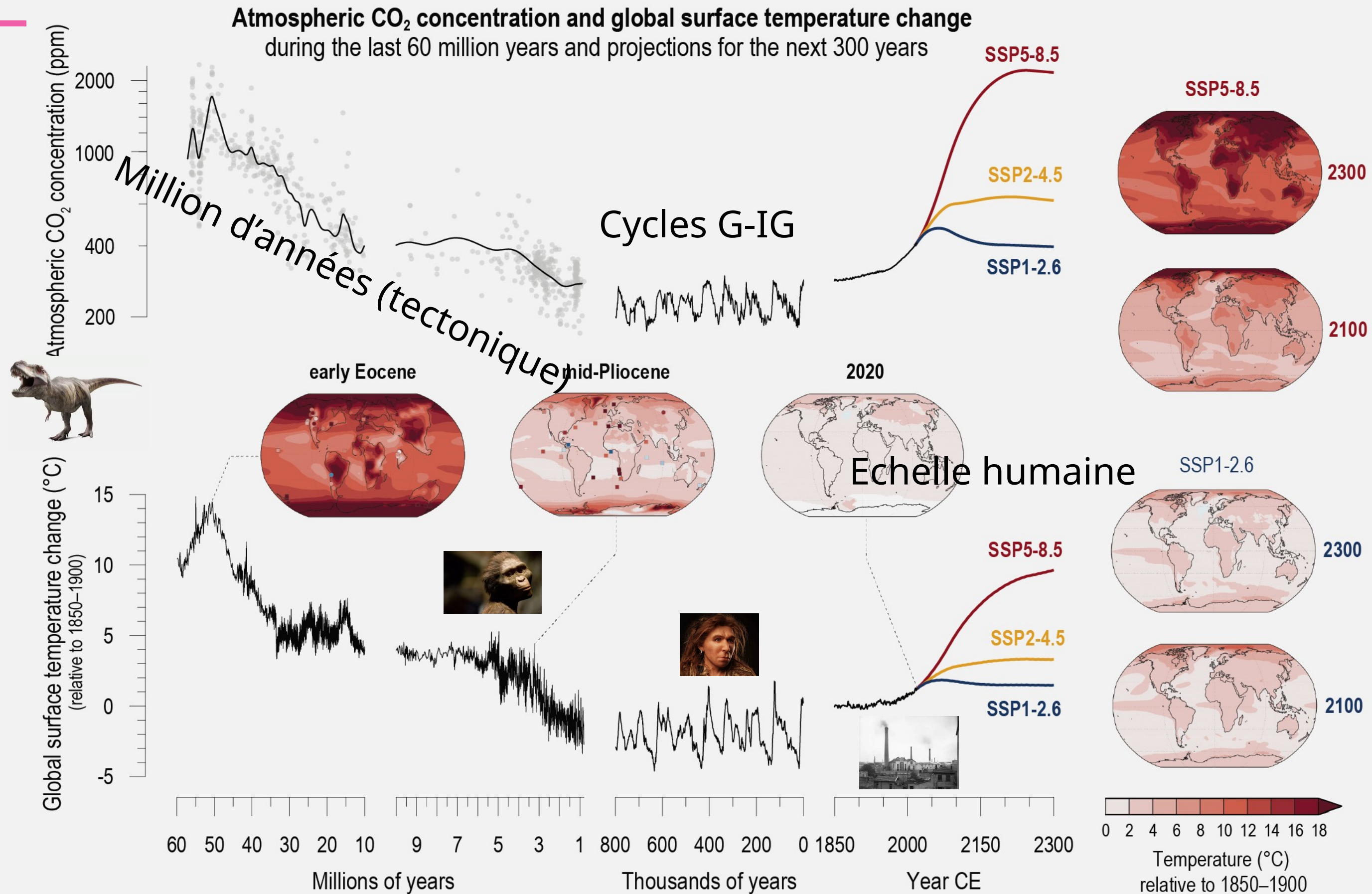


Echelle de temps 2 :
long terme, 10⁵-10⁶ années
Tectonique, métamorphisme,
altération et sédimentation

Echelle de temps 4, cycle court:
court terme, 10⁻¹ - 10⁰ années
Photosynthèse, respiration

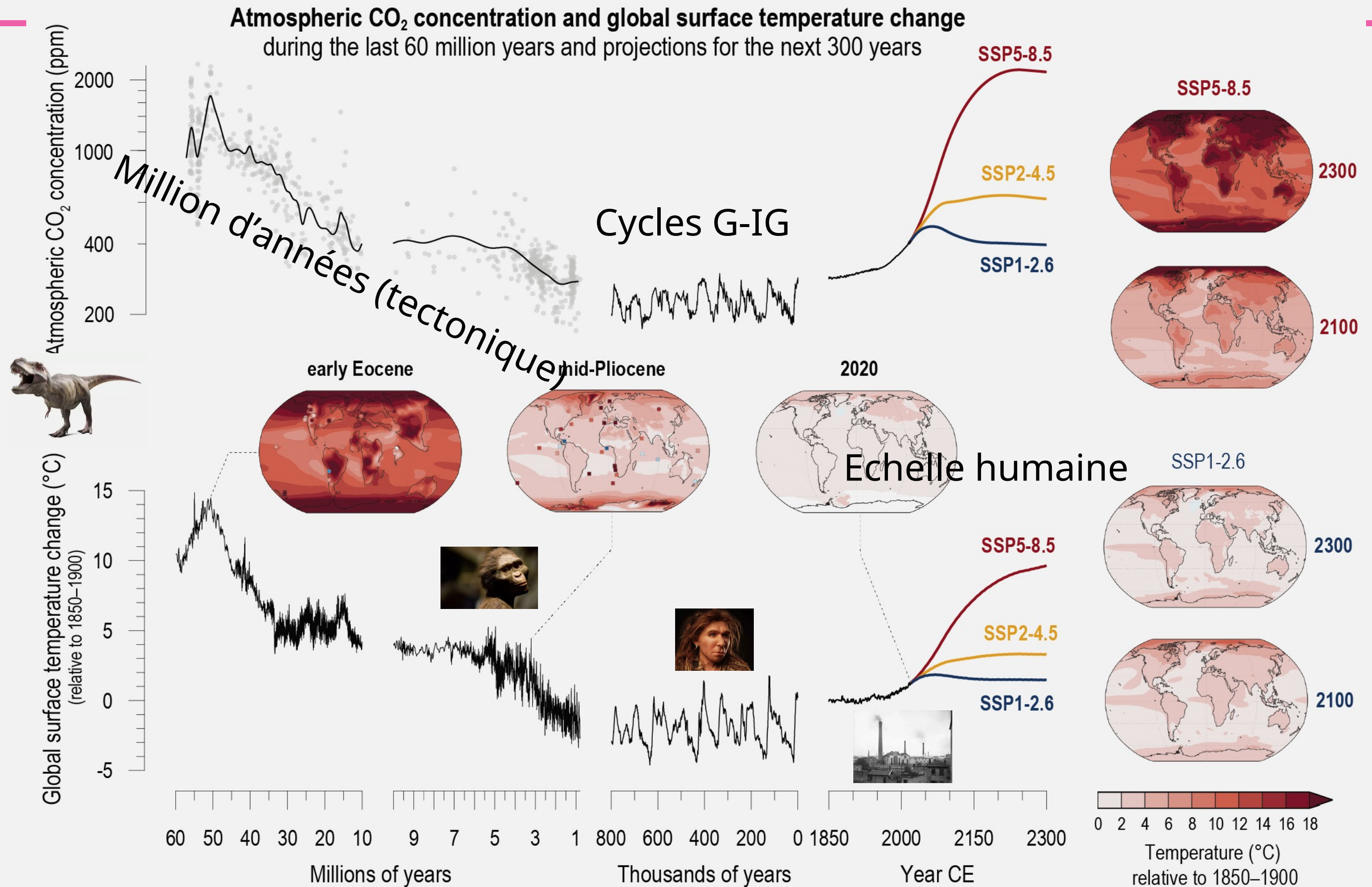


(Figure TS.1 in IPCC, 2021)



Actuellement dans une période froide

(Figure TS.1 in IPCC, 2021)



Actuellement dans une période moins froide

(Figure TS.1 in IPCC, 2021)

+ 1.2 degré, et alors ?

Déjà +1.2°C (moyenne mondiale), et ce n'est que le début.

- Quel est le rôle joué par le CO₂ dans le contrôle du climat et le réchauffement actuel ?
- Pourquoi le réchauffement est-il (aussi) un problème biogéochimique ?
- Quels enseignements tirer du passé de la Terre ?

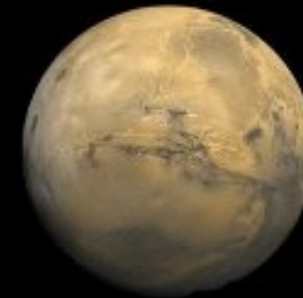
Partie 1. Les paramètres de contrôle du climat et le rôle de l'effet de serre

***Pour comprendre pourquoi le climat se réchauffe,
voyons comment le climat fonctionne***

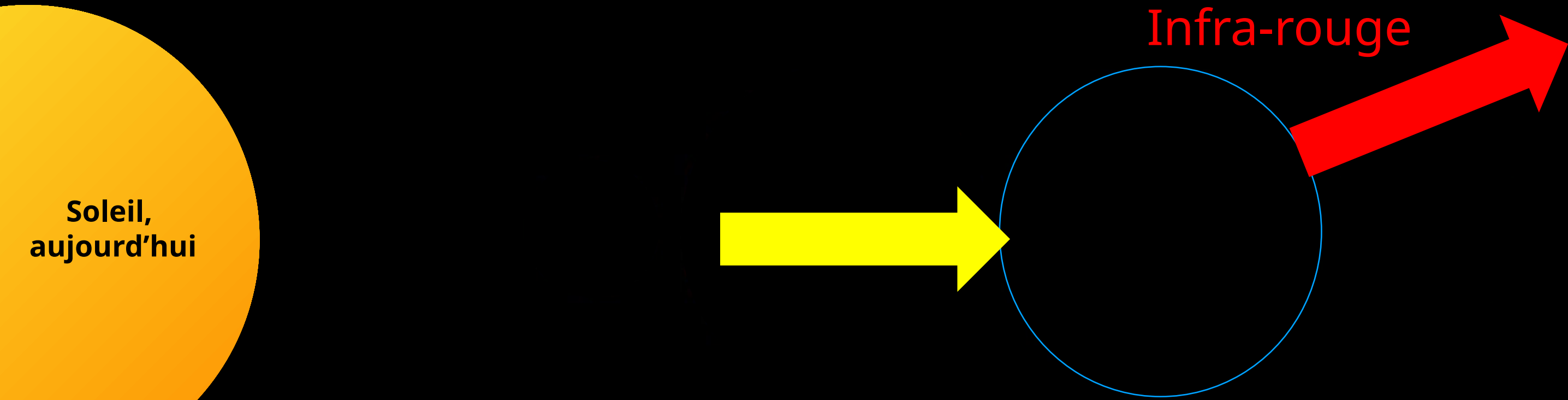
La température moyenne sur Terre et le bilan radiatif



Soleil,
aujourd'hui

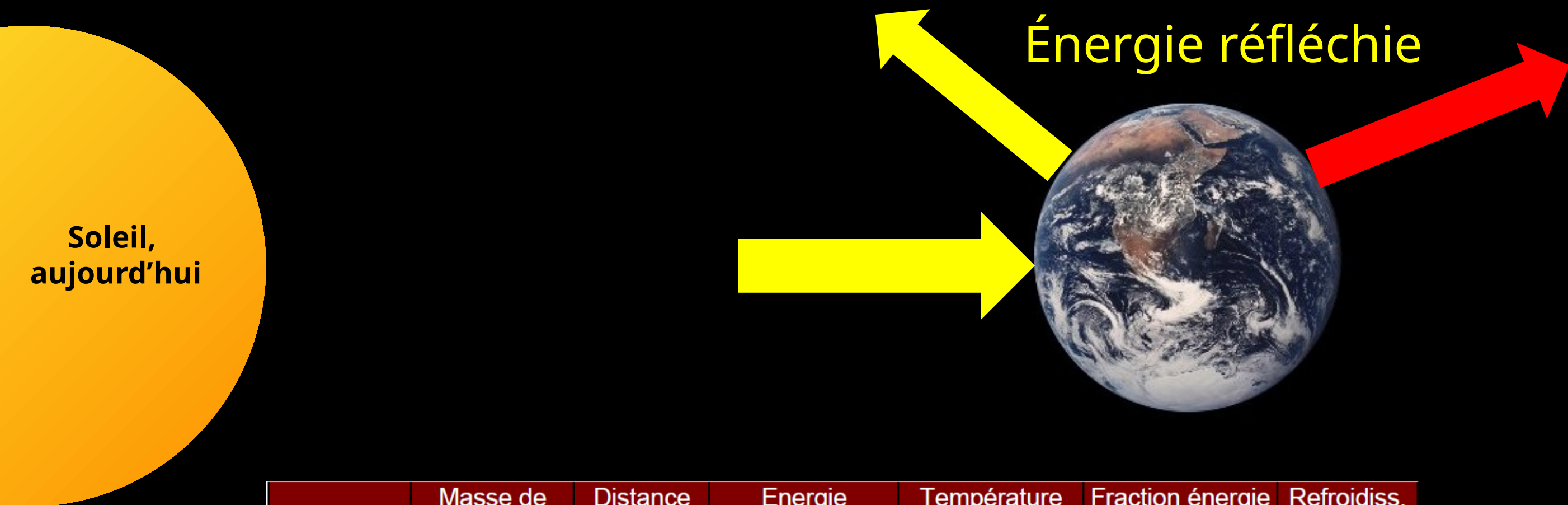


La température moyenne sur Terre et le bilan radiatif



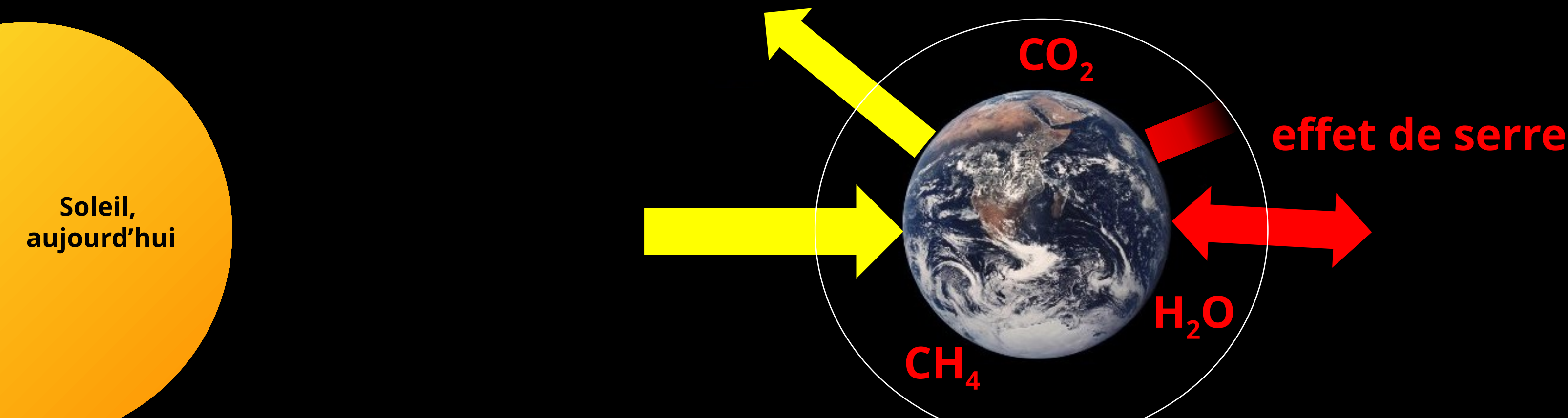
	Masse de l'atm. kg/m ²	Distance soleil 10 ⁶ km	Energie reçue Watt/m2	Température corps noir °C
Mercure	0	58	2234	175
Vénus	1150000	108	631	55
Terre	10300	150	340	5
Mars	160	228	146	-50

Les planètes perdent une partie de leur énergie



	Masse de l'atm. kg/m ²	Distance soleil 10 ⁶ km	Energie reçue Watt/m2	Température corps noir °C	Fraction énergie solaire réfléchie	Refroidiss. °C
Mercure	0	58	2234	175	0.06	-5
Vénus	1150000	108	631	55	0.71	-84
Terre	10300	150	340	5	0.33	-25
Mars	160	228	146	-50	0.17	-10

Sans effet de serre, pas d'eau liquide sur Terre



	Masse de l'atm. kg/m^2	Distance soleil 10^6 km	Energie reçue Watt/m^2	Température corps noir $^\circ\text{C}$	Fraction énergie solaire réfléchie	Refroidiss. $^\circ\text{C}$	Réchauff. par effet de serre $^\circ\text{C}$	Température moyenne $^\circ\text{C}$
Mercure	0	58	2234	175	0.06	-5	0	-
Vénus	1150000	108	631	55	0.71	-84	460	430
Terre	10300	150	340	5	0.33	-25	35	15
Mars	160	228	146	-50	0.17	-10	15	-45

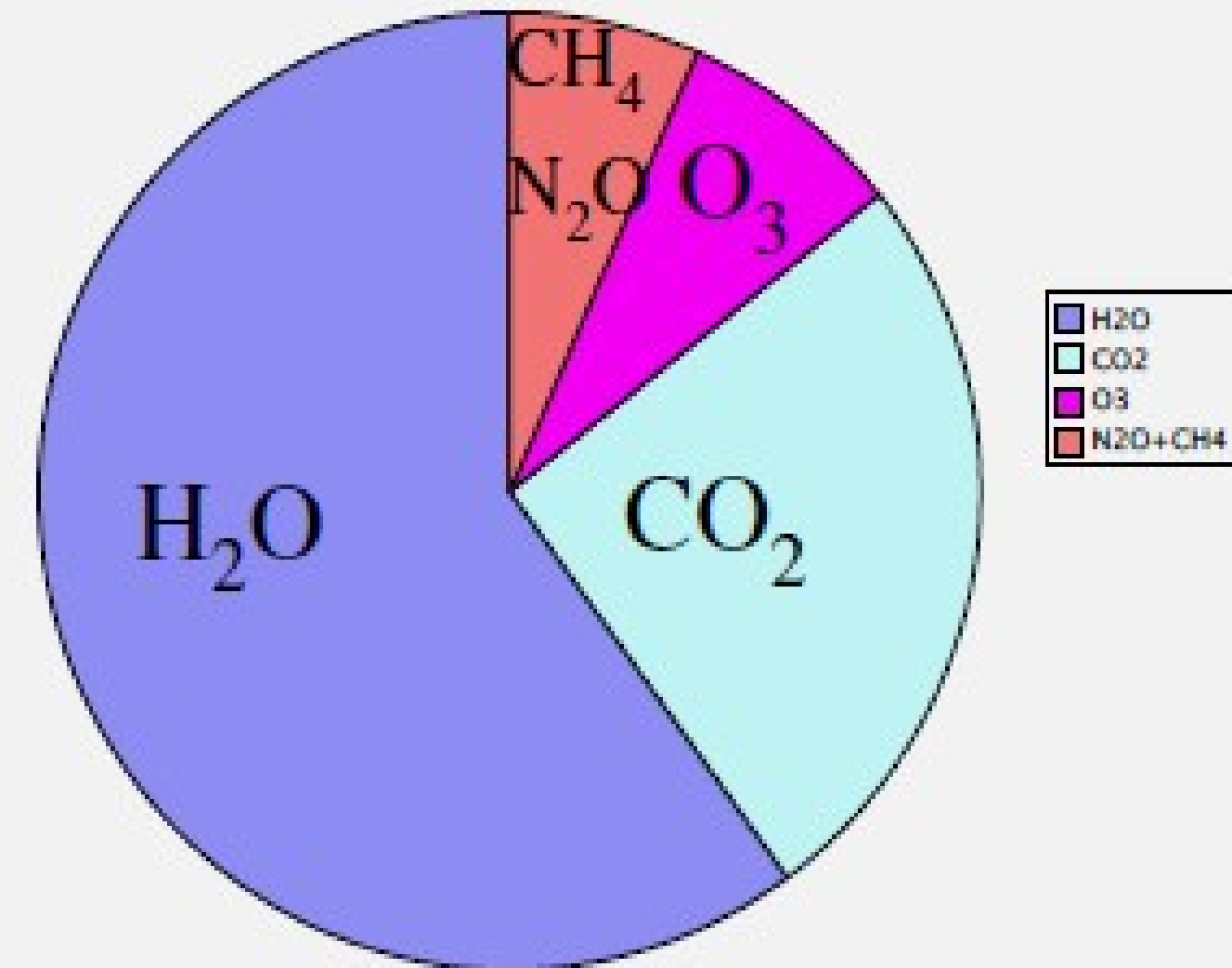
1. Climat et bilan radiatif

Les principaux gaz à effet de serre sont

Effet de serre (W.m^{-2}):

Vapeur d'eau	75	60%
CO ₂	32	26%
ozone	10	8%
N ₂ O+CH ₄	8	6%

Contribution à l'effet de serre



La teneur de vapeur d'eau est directement reliée à la température contrairement au CO₂ : seul ce dernier a un rôle de contrôle

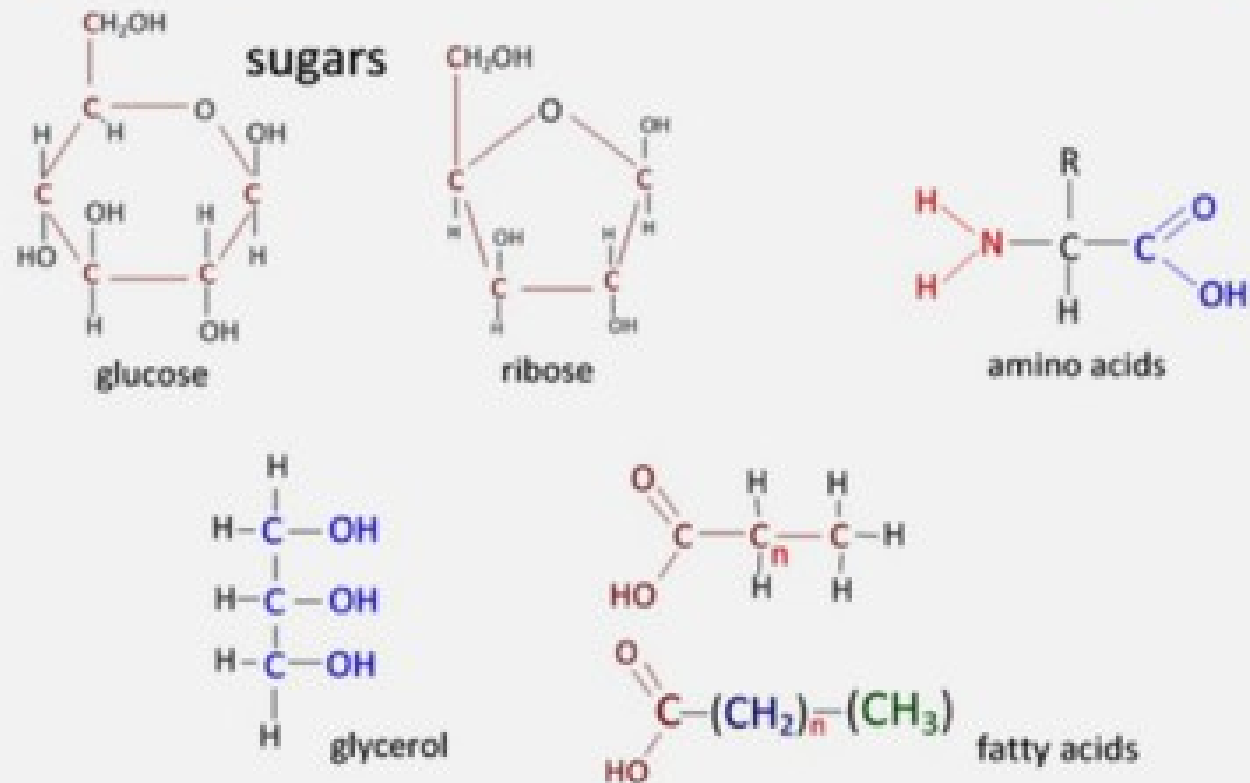
Partie 2. Le rôle de l'océan et de la biomasse dans le cycle du carbone et donc le contrôle du climat

Carbone !  CO_2
 CH_4

2. Cycle du carbone et variations naturelles

Les principales formes du carbone

Organic compounds contain **carbon** and are found in **living things**.



