Document téléchargeable sur le site
https://www.svt-tanguy-jean.com/

Lycée Valentine LABBÉ
41 rue Paul DOUMER – BP 20226
59563 LA MADELEINE CEDEX
CLASSE PRÉPARATOIRE TB
(Technologie & Biologie)

ENSEIGNEMENT DE SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE (SVT)
°° SCIENCES DE LA TERRE °°

Partie 6. Géodynamique externe
>> Cours <<

Chapitre 26

Variations climatiques et réservoir de carbone atmosphérique

Objectifs : extraits du programme

Connaissances clefs à construire	Commentaires, capacités exigibles
6.4 Variations climatiques et réservoir de carbone atmosphérique	Ce chapitre permet de montrer le lien entre le réservoir de carbone atmosphérique et le climat. L'étude des variations climatiques passées sert de base pour aborder les changements climatiques futurs.
L'analyse d'archives géologiques et géochimiques permet de montrer des variations passées du climat.	- présenter des archives géologiques témoins des climats passés : dépôts glaciaires et témoins paléontologiques. - mettre en relation la composition isotopique en ^{18}O des glaces des inlandsis et les périodes glaciaires et interglaciaires. **Limite** : enregistrements du climat limités au dernier million d'années. - observer la rythmicité des périodes glaciaires et interglaciaires et la relier aux paramètres orbitaux de la Terre, **Limite** : la connaissance exhaustive des paramètres orbitaux n'est pas exigible.
Les variations de la teneur en CO_2 et CH_4 et la température sont interdépendantes et mettent en jeu des processus diversifiés : effet de serre, dégazage de l'océan…	- mettre en relation les paléotempératures et la teneur en CO_2 et CH_4 atmosphérique. - identifier l'effet modérateur et/ou amplificateur de l'albédo et de l'effet de serre.
La modélisation de ces différentes interactions permet d'appréhender l'évolution du climat en intégrant les perturbations anthropiques.	- expliciter les difficultés à modéliser et prédire l'évolution climatique. - évoquer des conséquences probables du réchauffement climatique.

Introduction

Climat :
Climat global :
Paléoclimats :

Comment le climat a-t-il évolué, en lien avec le carbone atmosphérique, au cours des temps géologiques (notamment le dernier million d'années) ? Comment le climat peut-il évoluer à l'avenir sous l'effet de l'action humaine ?

I. Les archives climatiques, témoins géologiques des variations climatiques

Capacités exigibles	✓ **Présenter** des archives géologiques témoins des climats passés : dépôts glaciaires et témoins paléontologiques. ✓ **Mettre en relation** la composition isotopique en ^{18}O des glaces des inlandsis et les périodes glaciaires et interglaciaires.

A. Les archives sédimentaires continentales : des dépôts à contrôle climatique

1. Les indices glaciaires et périglaciaires, indicateurs d'un climat froid

Climats froids : → Aujourd'hui : **hautes latitudes** / **hautes altitudes**

a. Les glaciers et les dépôts qu'ils génèrent immédiatement

α. Rappels : notion de glacier et typologie (glacier de montagne / calotte glaciaire / calotte polaire = *inlandsis*)

Glacier :
- Glaciers de type alpin : Ex.
- Calottes glaciaires : Ex.

Calottes polaires = *inlandsis* :

Ex.

Attention ! La **banquise** (***étendue de glace issue du gel de l'eau de mer***) n'est pas un ~~glacier~~.
Elle n'est pas située sur un ~~continent~~.

