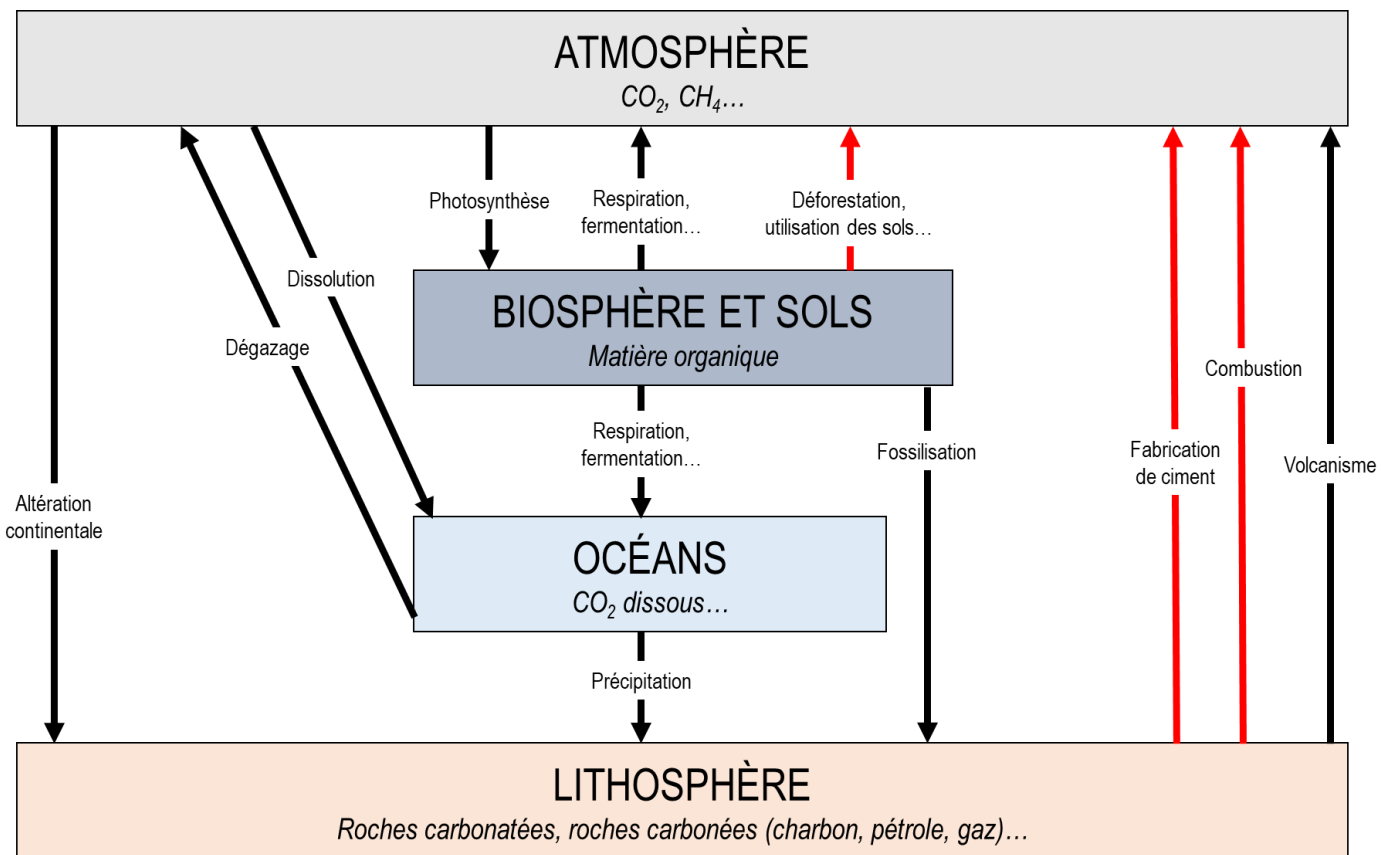
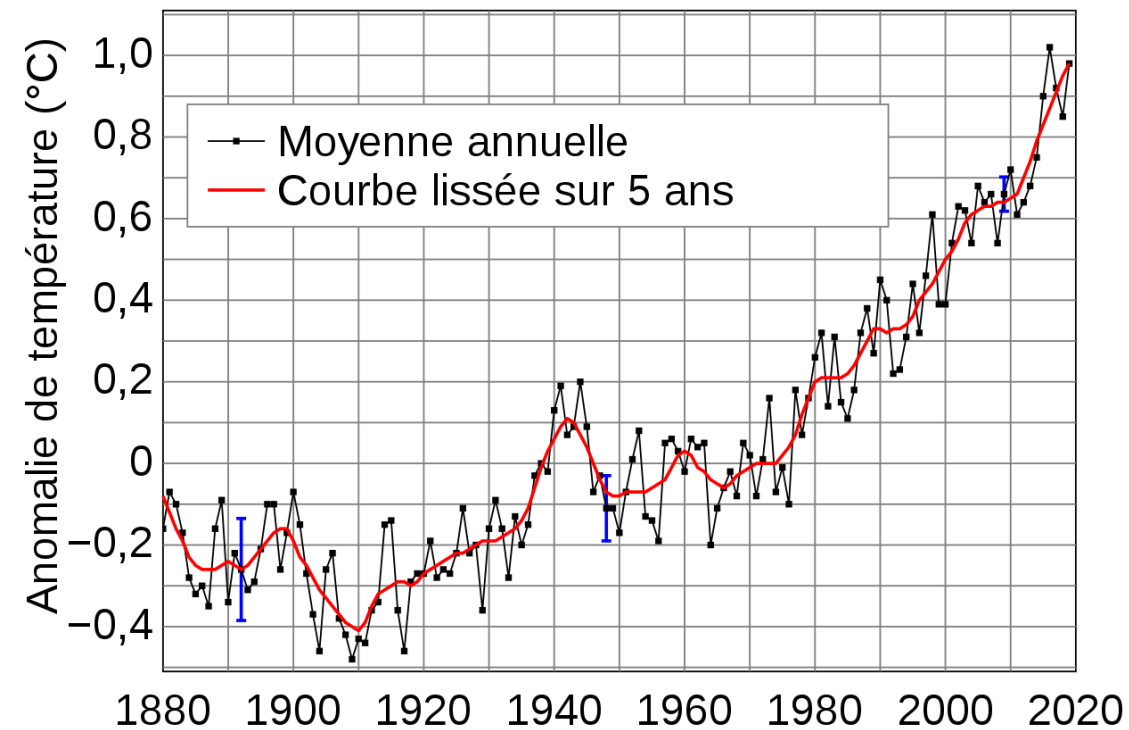


**Les climats de la Terre :
comprendre le passé pour agir aujourd'hui et demain**

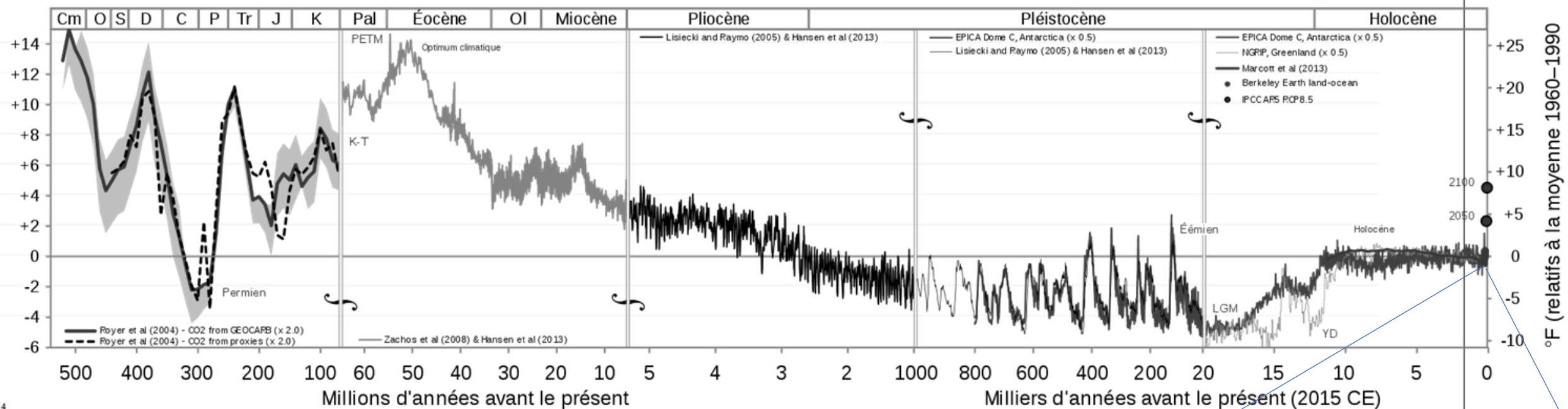
Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

Indice mondial de température terre-océan



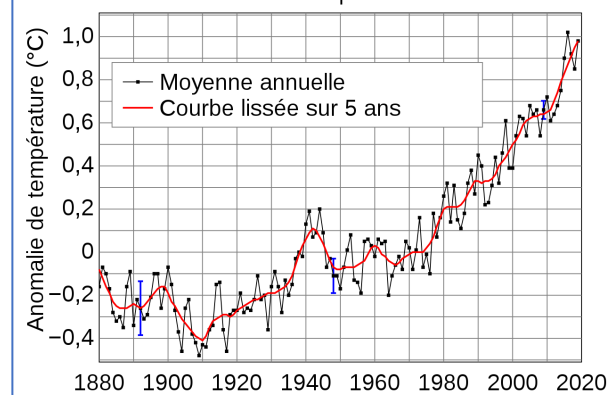
Paléotempératures sur Terre

°C (relatifs à la moyenne 1960–1990)



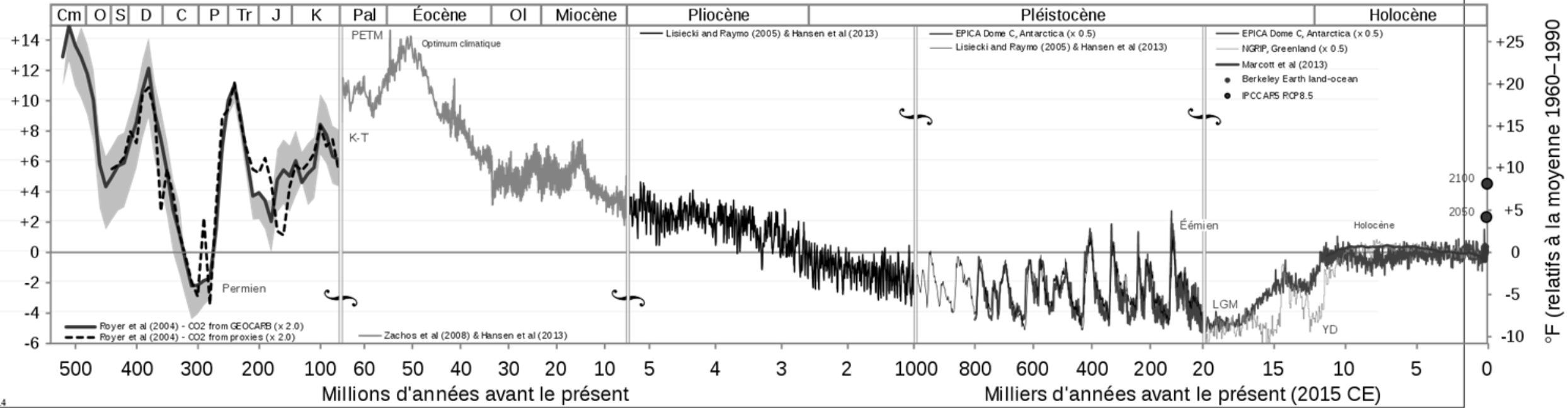
GSF 2014

Indice mondial de température terre-océan



Paléotempératures sur Terre

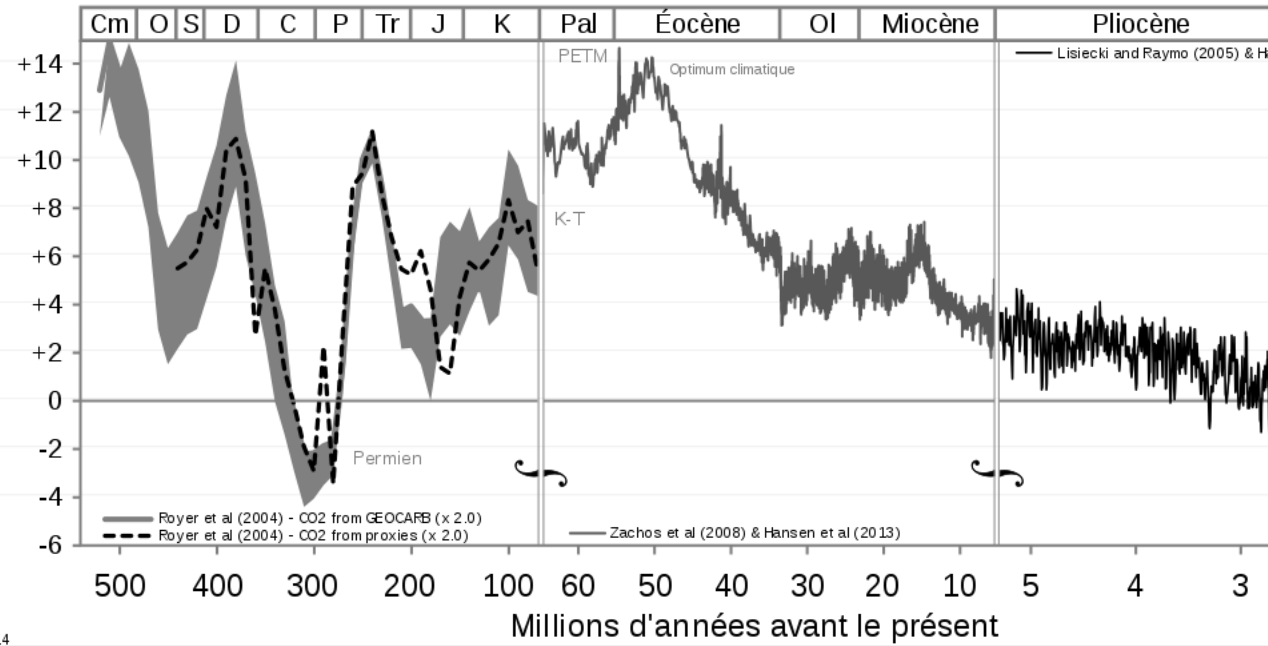
°C (relatifs à la moyenne 1960–1990)



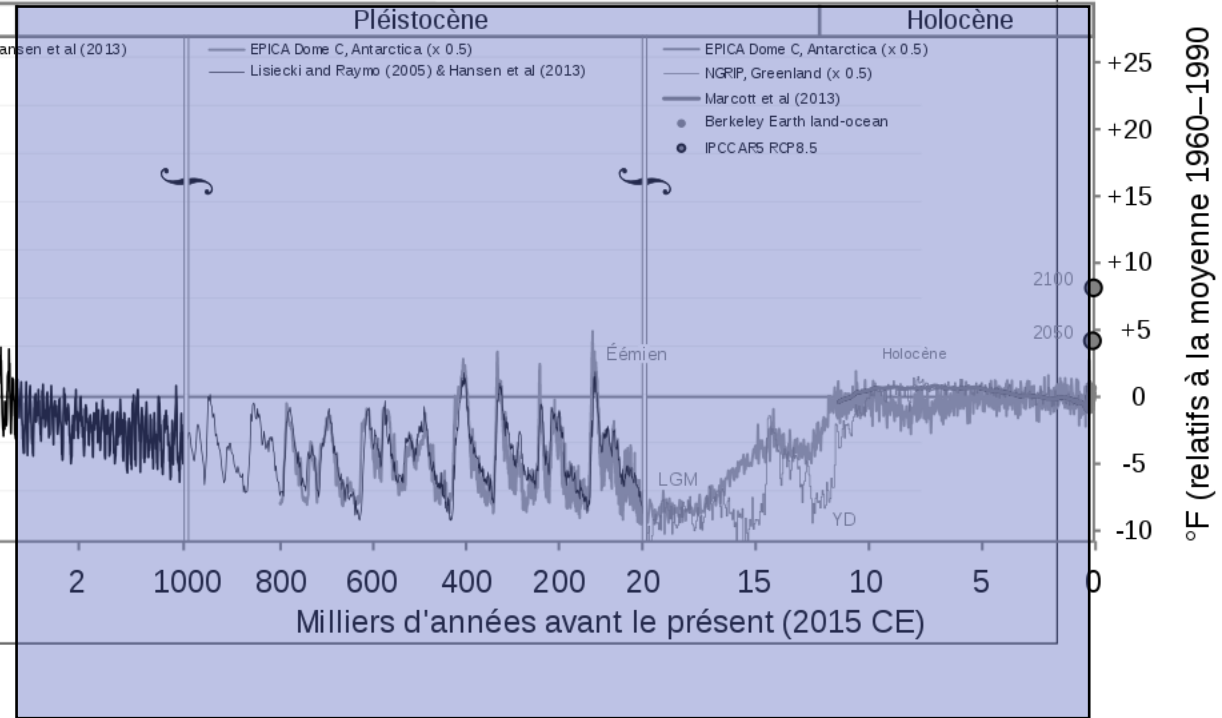
°F (relatifs à la moyenne 1960–1990)

Paléotempératures sur Terre

°C (relatifs à la moyenne 1960–1990)

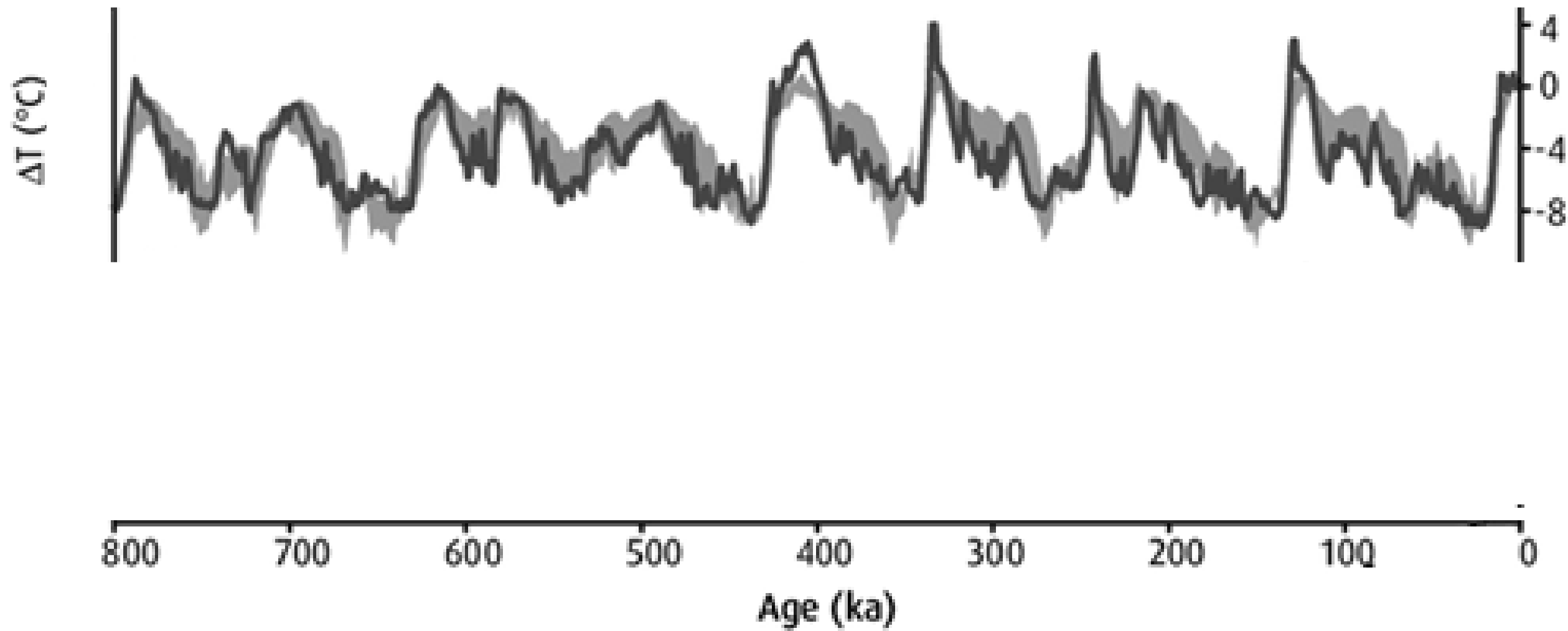


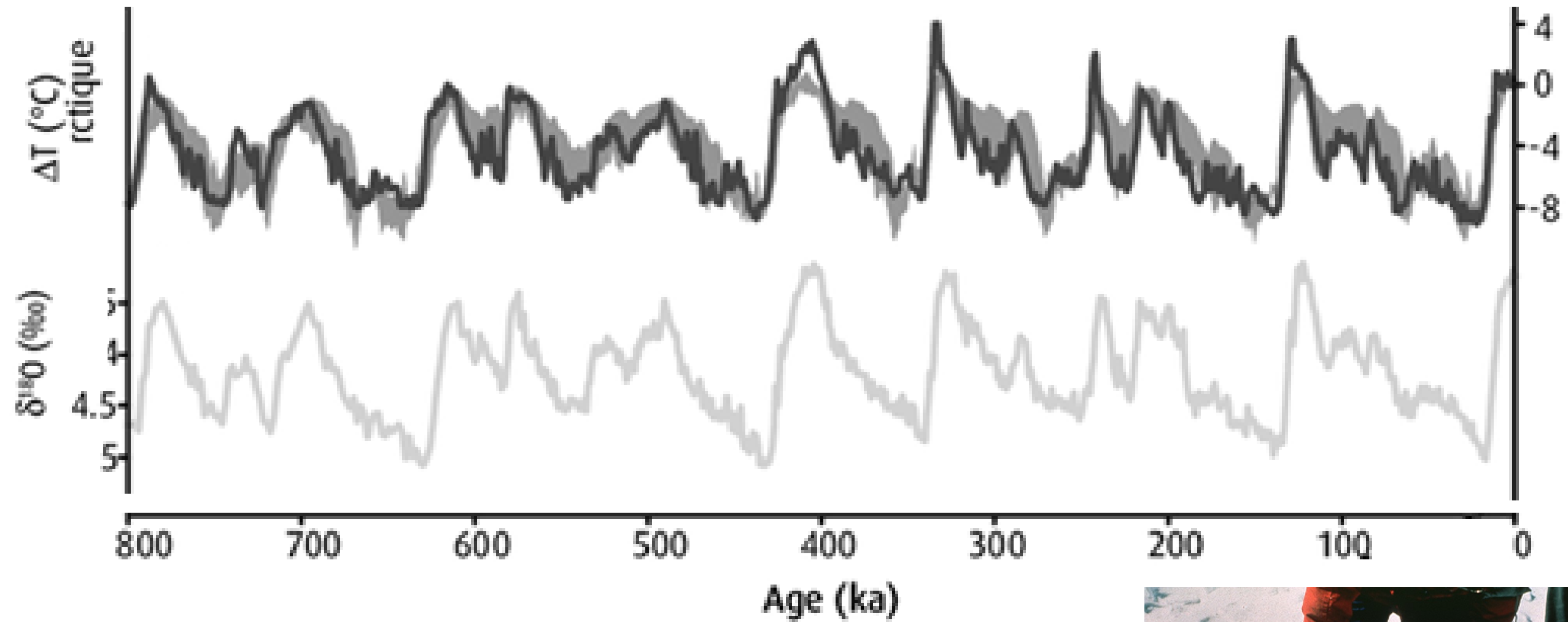
Millions d'années avant le présent



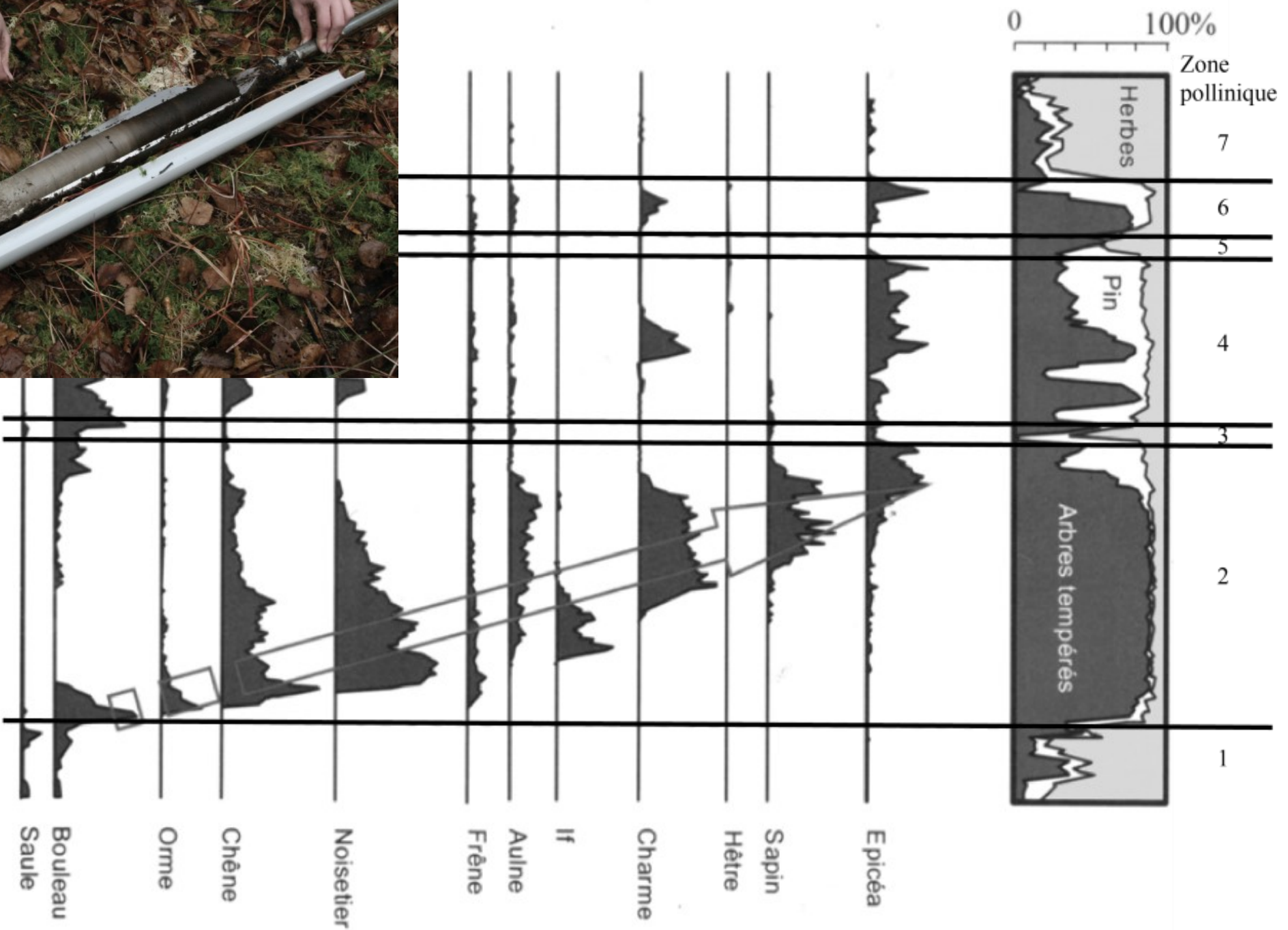
Milliers d'années avant le présent (2015 CE)