They usually contain **C-H** or **C-C** bonds.

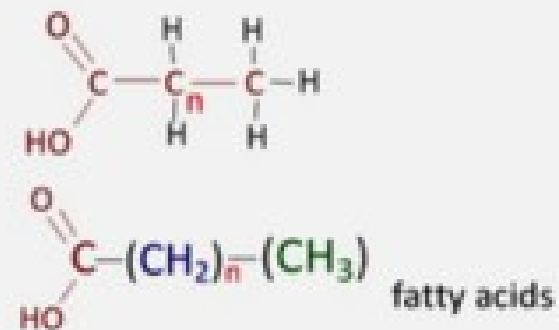
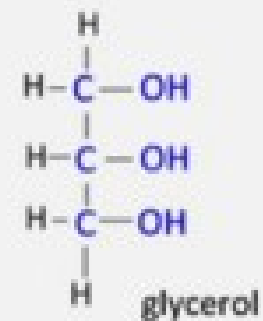
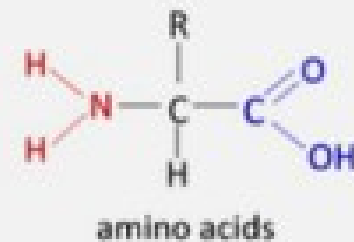
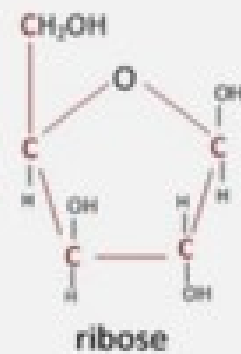
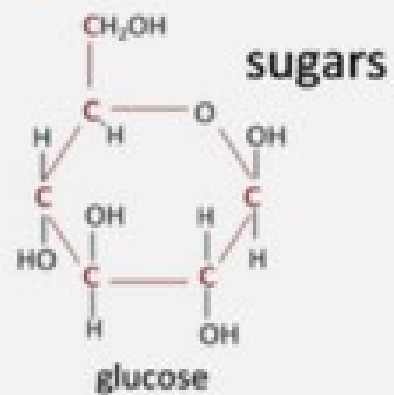
The organic compounds we study can be used in metabolic reactions.

Le carbone organique CH₂O
Biomasse, sols, matière
organique des
sédiments, charbon,
pétrole

2. Cycle du carbone et variations naturelles

Les principales formes du carbone

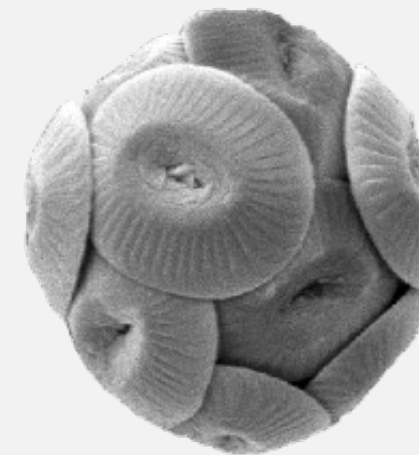
Organic compounds contain **carbon** and are found in **living things**.



They usually contain **C-H** or **C-C** bonds.

The organic compounds we study can be used in metabolic reactions.

Le carbone organique



Le carbone minéral



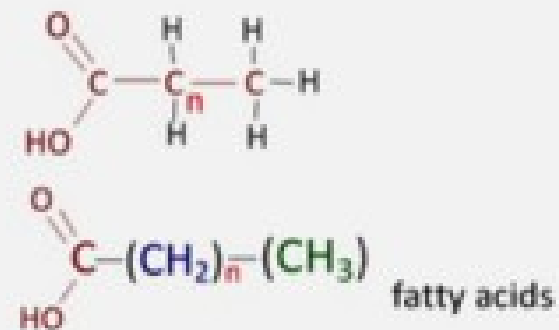
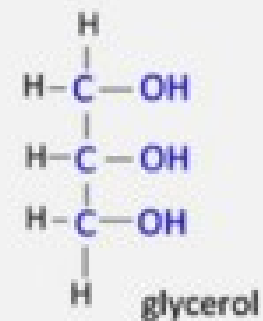
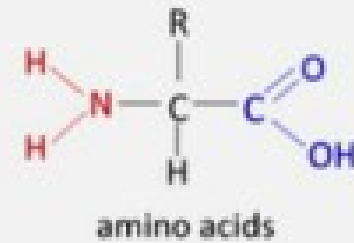
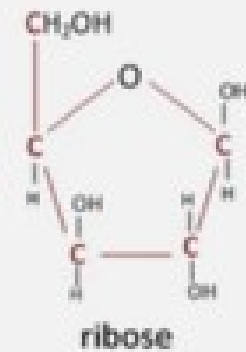
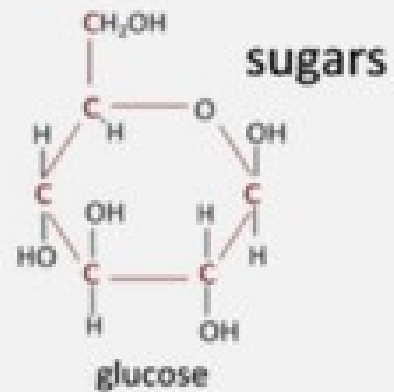
Organismes marins
Roches calcaires, craies,
dolomites...



2. Cycle du carbone et variations naturelles

Les principales formes du carbone

Organic compounds contain **carbon** and are found in **living things**.

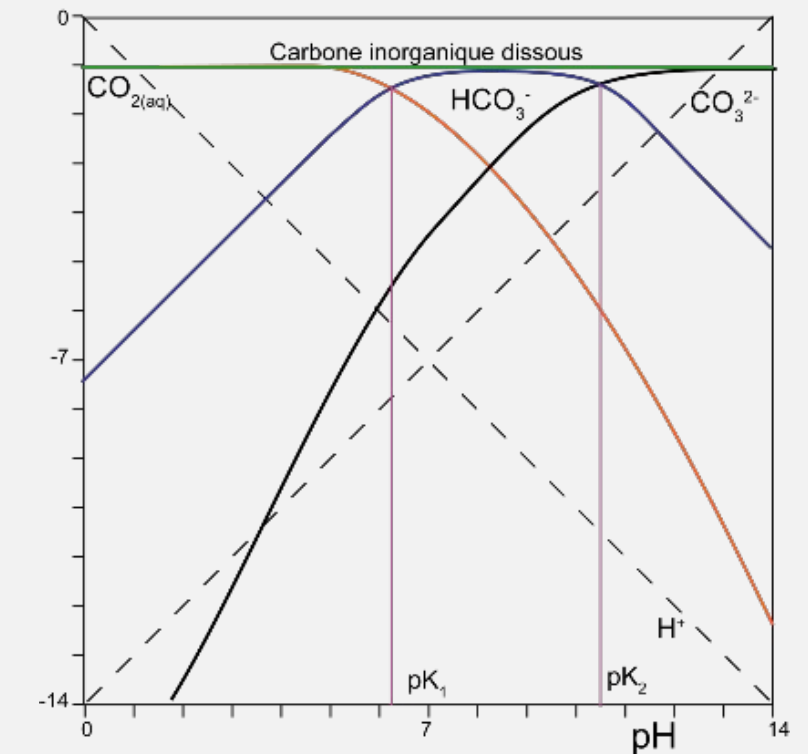


They usually contain **C-H** or **C-C** bonds.

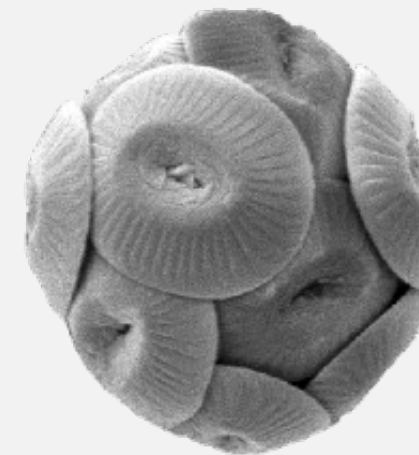
The organic compounds we study can be used in metabolic reactions.

Le carbone organique

Ion carbonates,
bicarbonates,
acide
carbonique, CO₂
dissout



Le carbone inorganique dissout - DIC

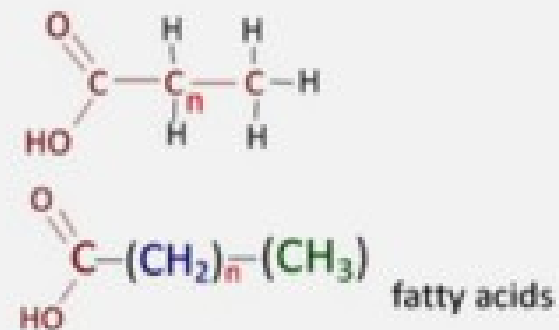
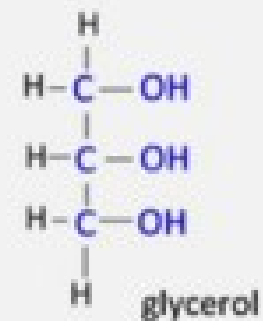
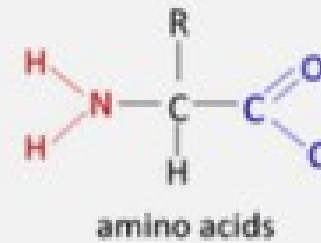
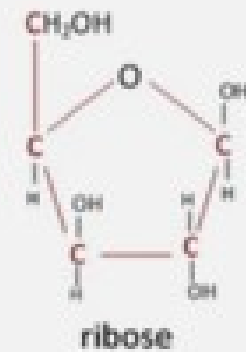
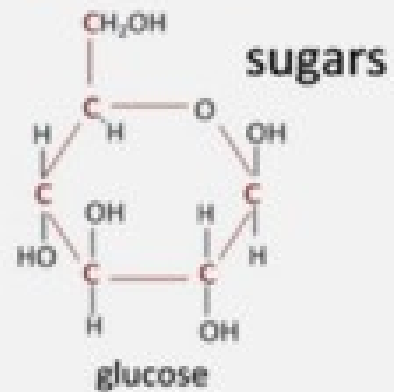


Le carbone minéral

2. Cycle du carbone et variations naturelles

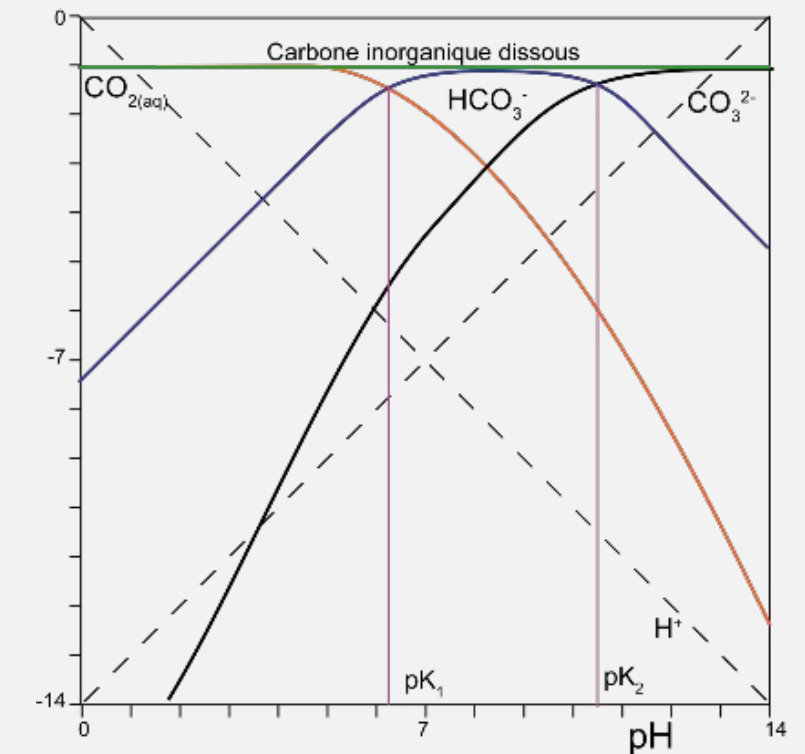
Les principales formes du carbone

Organic compounds contain **carbon** and are found in **living things**.



They usually contain **C-H** or **C-C** bonds.

The organic compounds we study can be used in metabolic reactions.



e carbone inorganique dissout - DIC

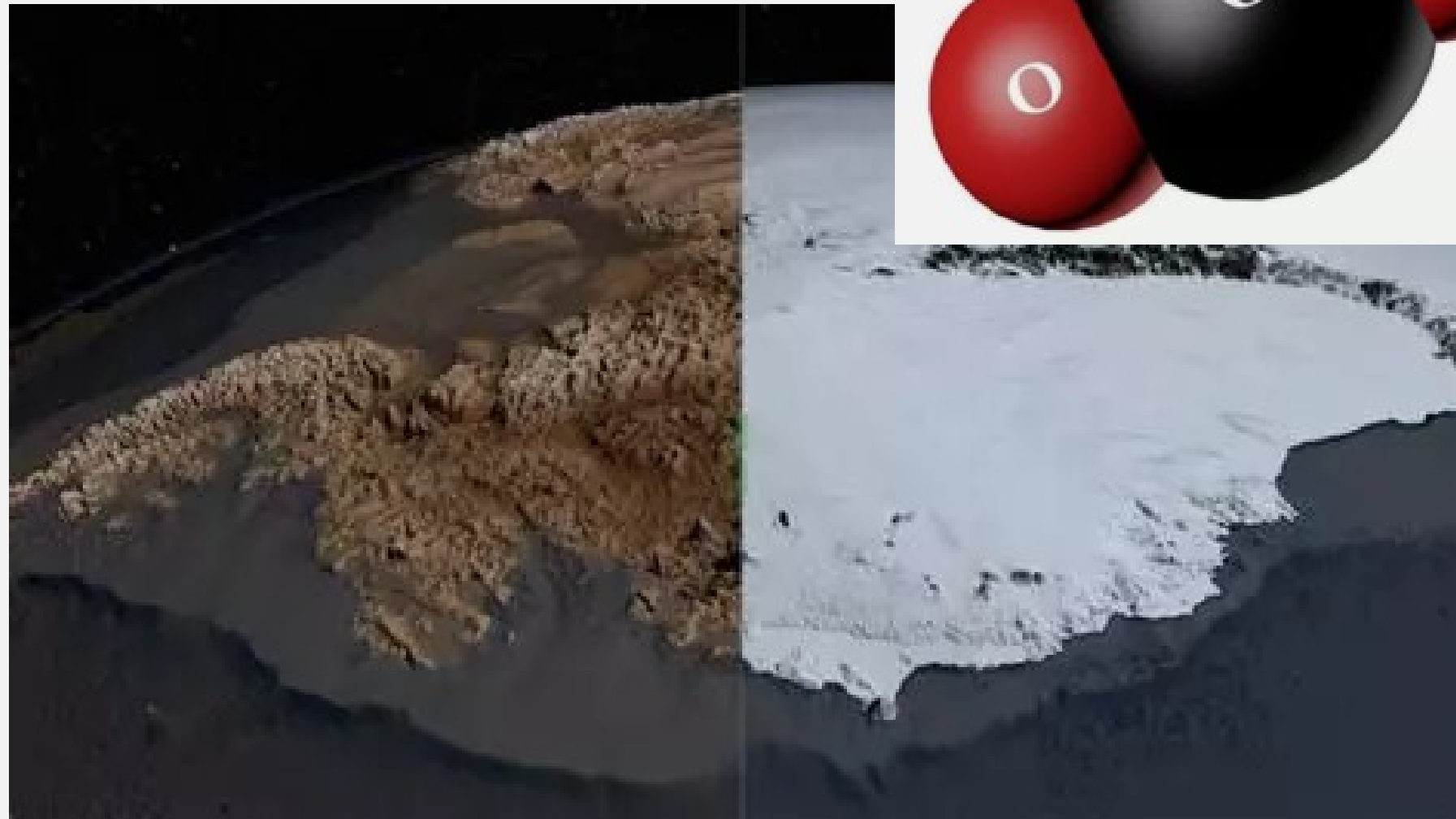
Le carbone organique

Le carbone minéral



2. Cycle du carbone et variations naturelles

CO₂ (climat)



NASA

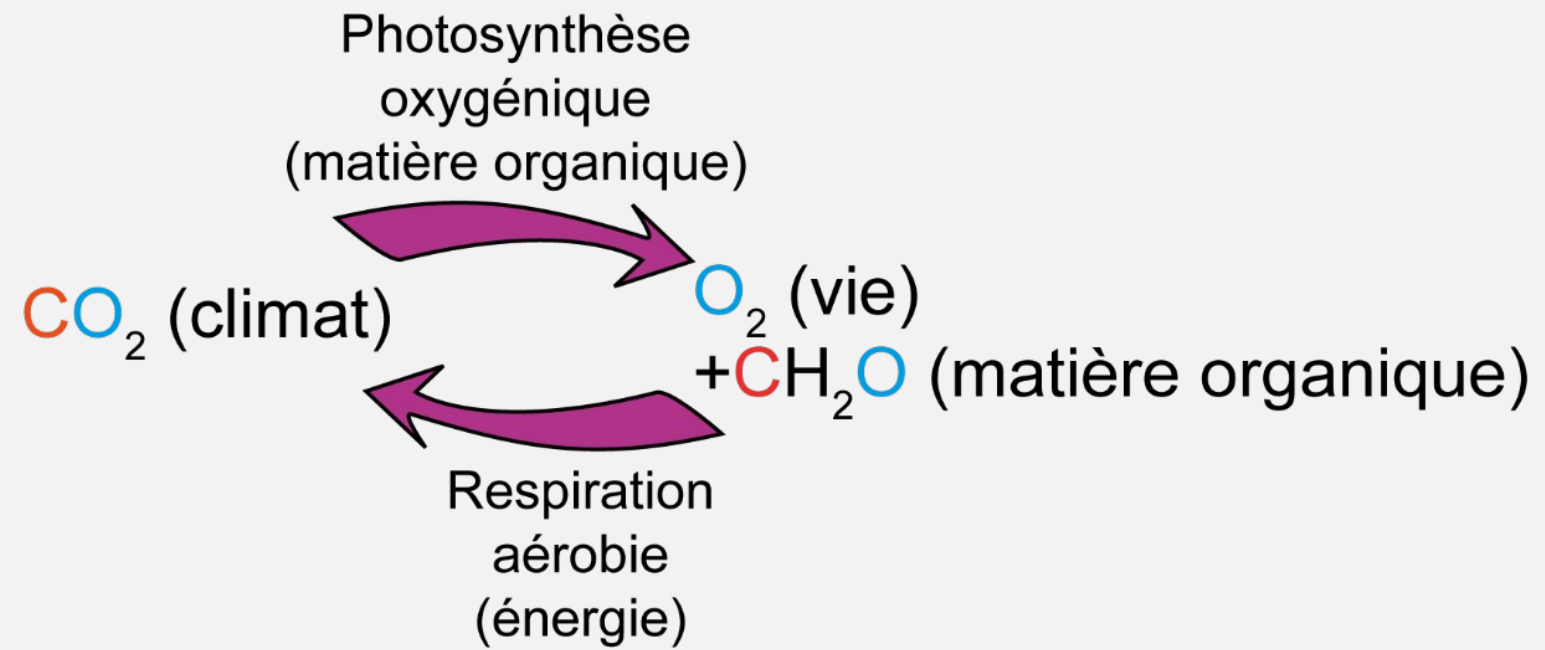
2. Cycle du carbone et variations naturelles

CO₂ (climat)

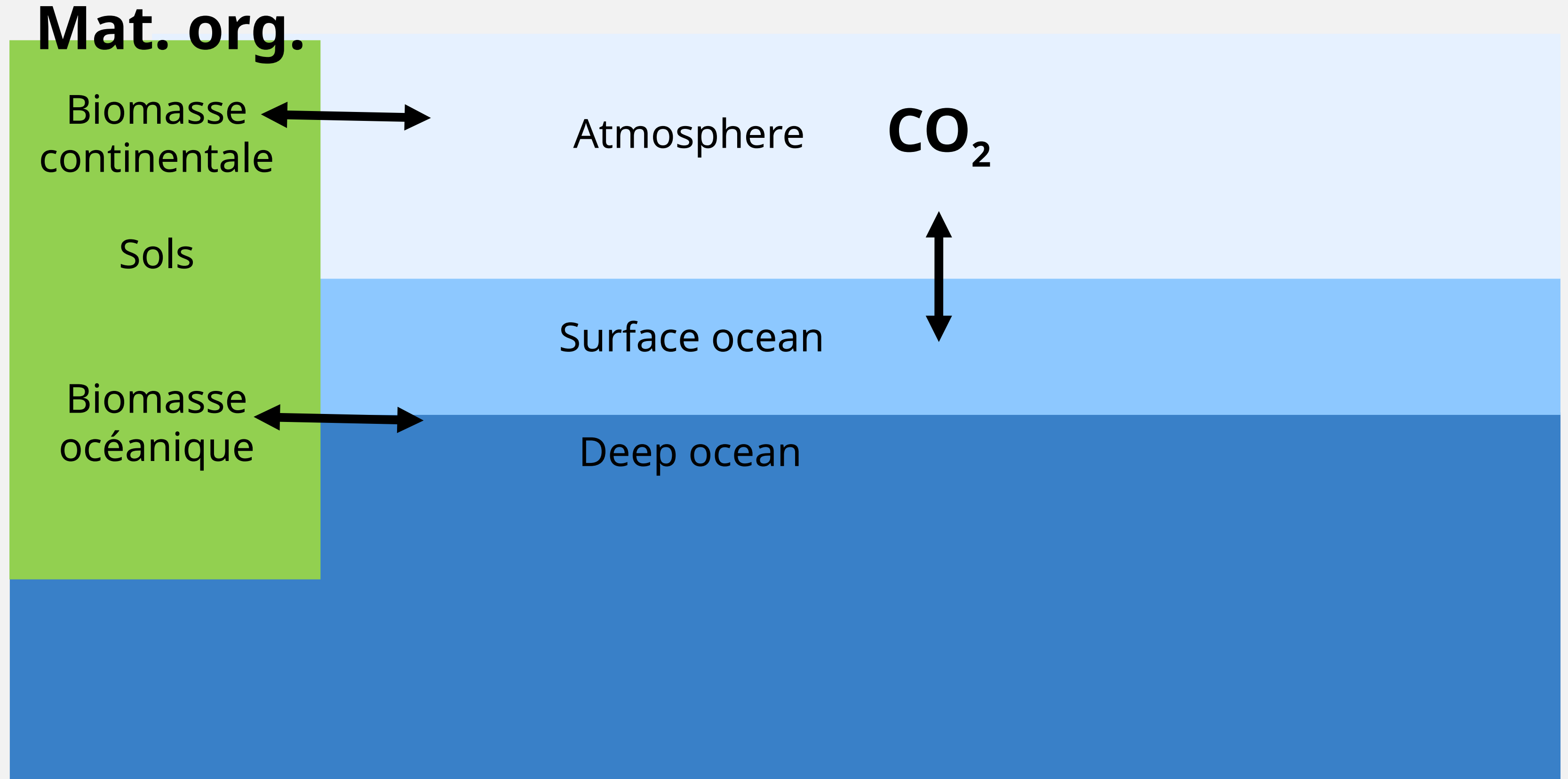
O₂ (vie)