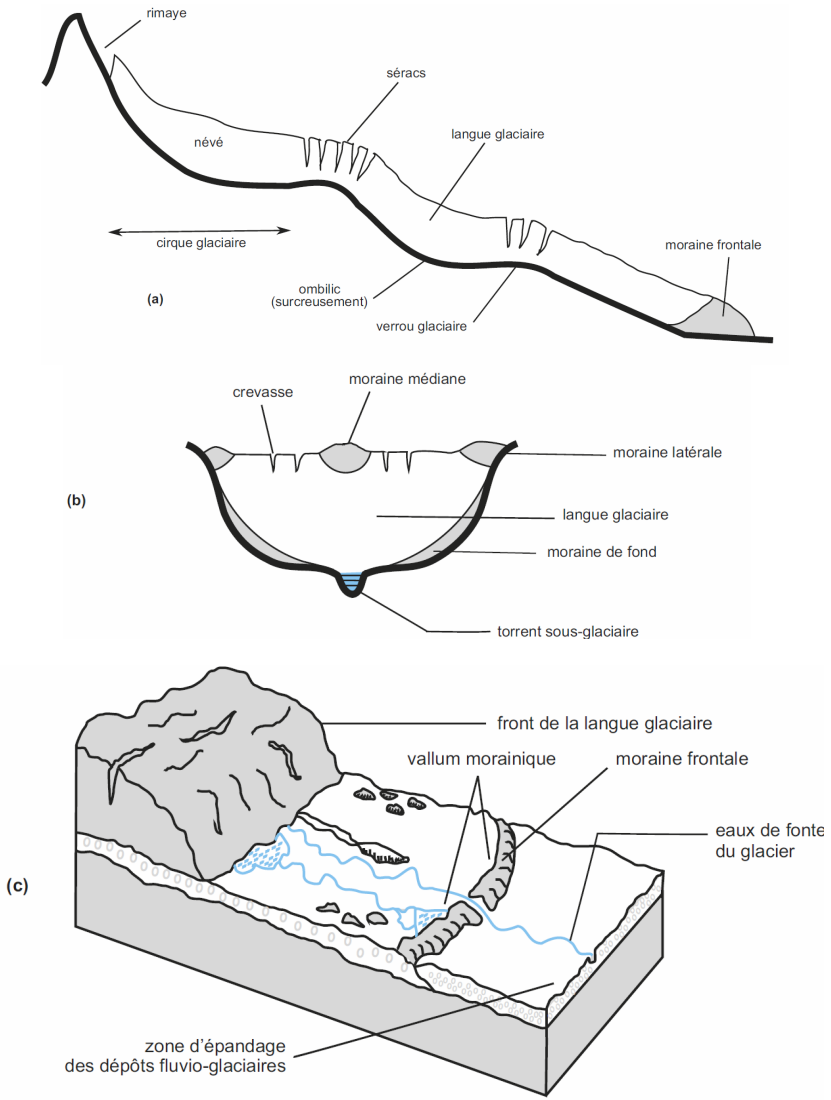


FIGURE 2. Glacier de type alpin : schéma simple. D'après PEYCRU *et al.* (2008)

FIGURE 4. Calotte polaire (= *inlandsis*) : schéma simple. D'après PEYCRU *et al.* (2008)

β. La production de moraines (à l'origine de tillites), de *dropstones* et de roches moutonnées par les glaciers

-

NB **tillites** :

-

-

Substrat :

b. En domaine périglaciaire : des dépôts variés

Domaines périglaciaires :

α. Des dépôts éoliens fréquents (de type lœss)

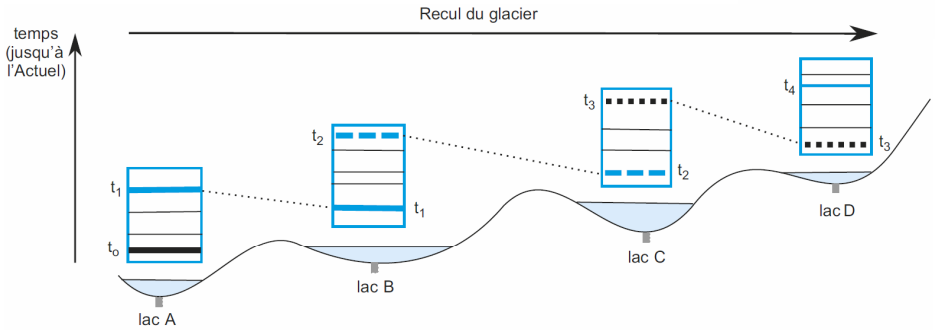
Vents catabatiques :

Lœss (= limon des plateaux) :

β. Des pergélisols polaires (à l'origine de sols polygonaux parfois fossilisés)

Pergélisols :
Sols polygonaux :

γ. Des dépôts lacustres périglaciaires : les varves



Datation du recul des glaciers.

Le profil longitudinal d'une vallée glaciaire présente 4 lacs (A à D) alimentés par les eaux de fonte du glacier, du plus bas (lac A le plus ancien) au plus élevé (lac D le plus récent). Au fond de ces lacs se sont formées des varves qui ont été extraites par carotage (rectangles gris). Chaque carotte montre (caisson correspondant) des années anormales t_i (ex. : période froide ou chaude anormalement longue) qui permettent de corréler les différentes carottes et de dater le recul du glacier dont les eaux de fonte alimentent les lacs successifs.

FIGURE 6. Les varves et la datation du recul des glaciers.
D'après PEYCRU *et al.* (2008)

Varves :
-
-

c. Les dépôts fluvio-glaciaires en aval des glaciers : les terrasses alluviales

Terrasses alluviales = fluviatiles :

Terrasses étagées :
Terrasses emboîtées :

(!) Les **terrasses** sont un des rares cas liés au **phénomène sédimentaire** où l'on peut observer des **dépôts antérieurs** situés au-dessus de **dépôts postérieurs** (existence d'exceptions).

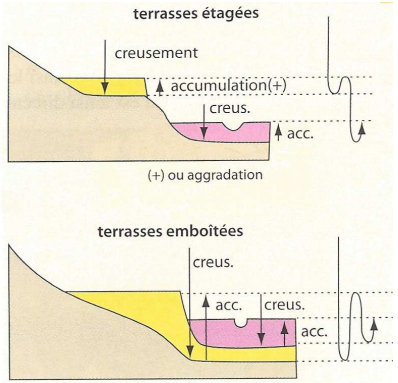


FIGURE 7. Terrasses étagées *vs.* emboîtées. D'après RENARD *et al.* (2018)

FIGURE 8. Les terrasses : une vision simple. D'après PEYCRU *et al.* (2008).