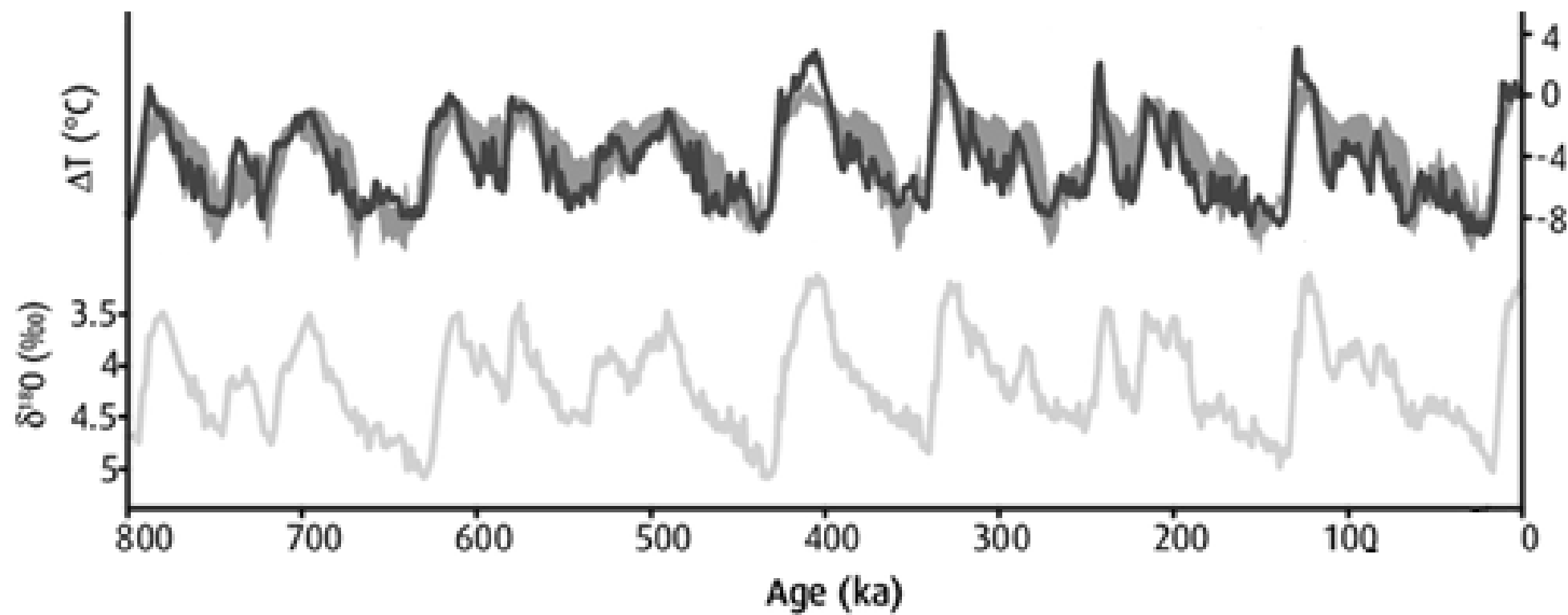
°F (relatifs à la moyenne 1960–1990)

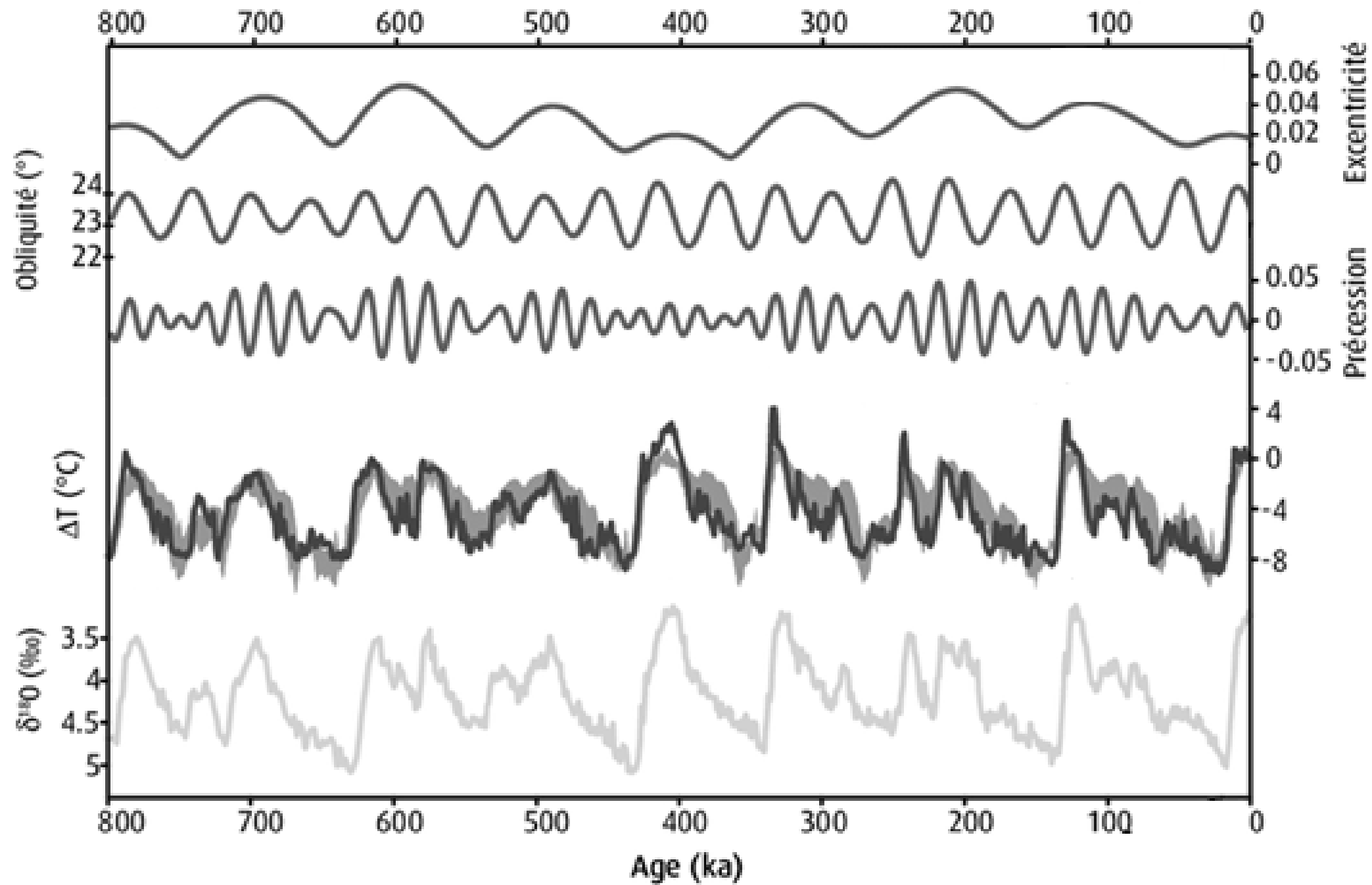


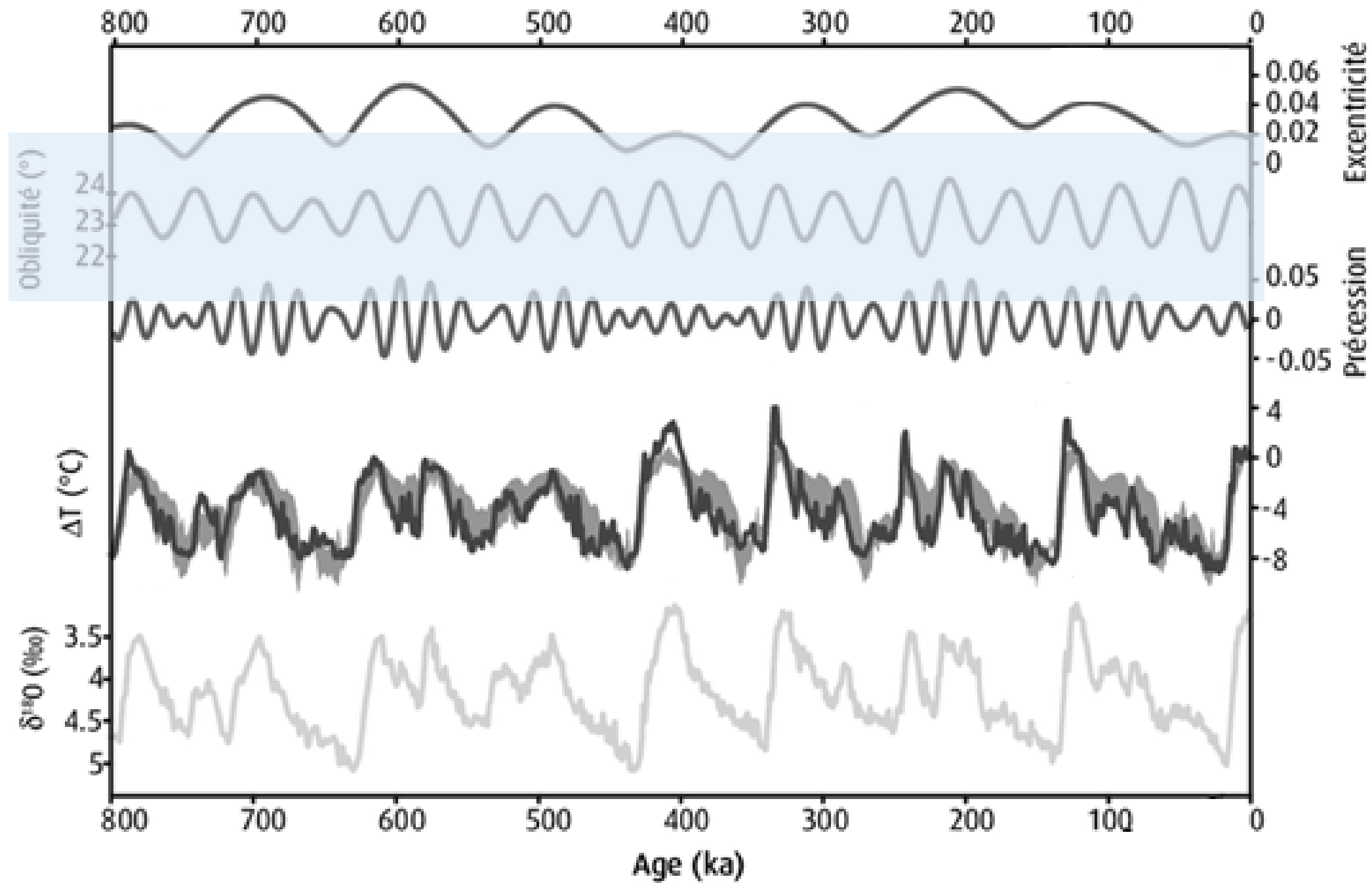


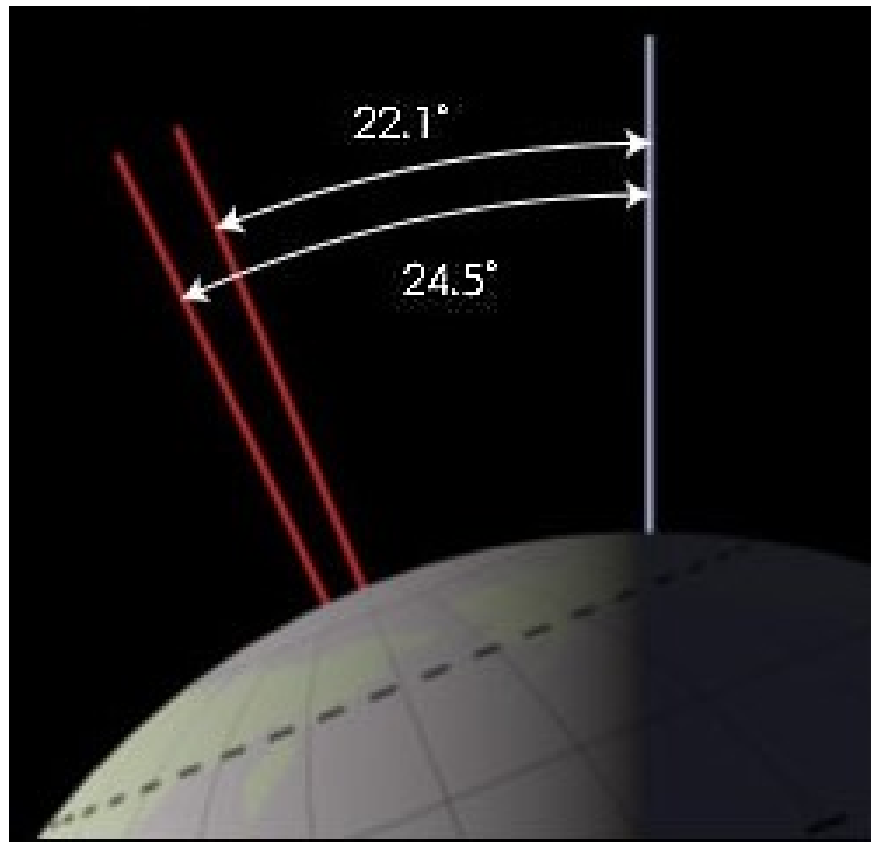












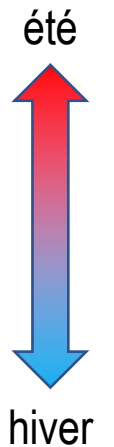
Obliquité faible

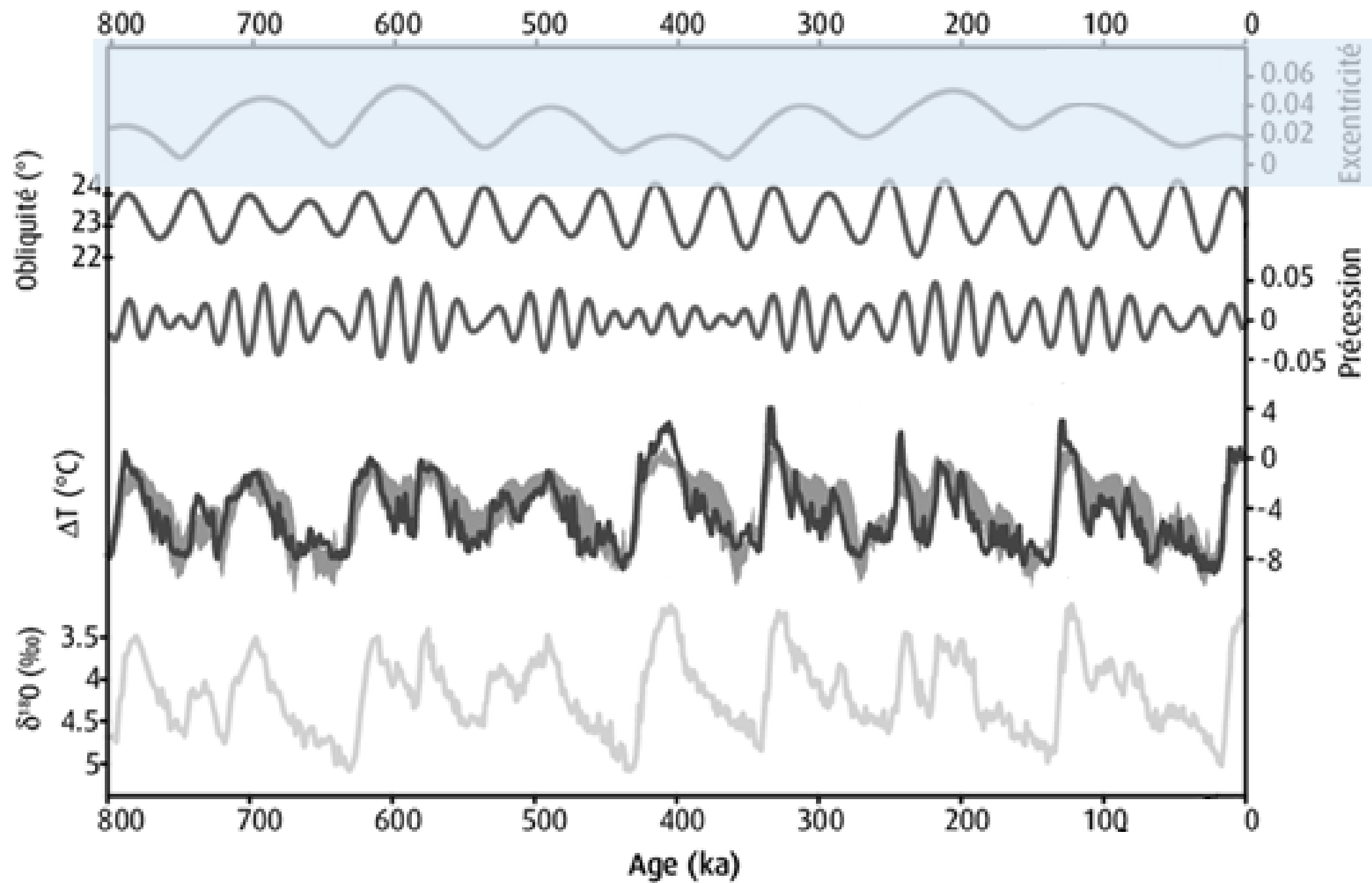
Faible contraste entre les saisons

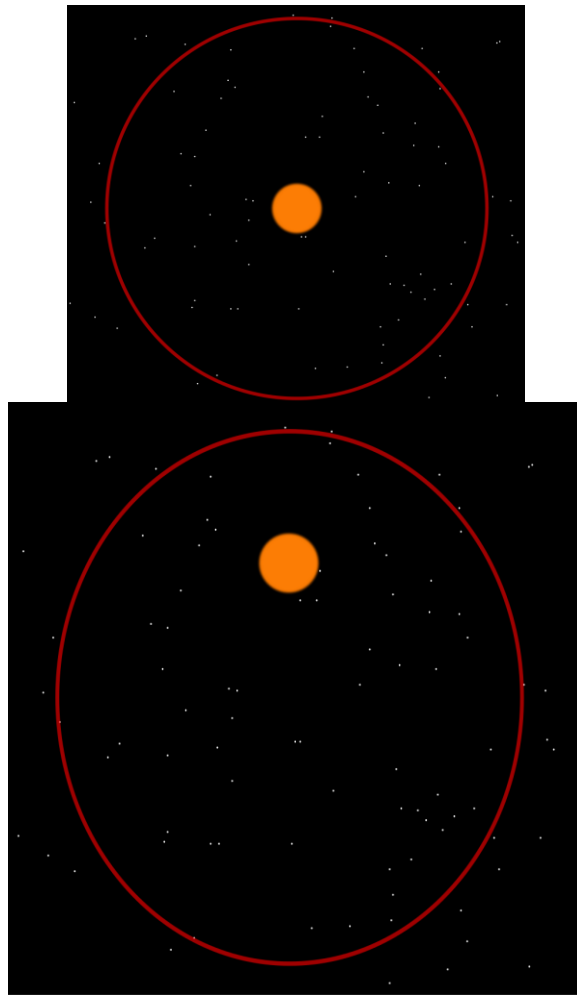
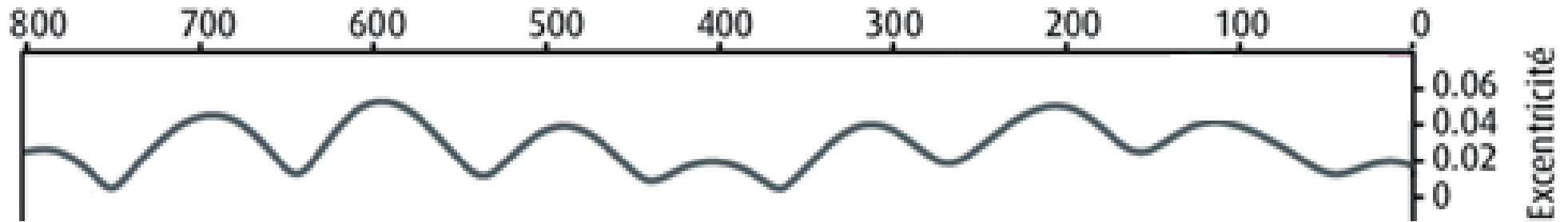