2. Cycle du carbone et variations naturelles

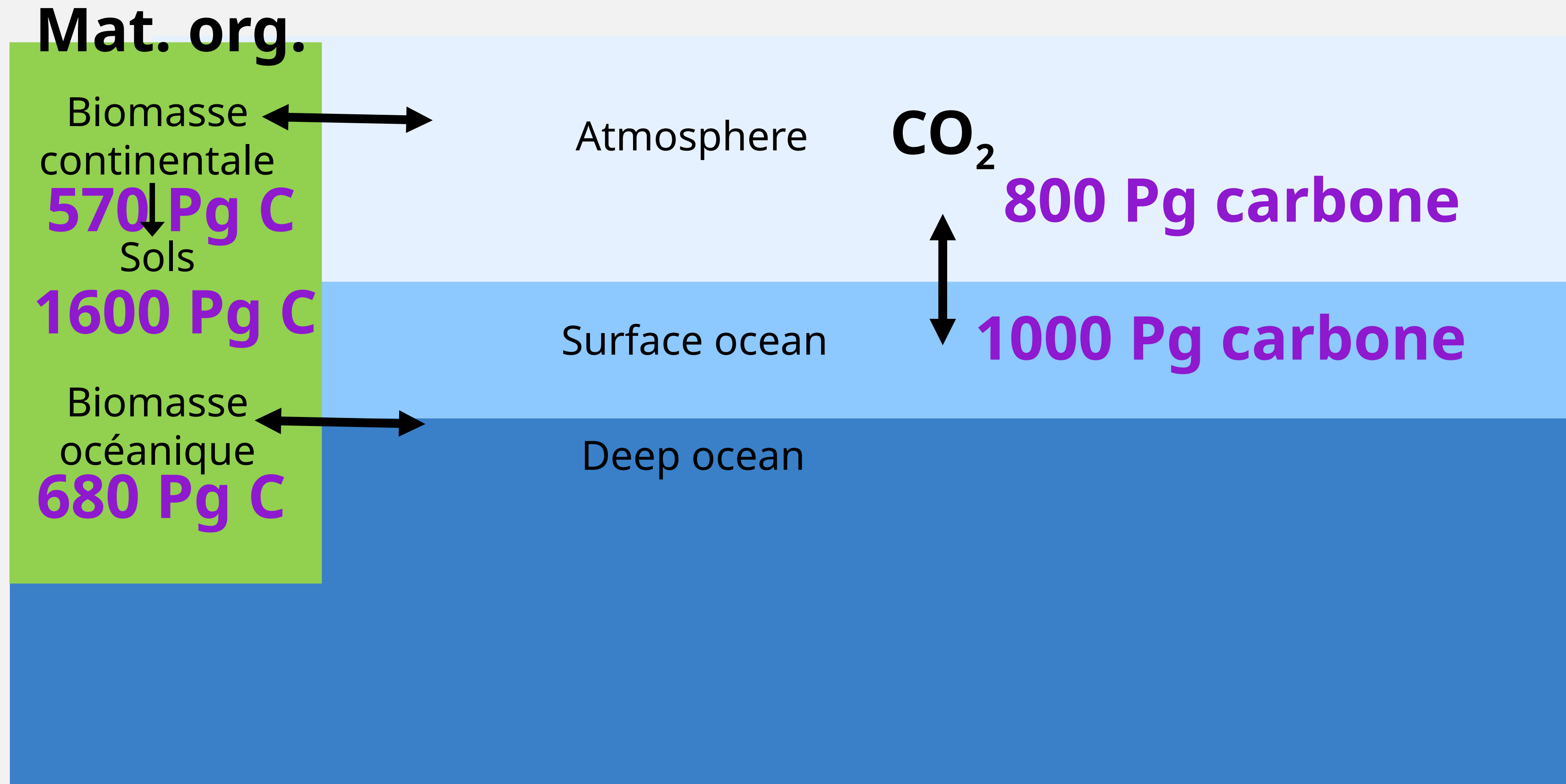


2. Cycle du carbone et variations naturelles : instantané



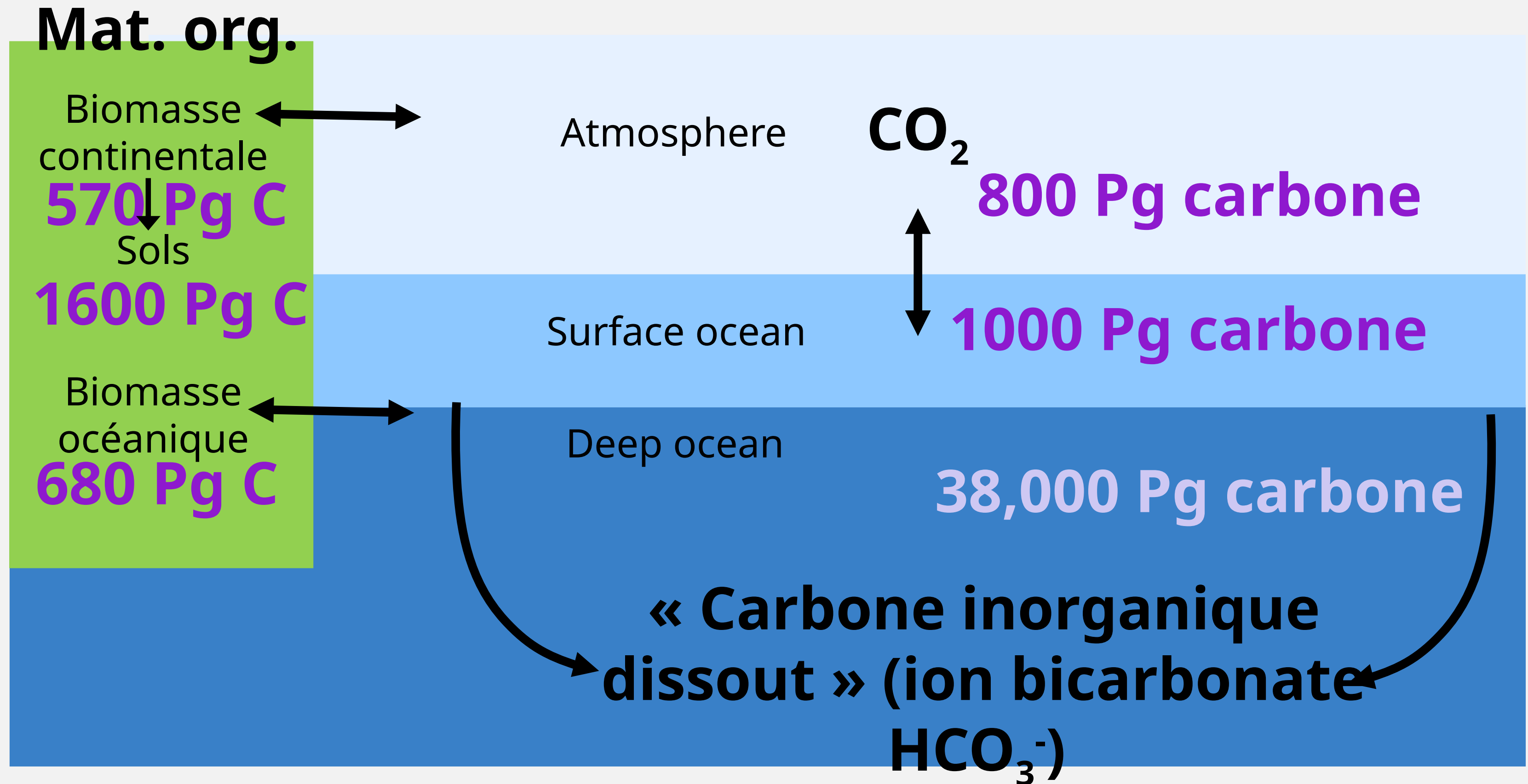
1 Pg = 10¹⁵ g = 10000000000000000 g = 1 milliard de tonnes

2. Cycle du carbone et variations naturelles : moins de cent ans



1 Pg = 10^{15} g = 1000000000000000 g = 1 milliard de tonnes

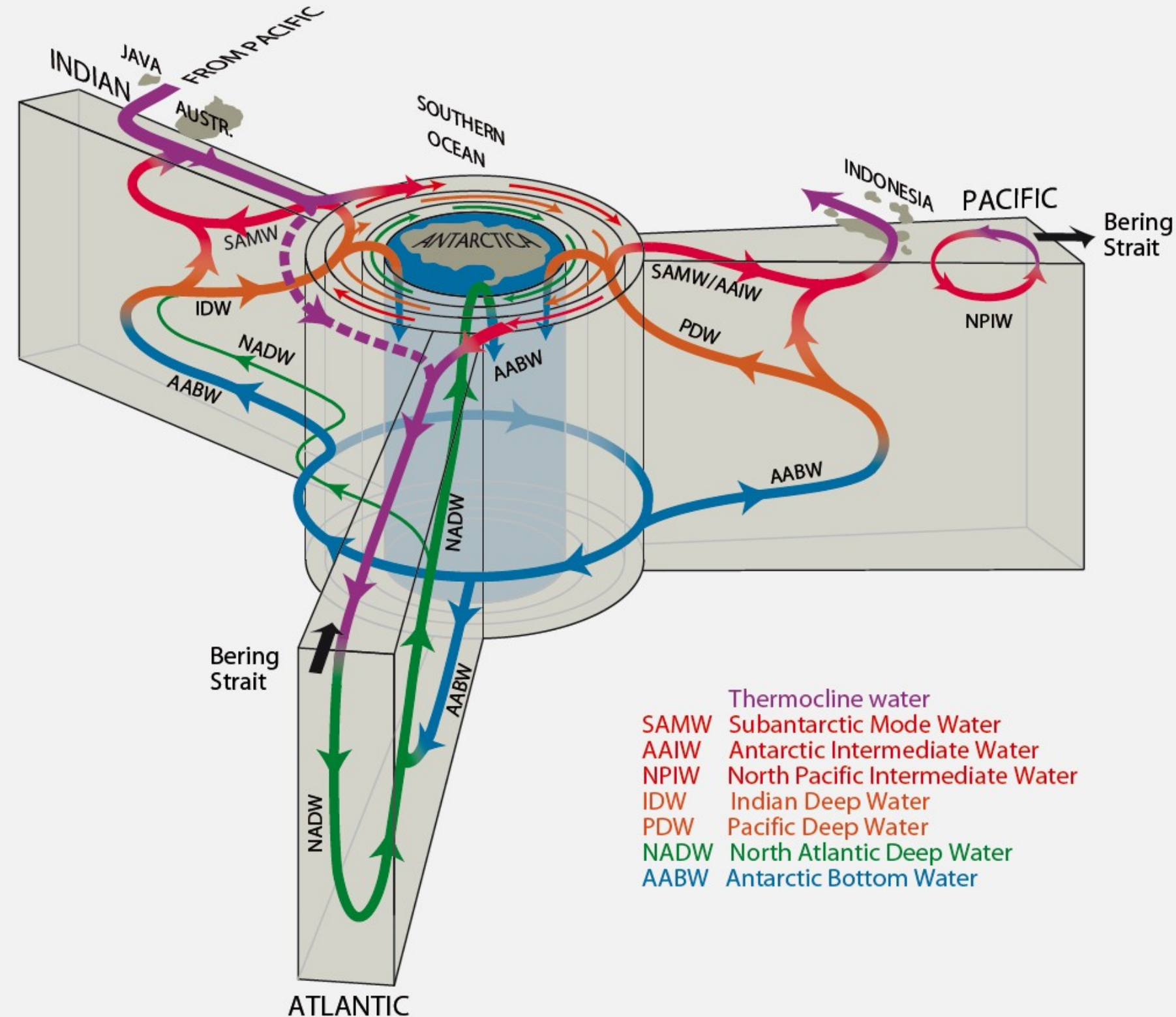
2. Cycle du carbone et variations naturelles : millier d'années



1 Pg = 10¹⁵ g = 1000000000000000 g = 1 milliard de tonnes

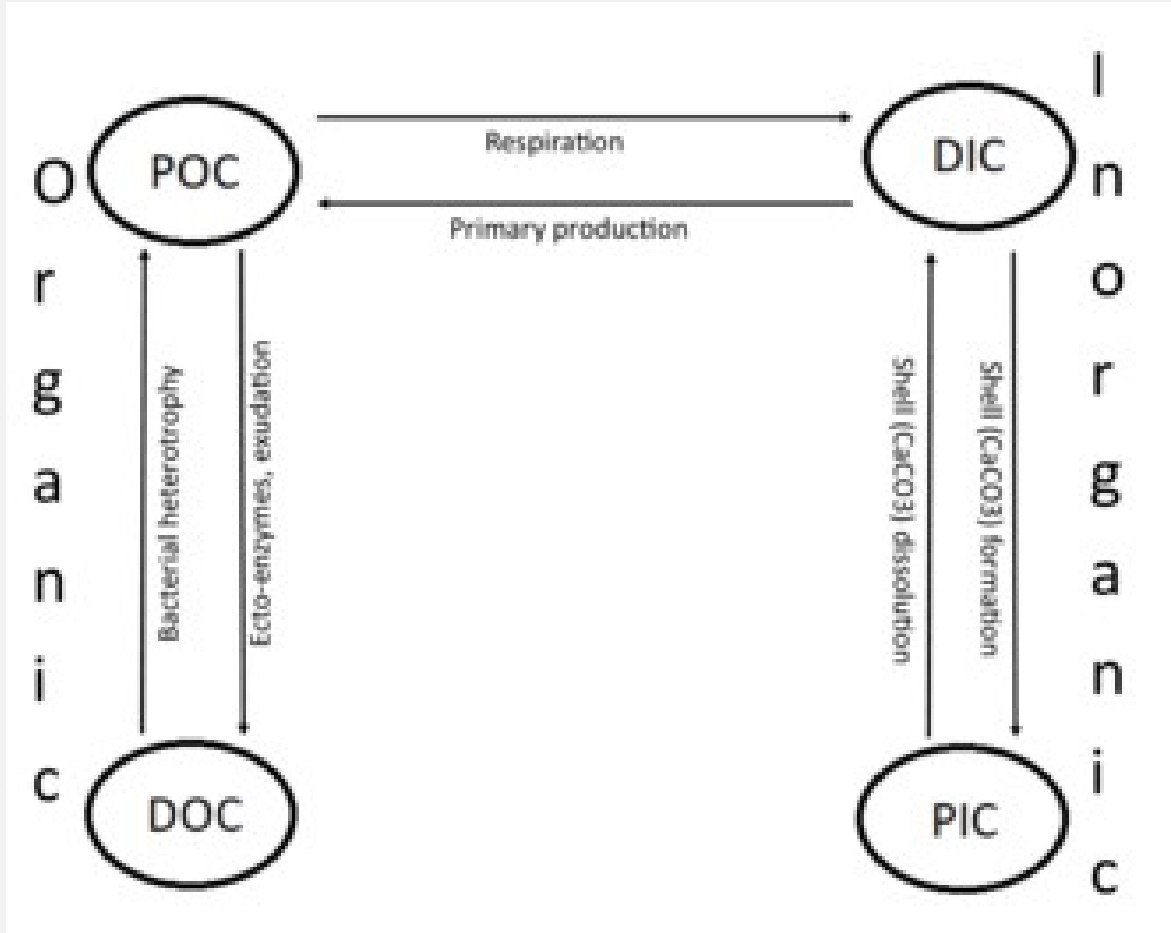
2. Cycle du carbone et variations naturelles : circulation océanique

Le rôle central de l'océan austral

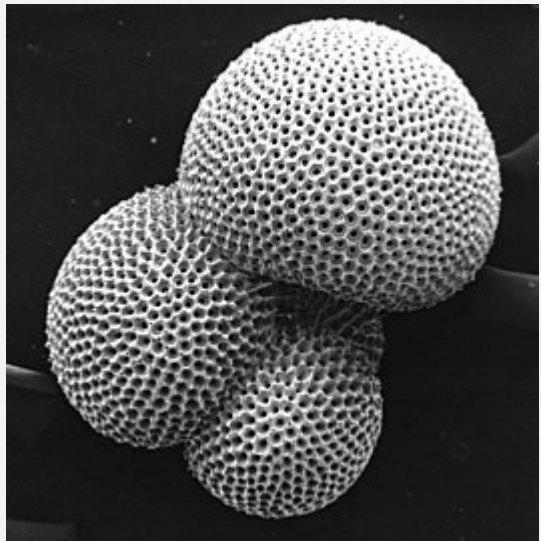


2. Cycle du carbone et variations naturelles

Dans l'océan : PIC, POC, DIC, DOC



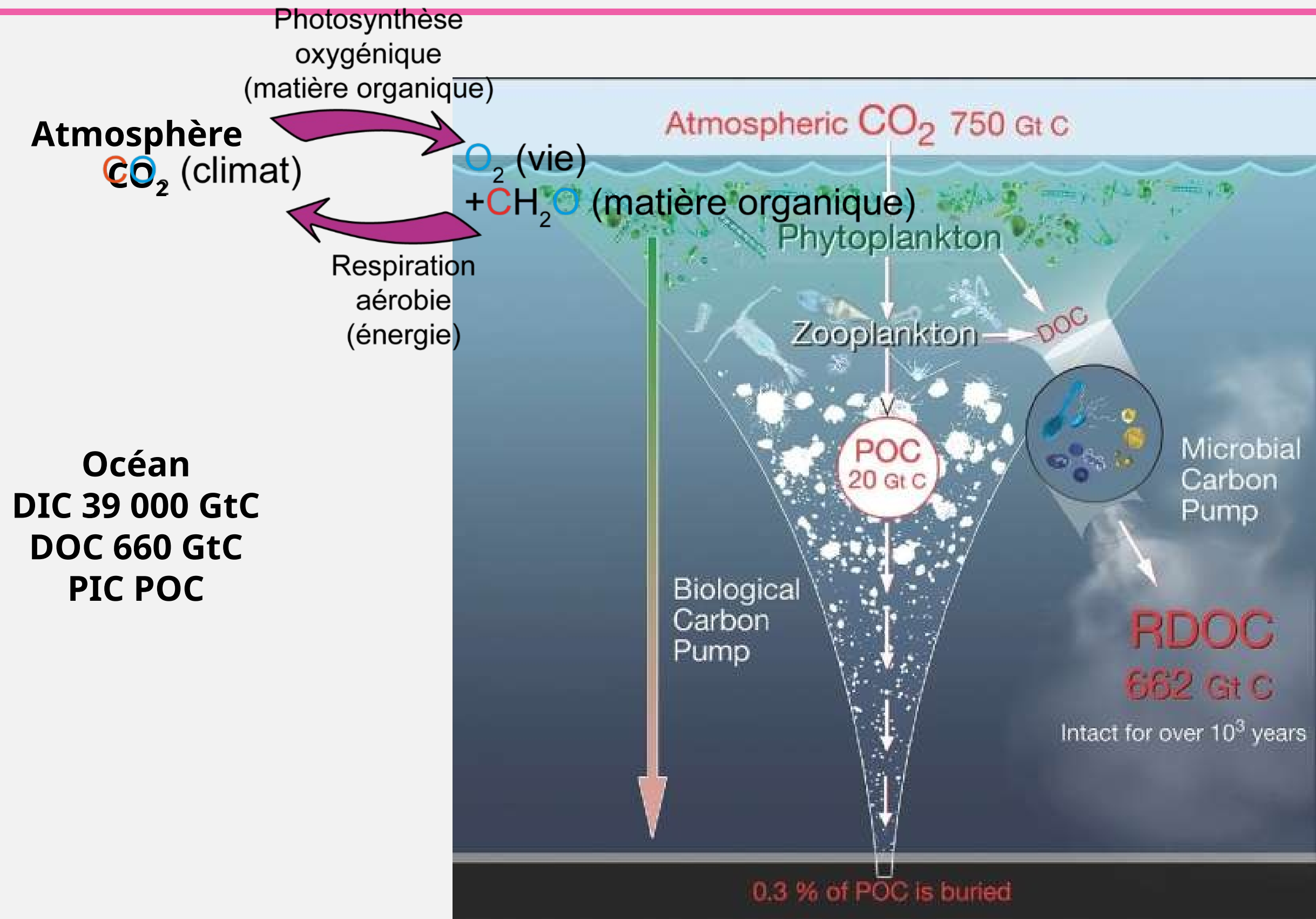
Coccolithophoridé



Foraminifère

Différence particulate / dissolved : 0.2 µm





Pompe carbone organique

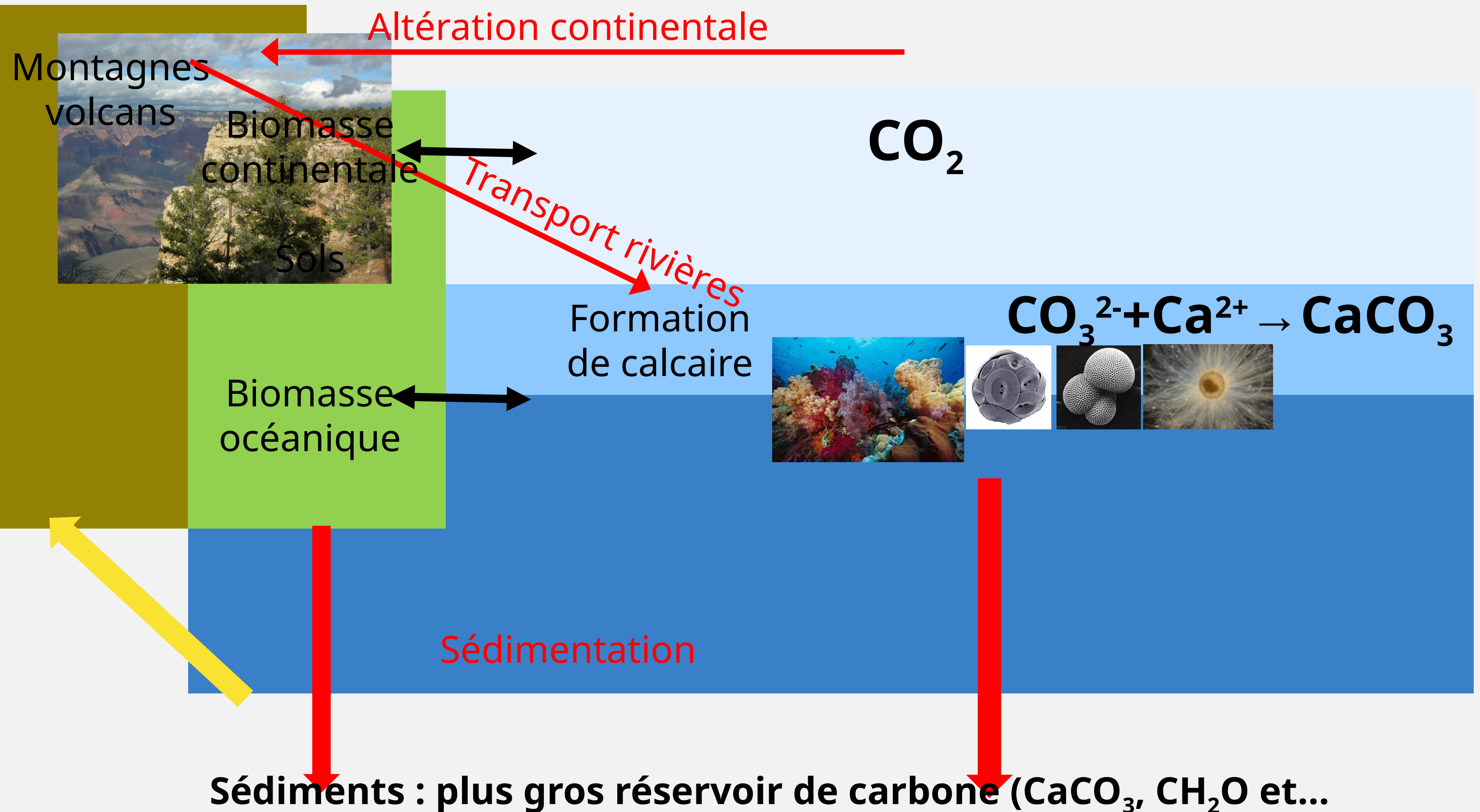
100 %

5 %

≤ 1 %

Sédiments : carbone organique sédimentaire, carbonate de calcium (1000000 GtC)