Terrasses et glaciations : le système fluvio-glaciaire

Les **terrasses** se sont généralement **mises en place sous l'effet des glaciations-déglaciations** qui ont eu lieu au **Quaternaire**.

- En **période glaciaire**, les **importants glaciers** alimentent de **grands cours d'eau** à **fort débit**, à **large lit** et à **dépôts important** (en raison d'une **forte érosion**) à cause notamment d'une ***fonte intense au printemps aboutissant à un très fort débit et de fortes crues*** (« **débâcle printanière** »).
- En **période interglaciaire**, les **petits glaciers** alimentent des **cours d'eau à moindre débit**, à **lit étroit** et à **dépôts moins nombreux** ; les fleuves **creusent** alors les importants **dépôts mis en place** lors des **périodes glaciaires**.

Cette ***alternance d'alluvionnement intense et de surcreusement par un cours d'eau due aux alternances des glaciations et déglaciations au cours de temps géologiques*** s'appelle le **système fluvio-glaciaire**.

2. Les indices indicateurs d'un climat chaud : kaolinites, cuirasse latéritique et évaporites

Climats chauds :

→

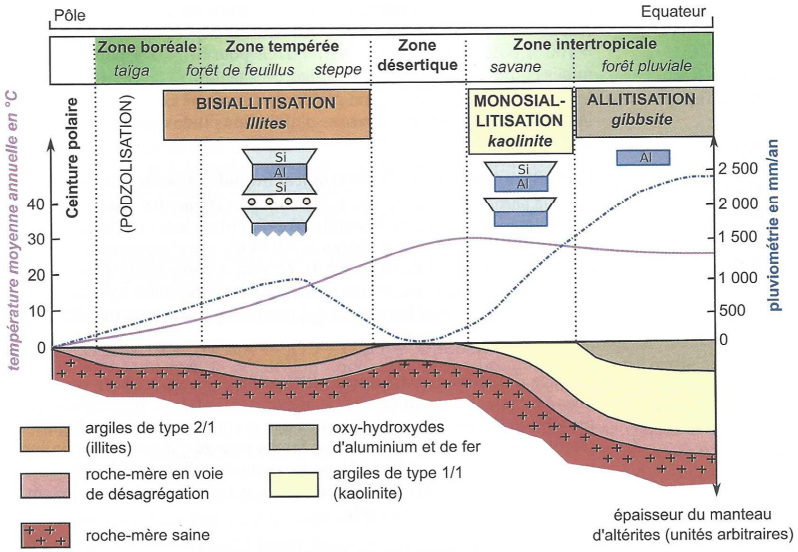


FIGURE 9. Climats actuels et formation d'argiles : diagramme de PEDRO (1968).
D'après PEYCRU *et al.* (2015).

→ **kaolinite**, **cuirasse latéritique**…
→ **évaporites** (*possible aussi en climat aride froid*)

B. Les archives paléontologiques : des fossiles indicateurs de conditions climatiques

1. Les fossiles océaniques : l'exemple des Foraminifères planctoniques

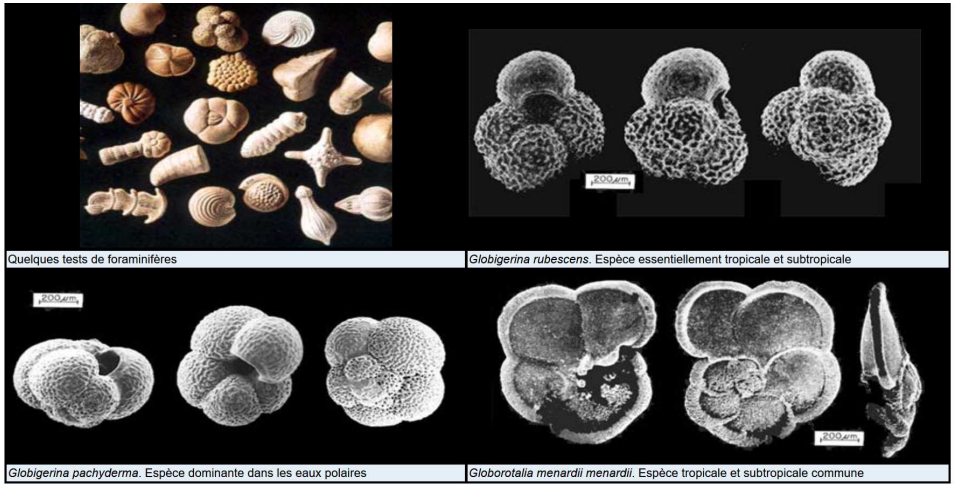


FIGURE 10. Quelques Foraminifères actuels bioindicateurs de climat.
http://tp-svt.pagesperso-orange.fr/foram.htm (consultation avril 2019)

2. Les fossiles continentaux : l'exemple des pollens de Spermaphytes

a. Les pollens, une ressource fossile continentale abondante (notamment dans les argiles ou la tourbe)

b. La réalisation et l'interprétation de diagrammes polliniques

Diagramme pollinique :