Obliquité élevée

Fort contraste entre les saisons



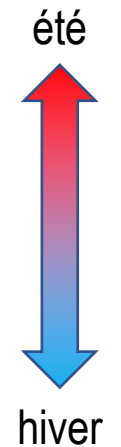


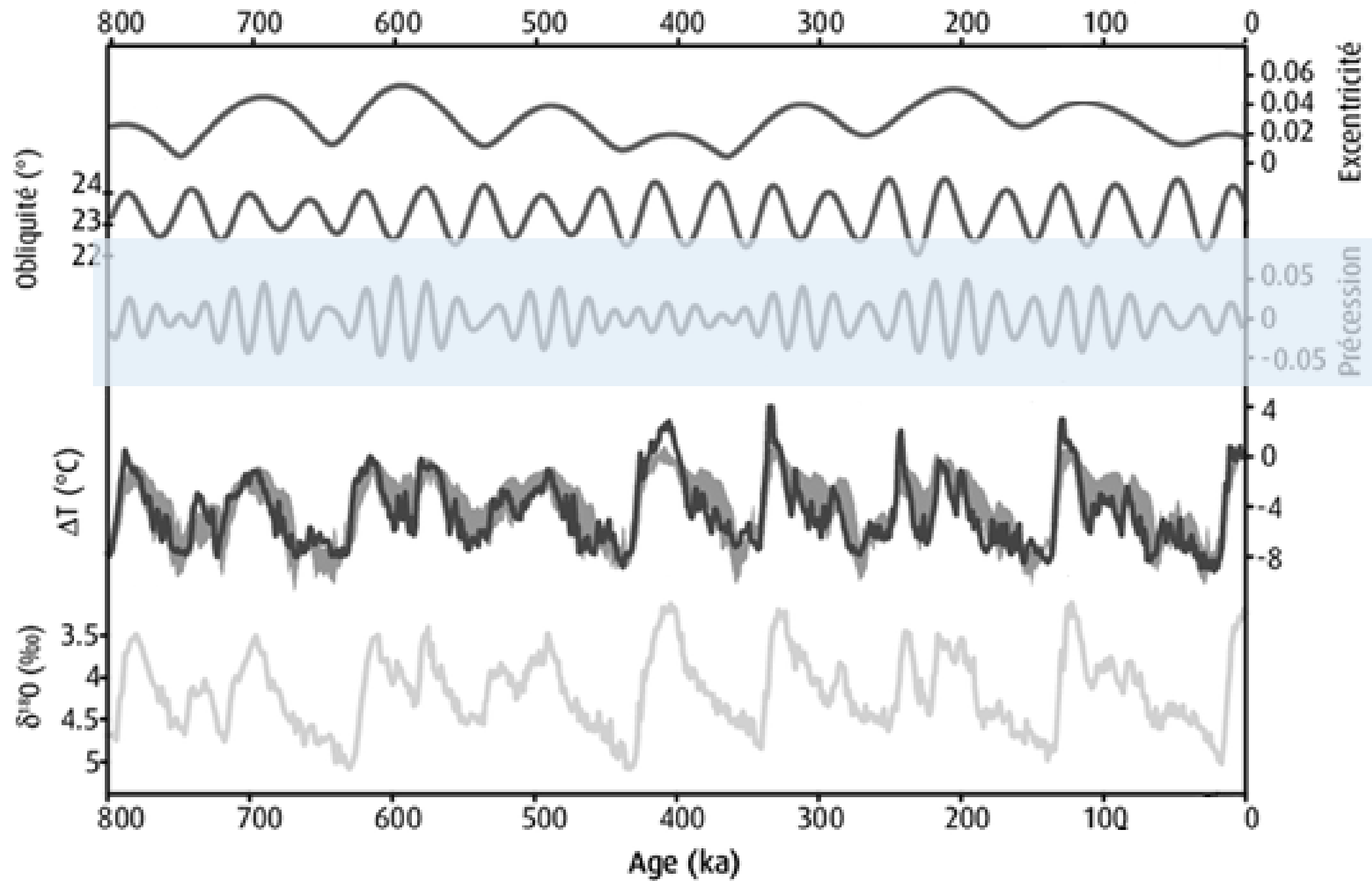


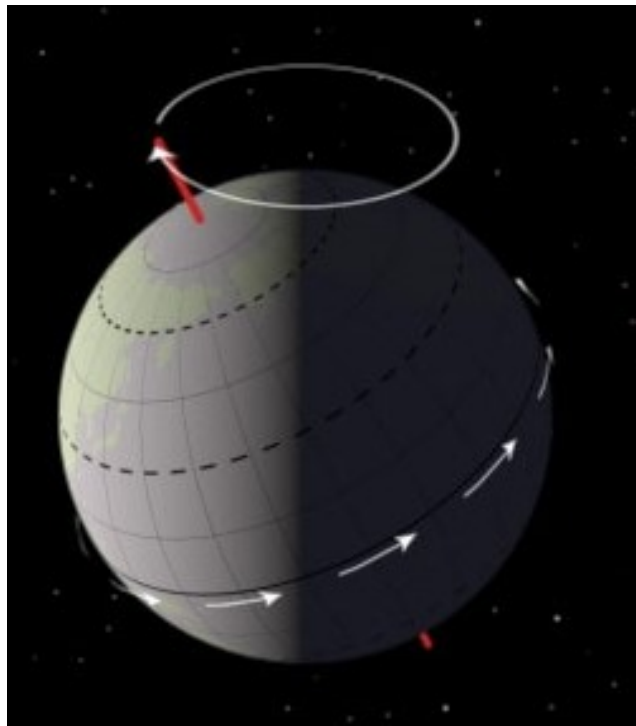
Excentricité faible
Faible contraste entre les saisons



Excentricité élevée
Fort contraste entre les saisons





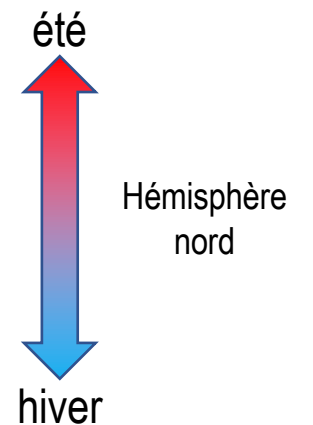
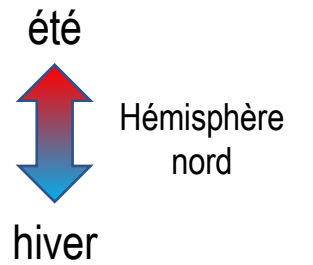