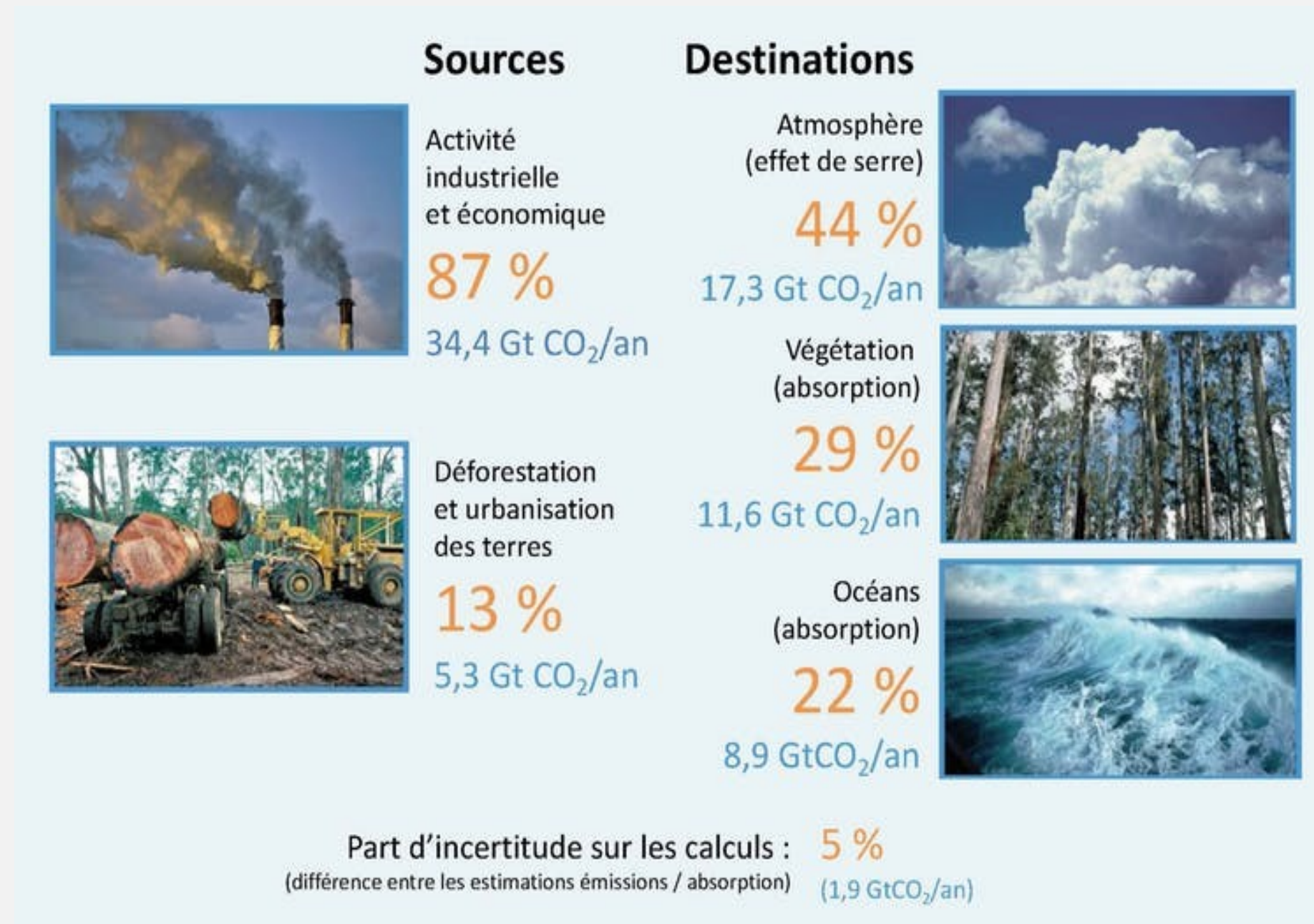
2. Cycle du carbone et variations naturelles : millions d'années



4. Perturbations anthropiques

Apports anthropiques = 40 GtCO₂/an
(essentiellement les pays dits de l'Ouest et la Chine)

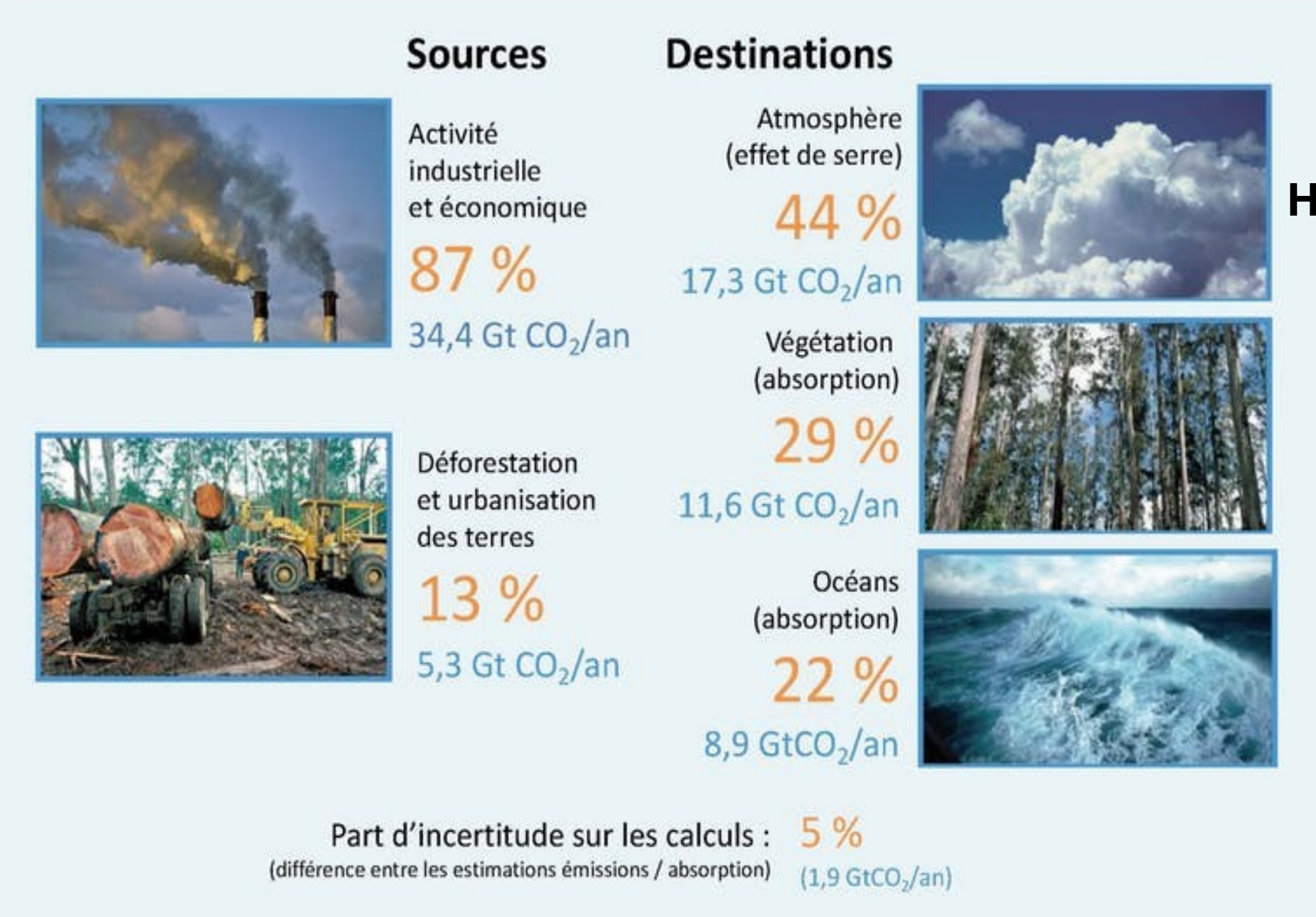
Volcans = 0.5 GtCO₂/an



4. Perturbations anthropiques

Apports anthropiques = 40 GtCO₂/an
(essentiellement les pays dits de l'Ouest et la Chine)

Volcans = 0.5 GtCO₂/an



Hausse bilan radiatif

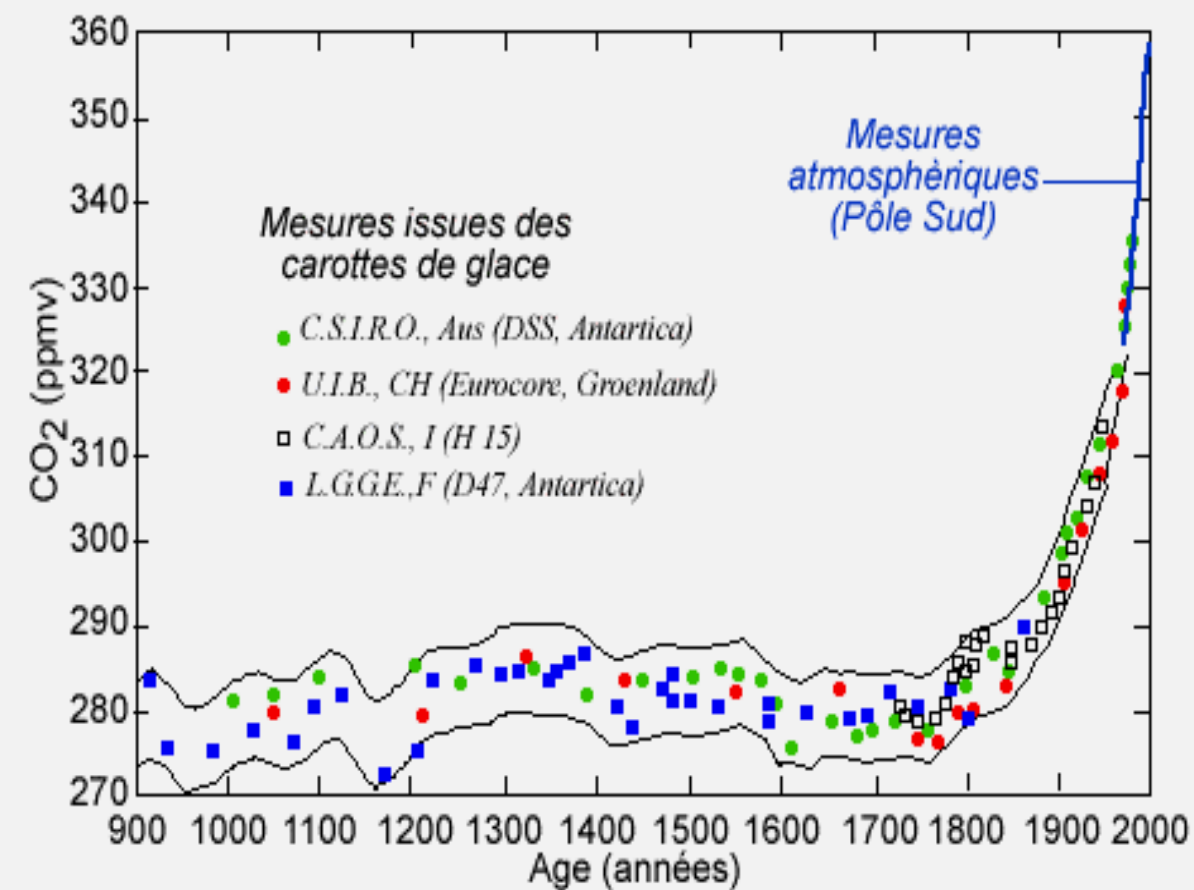
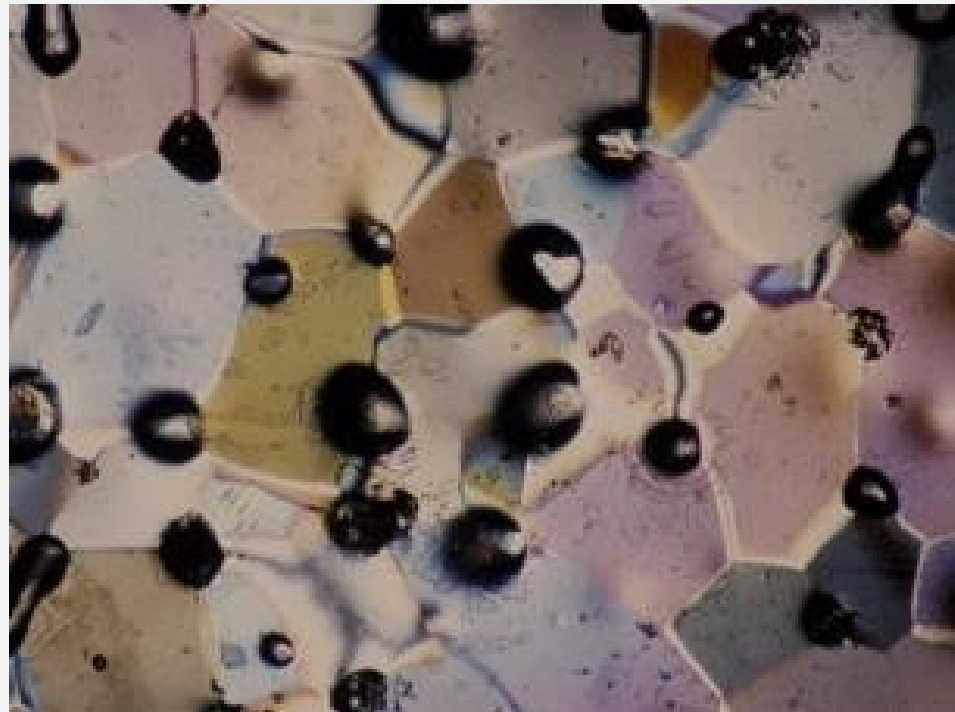
Acidification

2. Cycle du carbone et variations naturelles

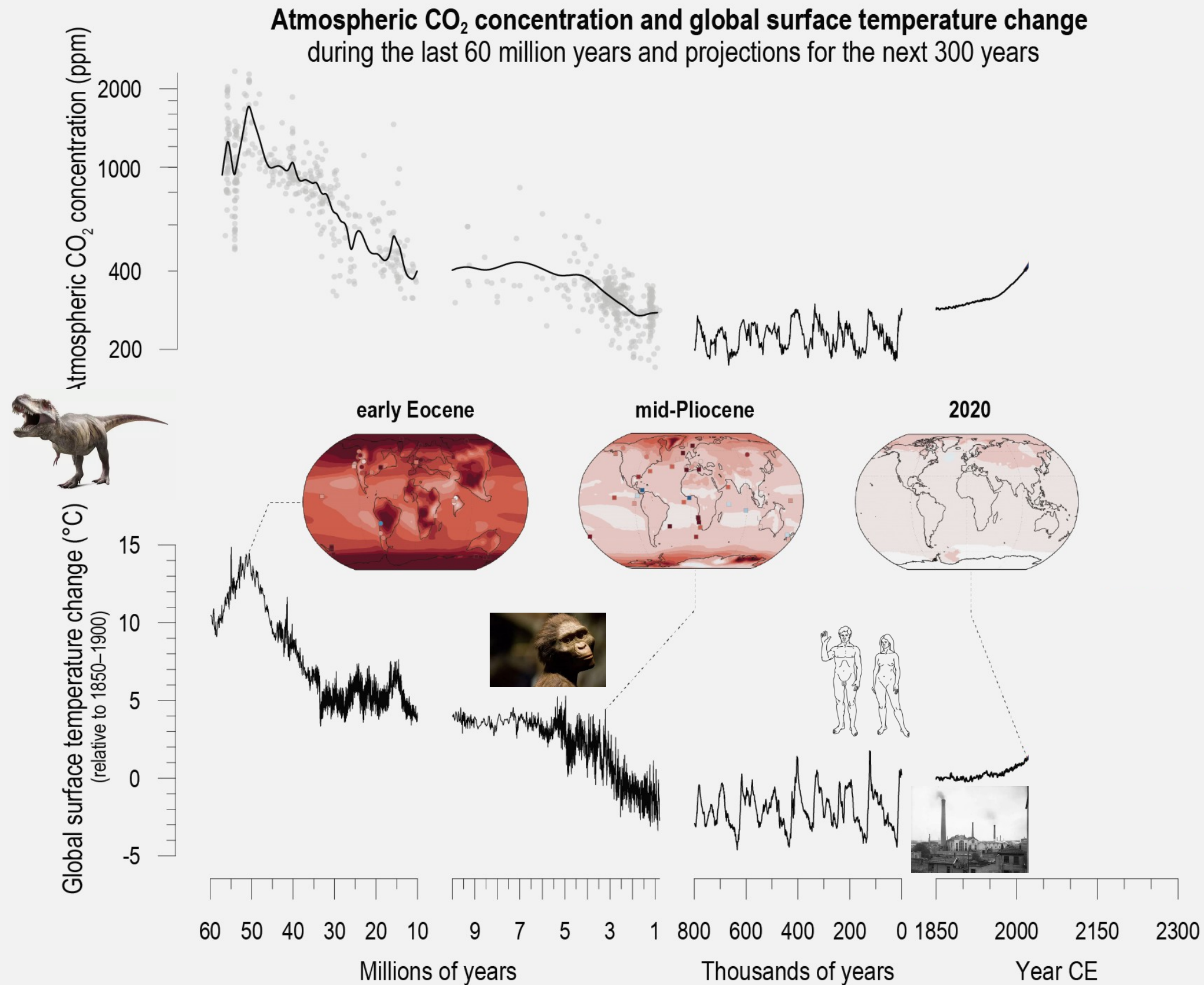
Apports anthropiques = 40 GtCO₂/an (essentiellement les pays dits de l'Ouest et la Chine)

Volcans = 0.5 GtCO₂/an

Nos flux n'ont rien à voir avec les flux naturels à long terme, nous saturons le système



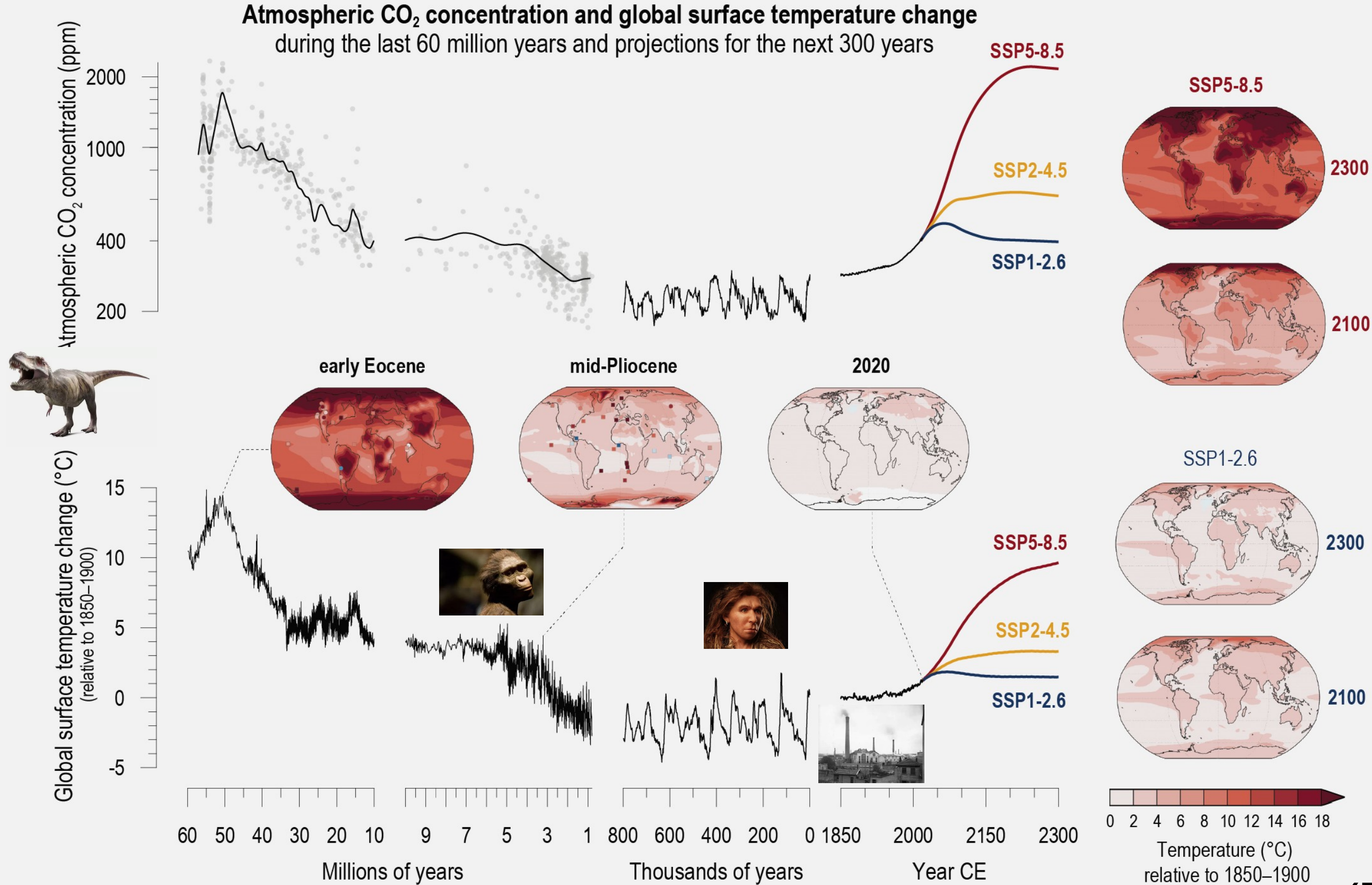
2. Cycle du carbone et variations naturelles



**Bon ben alors
tout va bien en
fait ? La Terre en a
vu d'autres !**

(Figure TS.1 in IPCC, 2021)

2. Cycle du carbone et variations naturelles



Il n'y avait pas d'humains...