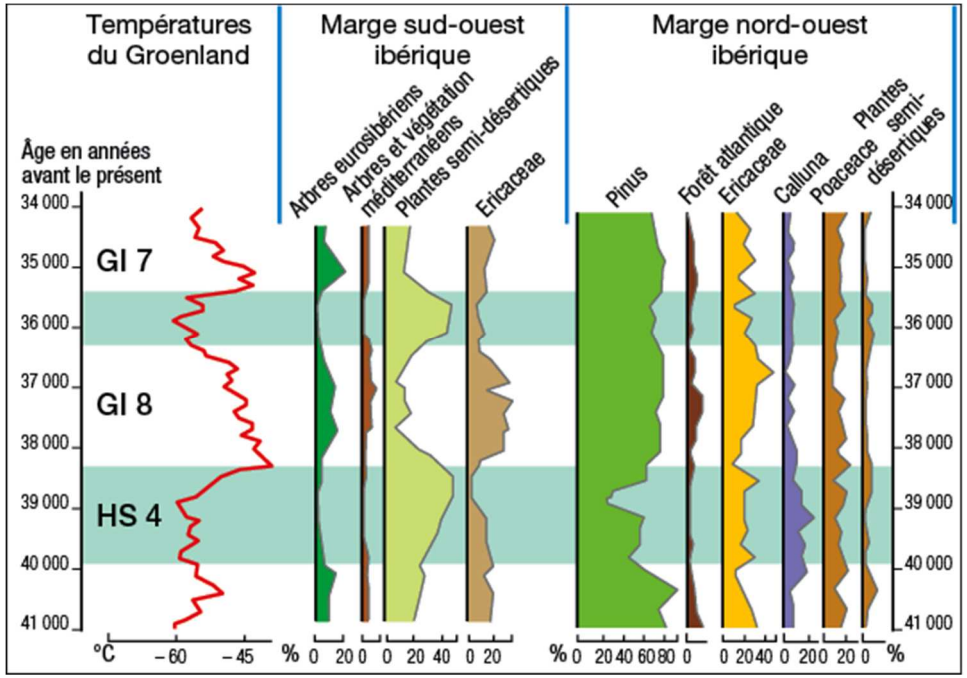


FIGURE 11. Un exemple de diagramme pollinique.
https://www.annabac.com/annales-bac/conditions-climatiques-et-survie-des-neandertaliens
(consultation avril 2019) [HS : événement de Heinrich / GI : interstaidiare]

Analyse d'un diagramme pollinique :

-

-

C. Les archives géochimiques de type isotopique : des paléothermomètres

Paléothermomètre :

1. Le $\delta^{18}O$ (rapport isotopique de l'oxygène)

a. Définition et formule

- ^{18}O, ^{16}O (99,7 %) : isotopes stables de l'oxygène

$\delta^{18}O$ (delta O 18) :

Standard de référence :

- **PDB** (*Pee Dee Belemnite*, dans la calcite des rostres de Bélemnites du gisement crétacé de Pee Dee en Caroline du Nord, États-Unis) pour les **carbonates** ; à cette époque, il n'y avait **pas de calotte polaire** (période chaude).
- **SMOW** (*Standard Mean of Ocean Water*, moyenne standard de l'eau océanique) est un standard retenu pour la **glace des *inlandsis***.

b. Fractionnement isotopique de l'oxygène et lien avec la température (et le niveau marin absolu)

La ***répartition différentielle des isotopes dans l'eau des différents compartiments*** ou **fractionnement isotopique** obéit aux **règles** simples suivantes :

- L'**isotope lourd** a plutôt tendance à **rester dans l'eau liquide** et donc dans les **océans**.
- L'**isotope léger s'évapore plus facilement** se retrouve donc plus facilement dans les **nuages (surtout formés à l'équateur et dans les zones tempérées où l'évaporation est forte)**.
- Lorsqu'il y a des précipitations, l'**isotope lourd tombe d'abord (notamment aux faibles et moyennes latitudes)** et, lorsque l'on arrive aux **pôles**, les **nuages** contiennent **surtout de l'isotope léger** qui **tombe** alors au niveau des **calottes polaires**.

Le **fractionnement isotopique** est d'autant **plus marqué** qu'il se produit aux **faibles températures** (donc en **période de climat froid**).

En période froide :

-

-

Notons qu'en présence d'une **forte calotte polaire** (période froide), le **niveau marin** est bas puisque **beaucoup d'eau** est **mobilisée** dans la **calotte**.

En <u>période chaude</u> :

-

-

En parallèle, la **fonte des glaces** libère des **eaux appauvries en ^{18}O**, ce qui tend à **diluer** encore le **^{18}O** des **océans** et donc **abaisser le $\delta^{18}O$ des océans**.