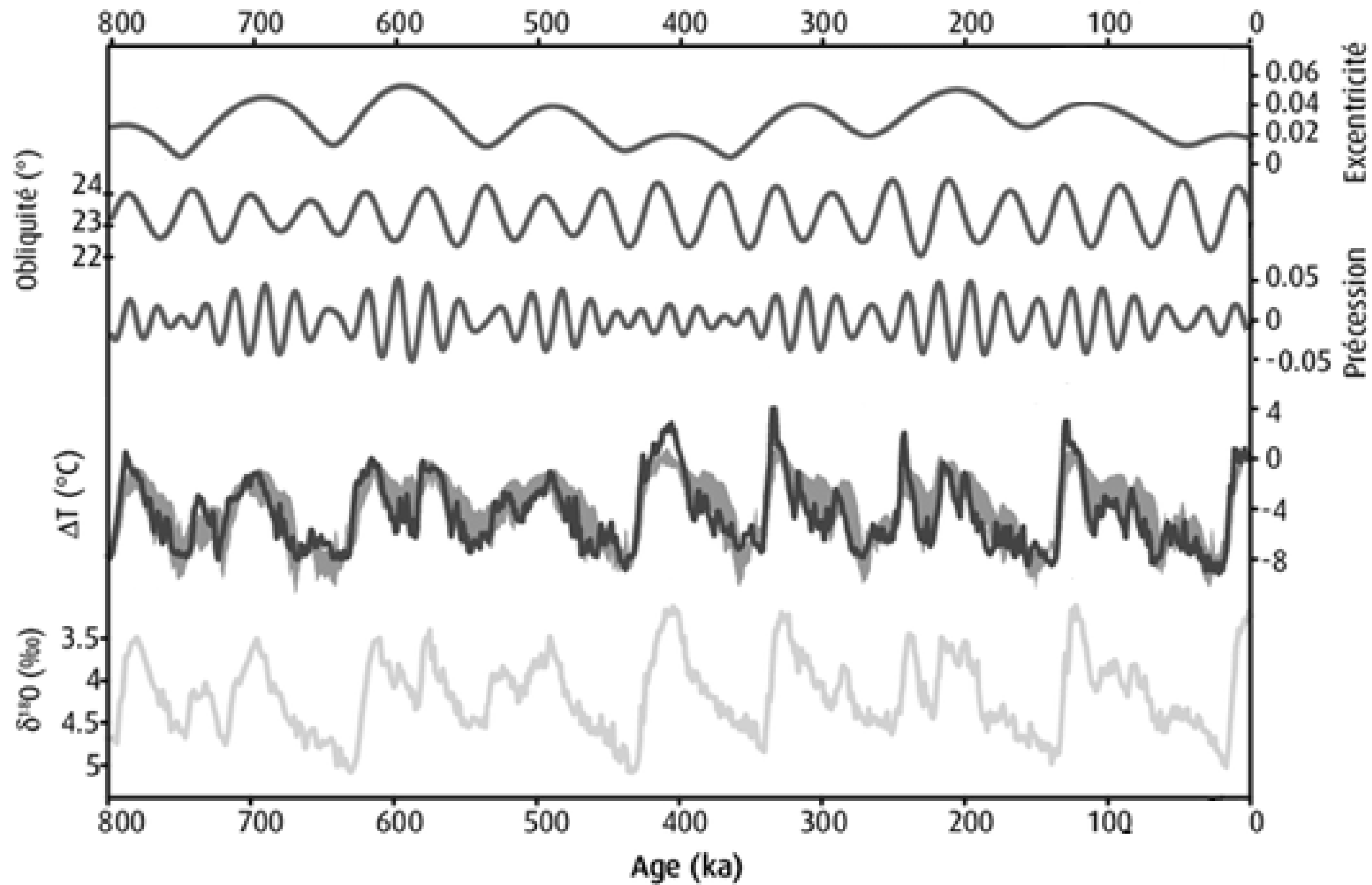
Précession faible

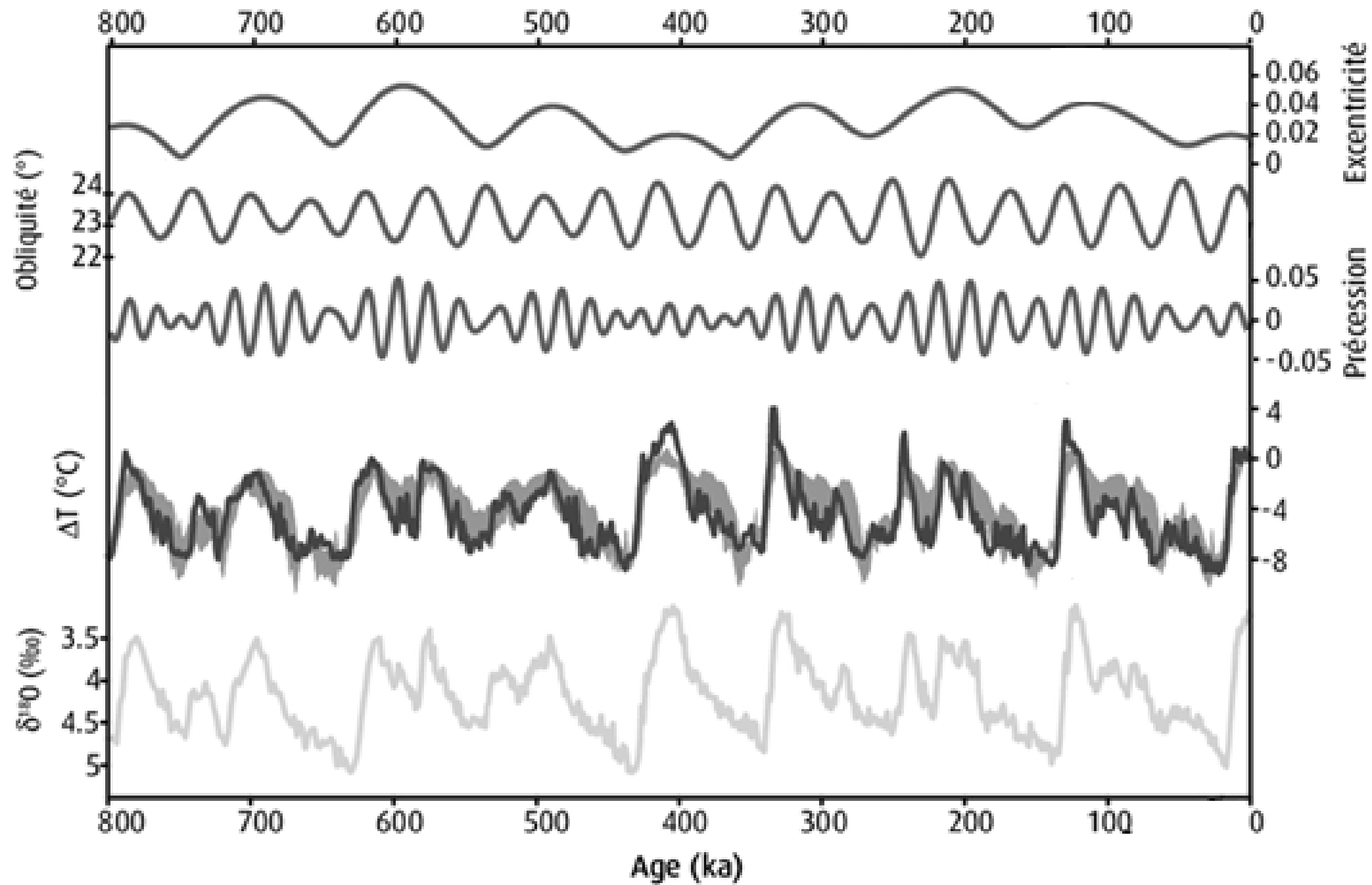
Faible contraste entre les saisons

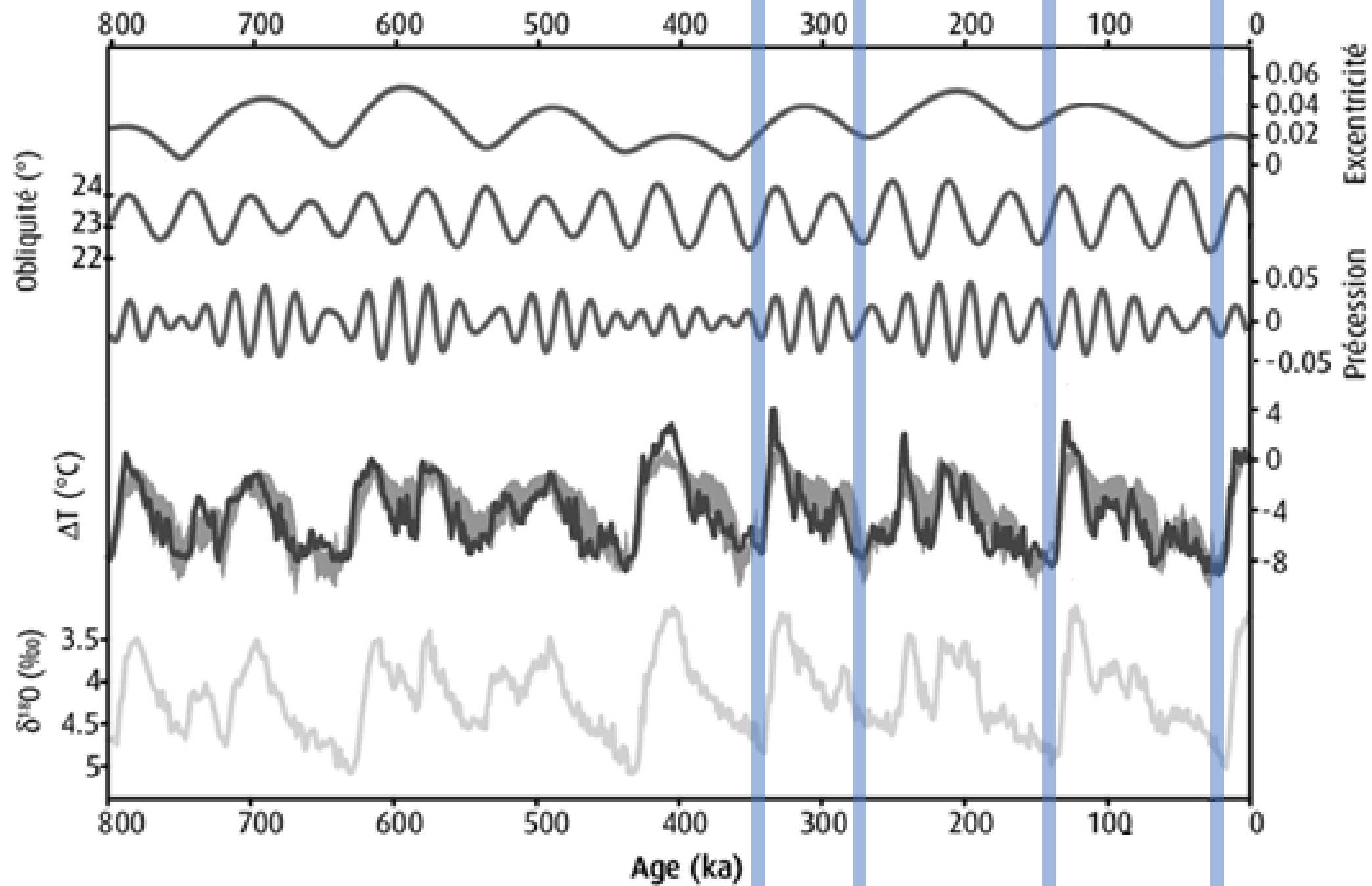
Précession élevée

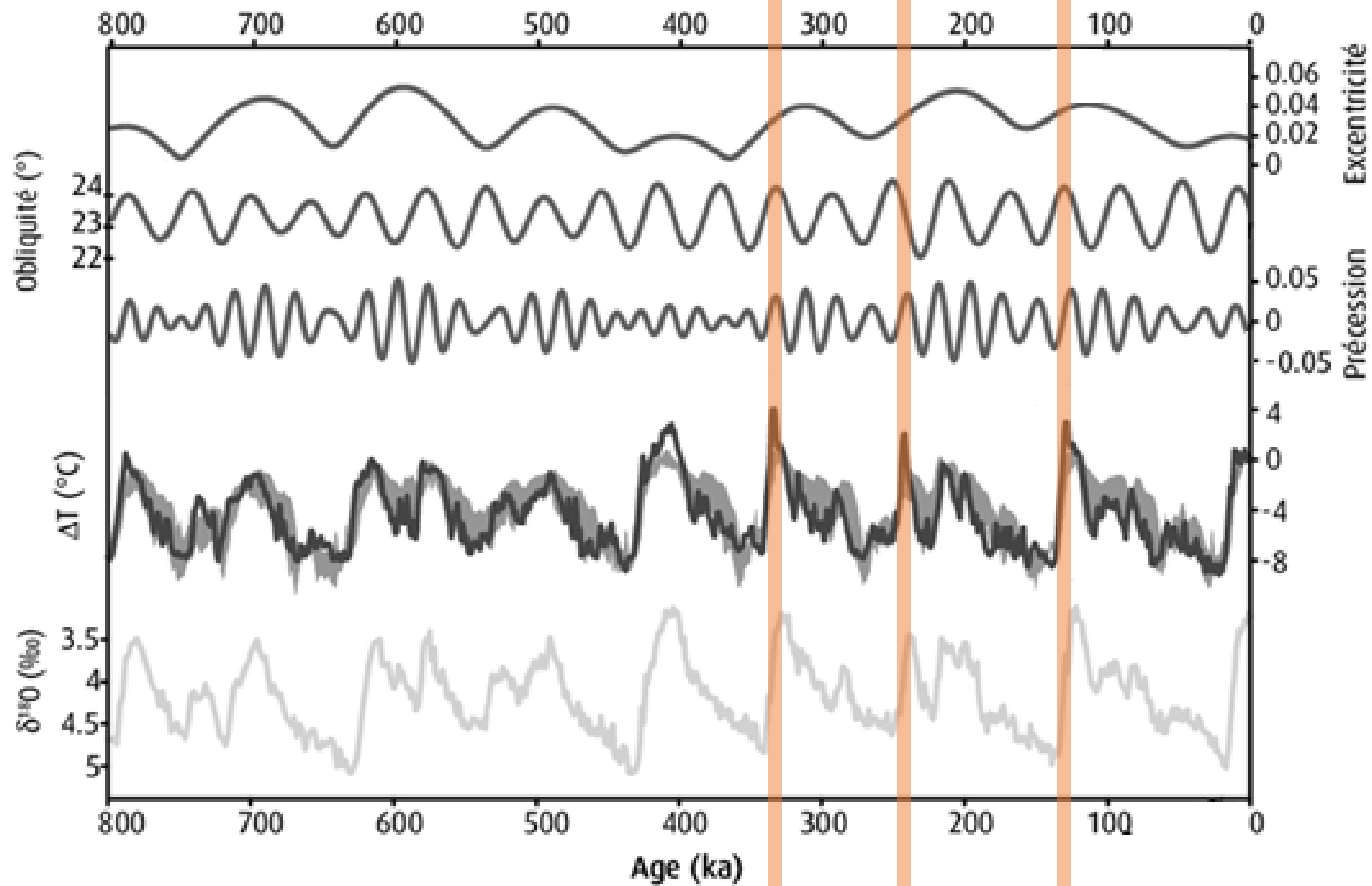
Fort contraste entre les saisons

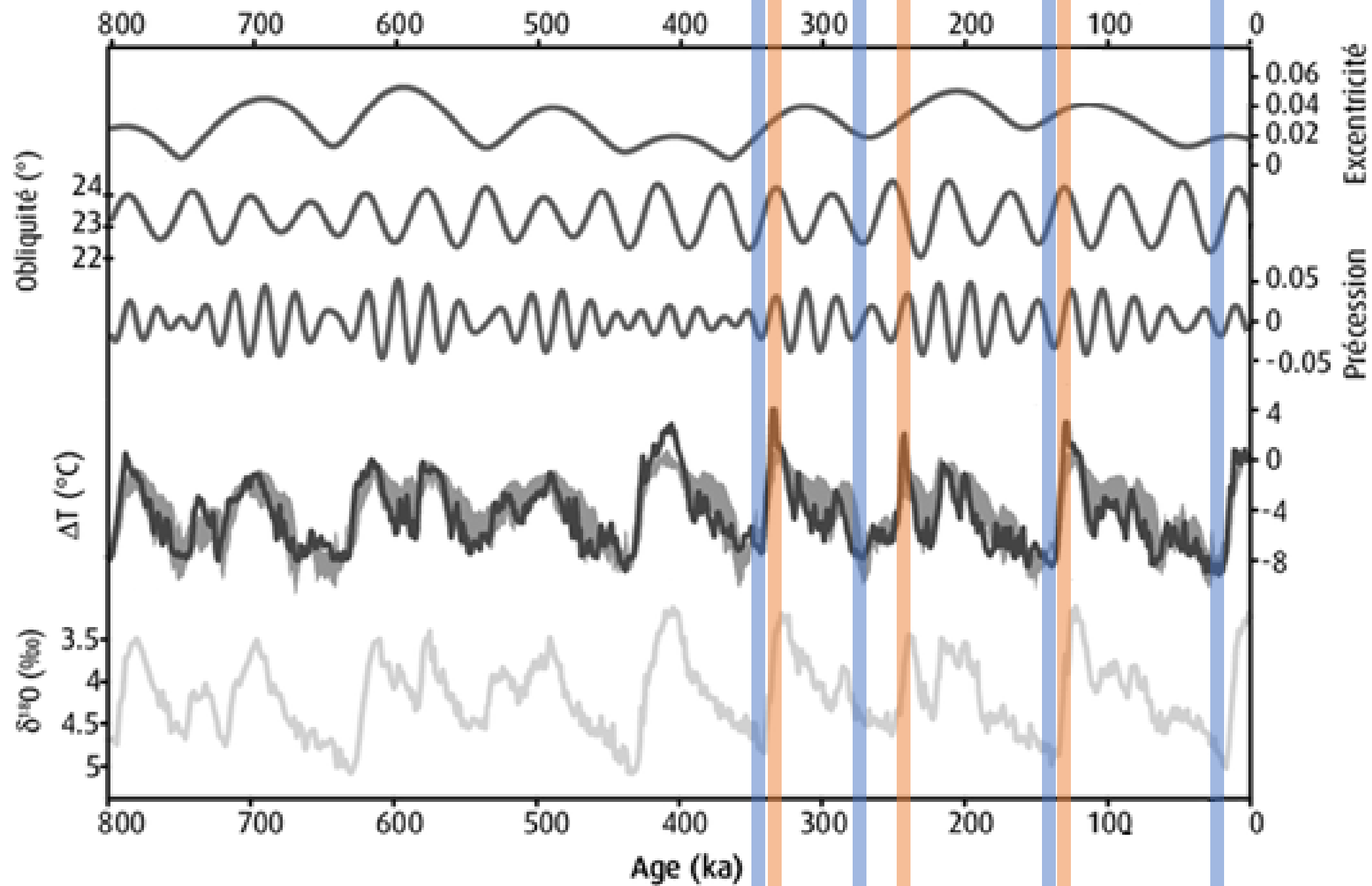




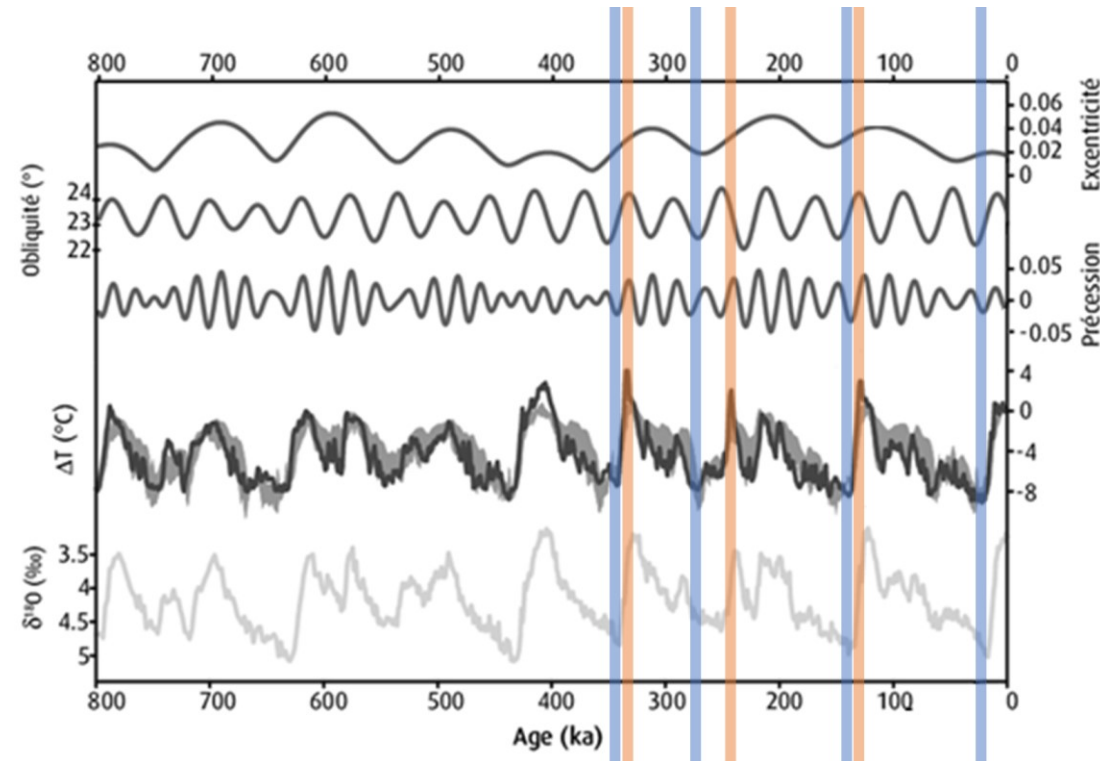








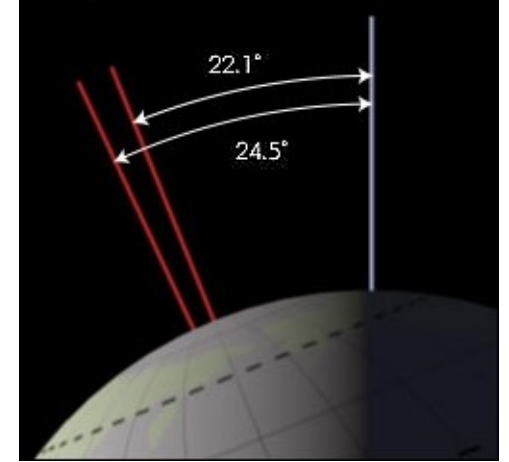
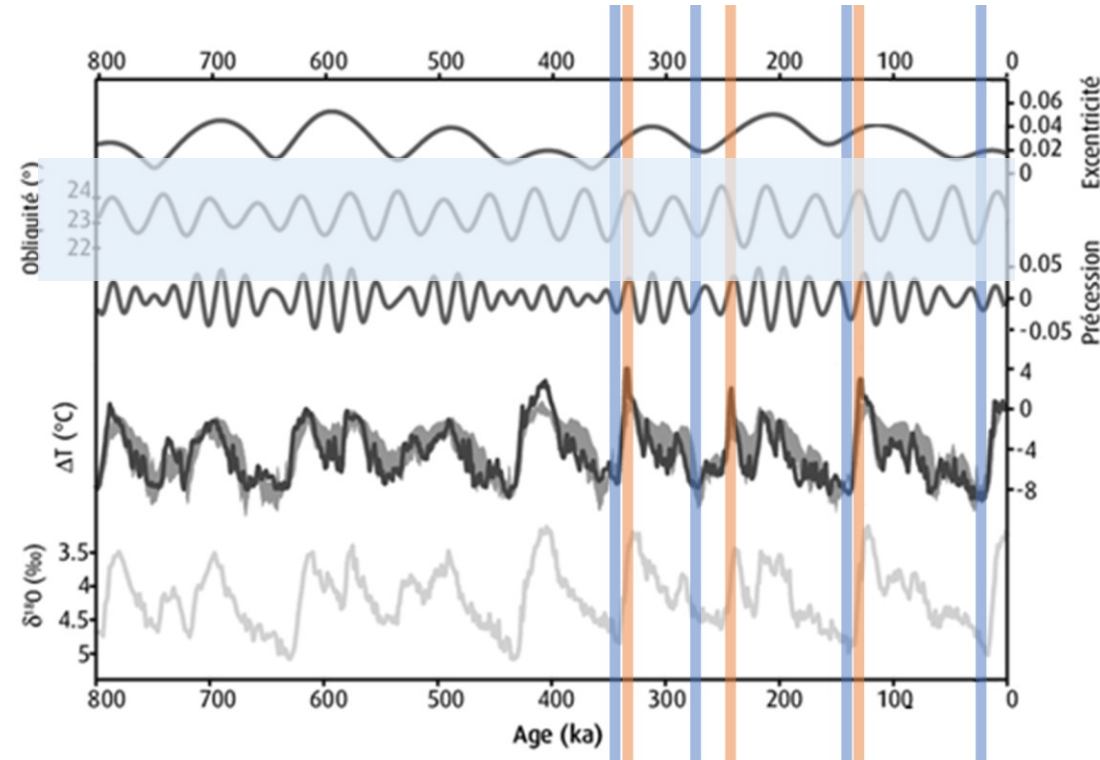
Problème : comment expliquer les variations du climat au Quaternaire ?



Hypothèse :

- Valeurs faibles des paramètres orbitaux → faible contraste entre les saisons → refroidissement global (glaciation)
- Valeurs élevées des paramètres orbitaux → fort contraste entre les saisons → réchauffement global (interglaciaire)

Problème : comment expliquer les variations du climat au Quaternaire ?

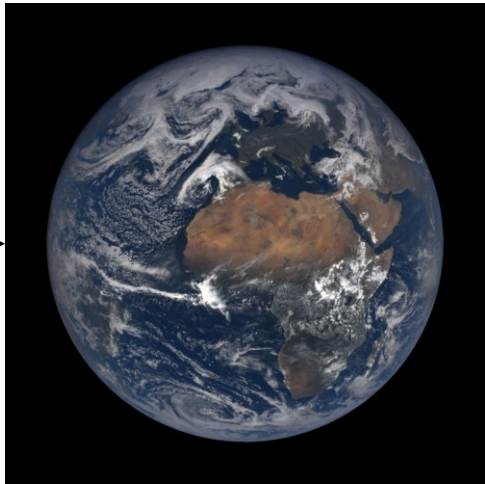


Hypothèse :

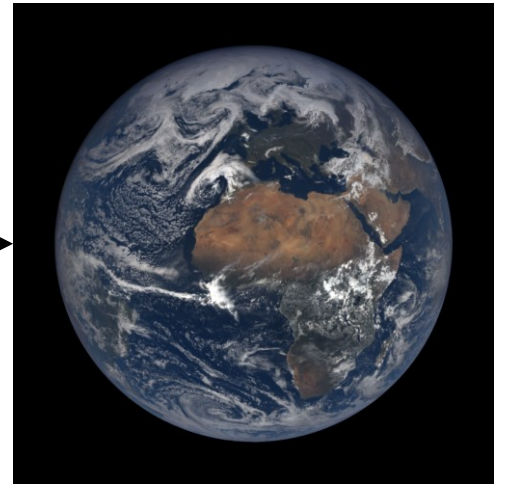
- **Obliquité faible** → faible contraste entre les saisons → refroidissement global (glaciation)
- **Obliquité faible** → fort contraste entre les saisons → réchauffement global (interglaciaire)

Expérience :

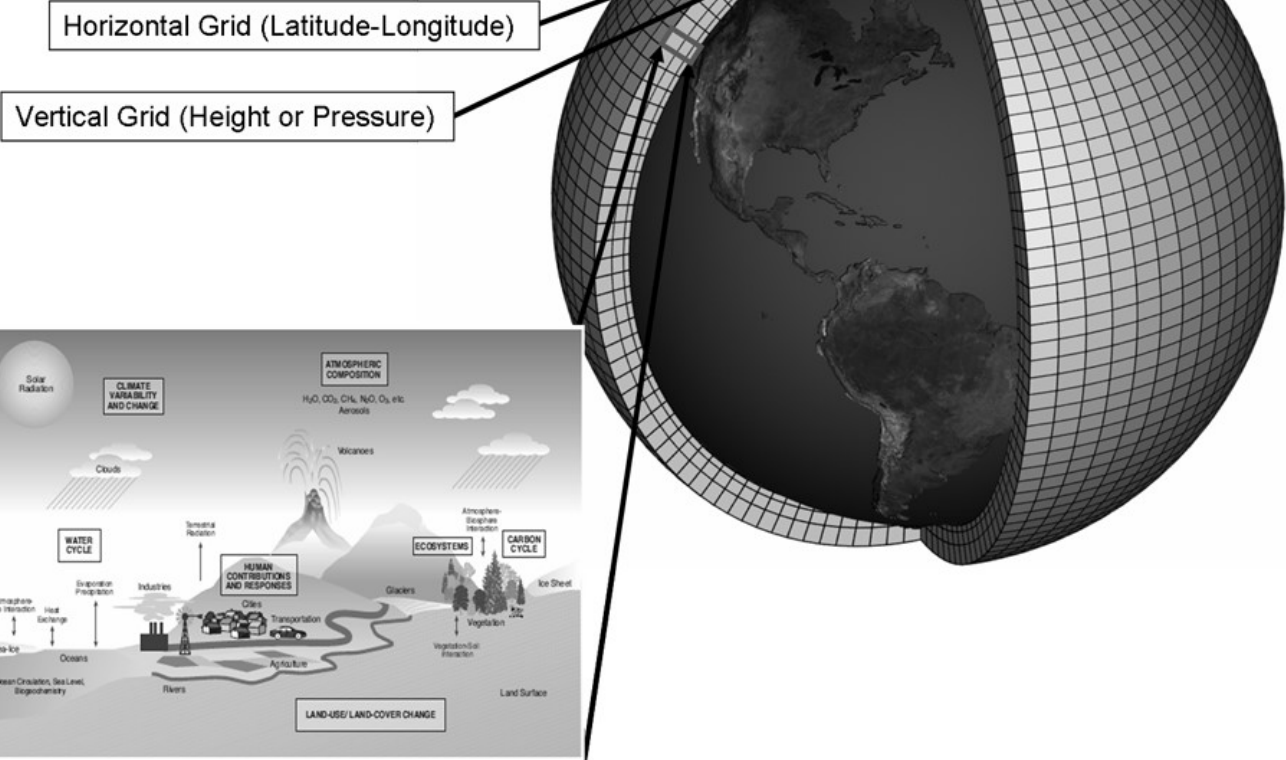
Obliquité
minimum



Obliquité
maximum



Schematic for Global Atmospheric Model



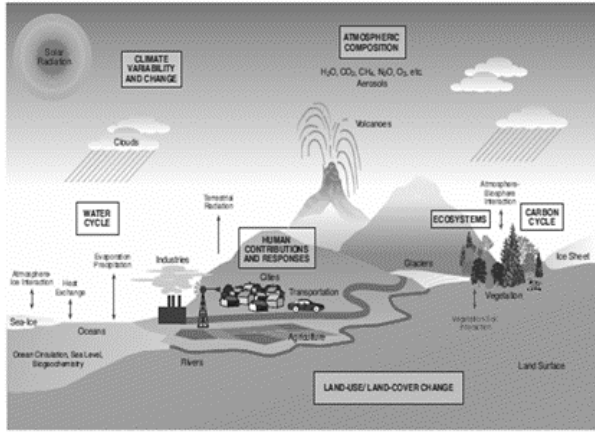
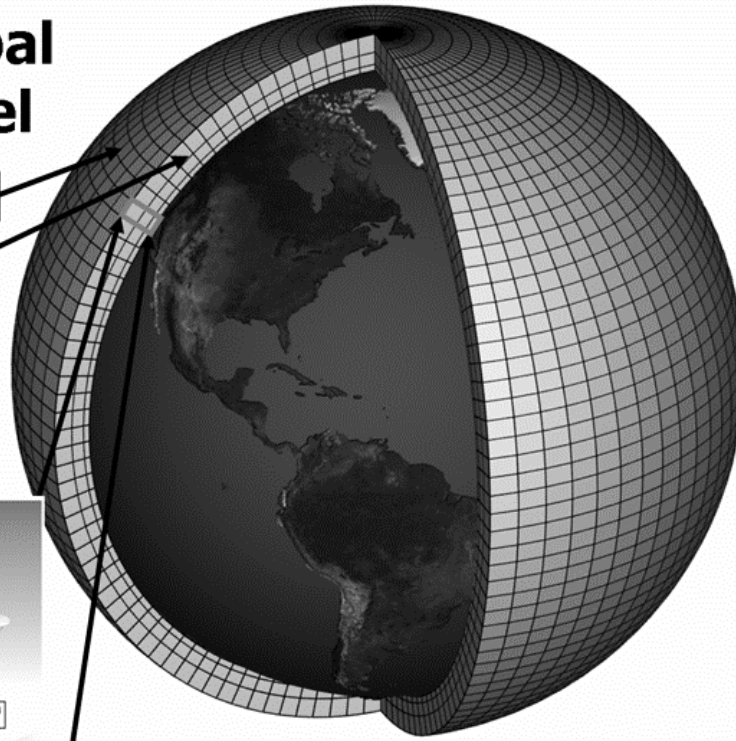
Ens. Sc



Schematic for Global Atmospheric Model

Horizontal Grid (Latitude-Longitude)

Vertical Grid (Height or Pressure)



Ens. Sc

Conservation of momentum:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p - \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} + \nabla \cdot (k_m \nabla \vec{V}) - \vec{F}_d$$

Conservation of energy:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho c_v (\vec{V} \cdot \nabla) T - \nabla \cdot \vec{R} + \nabla \cdot (k_r \nabla T) + C + S$$

Conservation of mass:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \rho - \rho (\nabla \cdot \vec{V})$$

Conservation of H₂O (vapor, liquid, solid):

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) q + \nabla \cdot (k_v \nabla q) + S_q + E$$

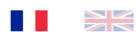
Equation of state:

$$p = \rho R_d T$$



SIMCLIMAT

Choisir votre langue



LANCER DES SIMULATIONS

[Documentation](#)[Mentions légales](#)[Crédits](#)

Version ordinateur
Version smartphone et tablette

Camille Risi

<https://www.lmd.jussieu.fr/~crlmd/simclimat/>

Problème : comment expliquer les variations du climat au Quaternaire ?

Hypothèse :

- Obliquité faible → faible contraste entre les saisons → refroidissement global (glaciation)
- Obliquité élevée → fort contraste entre les saisons → réchauffement global (interglaciaire)

Simulations à réaliser à l'aide du modèle :

Problème : comment expliquer les variations du climat au Quaternaire ?

Hypothèse :

- Obliquité faible → faible contraste entre les saisons → refroidissement global (glaciation)
- Obliquité élevée → fort contraste entre les saisons → réchauffement global (interglaciaire)

Simulations à réaliser à l'aide du modèle :

Simulation 1	Simulation 2
Fixer l'obliquité au minimum	Fixer l'obliquité au maximum

Problème : comment expliquer les variations du climat au Quaternaire ?

Hypothèse :

- Obliquité faible → faible contraste entre les saisons → refroidissement global (glaciation)
- Obliquité élevée → fort contraste entre les saisons → réchauffement global (interglaciaire)

Simulations à réaliser à l'aide du modèle :

Simulation 1	Simulation 2
Fixer l'obliquité au minimum	Fixer l'obliquité au maximum

Résultats attendus :

--

Problème : comment expliquer les variations du climat au Quaternaire ?

Hypothèse :

- Obliquité faible → faible contraste entre les saisons → refroidissement global (glaciation)
- Obliquité élevée → fort contraste entre les saisons → réchauffement global (interglaciaire)

Simulations à réaliser à l'aide du modèle :

Simulation 1	Simulation 2
Fixer l'obliquité au minimum	Fixer l'obliquité au maximum

Résultats attendus :

Refroidissement	Réchauffement
-----------------	---------------

SIMCLIMAT

Choisir votre langue



LANCER DES SIMULATIONS

[Documentation](#)

[Mentions légales](#)

[Crédits](#)



Obliquité

Régler l'obliquité

(en °)

- ☐ Obliquité actuelle (23.5°)
- ☒ Valeur minimale (21.8°)
- ☐ Valeur maximale (24.4°)
- ☐ Autre valeur

Régler manuellement l'obliquité (21.8 °)

21.8

Voir schéma explicatif





Obliquité

Régler l'obliquité

(en °)

- ☐ Obliquité actuelle (23.5°)
- ☐ Valeur minimale (21.8°)
- ☒ Valeur maximale (24.4°)
- ☐ Autre valeur

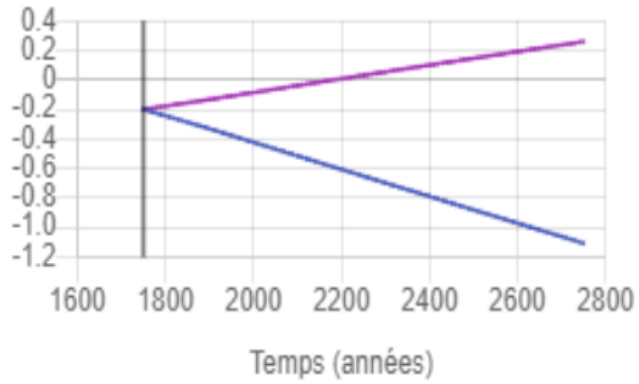
Régler manuellement l'obliquité (24.4 °)

24.4

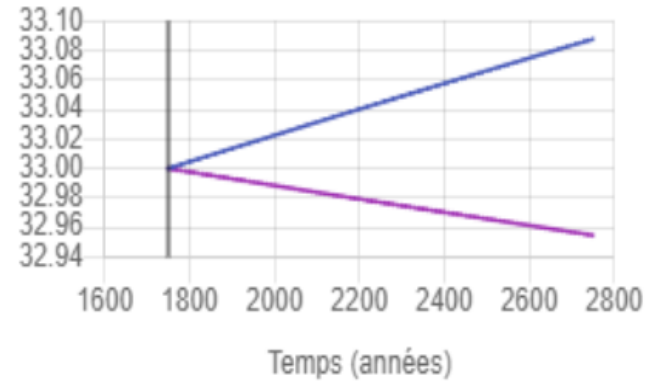
Voir schéma explicatif



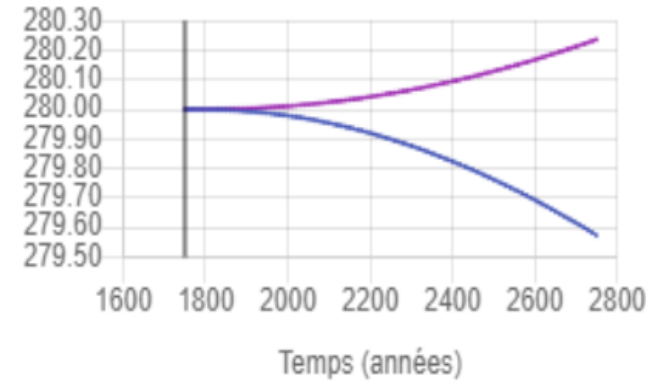
Niveau de la mer par rapport à l'époque pré-industrielle (m)



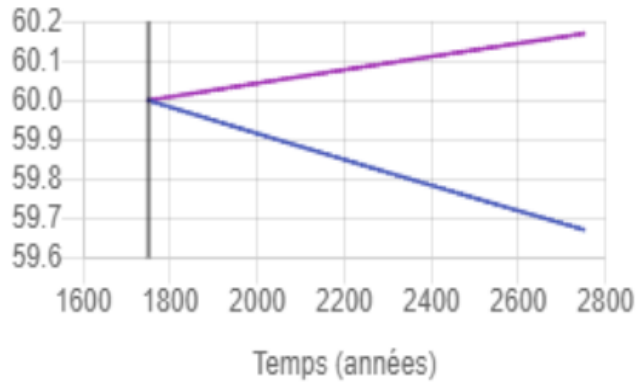
Albedo (%)



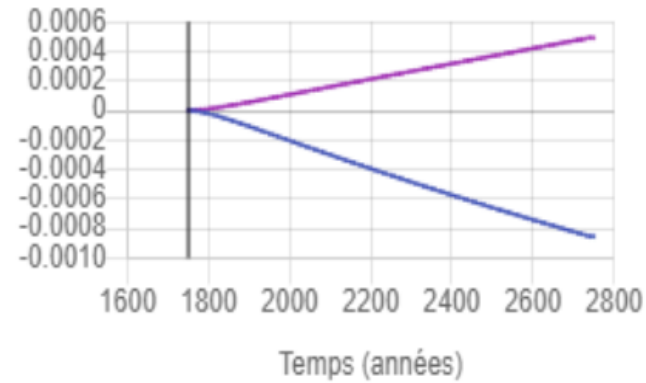
Concentration en CO₂ (ppm)



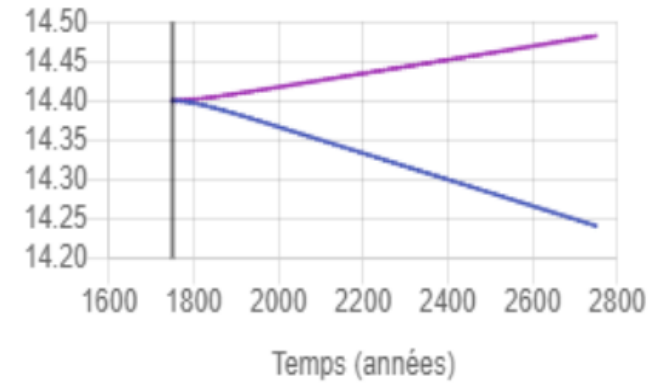
Latitude jusqu'à laquelle la calotte de l'Hémisphère Nord s'étend (°)



Emissions (GtC/an)



Température (°C)



— Obliquité minimum
— Obliquité maximum

Problème : comment expliquer les variations du climat au Quaternaire ?

Hypothèse :

- Obliquité faible → faible contraste entre les saisons → refroidissement global (glaciation)
- Obliquité élevée → fort contraste entre les saisons → réchauffement global (interglaciaire)

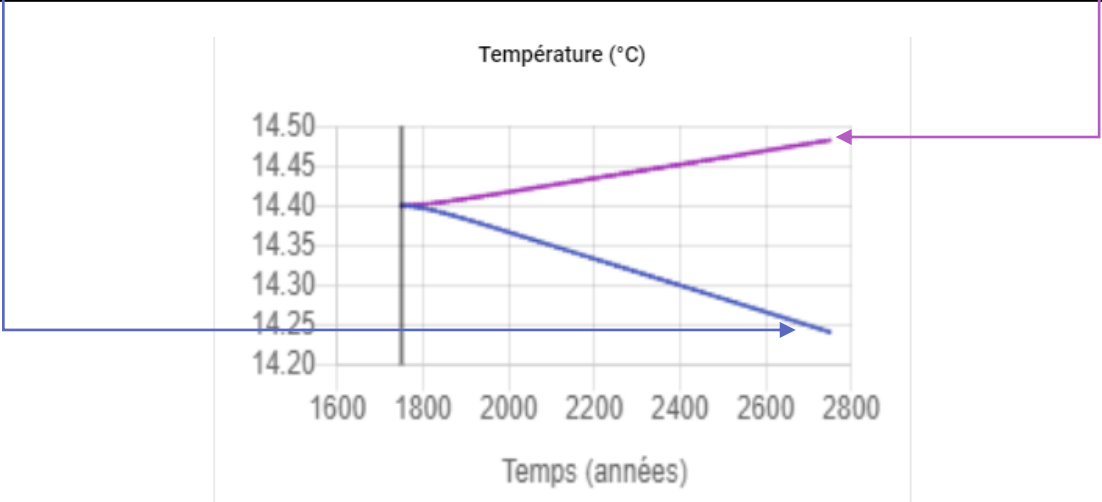
Simulations à réaliser à l'aide du modèle :

Simulation 1	Simulation 2
Fixer l'obliquité au minimum	Fixer l'obliquité au maximum

Résultats attendus :

Refroidissement	Réchauffement
-----------------	---------------

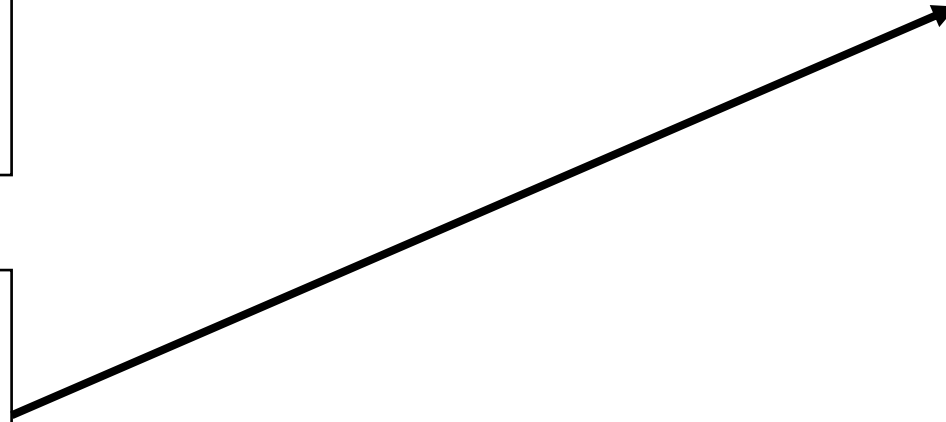
Résultats observés :