Les températures remontent vers celle d'un monde sans glace à l'échelle d'une génération !

Groenland : ~7 m (dont 50 cm d'ici à 2100 ?)
Antarctique : 65 m

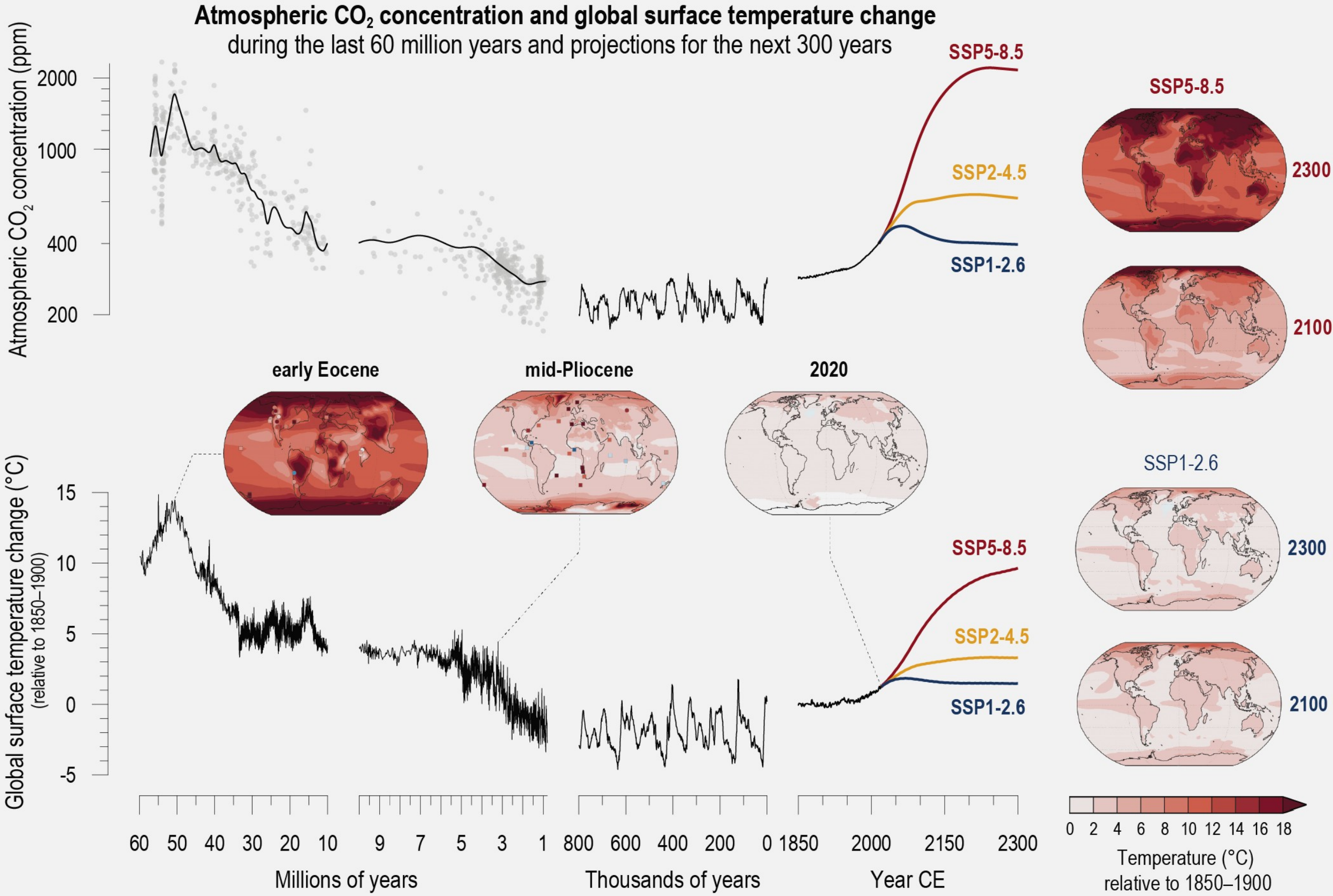
(Figure TS.1 in IPCC, 2021)

2. Cycle du carbone et variations naturelles

- L'océan est le plus gros réservoir de carbone à la surface de la Terre. Il capte 22% de nos émissions.
- La photosynthèse capte 29% de nos émissions. Le carbone est stocké comme « biomasse ».
- Les émissions des sociétés thermo-industrielles saturent le système naturel
- Nous passons de temps de 10000 ans à 1 Ma à des changements à l'échelle de la génération

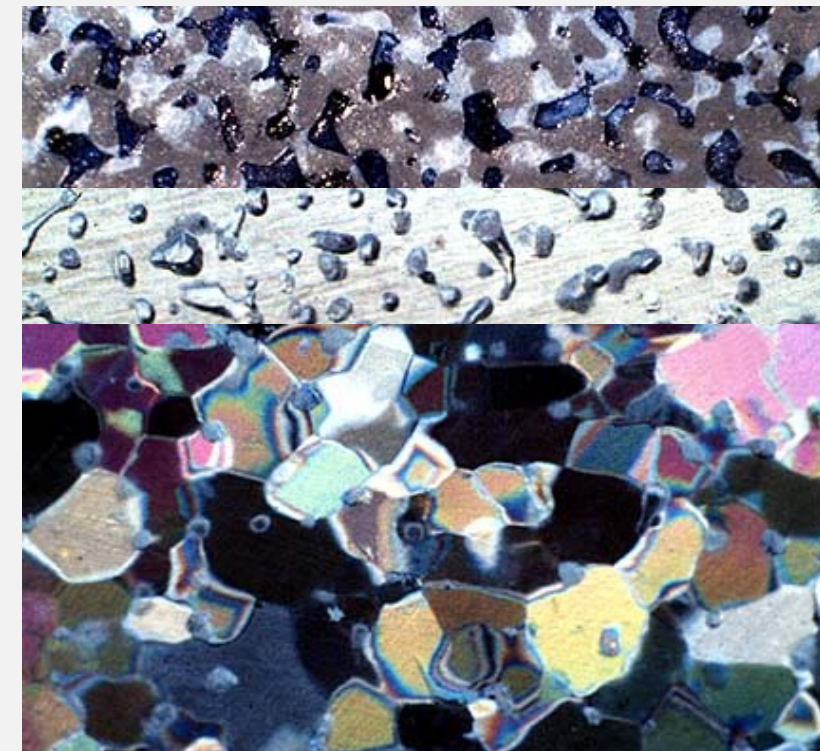
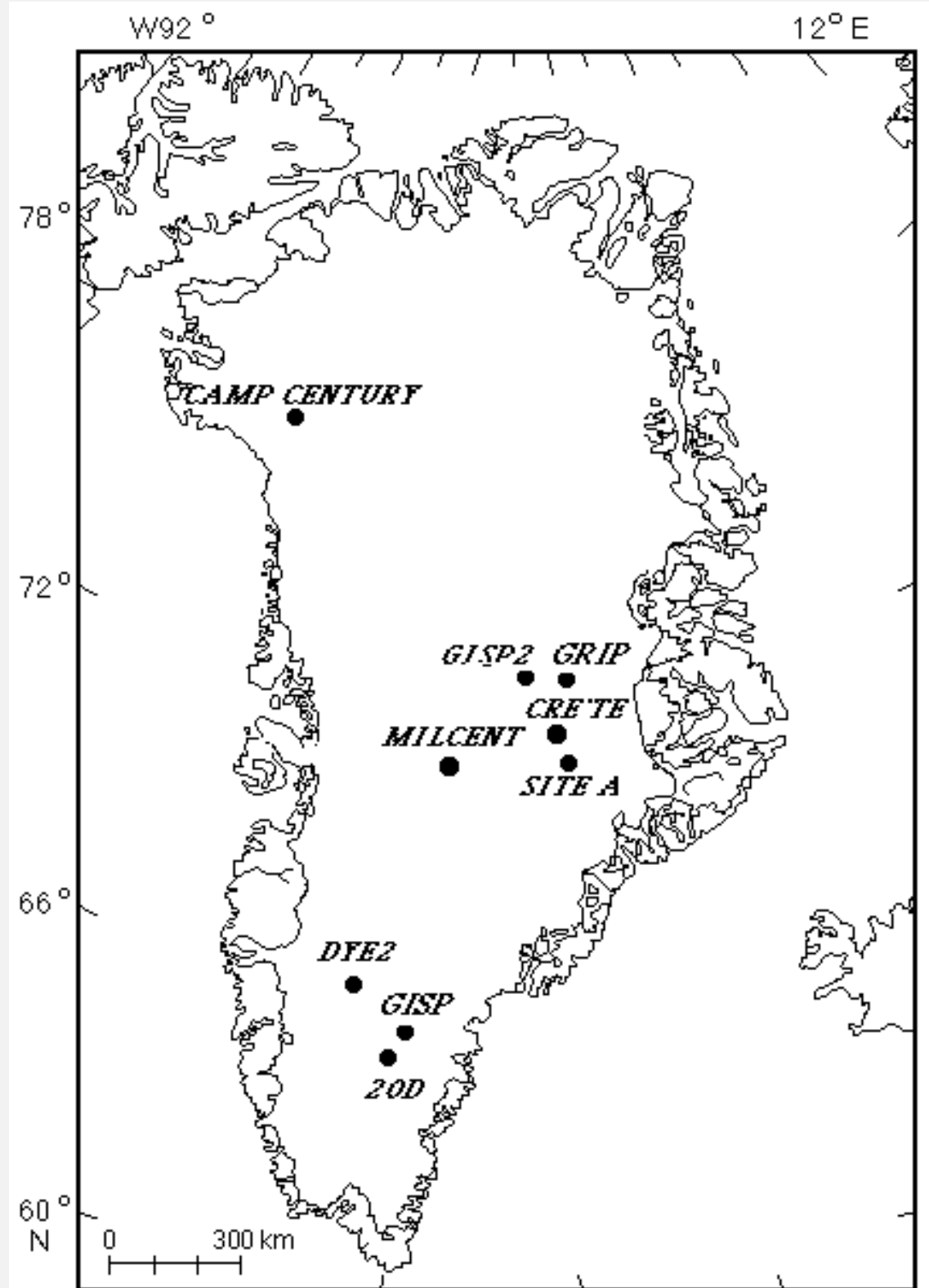
Partie 3. Comment reconstruit-on le climat ?

3. Climats anciens



3. Climats anciens

Forages internationaux : Groenland $t < 250\,000$ ans

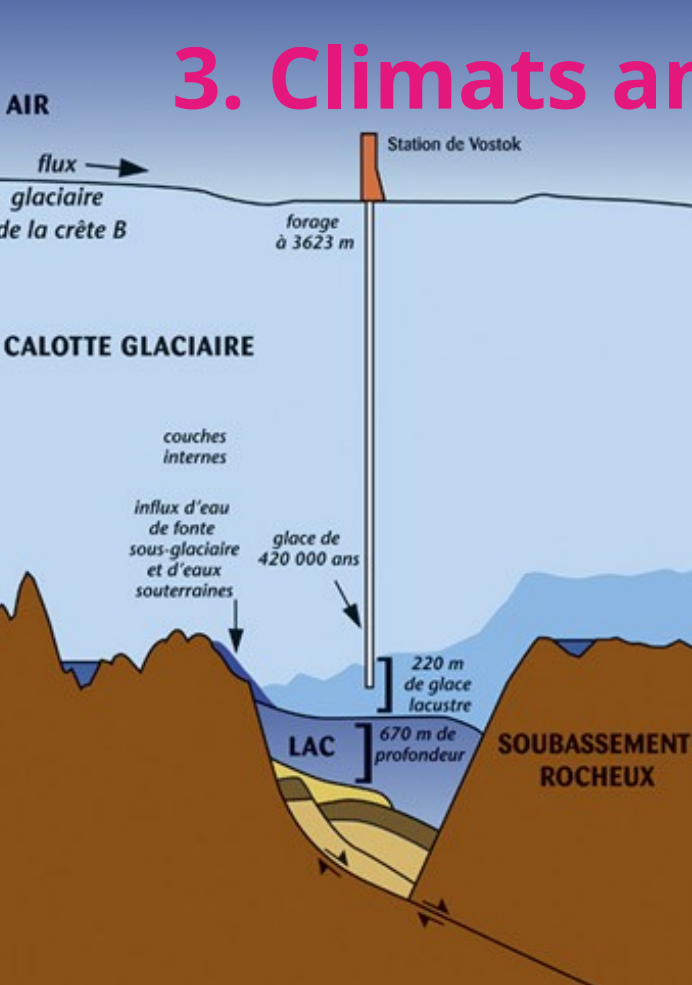


30 m

98.5 m

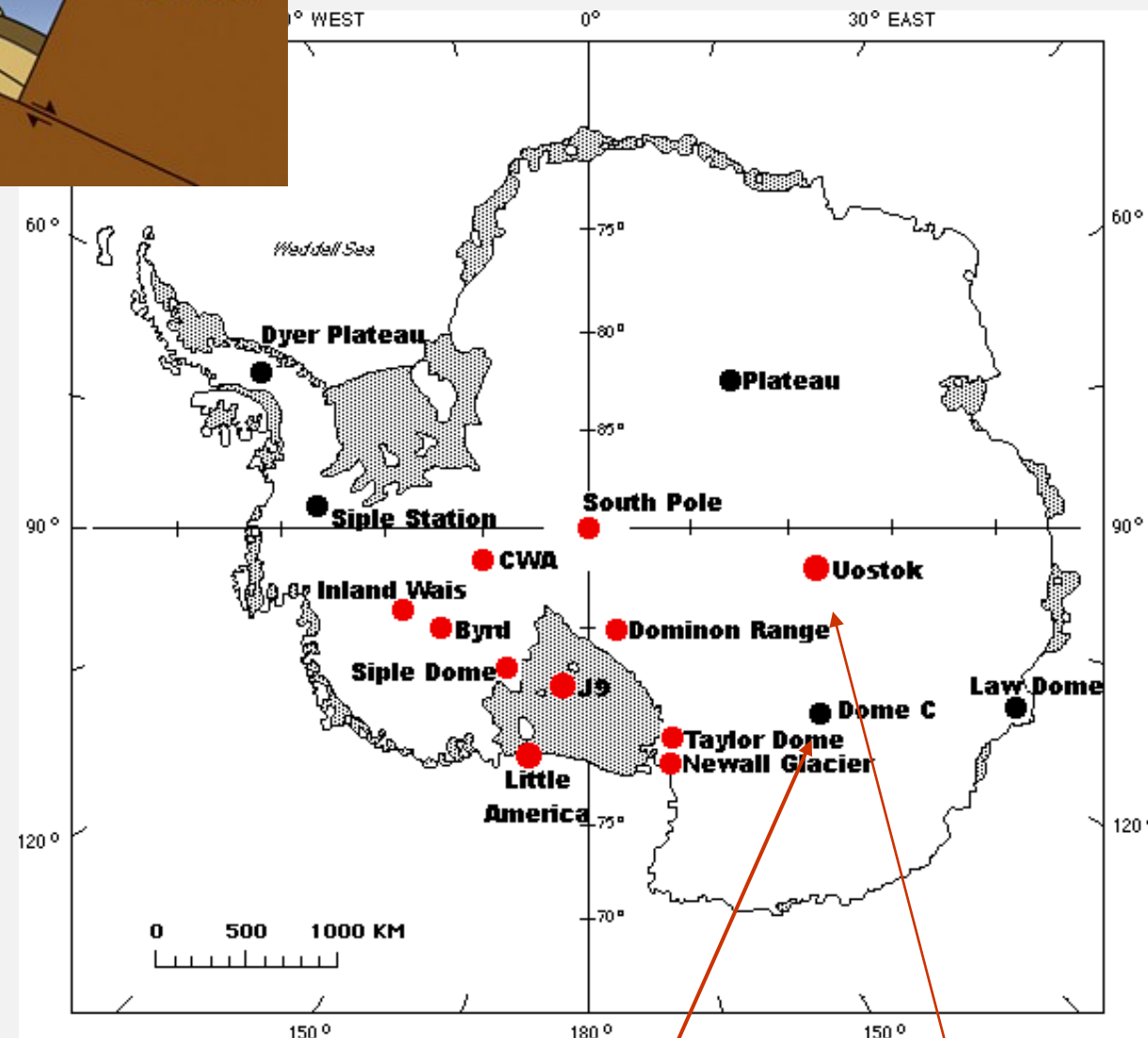
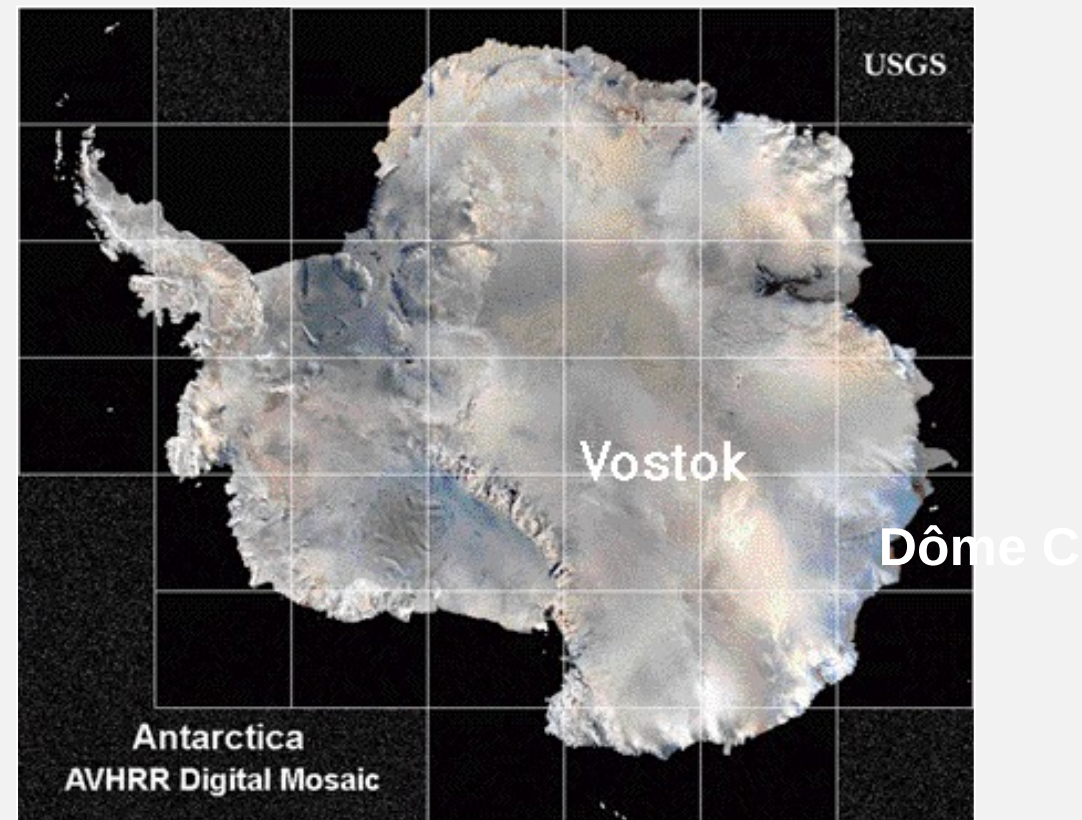
130 m

3. Climats anciens



Forages internationaux : Antarctique

$t < 800\,000$ ans (?)

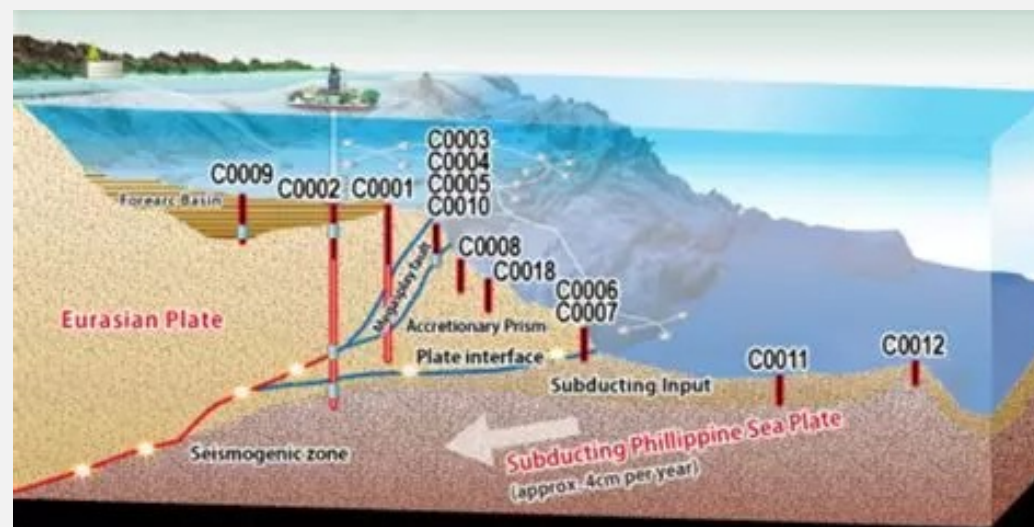
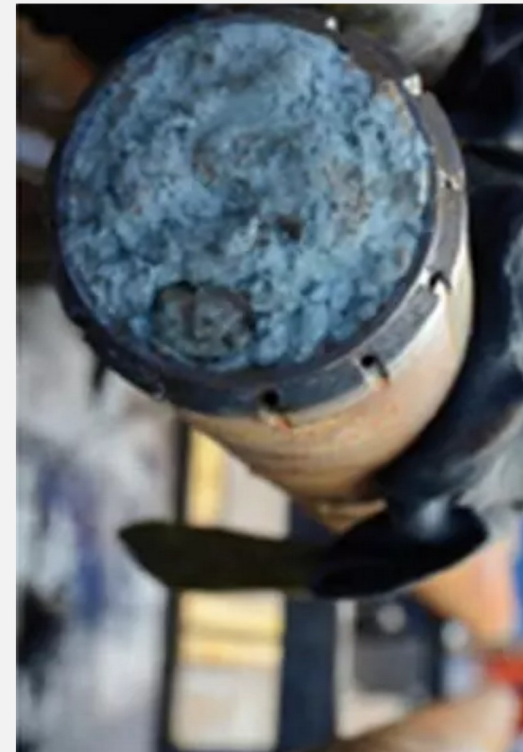


Forage les plus profonds actuels

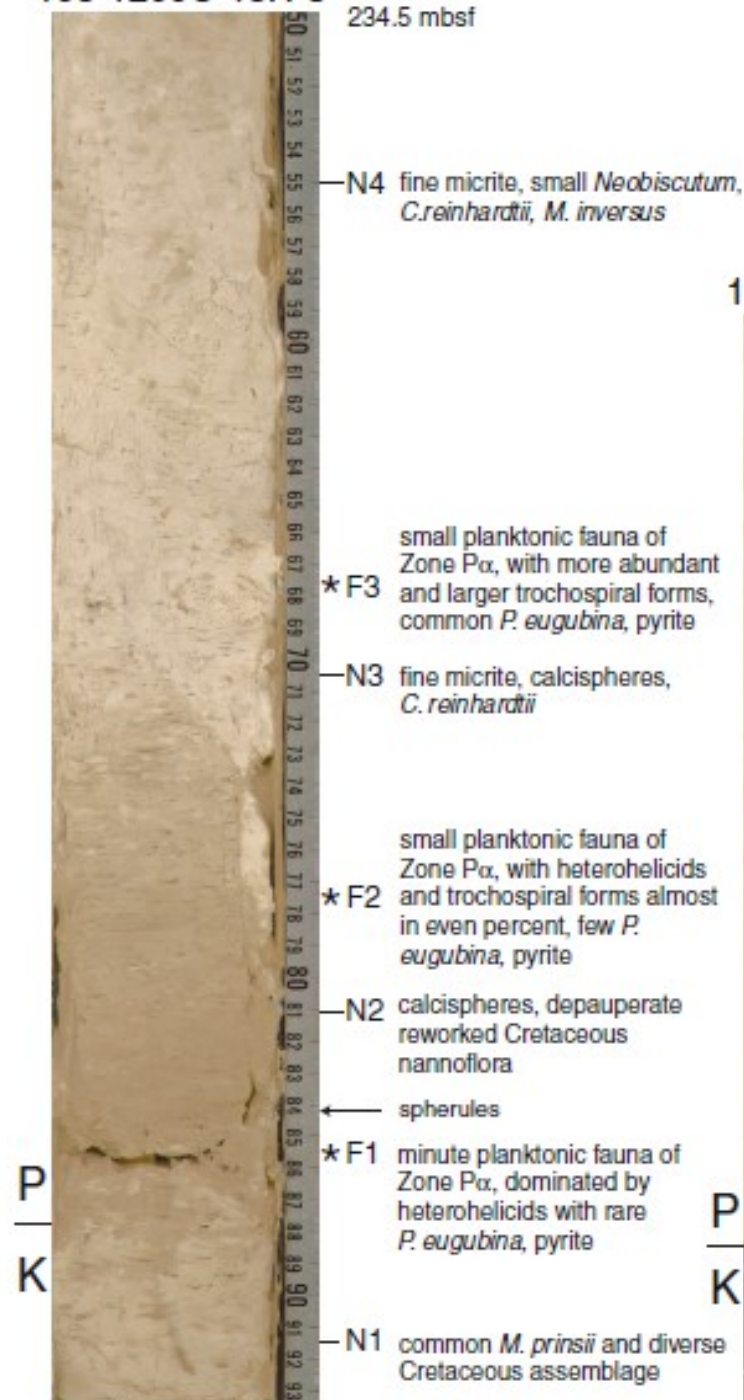


Forage européen a atteint 1 Ma !