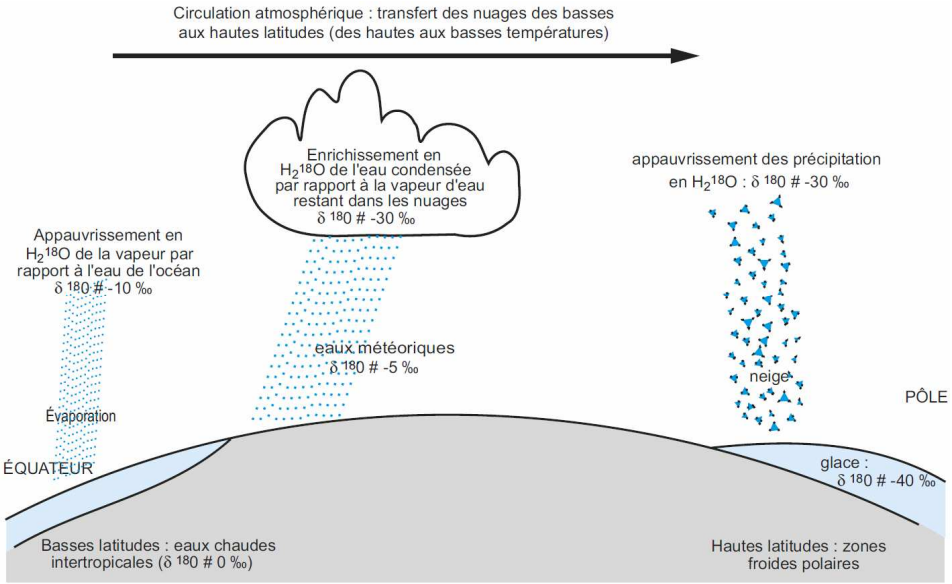


FIGURE 12. <u>Fractionnement isotopique de l'oxygène</u>. D'après PEYCRU *et al.* (2008).

c. Utilisation paléoclimatologique

α. Une variation du $\delta^{18}O$ dans les glaces <u>semblable</u> à la variation de température

β. Une variation du $\delta^{18}O$ dans les océans (et sédiments carbonatés océaniques) <u>inverse</u> à la variation de température

2. Le δD (rapport isotopique de l'hydrogène) dans la glace : une évolution semblable à celle de la température

δD (delta D) :

Même évolution que le $\delta^{18}O$

$$\delta D = \frac{(^2H/\,^1H)échantillon - (^2H/\,^1H)standard}{(^2H/\,^1H)standard}$$

D. Bilan

TABLEAU I. <u>Les archives climatiques : bilan</u>. D'après PEYCRU *et al.* (2008).

L'eustatisme (variations absolues du niveau marin et ses causes) n'est pas au programme.

LES SÉDIMENTS : ARCHIVES DES VARIATIONS CLIMATIQUES DU DERNIER MILLION D'ANNÉES.

Sédiments	Approche	Méthodes	Apports	Enregistrement des Variations climatiques	Résolution
Dépôts glaciaires, moraines et dépôts fluvio-glaciaires	Directe	Litage Granulométrie	Existence, extension et avancée maximale des glaciers	Local, discontinu	Médiocre
Varves	Directe	Litage Granulométrie	Saisons : rythmicité et fluctuations	Local, continu	Bonne
Tourbes	Indirecte	Extraction et identification du pollen, diagramme pollinique	Évolution floristique des paysages	Local, continu	Bonne
Dépôts de plateforme continentale	Indirecte	Sismique réflexion	Glacio-eustatisme : variations du niveau marin	Local, discontinu	Médiocre
Glace des inlandsis	Indirecte	Spectrométrie de masse Rapports isotopique de l'oxygène et de l'hydrogène	Fluctuations thermiques Paléotempératures Évolution des inlandsis et du niveau marin	Global Continu Longue durée	Excellente
Dépôts carbonatés à tests de foraminifères					

Bilan (adapté du programme)	✓ L'analyse d'**archives géologiques** et **géochimiques** permet de montrer des **variations passées** du **climat**.

II. Les variations climatiques du dernier million d'années : caractérisation et contrôle

Capacités exigibles	✓ **Mettre en relation** la composition isotopique en ^{18}O des glaces des inlandsis et les périodes glaciaires et interglaciaires. ✓ **Observer** la rythmicité des périodes glaciaires et interglaciaires et la relier aux paramètres orbitaux de la Terre ✓ **Mettre en relation** les paléotempératures et la teneur en CO_2 et CH_4 atmosphérique. ✓ **Identifier** l'effet modérateur et/ou amplificateur de l'albédo et de l'effet de serre.

A. Mise en évidence de variations climatiques à l'échelle du dernier million d'années

1. À partir des indices glaciaires et périglaciaires

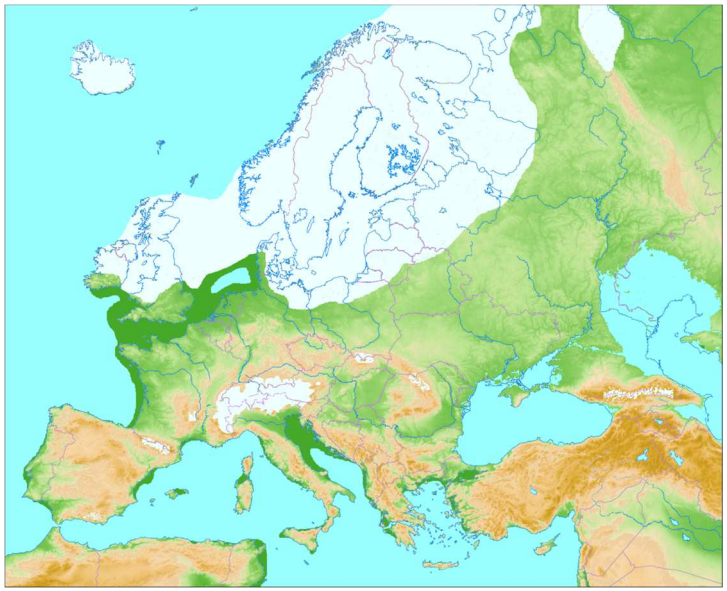


FIGURE 13. Extension de l'inlandsis de l'hémisphère nord en Europe lors du dernier maximum glaciaire (20 000 ans BP). *Wikipédia.*