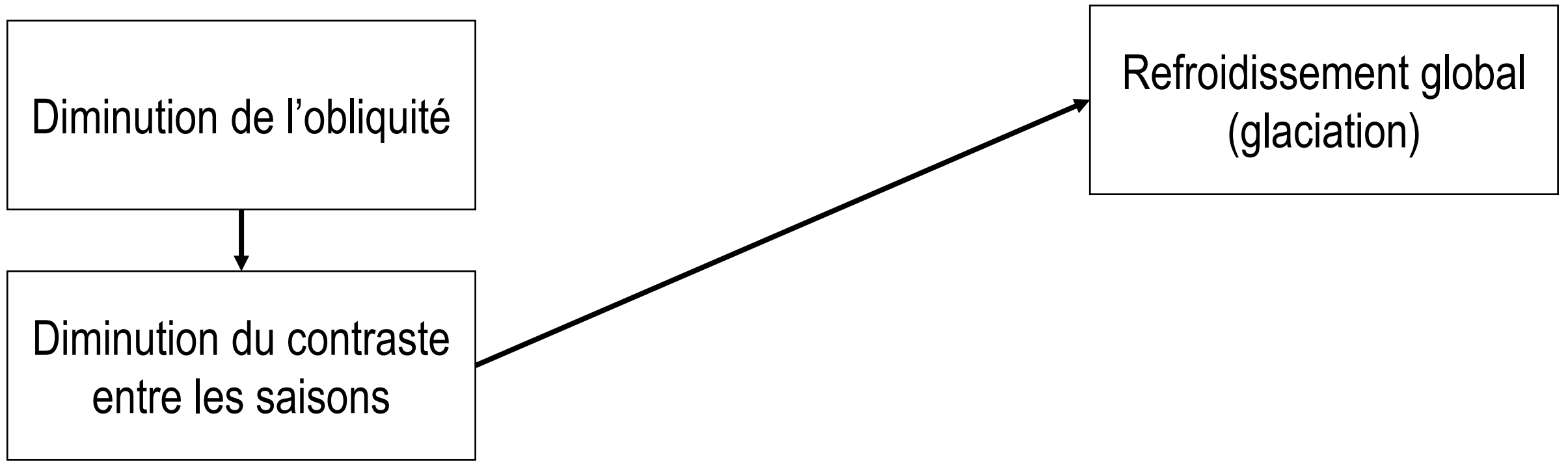
Diminution de l'obliquité



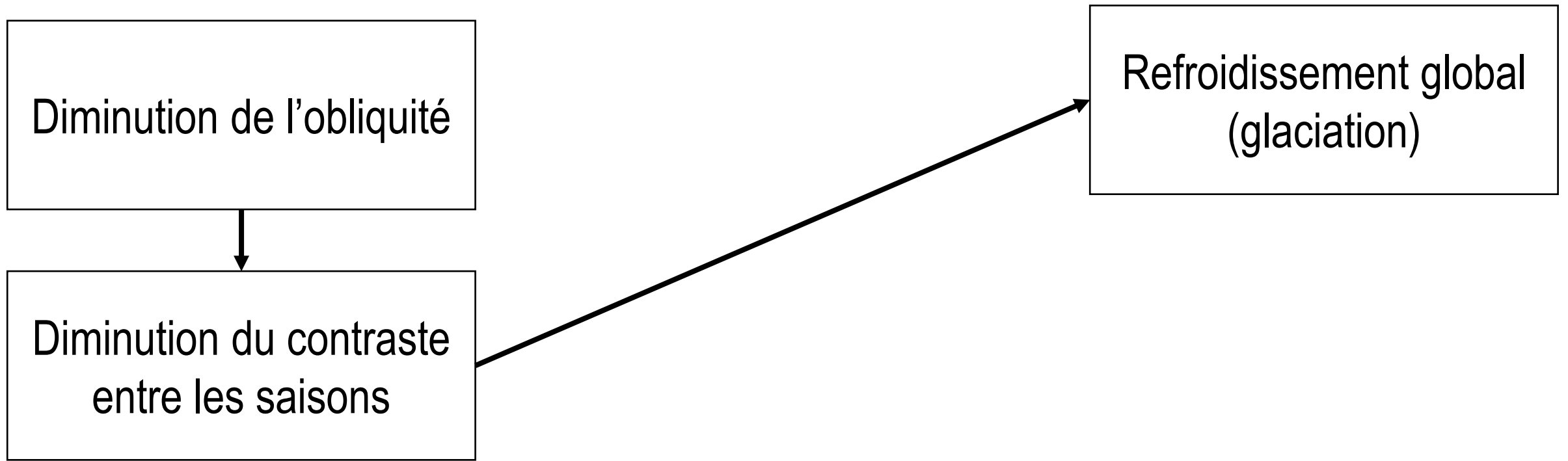
Diminution du contraste
entre les saisons



Refroidissement global
(glaciation)



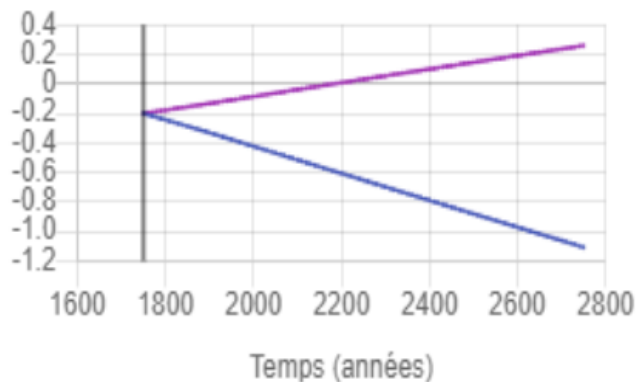
Problème : comment expliquer que la diminution de l'obliquité et donc la diminution du contraste entre les saisons provoque le refroidissement ?



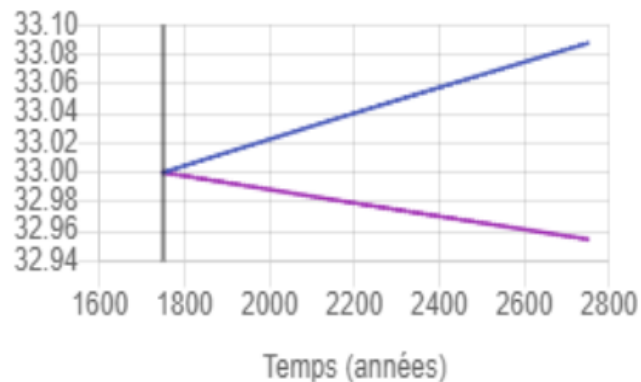
Problème : comment expliquer que la diminution de l'obliquité et donc la diminution du contraste entre les saisons provoque le refroidissement ?

Hypothèse :

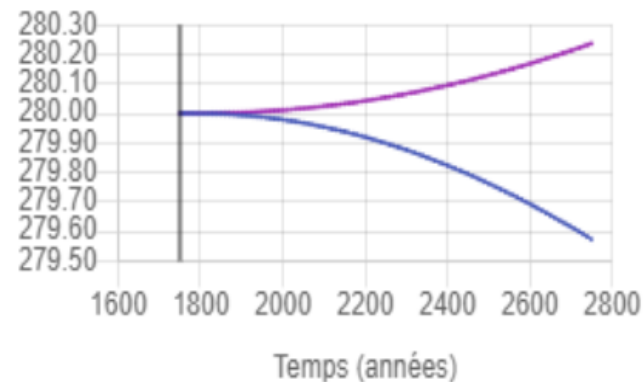
Niveau de la mer par rapport à l'époque pré-industrielle (m)



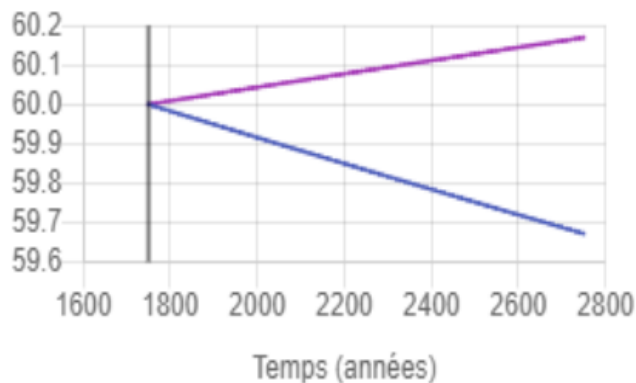
Albedo (%)



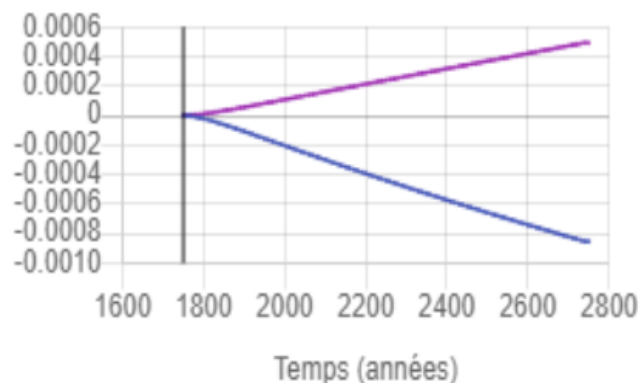
Concentration en CO₂ (ppm)



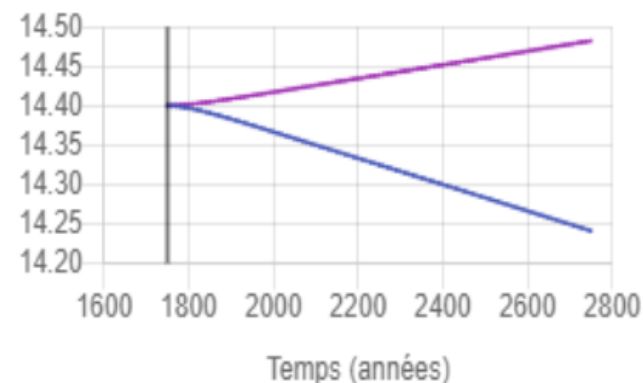
Latitude jusqu'à laquelle la calotte de l'Hémisphère Nord s'étend (°)



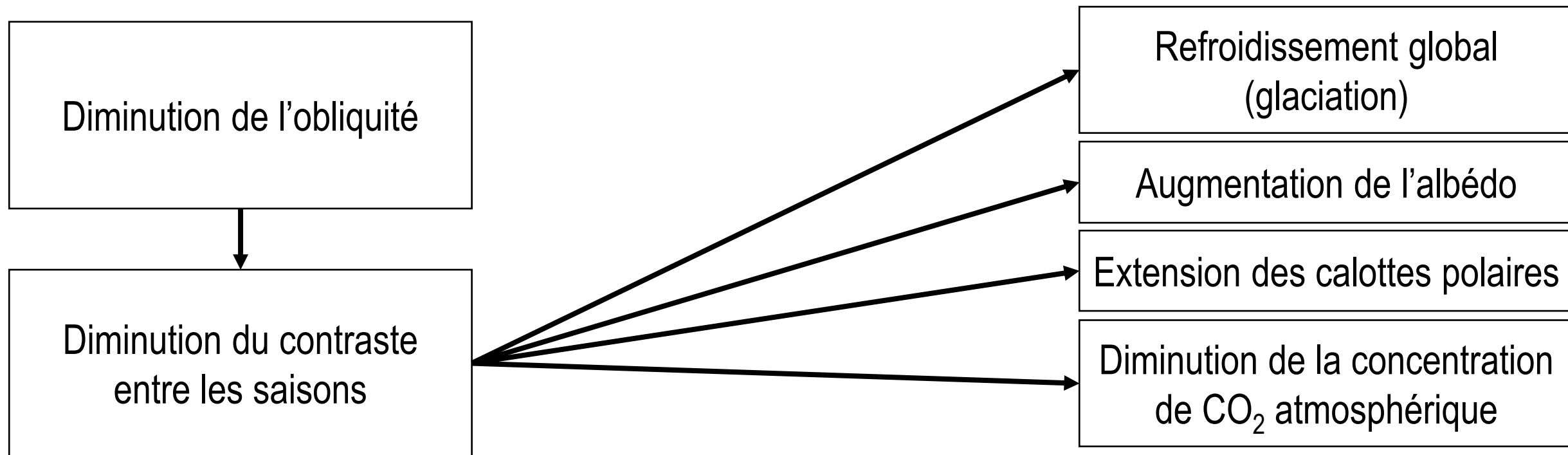
Emissions (GtC/an)



Température (°C)

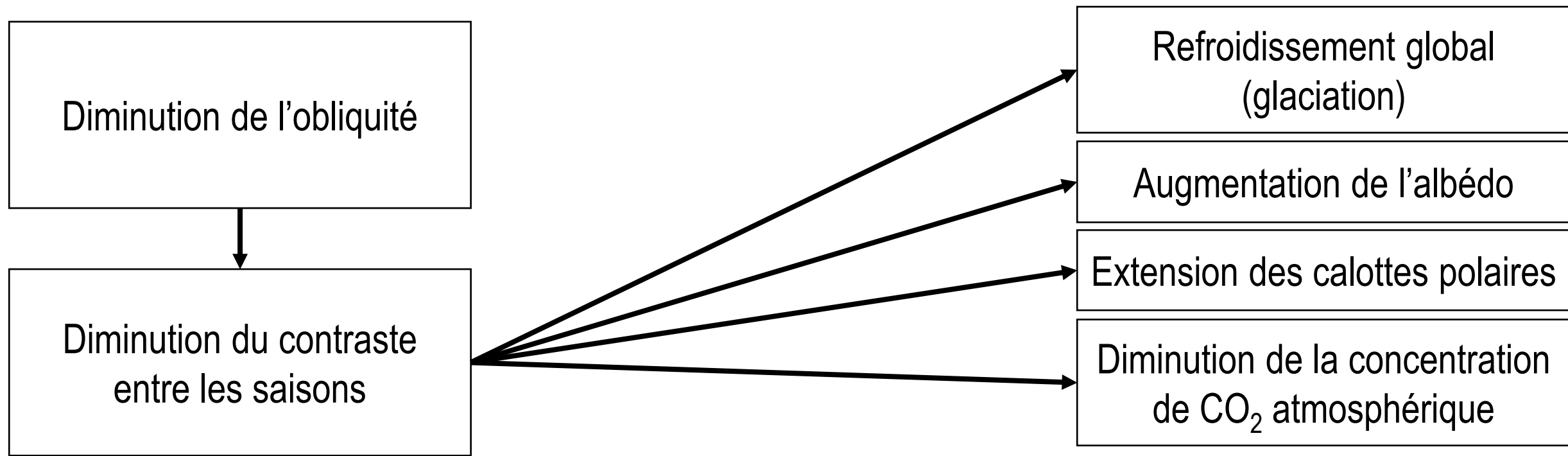


— Obliquité minimum
— Obliquité maximum



Problème : comment expliquer que la diminution de l'obliquité et donc la diminution du contraste entre les saisons provoque le refroidissement ?

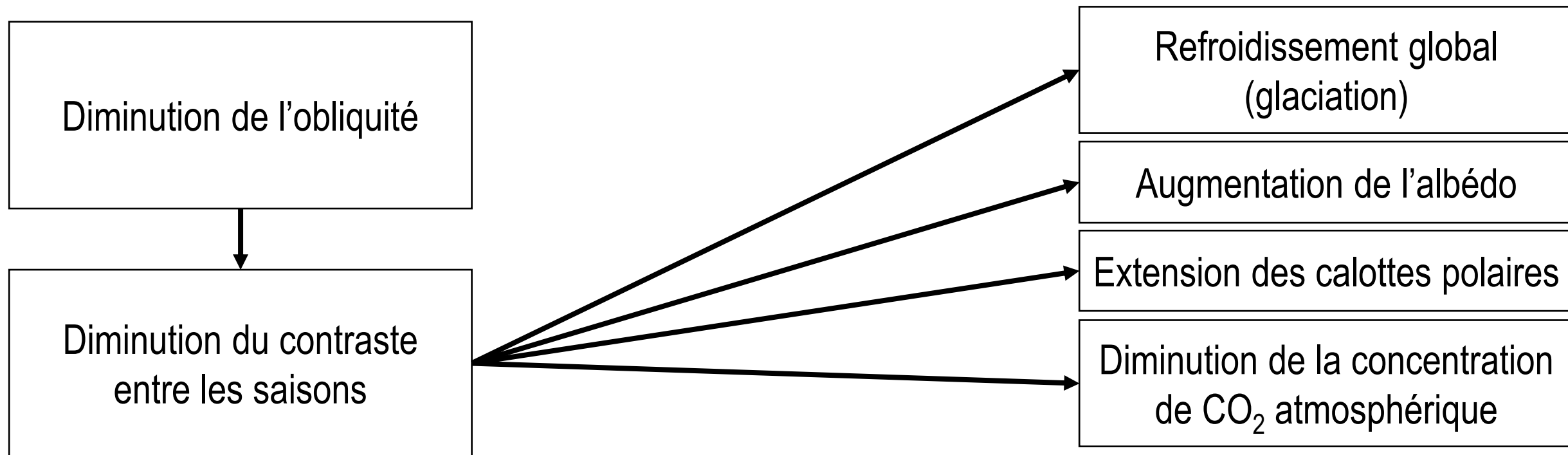
Hypothèse :



Problème : comment expliquer que la diminution de l'obliquité et donc la diminution du contraste entre les saisons provoque le refroidissement ?

Hypothèse :

Diminution de l'obliquité → Diminution du contraste entre les saisons → Augmentation des surface de glace → Augmentation de l'albédo → Augmentation de la perte d'énergie → Refroidissement (glaciation)



Problème : comment expliquer que la diminution de l'obliquité et donc la diminution du contraste entre les saisons provoque le refroidissement ?

Hypothèse :

Diminution de l'obliquité → Augmentation de l'albédo → Refroidissement (glaciation)

Problème : comment expliquer que la diminution de l'obliquité et donc la diminution du contraste entre les saisons provoque le refroidissement ?

Hypothèse : Diminution de l'obliquité → Augmentation de l'albédo → Refroidissement (glaciation)

Simulations à réaliser à l'aide du modèle :

Problème : comment expliquer que la diminution de l’obliquité et donc la diminution du contraste entre les saisons provoque le refroidissement ?

Hypothèse : Diminution de l’obliquité → Augmentation de l’albédo → Refroidissement (glaciation)

Simulations à réaliser à l’aide du modèle :

Simulation 1 (contrôle)	Simulation 2
Fixer l’obliquité au minimum	Fixer l’obliquité au minimum + Albédo constant

Problème : comment expliquer que la diminution de l'obliquité et donc la diminution du contraste entre les saisons provoque le refroidissement ?

Hypothèse : Diminution de l'obliquité → Augmentation de l'albédo → Refroidissement (glaciation)

Simulations à réaliser à l'aide du modèle :

Simulation 1 (contrôle)	Simulation 2
Fixer l'obliquité au minimum	Fixer l'obliquité au minimum + Albédo constant

Résultats attendus :

Problème : comment expliquer que la diminution de l'obliquité et donc la diminution du contraste entre les saisons provoque le refroidissement ?

Hypothèse : Diminution de l'obliquité → Augmentation de l'albédo → Refroidissement (glaciation)

Simulations à réaliser à l'aide du modèle :

Simulation 1 (contrôle)	Simulation 2
Fixer l'obliquité au minimum	Fixer l'obliquité au minimum + Albédo constant

Résultats attendus :

Refroidissement	Absence de refroidissement
-----------------	----------------------------

Obliquité

Régler l'obliquité

(en °)

- ☐ Obliquité actuelle (23.5°)
- ☒ Valeur minimale (21.8°)
- ☐ Valeur maximale (24.4°)
- ☐ Autre valeur

Obliquité

Régler l'obliquité

(en °)

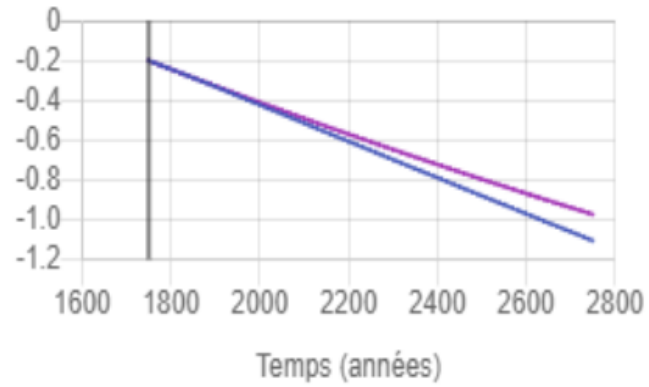
- ☐ Obliquité actuelle (23.5°)
- ☒ Valeur minimale (21.8°)
- ☐ Valeur maximale (24.4°)
- ☐ Autre valeur

Albédo de la planète

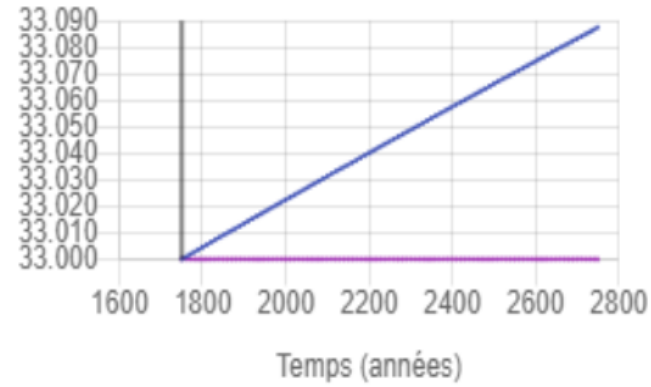
Régler l'albédo de la planète

- ☐ L'albédo est calculé par SimClimat en fonction de la température, ce qui permet la rétroaction
- ☒ L'albédo reste constant à sa valeur actuelle (33%)
- ☐ L'albédo reste constant à sa valeur pré-industrielle (33%)
- ☐ L'albédo reste constant à sa valeur d'un sol (25%)
- ☐ L'albédo reste constant à sa valeur de la glace (90%)
- ☐ L'albedo reste constant à une autre valeur

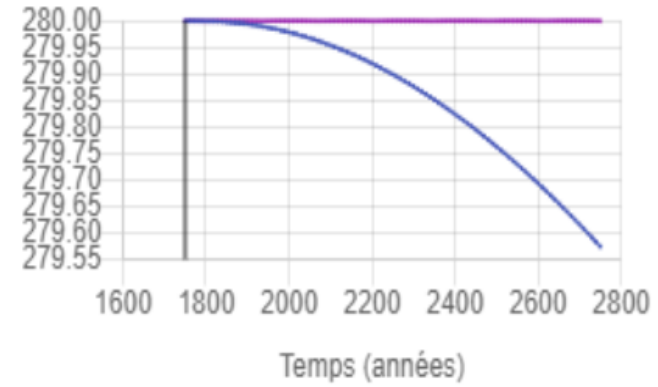
Niveau de la mer par rapport à l'époque pré-industrielle (m)



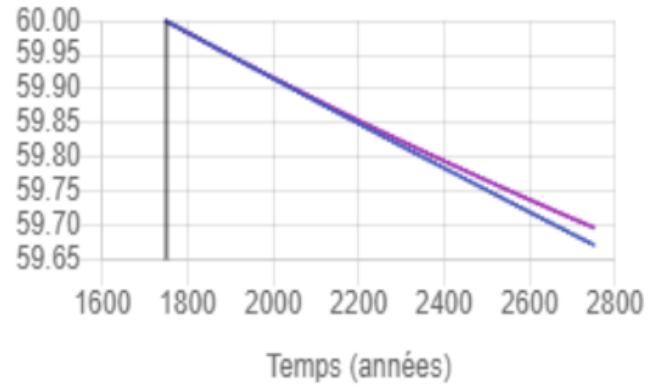
Albedo (%)



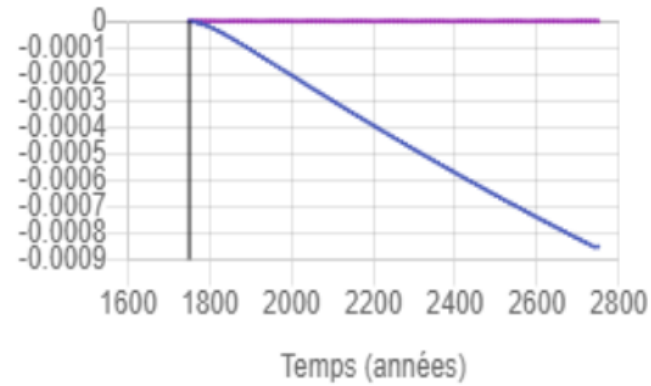
Concentration en CO_2 (ppm)



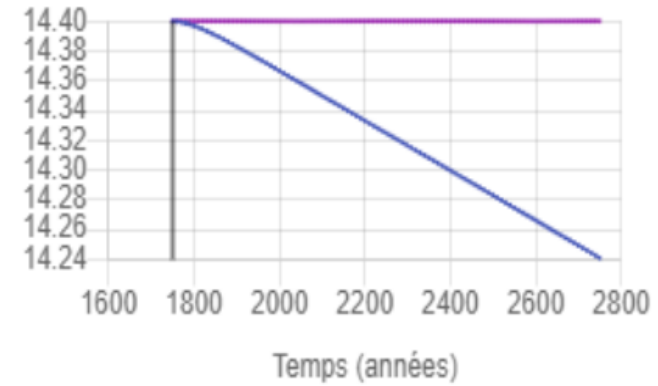
Latitude jusqu'à laquelle la calotte de l'Hémisphère Nord s'étend (°)



Emissions (GtC/an)



Température (°C)



- Obliquité minimum
- Obliquité minimum + albédo constant

Problème : comment expliquer que la diminution de l'obliquité et donc la diminution du contraste entre les saisons provoque le refroidissement ?