3. Climats anciens



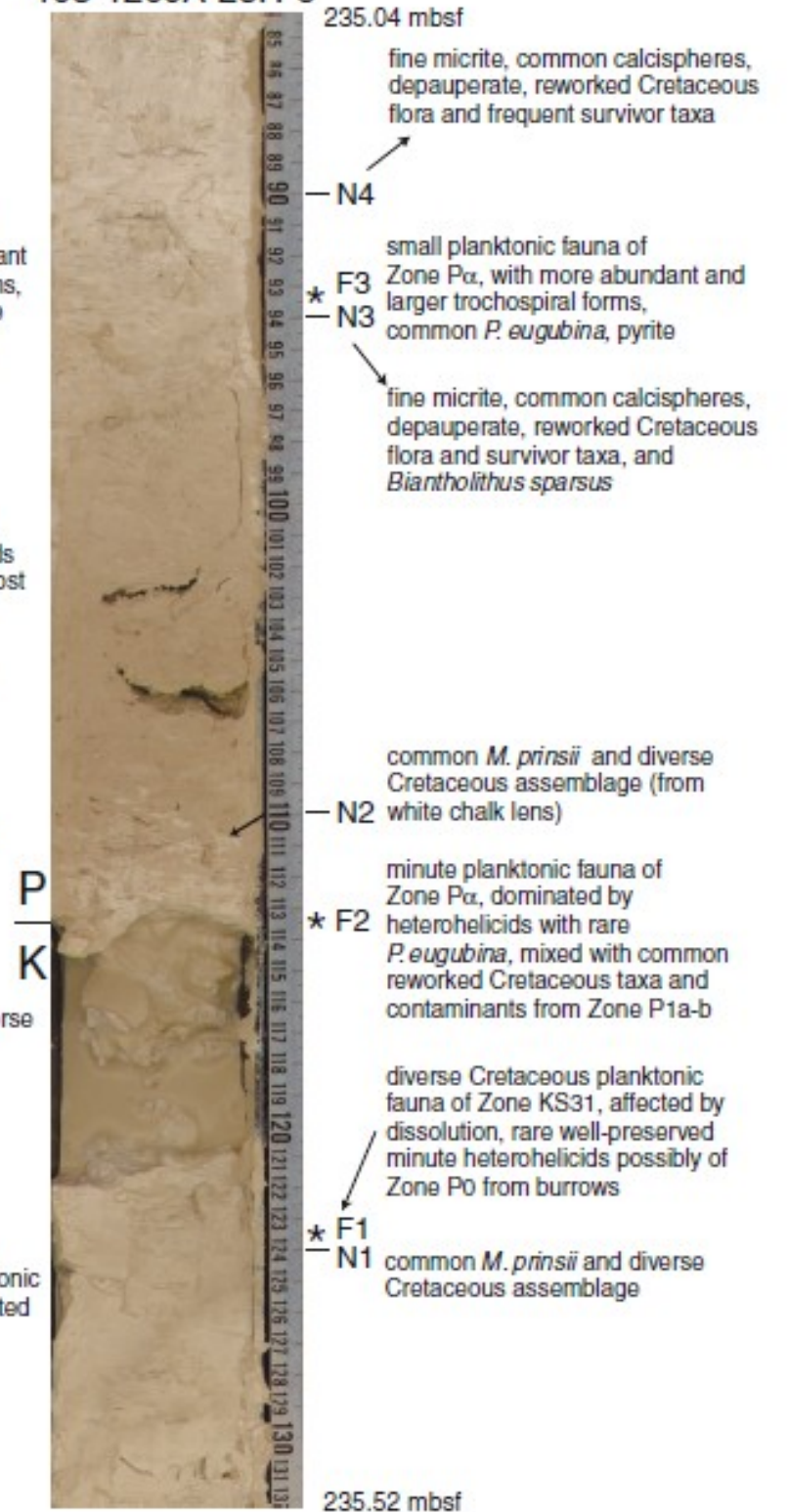
198-1209C-15H-3



10 cm void



198-1209A-25H-6



3. Climats anciens

- Cause des changements climatiques ? Inversion par transformée de Fourier des variations climatiques durant le dernier Ma

- On trouve les pics de fréquences de 100 000 ans, 41 000 ans et 21 000 ans : cycles de Milankovich

Petit et al. 1999

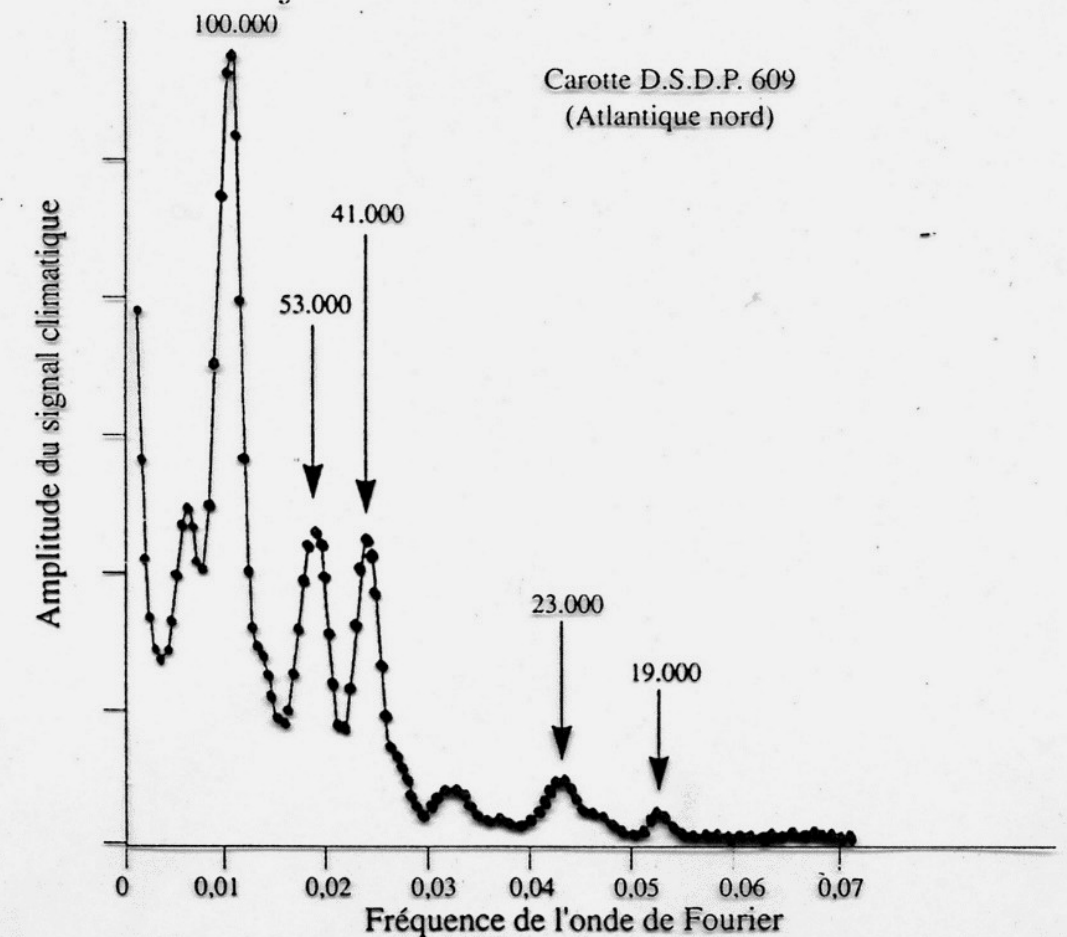
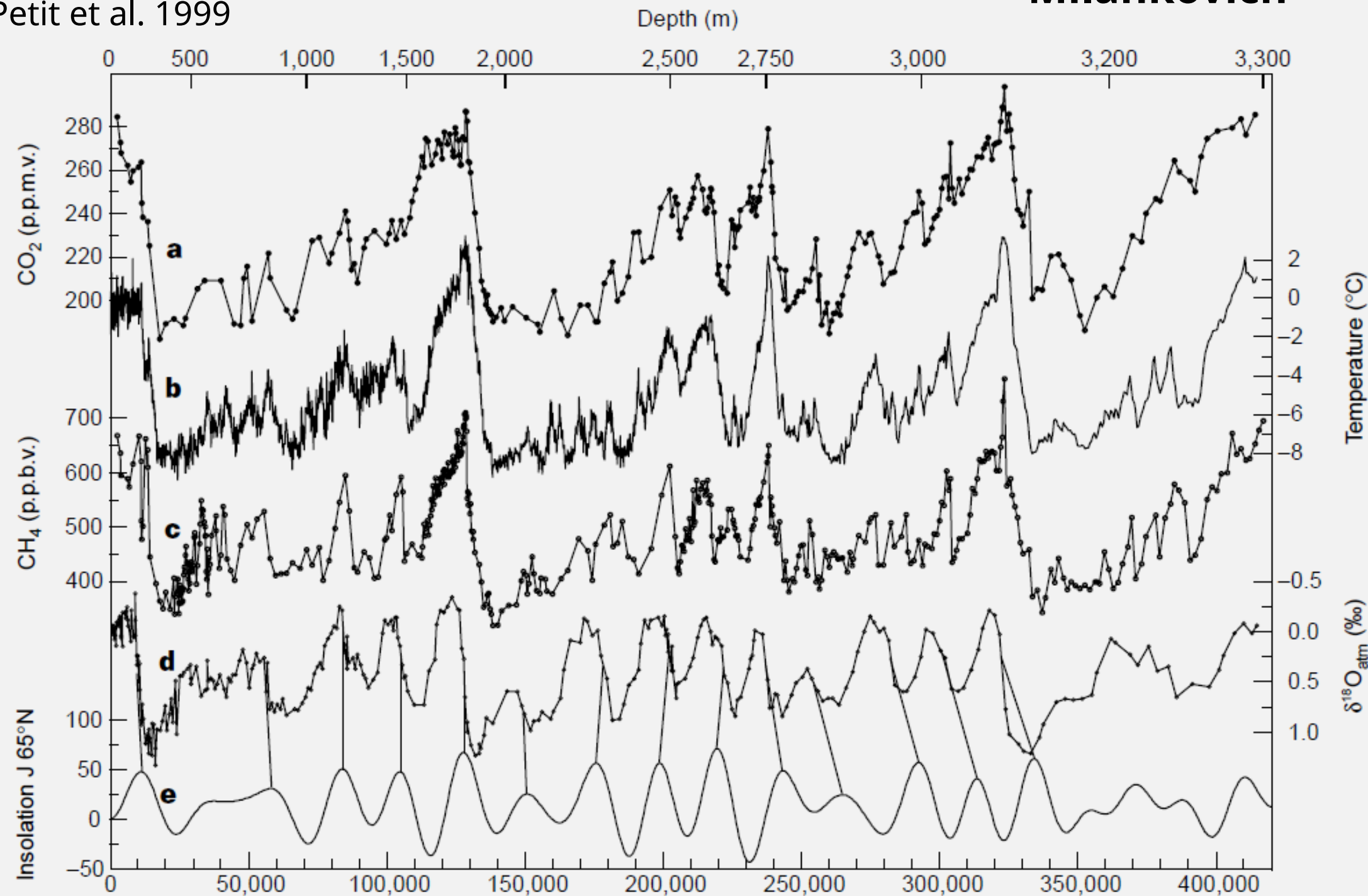
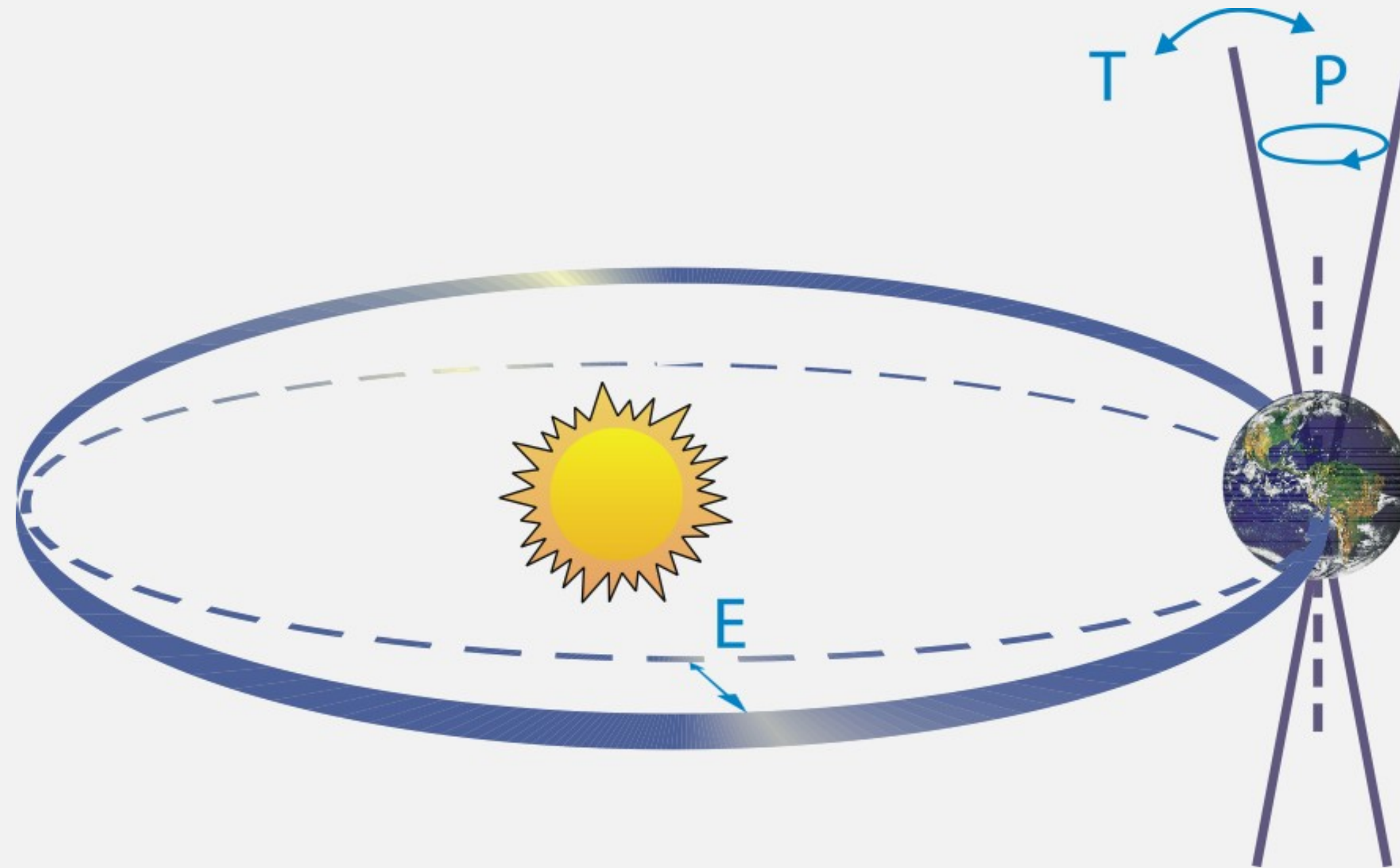


Figure III-5 : Analyse par la méthode de Fourier des variations climatiques du dernier million d'années, enregistrées dans l'Atlantique Nord d'après les mesures de L. Labeyrie à Gif-sur-Yvette. La plus grande amplitude du signal climatique correspond aux variations dont les fréquences sont égales à celles des principales composantes (ondes de 100 000, 53 000, 41 000, 22 000 et 19 000 ans) de l'insolation.

1. Climat et bilan radiatif



Théorie astronomique des variations climatiques
→ cycles de Milankovitch

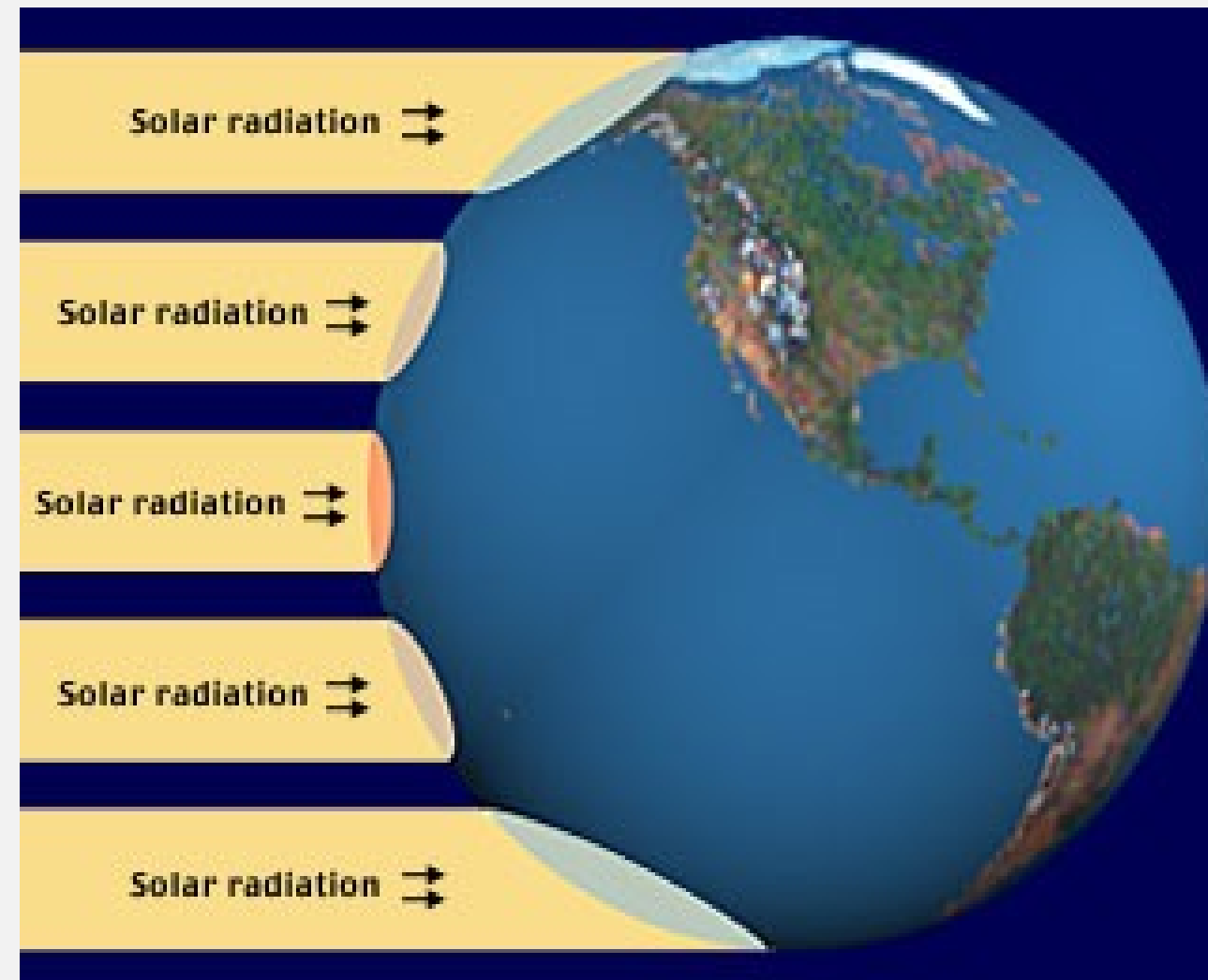
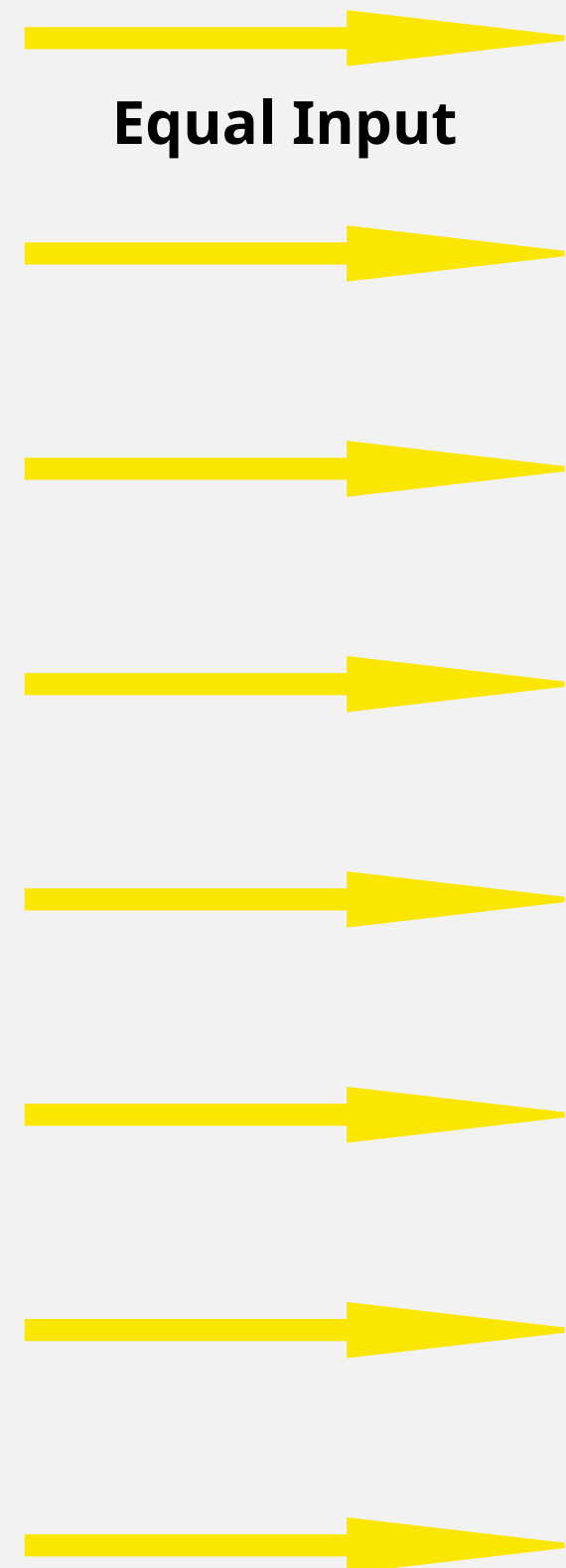
+ variations de l'activité solaire



Milutin Milankovitch (1879-1958)

3. Climats anciens

Why are there Global Climate (and weather) patterns?