Pour information
Les **principales glaciations**, initialement déduites notamment de **l'extension des glaciers alpins**, ont été **nommées** par le **nom des affluents du Danube** dans l'ordre alphabétique de la **plus ancienne** à la plus **récente** : **Günz**, **Mindel**, **Riss**, **Würm**.

2. À partir de carottages dans les glaces (ou les sédiments) et d'études isotopiques

a. Des forages dans les glaces polaires antarctiques et dans les sédiments marins pacifiques

b. Deux variations cycliques mettant notamment en évidence une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires

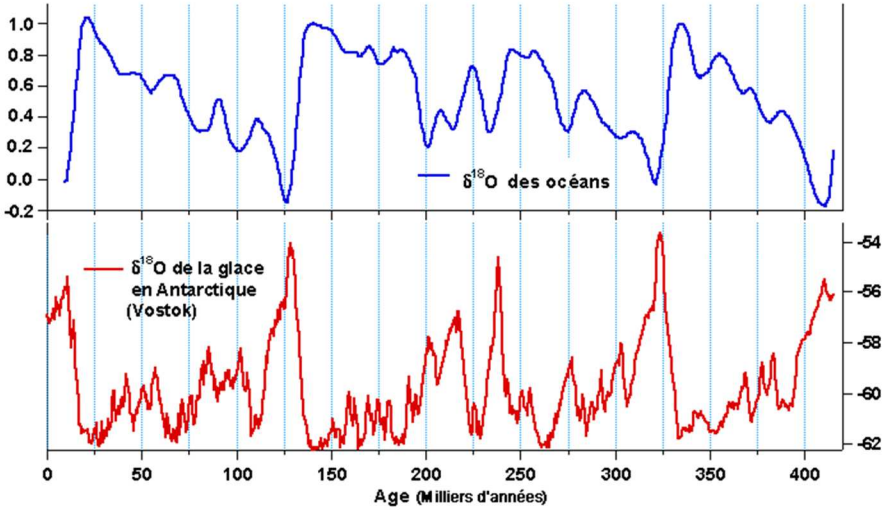


FIGURE 14. Variation inversée du $\delta^{18}O$ dans les sédiments et les glaces.
Source à préciser.

Enseignements :
-

-

-

c. Des événements ponctuels majeurs : les événements de HEINRICH

Événements de HEINRICH : → IRD :

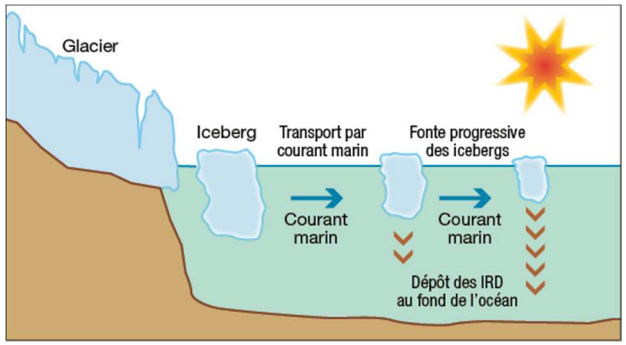


FIGURE 15. Principe d'un événement de HEINRICH.
https://www.annabac.com/annales-bac/les-evenements-d-heinrich (consultation avril 2019)

B. Mécanismes déclencheurs et amplificateurs des variations climatiques

1. Les mécanismes déclencheurs des variations climatiques du dernier million d'années : la théorie astronomique du climat

a. Une hypothèse qui s'est révélée juste

Auteur principal (années 1920) :

b. Les paramètres orbitaux (excentricité, obliquité et précession des équinoxes) et les variations climatiques qu'ils contrôlent

Théorie astronomique du climat :

Paramètres orbitaux :

Excentricité : Périodicité :
Obliquité : Périodicité :
Précession des équinoxes : Périodicité :

FIGURE 16. Paramètres de MILANKOVIĆ.
D'après DUCO *et al.* (2002)

2. Les mécanismes amplificateurs des variations climatiques

a. L'effet de serre : l'absorption thermique de l'atmosphère

α. Fonctionnement très simple de l'effet de serre

FIGURE 17. Principe de l'effet de serre.
http://atoidedecouvrir.blogspot.com/2015/11/le-climat-que-se-passe-t-il.html (consultation avril 2019)

Effet de serre :

β. Le rôle des gaz à effet de serre (GES) (notamment CO_2 et CH_4)

⋎ **TABLEAU II. Les principaux gaz à effet de serre.** D'après EMMANUEL *et al.* (2007).