Hypothèse : Diminution de l'obliquité → Augmentation de l'albédo → Refroidissement (glaciation)

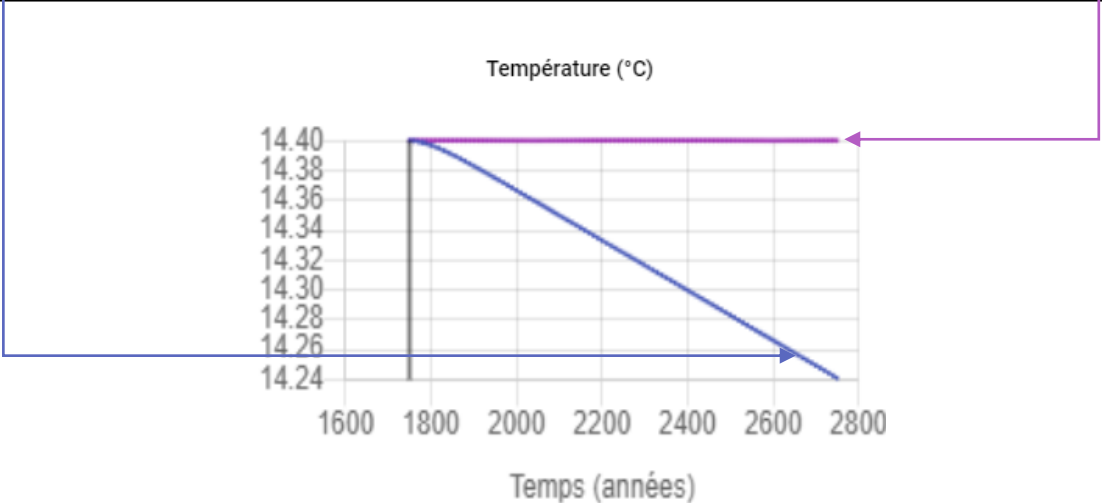
Simulations à réaliser à l'aide du modèle :

Simulation 1 (contrôle)	Simulation 2
Fixer l'obliquité au minimum	Fixer l'obliquité au minimum + Albédo constant

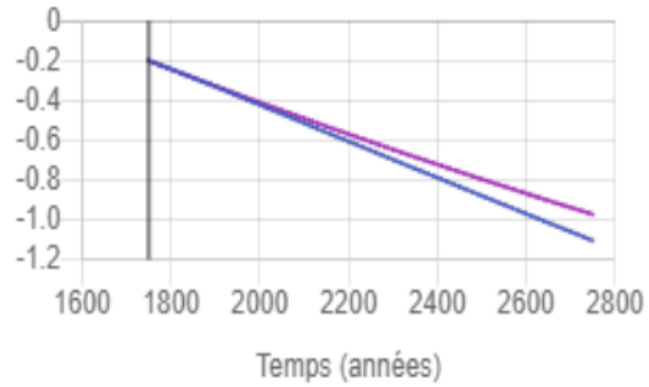
Résultats attendus :

Refroidissement	Absence de refroidissement
-----------------	----------------------------

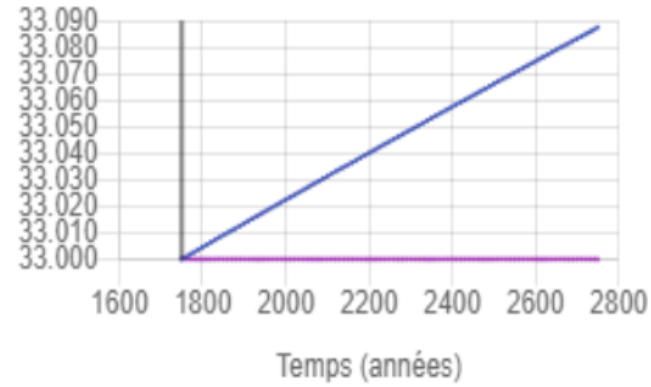
Résultats observés :



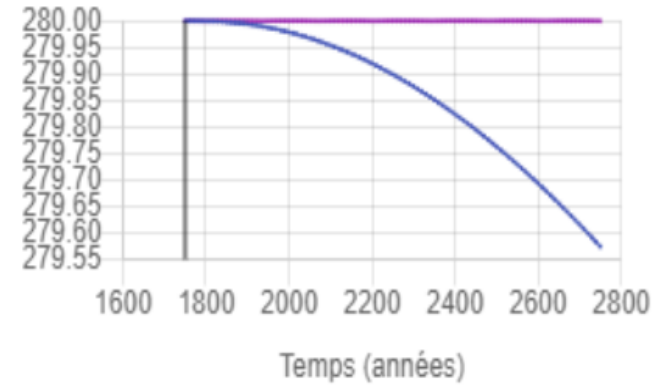
Niveau de la mer par rapport à l'époque pré-industrielle (m)



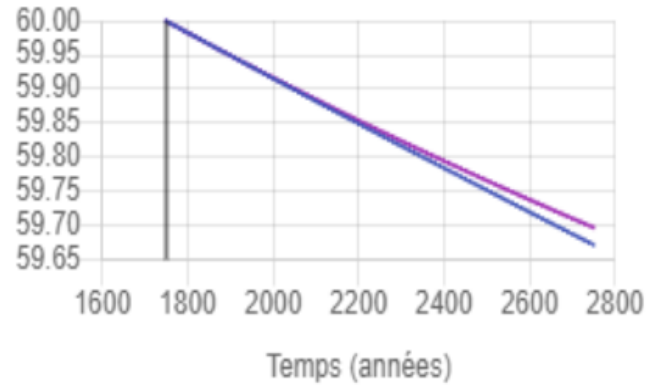
Albedo (%)



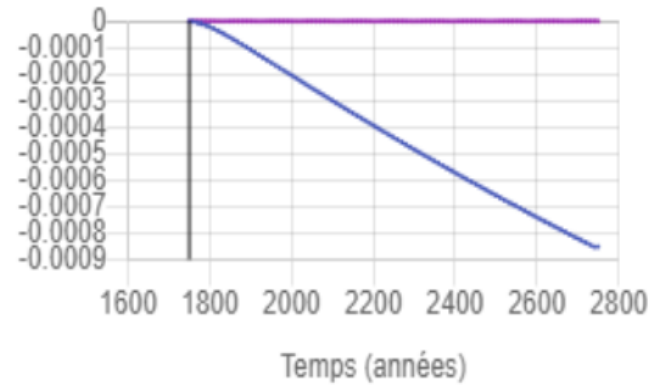
Concentration en CO_2 (ppm)



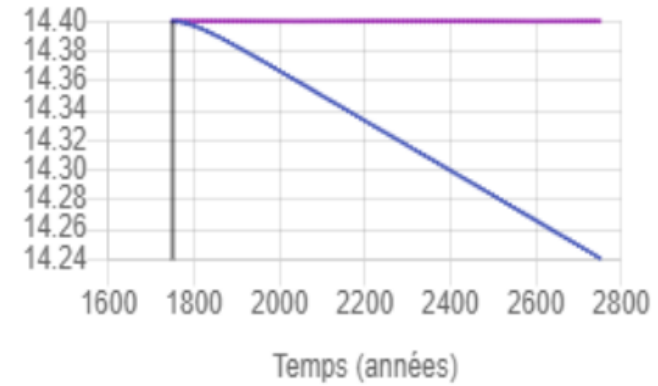
Latitude jusqu'à laquelle la calotte de l'Hémisphère Nord s'étend (°)



Emissions (GtC/an)



Température (°C)



- Obliquité minimum
- Obliquité minimum + albédo constant

Diminution de l'obliquité

Diminution de l'obliquité



Diminution du contraste entre
les saisons

Diminution de l'obliquité



Diminution du contraste entre
les saisons



Extension des calottes polaires

Diminution de l'obliquité



Diminution du contraste entre
les saisons



Extension des calottes polaires



Augmentation de l'albédo

Diminution de l'obliquité



Diminution du contraste entre
les saisons



Extension des calottes polaires



Augmentation de l'albédo



Plus d'énergie perdue par la
Terre

Diminution de l'obliquité



Diminution du contraste entre
les saisons



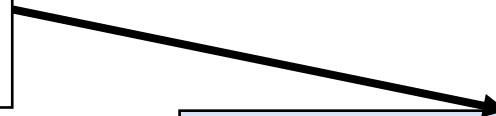
Extension des calottes polaires



Augmentation de l'albédo



Plus d'énergie perdue par la
Terre



Refroidissement global
(période glaciaire)

Diminution de l'obliquité



Diminution du contraste entre
les saisons



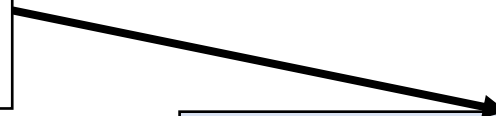
Extension des calottes polaires



Augmentation de l'albédo

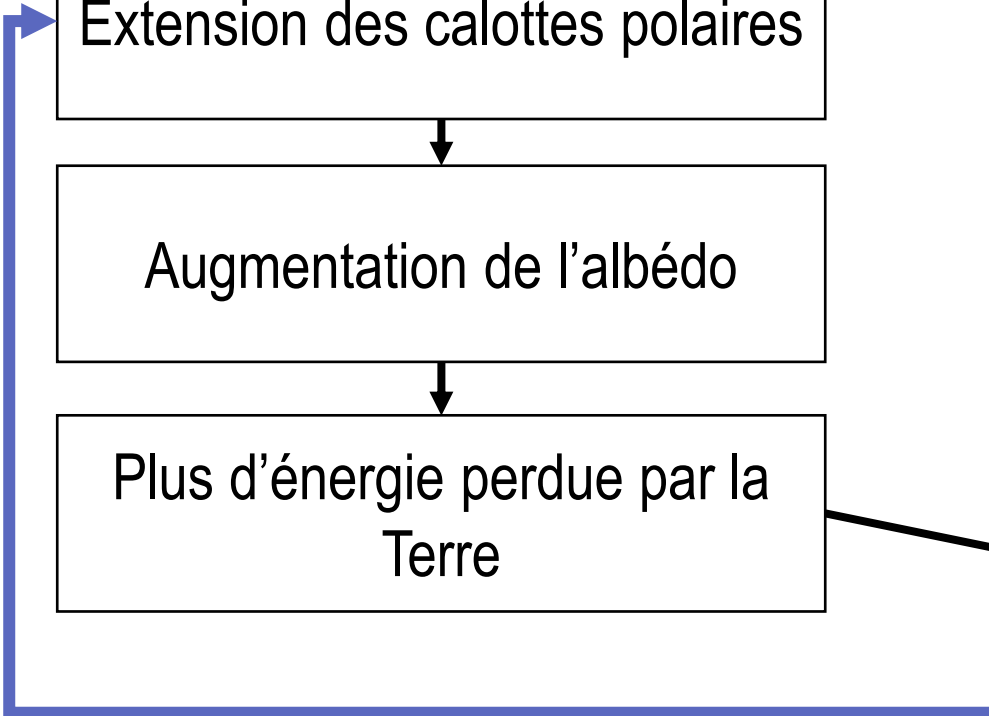


Plus d'énergie perdue par la
Terre



Refroidissement global
(période glaciaire)

Rétroaction positive



Diminution de l'obliquité



Diminution du contraste entre
les saisons



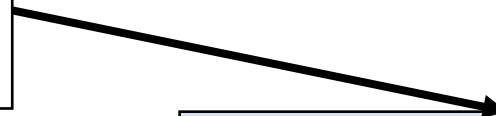
Extension des calottes polaires



Augmentation de l'albédo

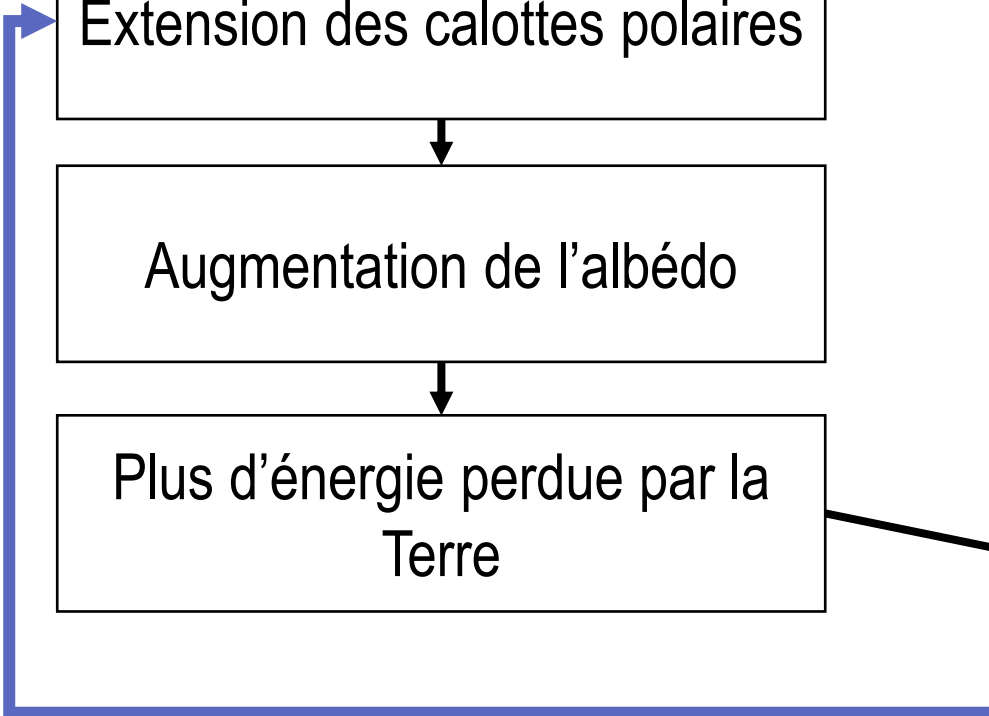


Plus d'énergie perdue par la
Terre

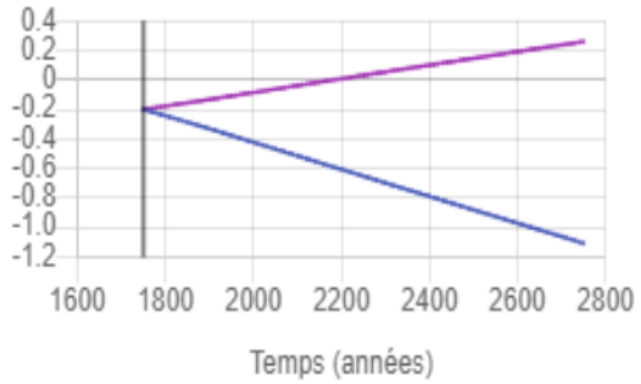


Refroidissement global
(période glaciaire)

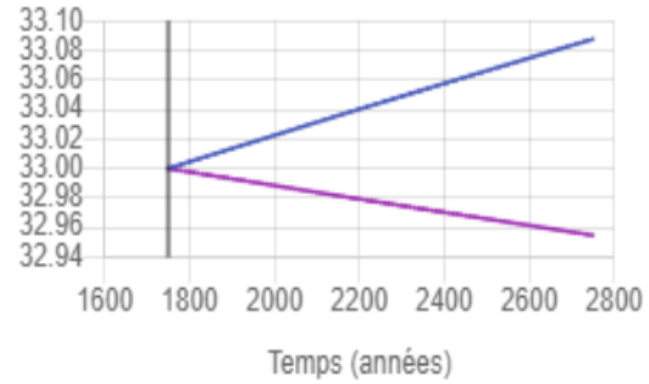
Rétroaction positive



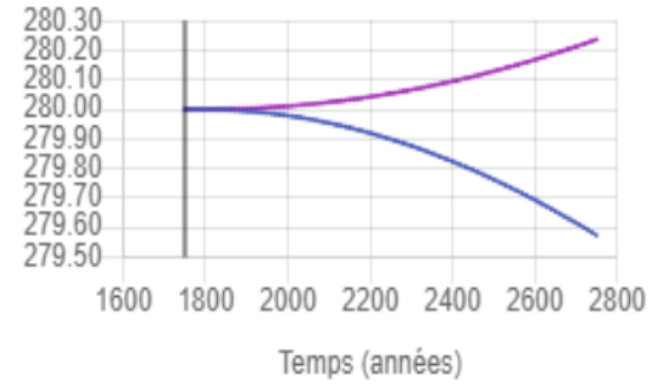
Niveau de la mer par rapport à l'époque pré-industrielle (m)



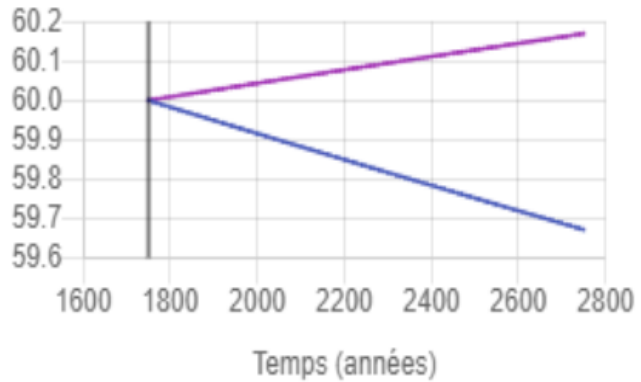
Albedo (%)



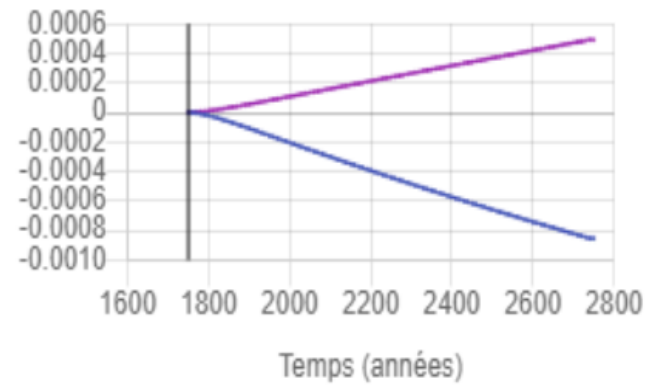
Concentration en CO₂ (ppm)



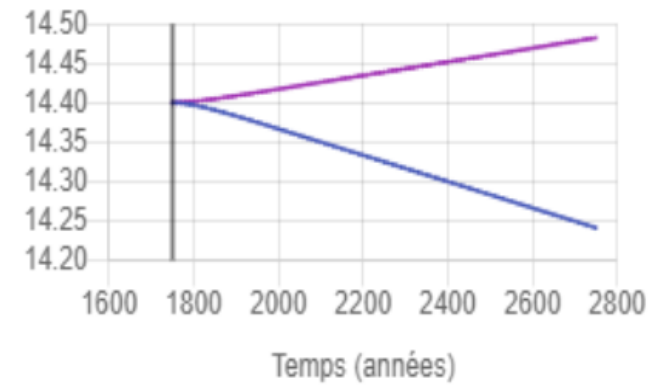
Latitude jusqu'à laquelle la calotte de l'Hémisphère Nord s'étend (°)



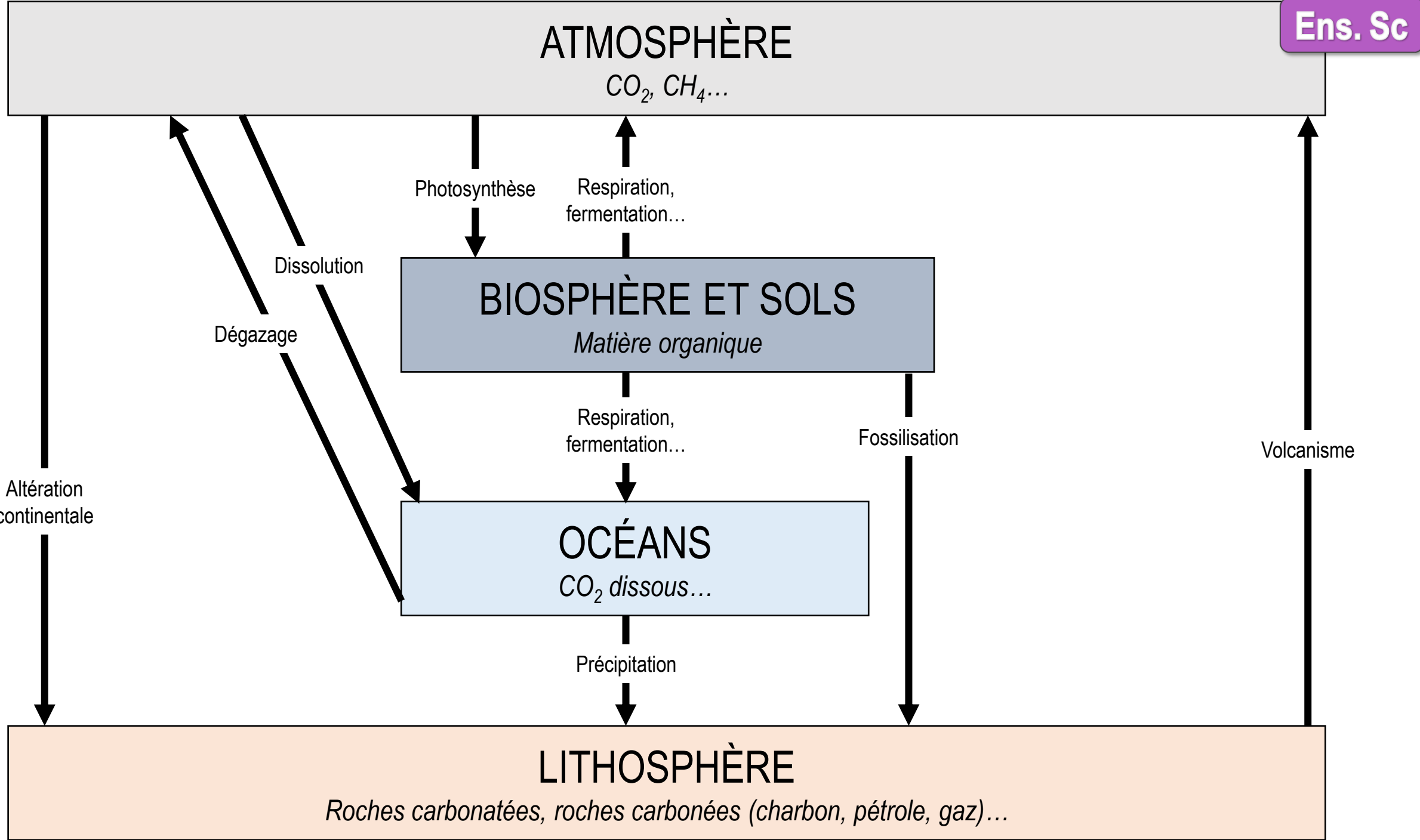
Emissions (GtC/an)



Température (°C)



— Obliquité minimum
— Obliquité maximum



Diminution de l'obliquité



Diminution du contraste entre
les saisons



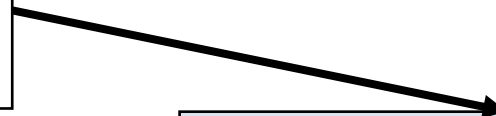
Extension des calottes polaires



Augmentation de l'albédo

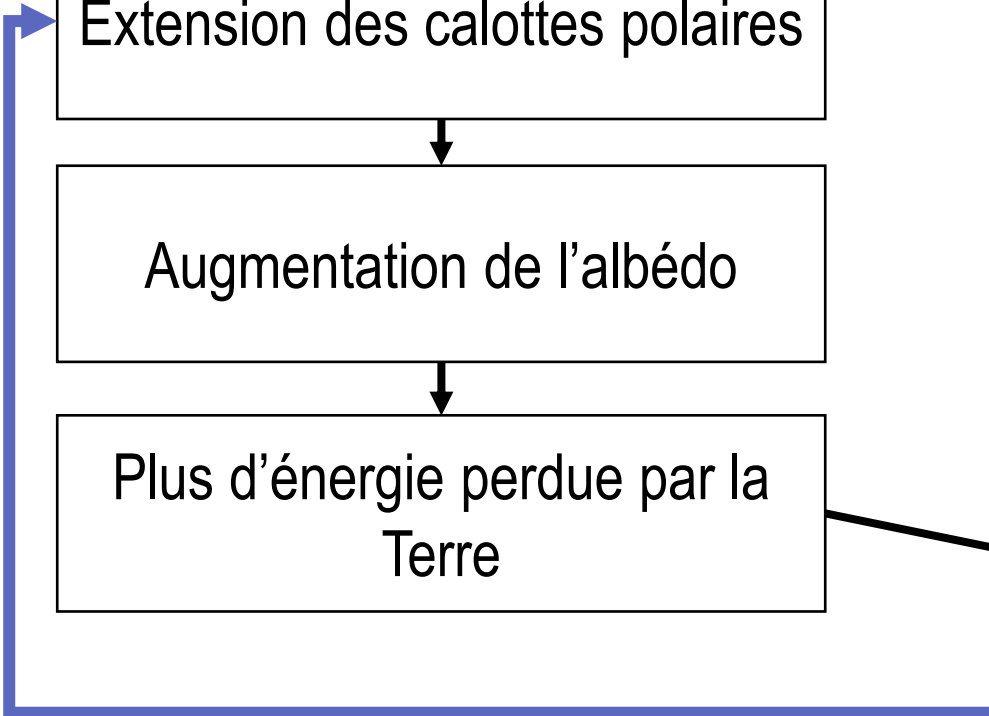


Plus d'énergie perdue par la
Terre



Refroidissement global
(période glaciaire)