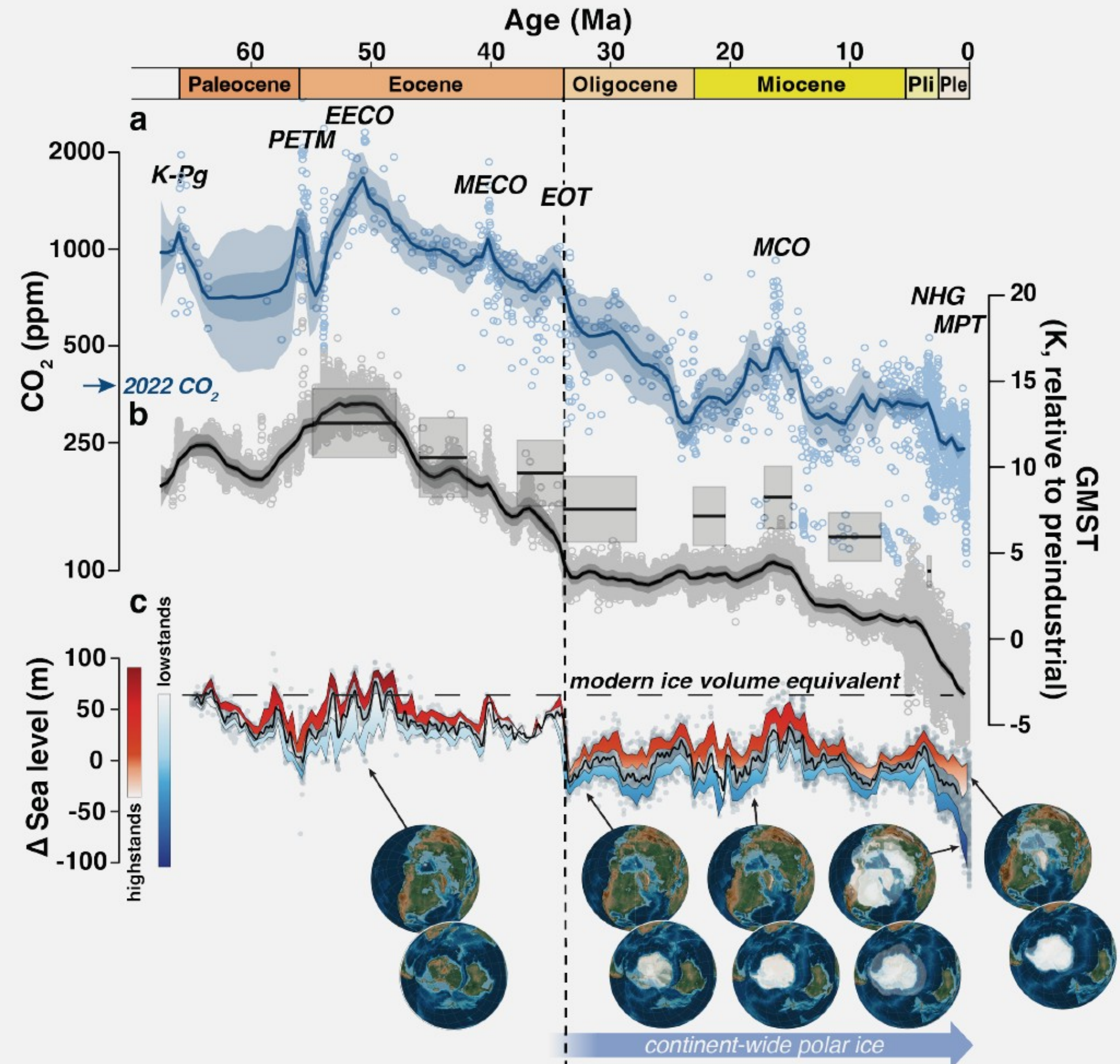


Unequal Distribution over the earth's area. Impact on albedo, vegetation, ice sheet growth, ocean circulation...

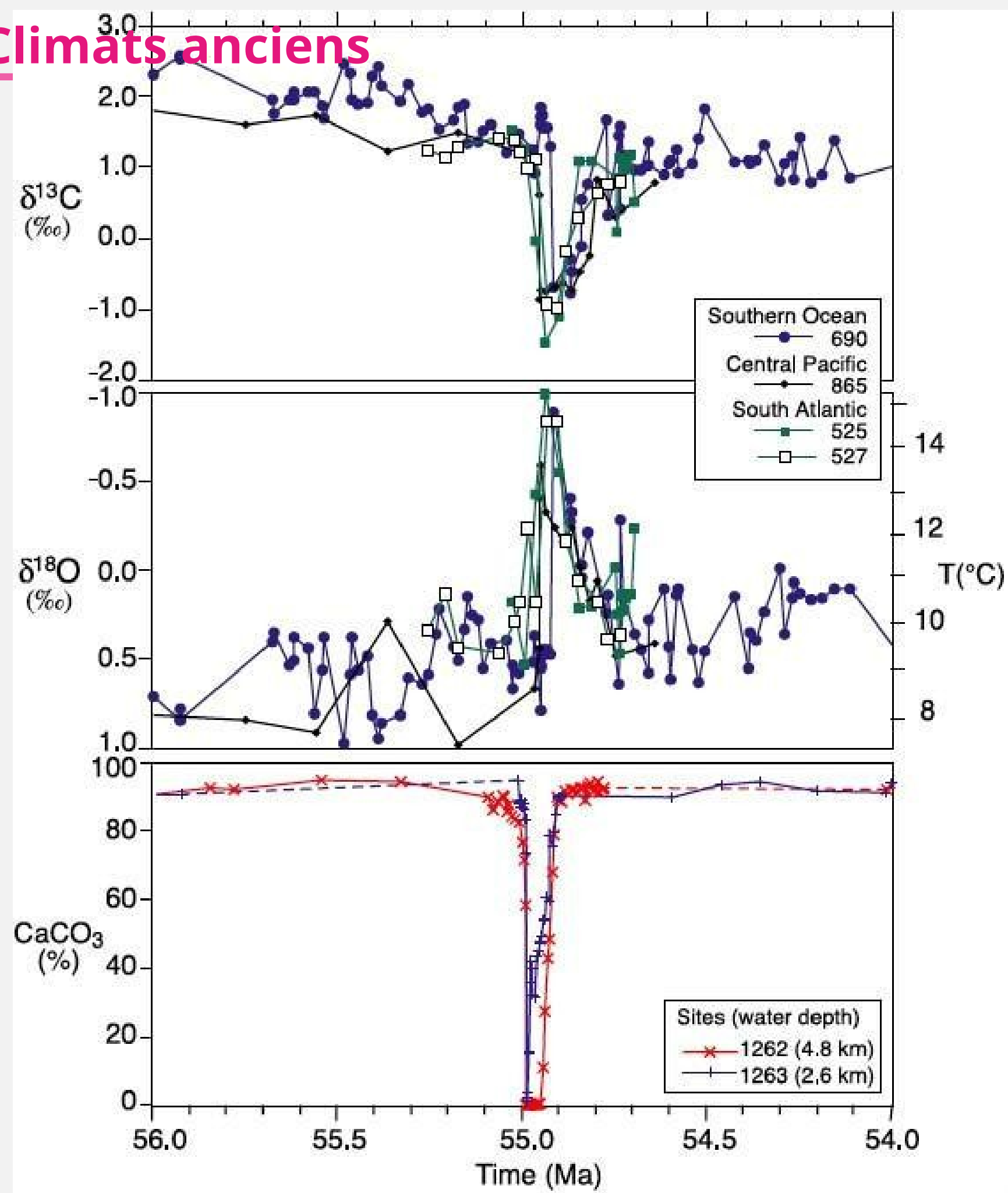
3. Climats anciens

Les températures remontent vers un monde sans glace à l'échelle d'une génération !

Combien de m de niveau marin au Groenland ? Et l'Antarctique ?



3. Climats anciens



Rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans roches calcaires – perturbations du cycle du C

Rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dans roches calcaires – température de l'océan

Moins de calcaire dans les roches : acidification.

3. Climats anciens

L'hypothèse du méthane

Réchauffement → GES

Excursion négative $\delta^{13}\text{C}$ → ajout de carbone léger

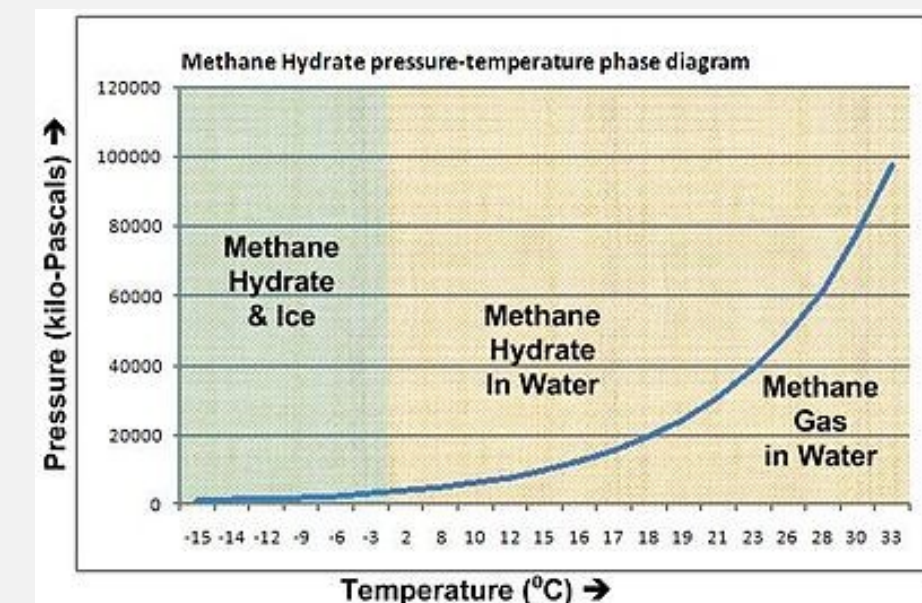
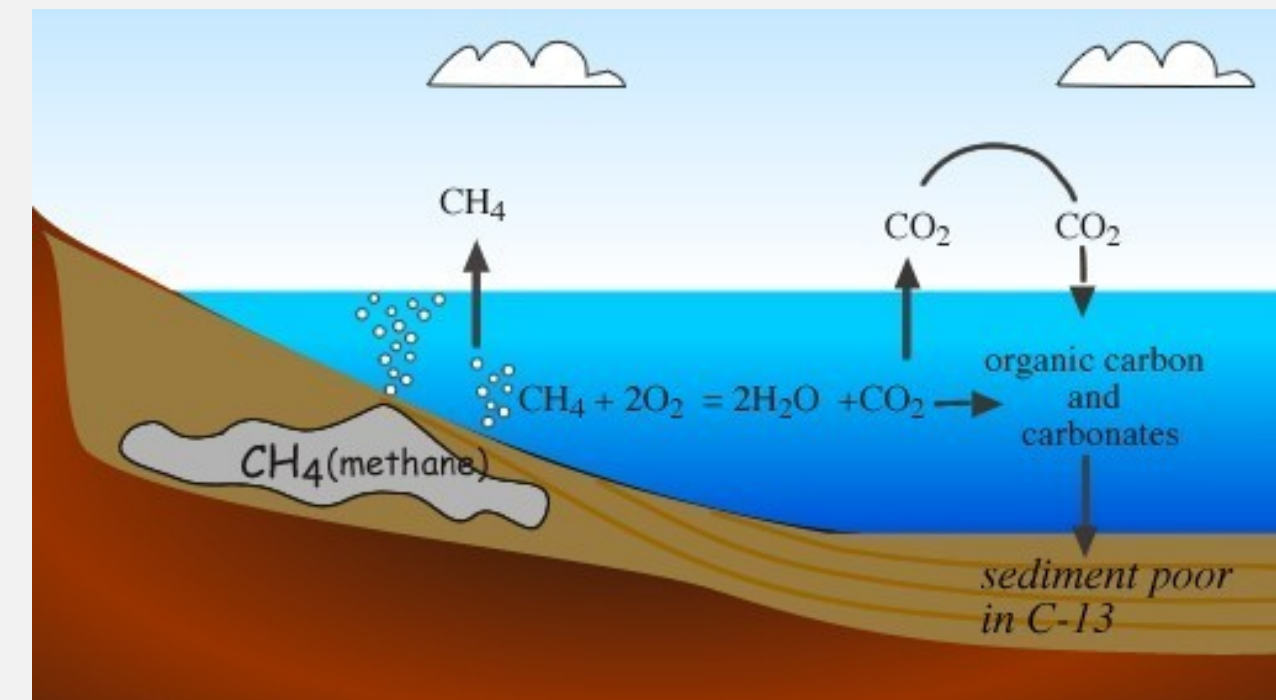
Méthanogenèse

Méthane de -30 à -60 ‰

Produit sur les talus continentaux

Début de réchauffement : déstabilisation du méthane

Hausse rapide de l'effet de serre !



Le passé éclaire le présent et l'avenir

PLANÈTE • CLIMAT

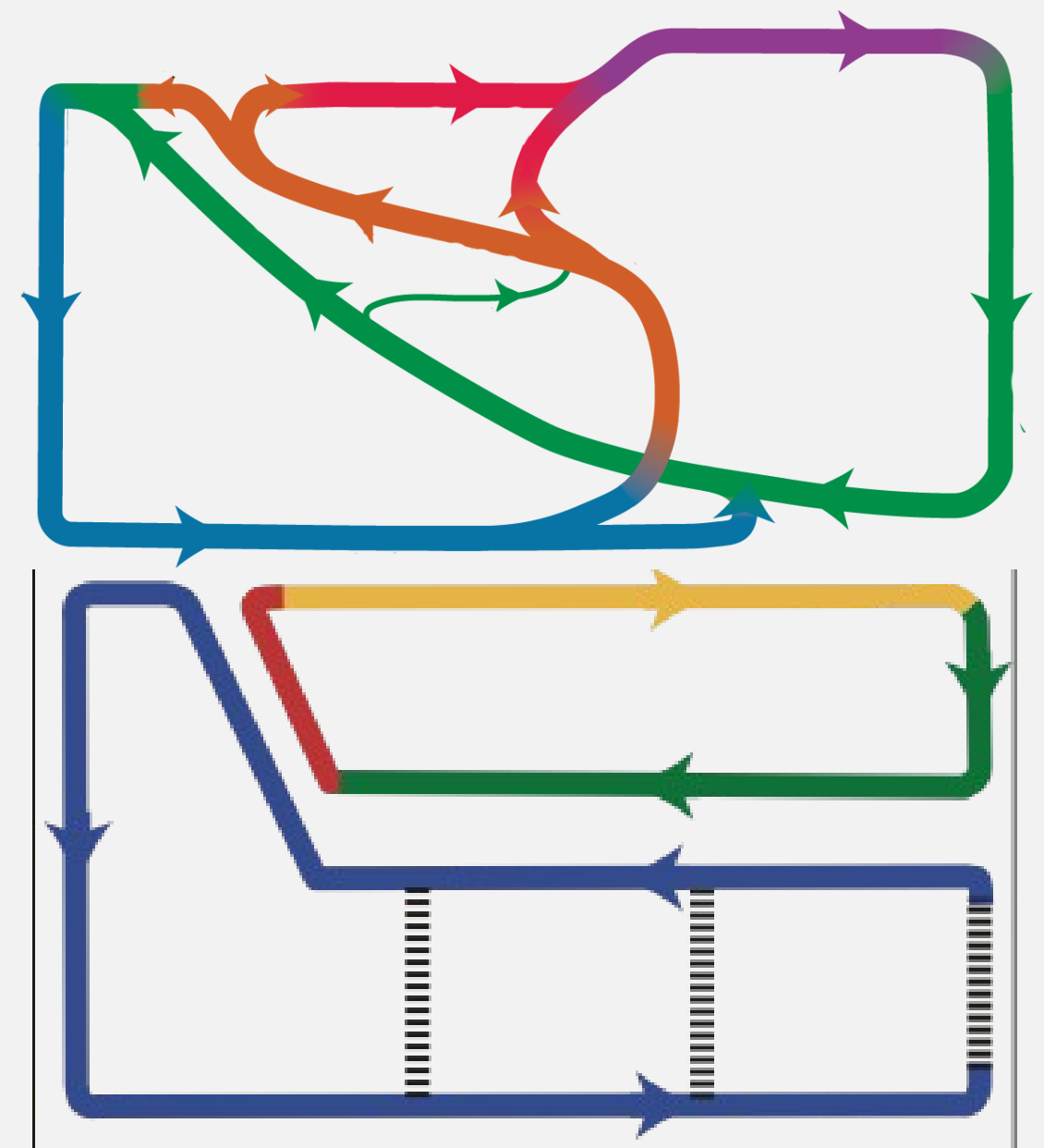
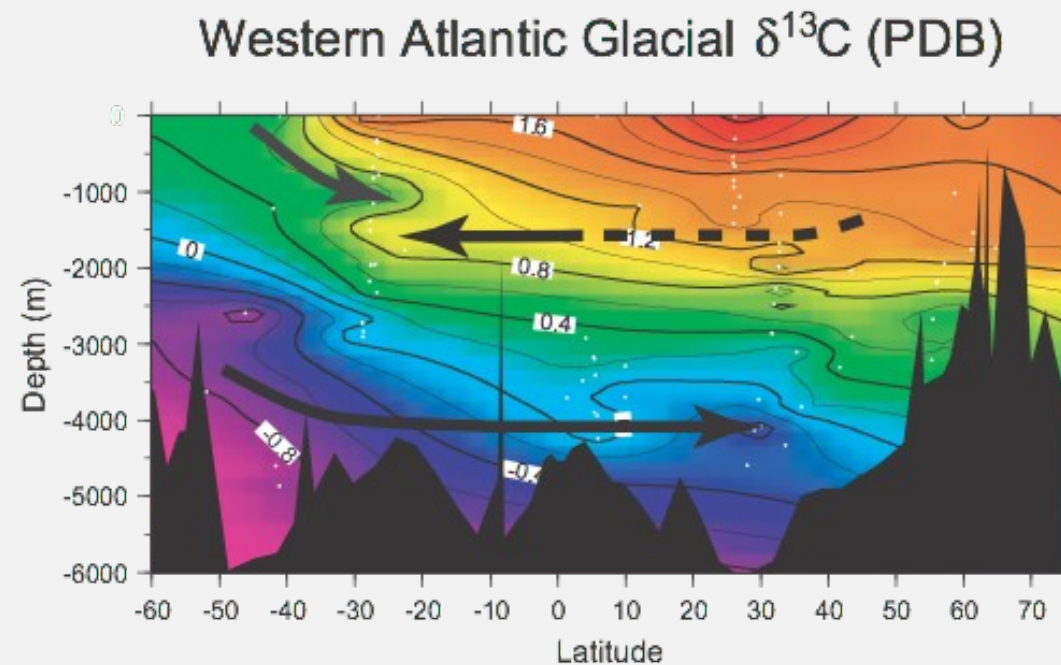
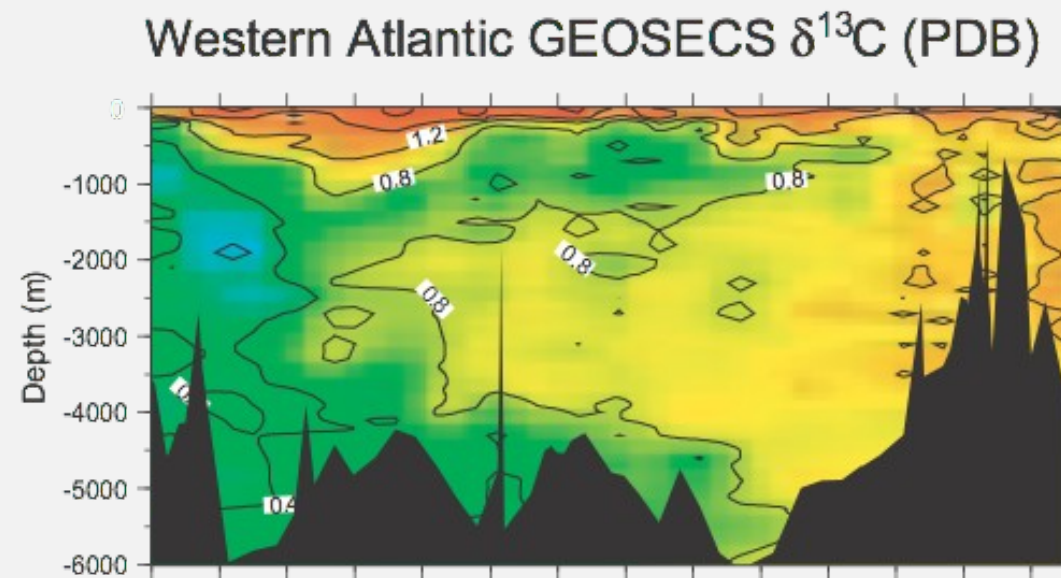
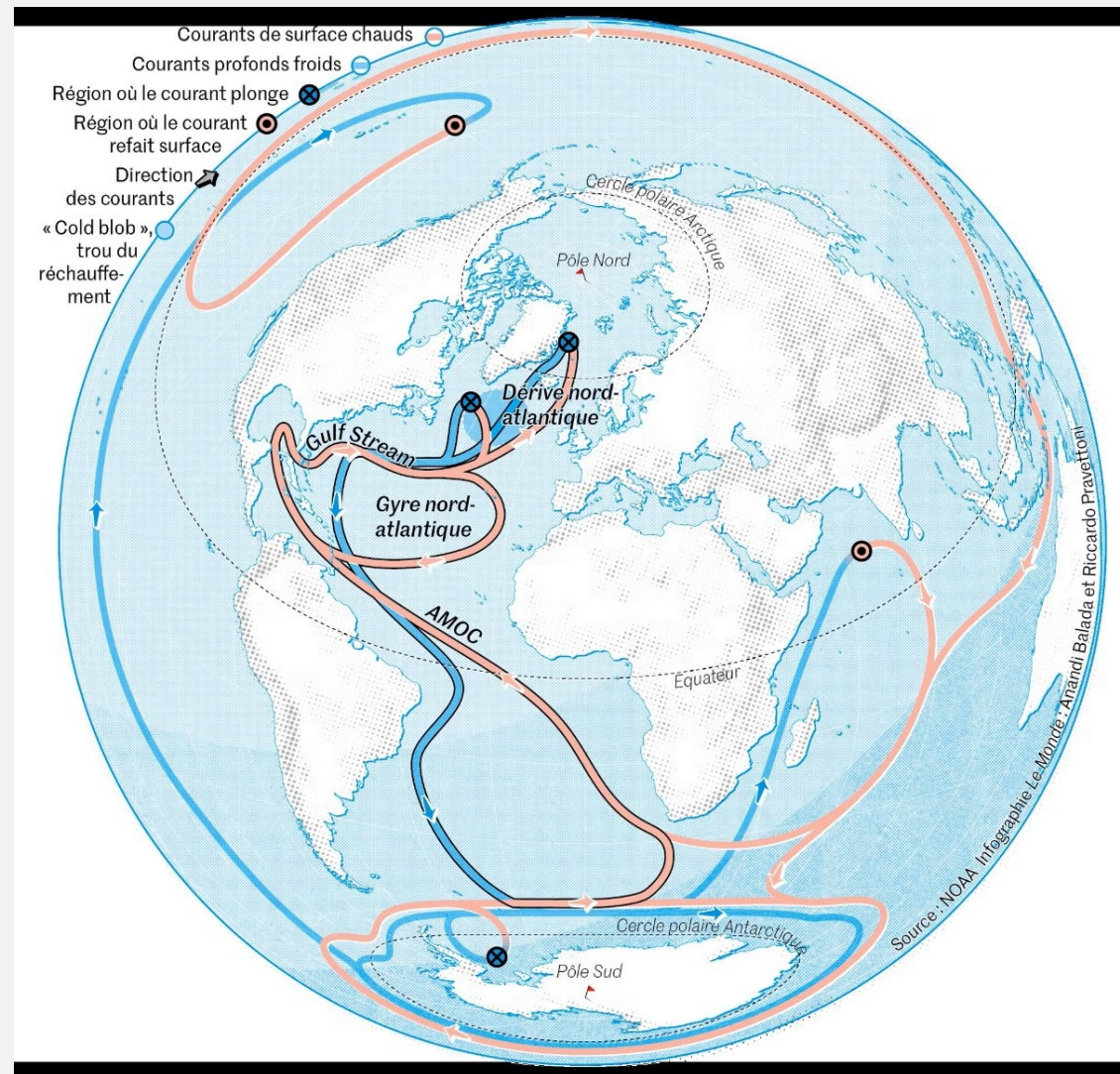
(Le Monde, 06/01/2025)

Le possible effondrement de la circulation océanique atlantique, régulant le climat, inquiète les scientifiques

L'AMOC, qui contribue à maintenir un climat doux en Europe, des pluies dans les tropiques et qui stocke du CO₂, devrait ralentir, et pourrait même s'arrêter, en raison du dérèglement climatique.