Gaz à effet de serre		Abondance (ppmv = 10^{-6} en volume ppbv = 10^{-9} en volume pptv = 10^{-12} en volume)	Capacité d'absorption du rayonnement infrarouge (par molécule par rapport au CO_2)
H_2O	Vapeur d'eau	Jusqu'à 4 % (en fonction de la température)	–
CO_2	Gaz carbonique	400 ppmv	1
CH_4	Méthane	1,73 ppmv	20
N_2O	Dioxyde d'azote	310 ppbv	200
CFC	Chlorofluorocarbures	Entre **200 et 500 pptv**	Entre **12 000 et 16 000**
O_3	Ozone	Entre **70 pptv** (dans la troposphère) et **500 pptv** (dans la stratosphère)	–

Gaz à effet de serre (GES) :

Quelques exemples :

-

-

-

γ. Une action de ces gaz confirmée par les analyses de carottes glaciaires

⋏ **FIGURE 18. Covariations de la température (ici renseignée par le δD) et des gaz à effet de serre dans les glaces de l'Antarctique.** D'après PEYCRU *et al.* (2008). [à refaire, oui !]

δ. Une amplification notamment explicable par le rôle de l'océan (dissolution / dégazage de CO_2)

Comment expliquer ce forçage ?

- Lorsqu'un **refroidissement** est **initié**, le **CO_2** est davantage pompé par **l'océan**, ce qui en **diminue** la **quantité dans l'atmosphère**, ce qui **accentue encore le refroidissement** (figure 19).
- Le phénomène inverse se produirait lors d'un **réchauffement**.

⋏ **FIGURE 19. Océan et renforcement du refroidissement en lien avec le pompage de CO_2 atmosphérique.** D'après DUCO *et al.* (2002)

b. L'albédo : l'effet réfléchissant de la surface terrestre

Albédo :

Importance de la glace (fort albédo)

FIGURE 20. Rôle climatique de l'albédo.
D'après DUCO *et al.* (2002)

Bilan (adapté du programme)	✓ Les **variations** de la **teneur en CO_2** et **CH_4** et la **température** sont **interdépendantes** et mettent en jeu des **processus diversifiés** : **effet de serre**, **dégazage de l'océan**…

III. Les variations climatiques récentes en lien avec les modifications anthropiques du réservoir de carbone atmosphérique

Capacités exigibles	✓ **Expliciter** les difficultés à modéliser et prédire l'évolution climatique. ✓ **Évoquer** des conséquences probables du réchauffement climatique.

A. La réalité du changement global

Changement global = réchauffement climatique :

1. Les perturbations d'origine anthropique, une réalité augmentant le taux atmosphérique de CO_2

a. Des perturbations variées, avec une prépondérance de la combustion des matières organiques fossiles (8 à 10 GtC par an)

-

-

-

b. La conséquence : une hausse de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone (+ méthane et autre GES)

- Variation récente de CO_2 atm :

- Variation de CH_4 atm :

- Et ça va continuer !