Rétroaction positive



Diminution de l'obliquité



Diminution du contraste entre
les saisons



Extension des calottes polaires



Augmentation de l'albédo



Plus d'énergie perdue par la
Terre



Refroidissement global
(période glaciaire)

Augmentation de la solubilité
du CO₂ dans l'océan



Rétroaction positive

Rétroaction positive

Diminution de l'obliquité



Diminution du contraste entre les saisons



Extension des calottes polaires



Augmentation de l'albédo



Plus d'énergie perdue par la Terre



Refroidissement global
(période glaciaire)

Rétroaction positive

Augmentation de la solubilité
du CO₂ dans l'océan



Piégeage d'une grande
quantité de CO₂ dans l'océan

Rétroaction positive



Diminution de l'obliquité



Diminution du contraste entre les saisons



Extension des calottes polaires



Augmentation de l'albédo



Plus d'énergie perdue par la Terre



Refroidissement global
(période glaciaire)

Rétroaction positive

Augmentation de la solubilité
du CO₂ dans l'océan



Piégeage d'une grande
quantité de CO₂ dans l'océan



Diminution de la
concentration de CO₂
atmosphérique

Rétroaction positive

Diminution de l'obliquité



Diminution du contraste entre les saisons



Extension des calottes polaires



Augmentation de l'albédo



Plus d'énergie perdue par la Terre



Refroidissement global
(période glaciaire)

Rétroaction positive

Augmentation de la solubilité
du CO_2 dans l'océan



Piégeage d'une grande
quantité de CO_2 dans l'océan



Diminution de la
concentration de CO_2
atmosphérique



Diminution de l'effet de serre

Rétroaction positive



Diminution de l'obliquité



Diminution du contraste entre les saisons



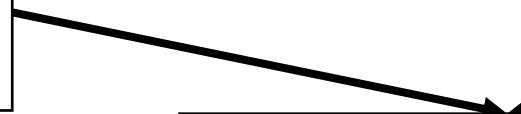
Extension des calottes polaires



Augmentation de l'albédo



Plus d'énergie perdue par la Terre



Refroidissement global
(période glaciaire)

Rétroaction positive

Augmentation de la solubilité
du CO₂ dans l'océan



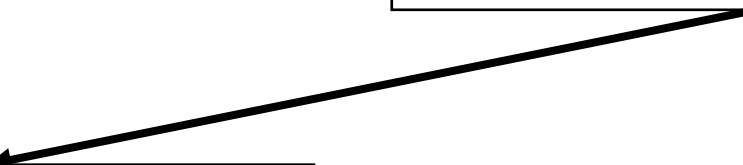
Piégeage d'une grande
quantité de CO₂ dans l'océan



Diminution de la
concentration de CO₂
atmosphérique



Diminution de l'effet de serre



Rétroaction positive



Diminution de la valeur des
paramètres orbitaux



Diminution du contraste entre
les saisons



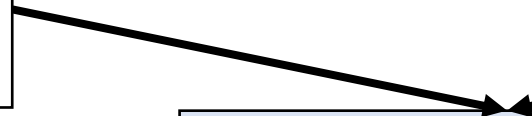
Extension des calottes polaires



Augmentation de l'albédo



Plus d'énergie perdue par la
Terre



Refroidissement global
(période glaciaire)

Rétroaction positive

Augmentation de la solubilité
du CO₂ dans l'océan



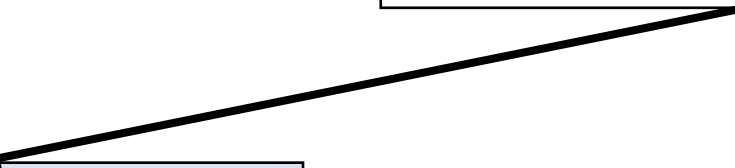
Piégeage d'une grande
quantité de CO₂ dans l'océan



Diminution de la
concentration de CO₂
atmosphérique



Diminution de l'effet de serre



Rétroaction positive



Augmentation de la valeur des paramètres orbitaux



Augmentation du contraste entre les saisons



Diminution de la surface des calottes polaires



Diminution de l'albédo



Moins d'énergie perdue par la Terre



Diminution de la solubilité du CO_2 dans l'océan



Dégazage du CO_2 océanique dans l'atmosphère



Augmentation de la concentration de CO_2 atmosphérique



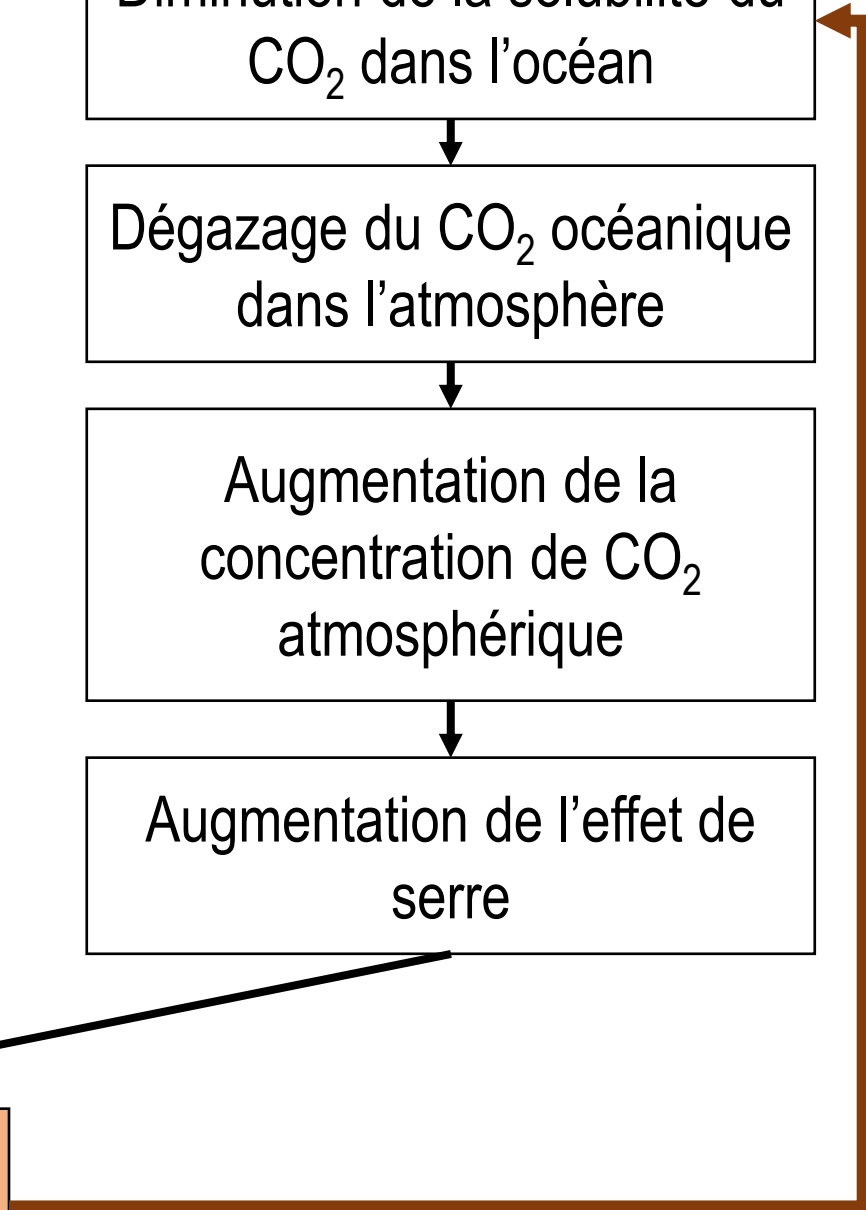
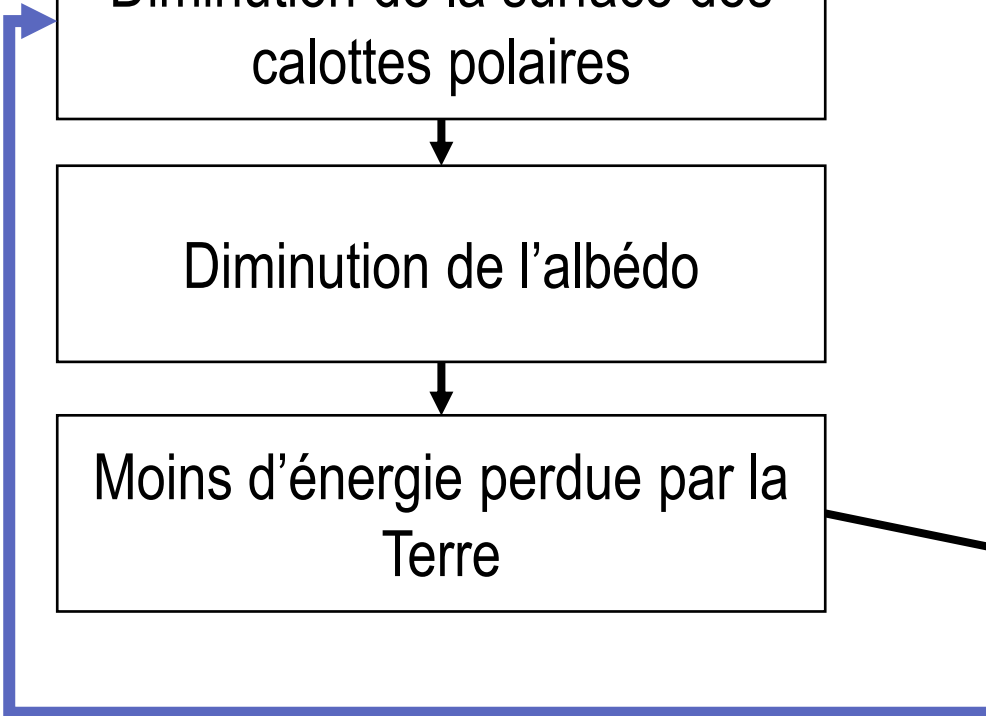
Augmentation de l'effet de serre



Réchauffement global
(période interglaciaire)

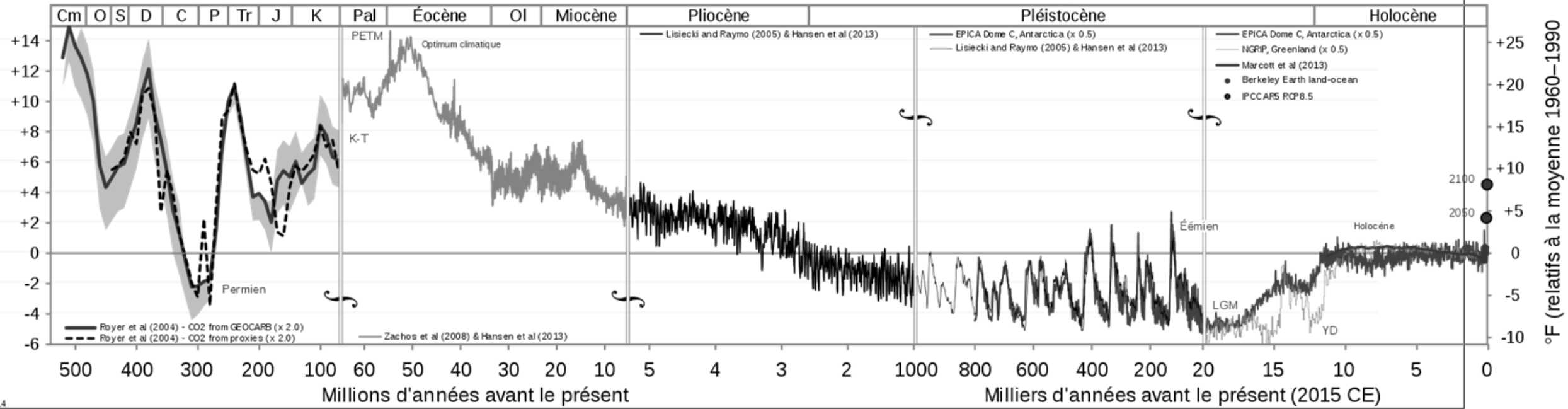
Rétroaction positive

Rétroaction positive



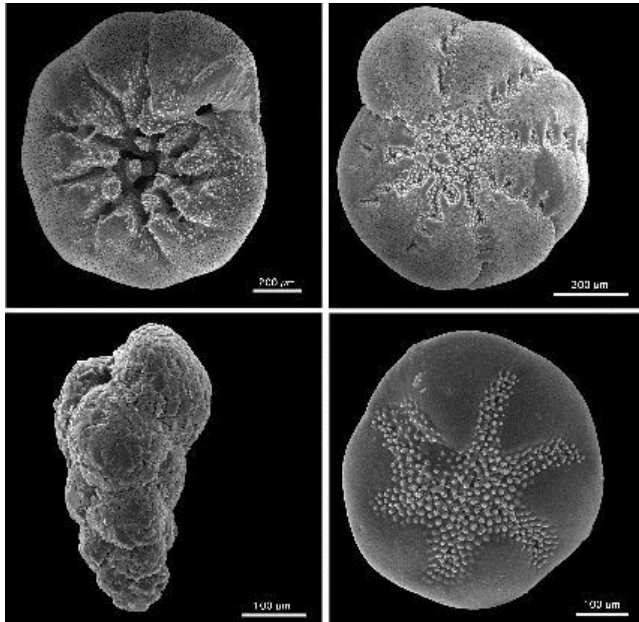
Paléotempératures sur Terre

°C (relatifs à la moyenne 1960–1990)



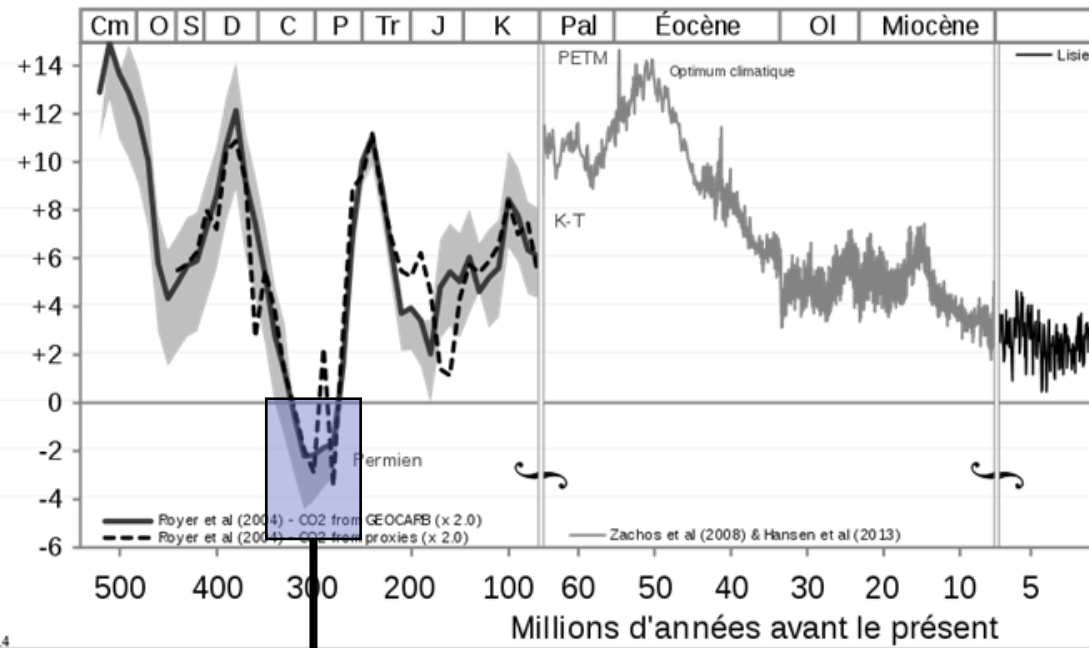
°F (relatifs à la moyenne 1960–1990)

GSF 2014

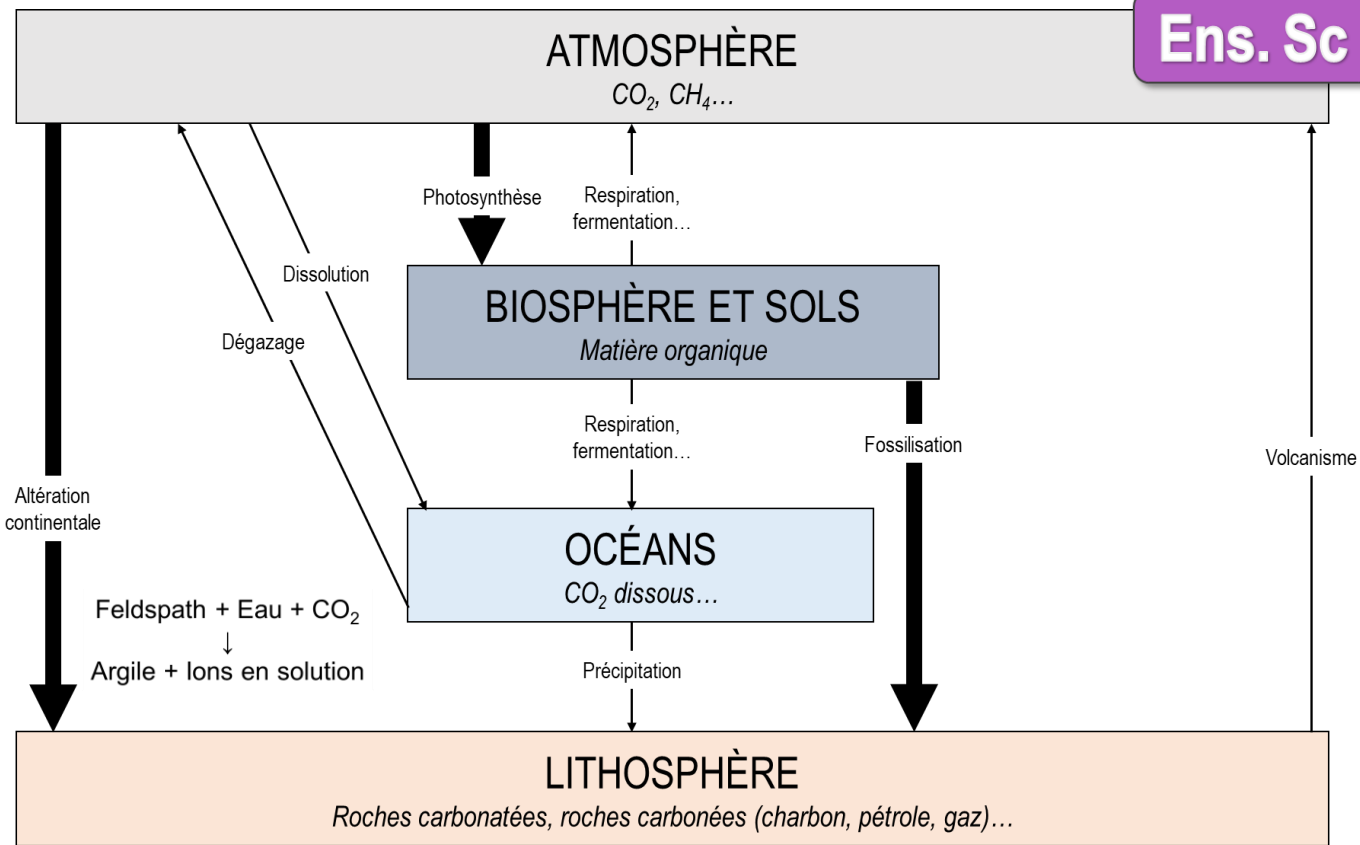


Paléotemp

°C (relatifs à la moyenne 1960–1990)



GSF 2014



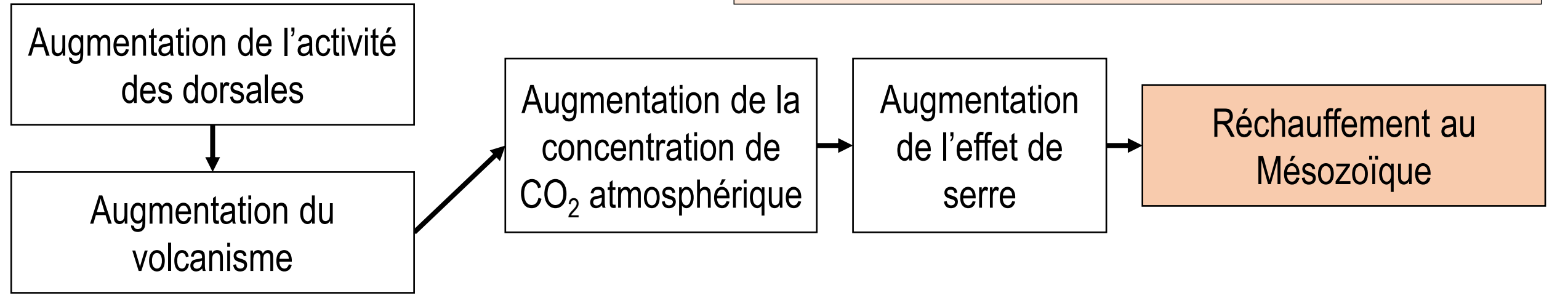
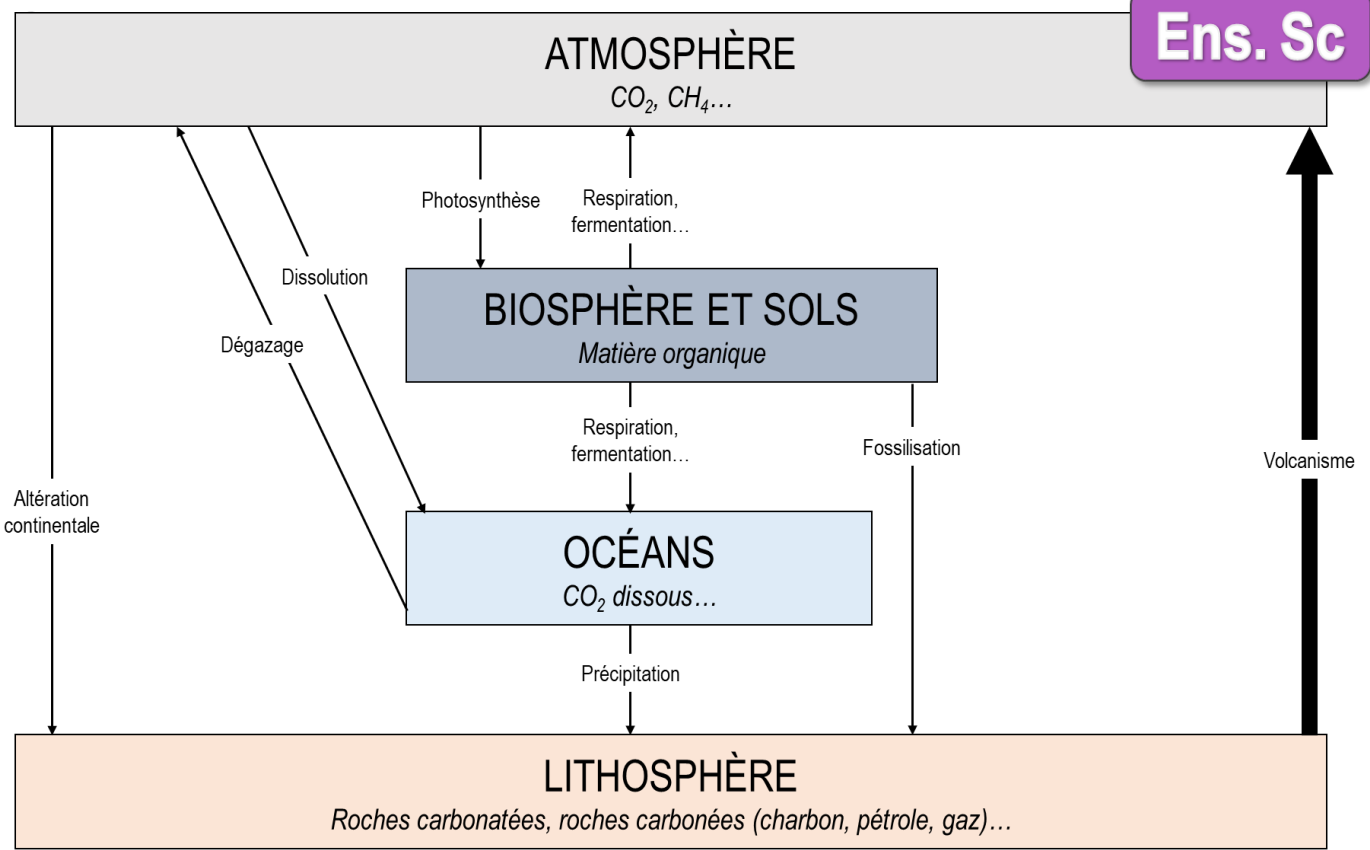
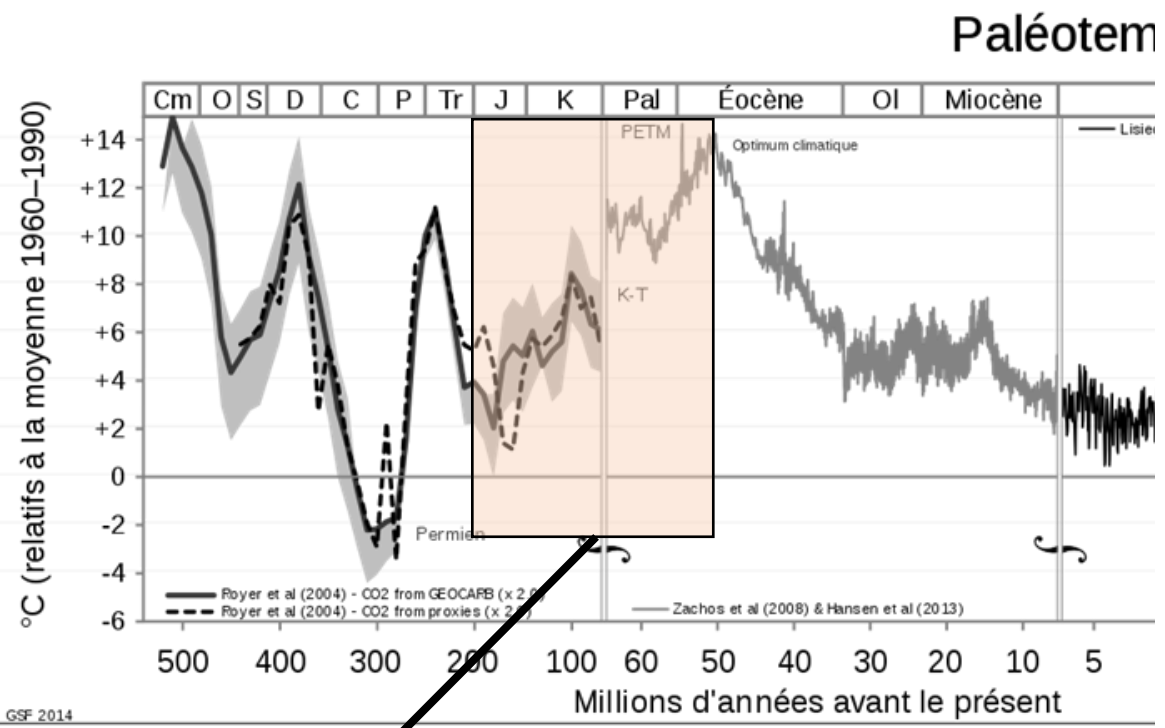
Altération importante de la chaîne hercynienne