Par Audrey Garric

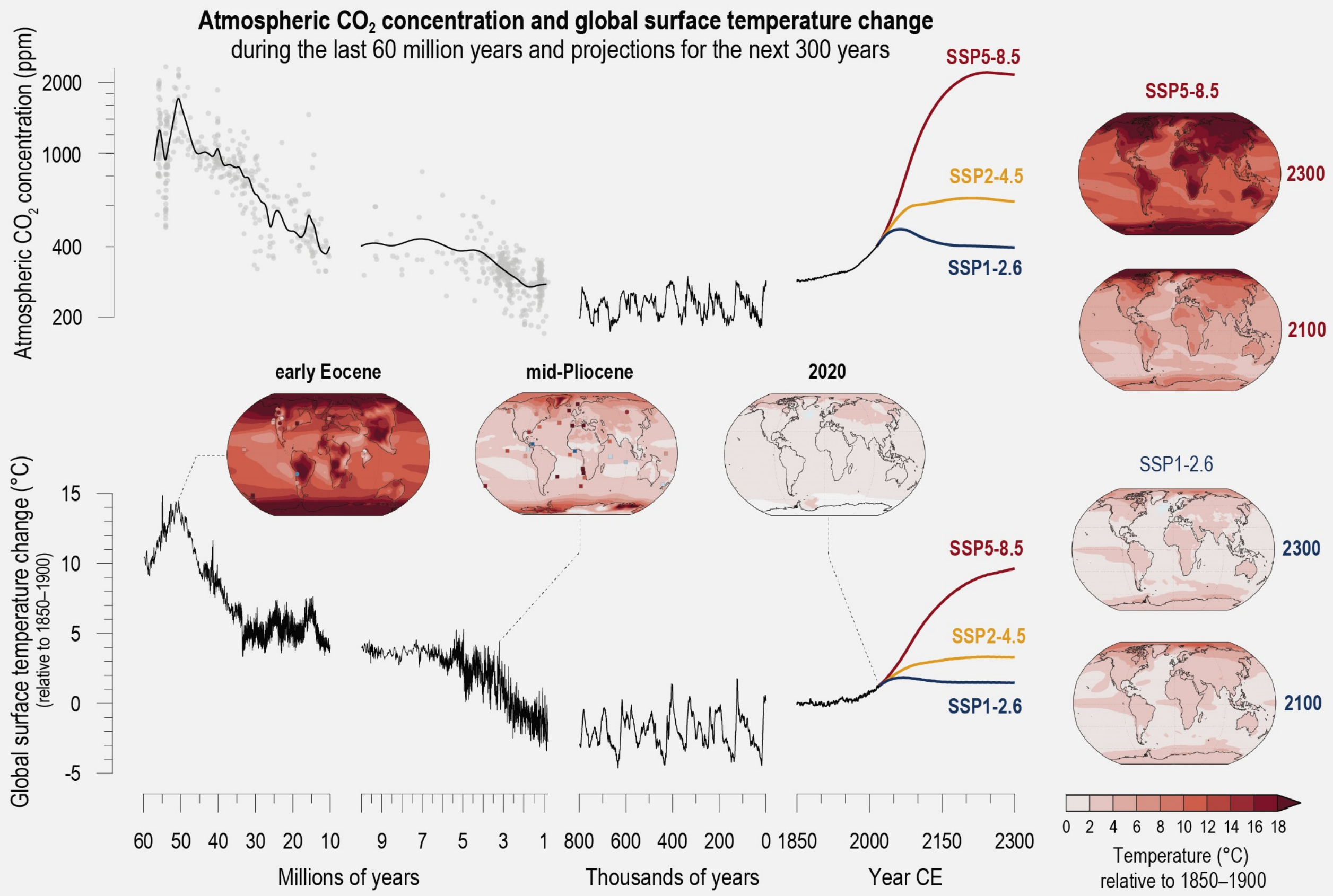
Publié le 06 janvier 2025 à 06h00, modifié le 06 janvier 2025 à 18h01 •  Lecture 5 min.



Curry and Oppo, 2005
Ferrari et al., 2014
Talley, 2013
Hines 2016

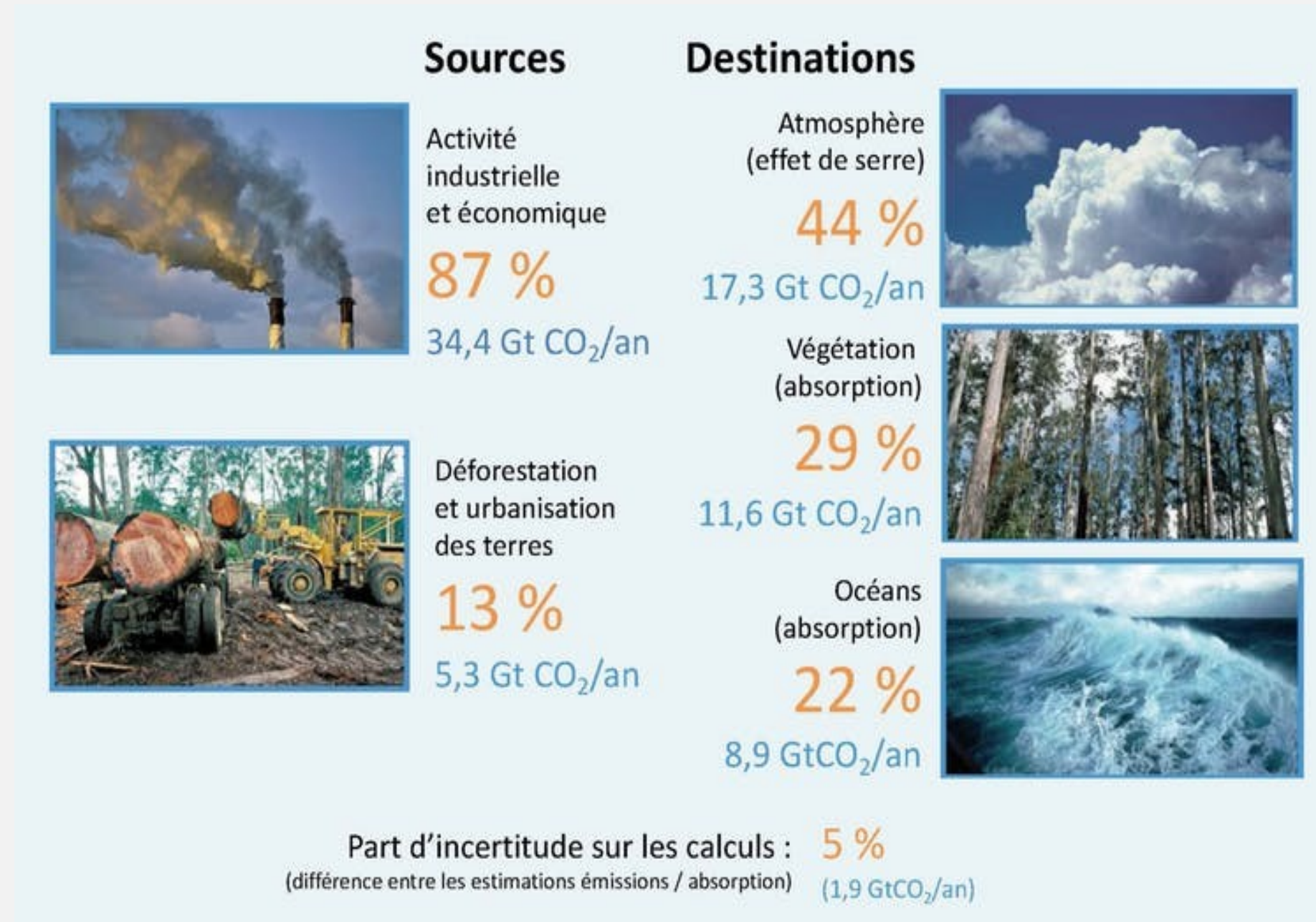
Conclusion

Conclusion (Figure TS.1 in IPCC, 2021)



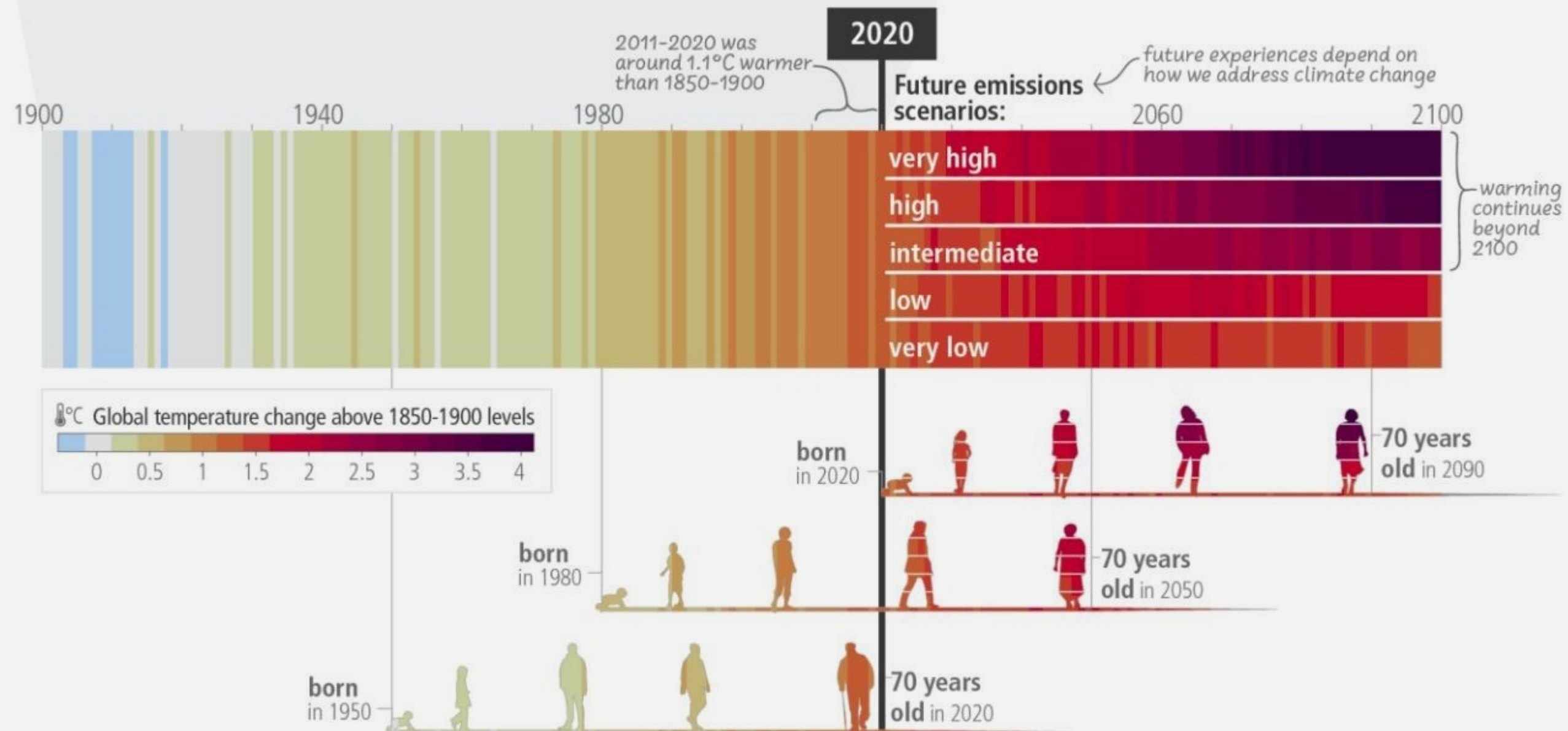
Apports anthropiques = 40 GtCO₂/an
(essentiellement les pays dits de l'Ouest et la Chine)

Volcans = 0.5 GtCO₂/an



Un futur clairement pas si lointain

c) The extent to which current and future generations will experience a hotter and different world depends on choices now and in the near-term



4. Pistes pour l'avenir ?

Objectif 2040 pour maintenir le réchauffement sous 2°C (et idéalement inférieur à 1,5 °C):

14 GtCO₂/an pour toute la planète.

Dans une planète à 8 milliards d'humains :

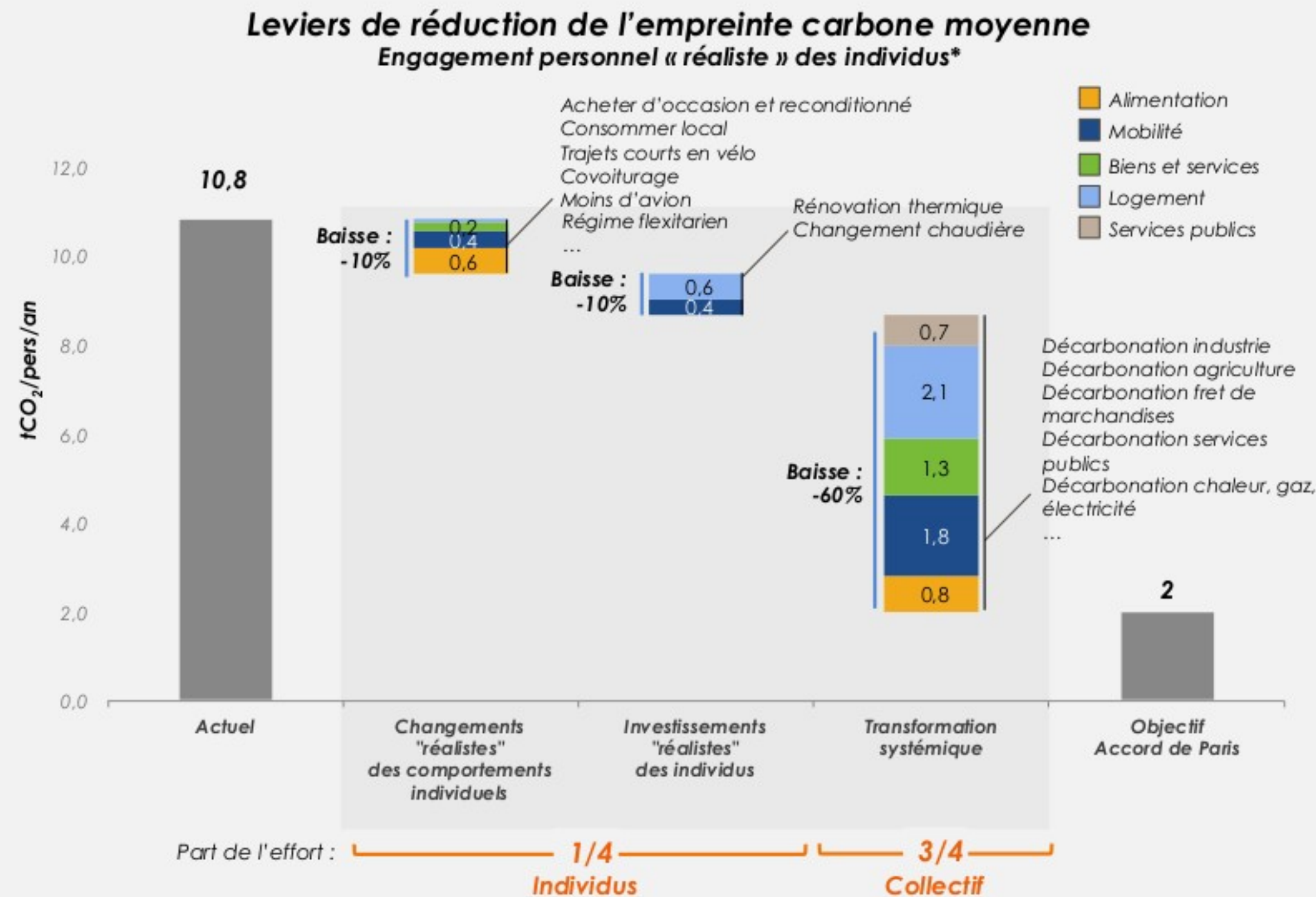
<2 tonnes CO₂ / hab / an



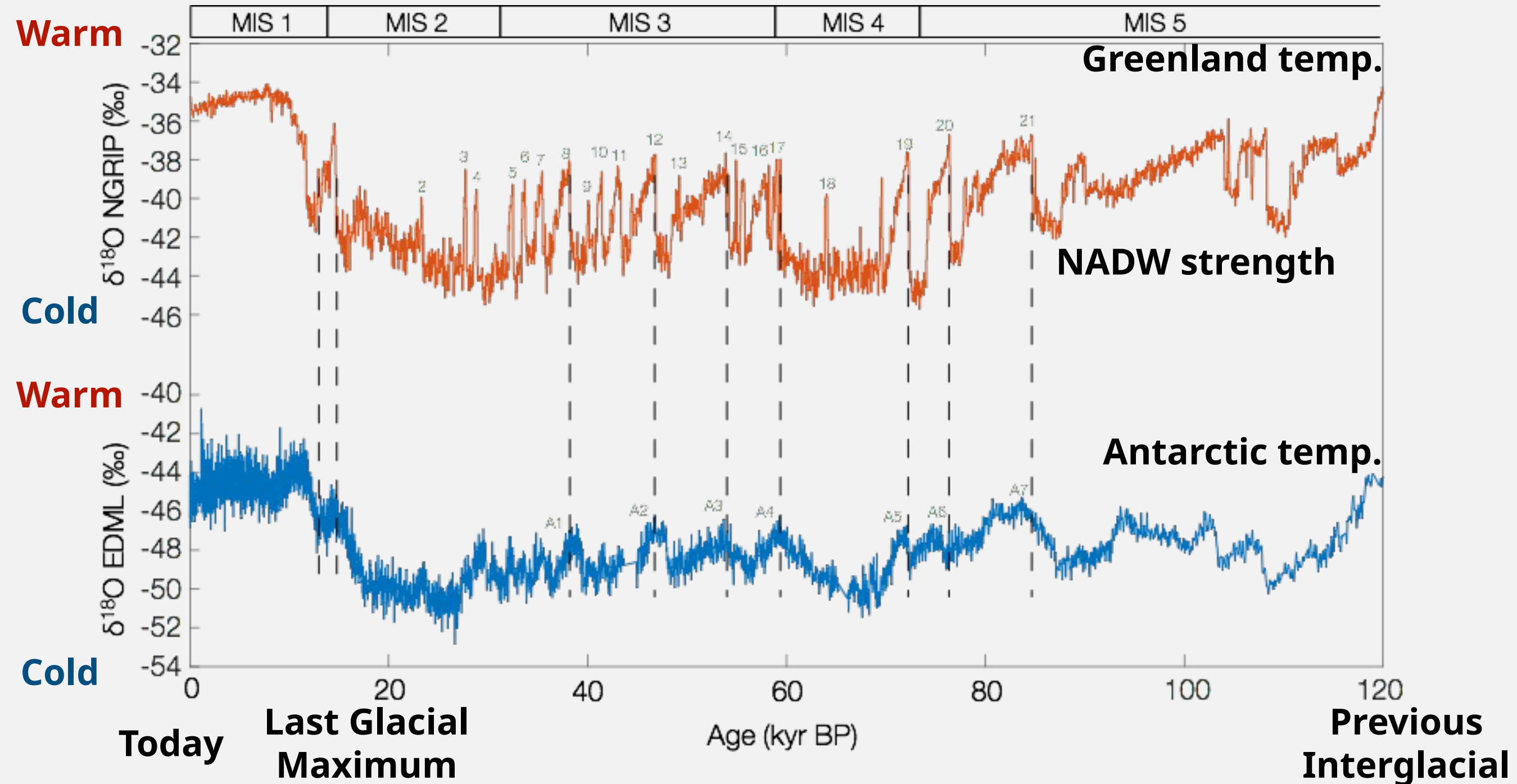
Avez-vous une idée de votre empreinte carbone ?

En conclusion : Que peut-on faire?

L'impulsion doit venir du collectif et de l'individuel



Diapo bonus (en réponse à une question, sur un point non abordé par manque de temps : les différences interhémisphériques (le « tape-cul bipolaire » de Wally Broecker (merci à Sophie Hines pour la diapo))



NGRIP Community Members, 2004
Monnin et al., 2001; Marcott et al., 2014; Ahn and Brook, 2008
EPICA Community Members, 2006