Fossilisation importante de matière organique

Diminution de la concentration de CO₂ atmosphérique

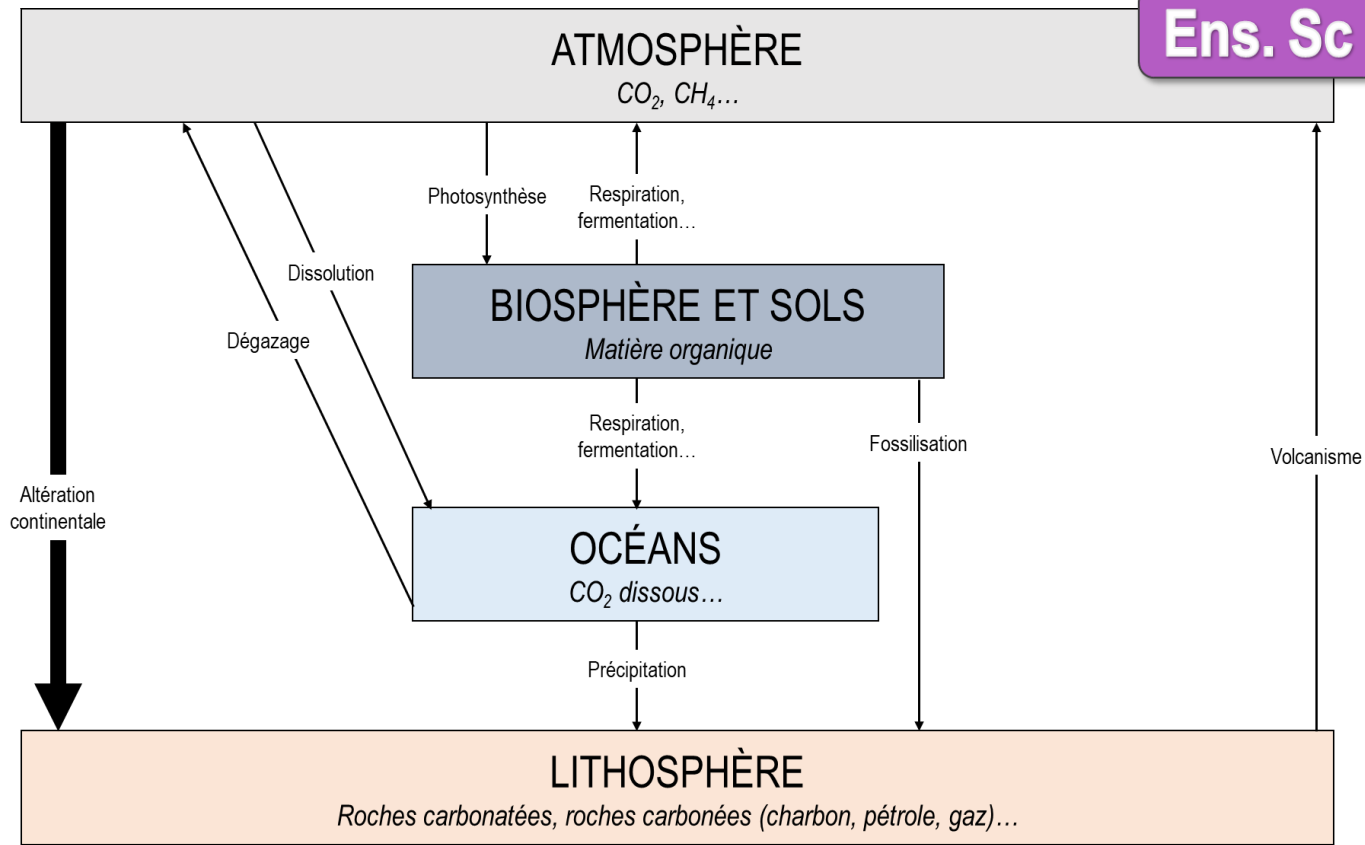
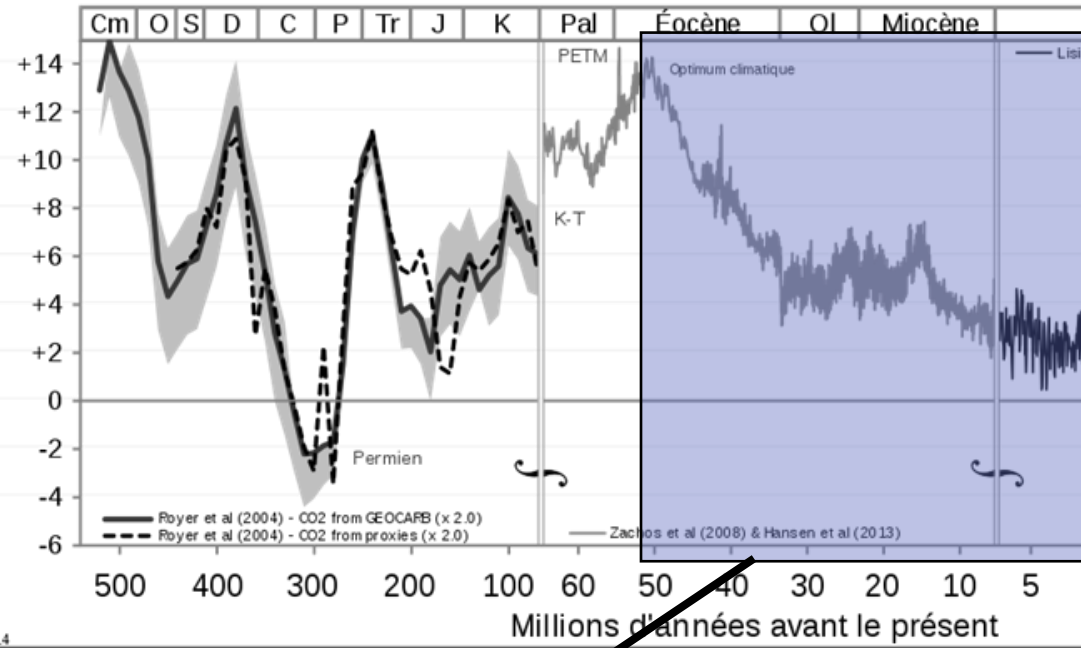
Diminution de l'effet de serre

Refroidissement au Paléozoïque



Paléotem

°C (relatifs à la moyenne 1960–1990)



Altération importante des chaînes de montagnes Tertiaire

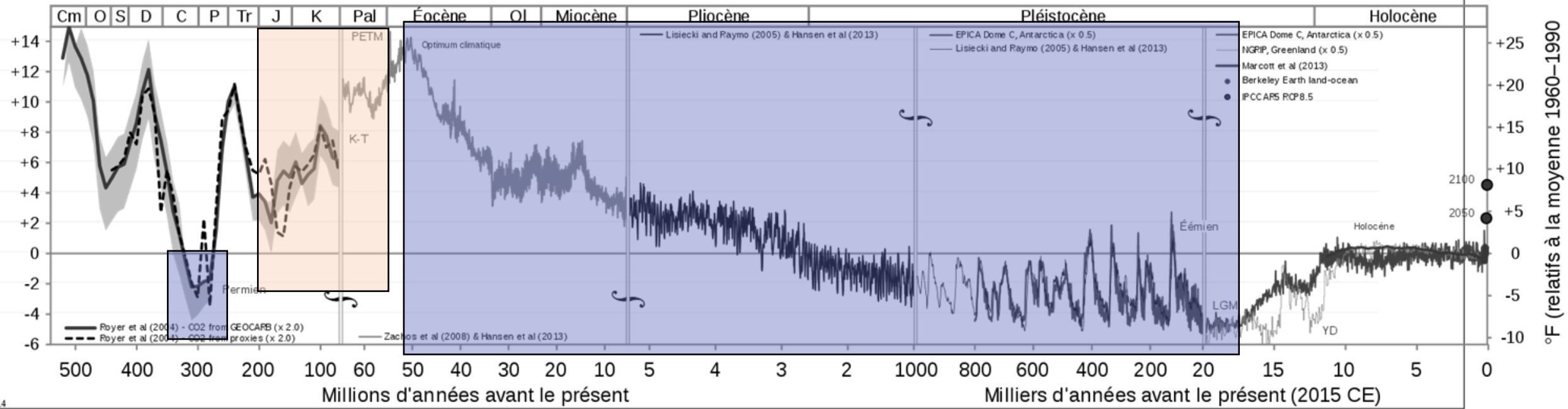
Diminution de la concentration de CO₂ atmosphérique

Diminution de l'effet de serre

Refroidissement au Cénozoïque

Paléotempératures sur Terre

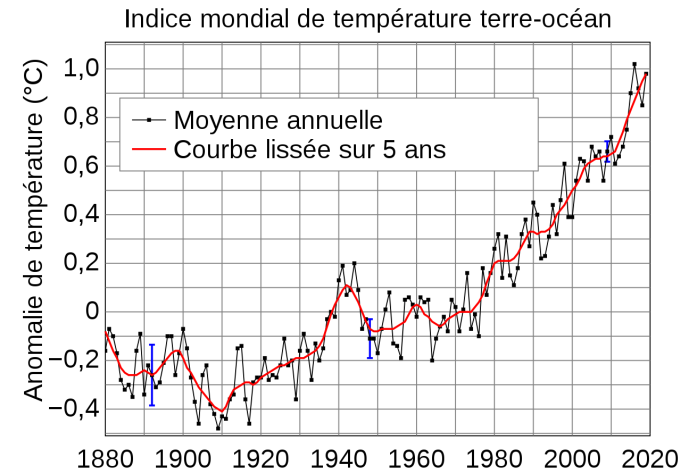
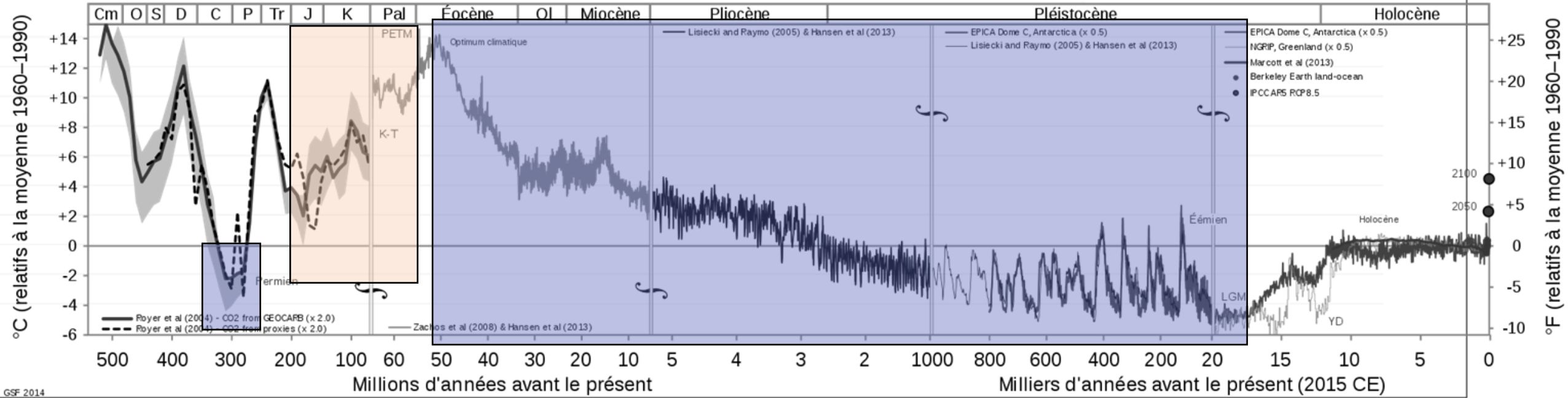
°C (relatifs à la moyenne 1960–1990)



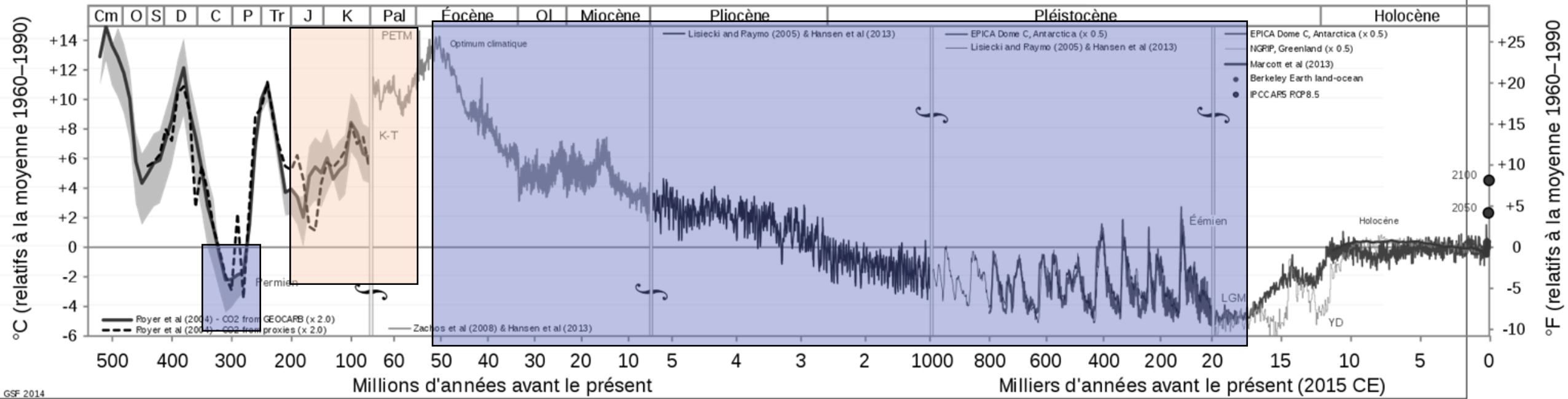
GSF 2014

SIMCLIMAT

Paléotempératures sur Terre



Paléotempératures sur Terre



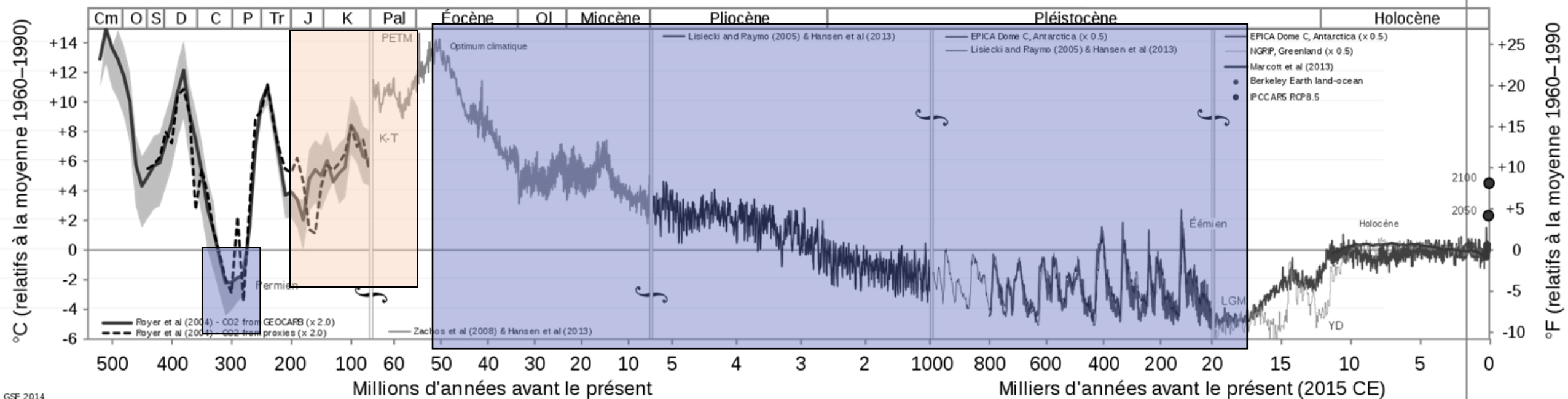
Reconstitution des climats :

Indices de différentes natures

Identification des causes des variations climatiques :

Implique la compréhension du fonctionnement du système climatique

Paléotempératures sur Terre



Reconstitution des climats :

Indices de différentes natures

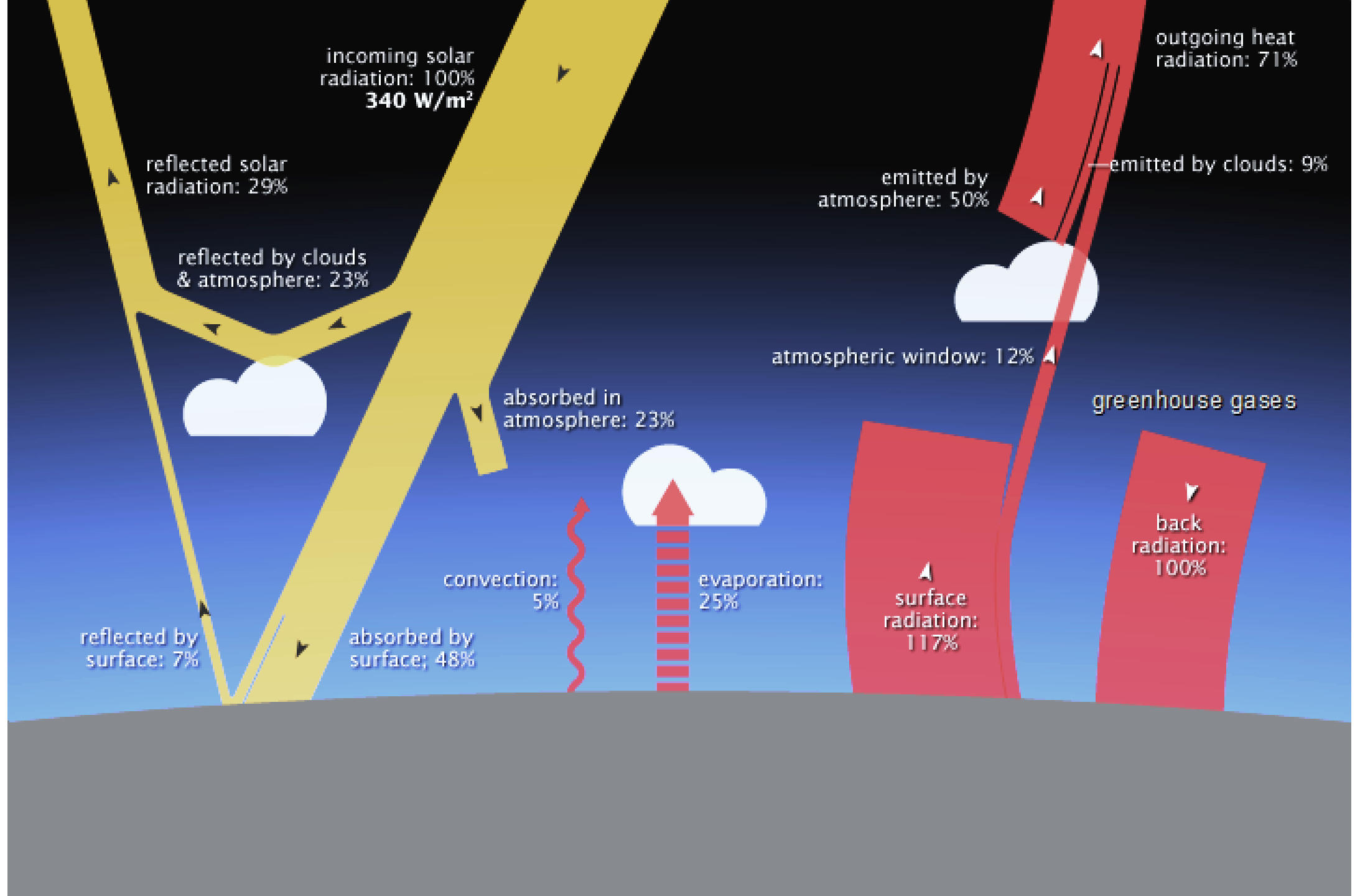
Identification des causes des variations climatiques :

Implique la compréhension du fonctionnement du système climatique

Importance des modèles climatiques

Pour le passé
Pour le futur...

Documents complémentaires



ATMOSPHÈRE

CO_2 , CH_4 ...

Photosynthèse

Respiration,
fermentation...

Déforestation,
utilisation des sols...

Dissolution

Dégazage

BIOSPHERE ET SOLS

Matière organique

Respiration,
fermentation...

Fossilisation

OCÉANS

CO_2 dissous...

Précipitation

LITHOSPHERE

Roches carbonatées, roches carbonées (charbon, pétrole, gaz)...

Altération
continentale

Fabrication
de ciment

Combustion

Volcanisme

Diaporama conçu par Mathieu Rajchenbach à partir des ressources suivantes :

Température depuis 1880 :

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e5/Diagram_showing_the_Earth%27s_energy_budget%2C_which_includes_the_greenhouse_effect_%28NASA%29.png

Paléotempératures depuis 540 Ma :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Pal%C3%A9oclimatologie#/media/Fichier:Pal%C3%A9otemp%C3%A9ratures.svg>

Températures et paramètres orbitaux depuis 800 000 ans : https://www.researchgate.net/figure/Cycles-glaciaires-interglaciaires-des-derniers-800-000-ans-en-fonction-du-temps-exprime_fig4_276385172

Carotte de glace : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9c/Icecore_4.jpg

Bloc erratique de Lyon : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fb/Lyon_1_-_Gros_caillou.jpg

Diagramme pollinique : http://edu.mnhn.fr/pluginfile.php/12823/mod_resource/content/6/cours_polven/co/III-E1-InterpAnal.html

Carotte de tourbe : http://svt.ac-dijon.fr/lithotheque/IMG/pdf/pontus_carotte.pdf

Obliquité : https://fr.wikipedia.org/wiki/Param%C3%A8tres_de_Milankovi%C4%87#/media/Fichier:Earth_obliquity_range.jpg

Excentricité : https://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles#/media/File:Eccentricity_zero.svg et https://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles#/media/File:Eccentricity_half.svg

Précession : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/df/Earth_precession.jpg

Terre : https://fr.wikipedia.org/wiki/Terre#/media/Fichier:Earth_by_the_EPIC_Team_on_21_April_2018.png

Modèle de climat : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b1/Global_Climate_Model.png

Supercalculateur : Météo France

Simclimat : <https://www.lmd.jussieu.fr/~crldm/simclimat/>

Foraminifère : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/10/Benthic_foraminifera.jpg

Tillite : <https://en.wikipedia.org/wiki/Till#/media/File:Geschiebemergel.JPG>

Bilan radiatif :

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e5/Diagram_showing_the_Earth%27s_energy_budget%2C_which_includes_the_greenhouse_effect_%28NASA%29.png