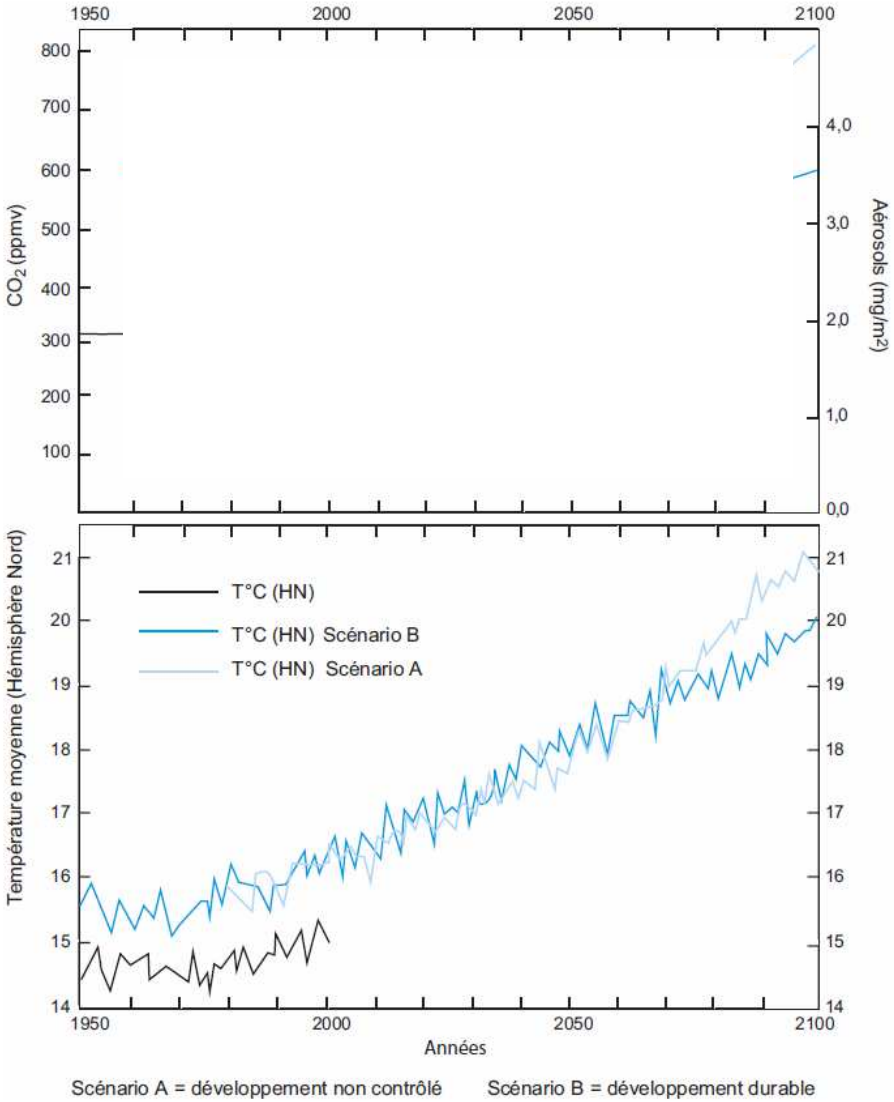


FIGURE 21. Courbes de KEELING (1989) variations du taux de CO2 atmosphérique et de la température moyenne dans l'hémisphère Nord depuis 1960.
D'après PEYCRU *et al.* (2008).

2. Une compensation naturelle partielle des perturbations anthropiques par des pompes au rôle tampon

- On peut noter que des **processus naturels** compensent les **émissions de CO_2 d'origine anthropique** – remplissant un rôle de **tampon** – mais de manière seulement **partielle** ; les **puits** (**réservoirs**) impliqués sont :
  - L'**hydrosphère** qui absorbe **environ 2 GtC par an** par le biais de **trois pompes** :
    - La pompe chimique : dissolution dans les océans ;
    - La pompe physique : entraînement des eaux de surface en profondeur au niveau de l'Atlantique Nord ;
    - La pompe biologique : photosynthèse océanique.
  - La **biosphère continentale** qui absorbe **1,5 GtC par an** sous l'effet de la **photosynthèse**.

3. La conséquence : une hausse des températures

Évolution de la teneur de l'atmosphère en CO_2 et de la température moyenne à la surface du globe depuis le début du XXe siècle

FIGURE 22. Lien entre CO2 atmosphérique et hausse récente des températures.
D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2012)

Hausse entre 1900 et 2010 :

4. Un phénomène accentué par le recul des glaciers et la diminution de l'albédo

B. Quel avenir pour le climat ?

1. L'existence d'obstacles à la modélisation et à la prédiction du climat

- Modèles produits par le **GIEC** =
- Obstacles / difficultés (exemples) :
  >
  >
  >
  >
  …

Projections pour 2100 :

2. Quelques conséquences probables du changement climatique à horizon 2100

-
-
-
-

Bilan (adapté du programme)	✓ La **modélisation** de ces **différentes interactions** permet d'appréhender **l'évolution du climat** en intégrant les **perturbations anthropiques**.

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes

Il est conseillé de maîtriser les **grandes lignes du plan**

*Le **plan** ne doit pas être perçu comme un carcan figé, ou comme un modèle de plan de dissertation à ré-utiliser en devoir, mais bien comme un **outil d'apprentissage et de structuration** des **concepts importants**. Vous pouvez en **recopier les grandes lignes** ou **annexer le plan du polycopié** directement.*

Il est conseillé de réaliser un **lexique des principales définitions**.

Il est conseillé de reproduire les **schémas (et tableaux) majeurs** :

Liste indicative.

° **Glacier** / moraines
° **Inlandsis**
° **Terrasses** étagées / emboîtées
° Diagramme de **PEDRO**
[° **Diagramme pollinique** simplifié ?]
° **Fractionnement isotopique** de l'oxygène / **$\delta^{18}O$**
° **Tableau** bilan des **indices** de **variations climatiques**

° Variations de **$\delta^{18}O$** dans les sédiments / les océans / variations corrélées de **CO_2**, **CH_4**…
[° **Paramètres orbitaux**]
° **Effet de serre**
° **Forçage océanique** du climat
° Forçage du climat par **l'albédo**

° Courbes d'**évolution récente** de ***T*** / **CO_2 atm** // **projections**

Références

ARNDT, N., C. GANINO & S. KESLER (2015). *Ressources minérales. Origine, nature et exploitation.* 2e édition (1e édition 2010), Dunod, Paris.

AUBOIN, J., J. DERCOURT & B. LABESSE (1970). *Manuel de travaux pratiques de cartographie. 1er cycle et maîtrise.* Dunod, Paris.

AUBOIN, J., R. BROUSSE & J.-P. LEHMAN (1978). *Précis de géologie. 2. Paléontologie, stratigraphie.* Dunod (Bordas), Paris, 3e édition (1e édition 1967).

BABIN, C. (1991). *Principes de paléontologie.* Armand Colin, Paris.

BARD, J.-P. (1990). *Microtextures des roches magmatiques et métamorphiques.* Masson, Paris, 2e édition (1e édition 1980).

BEAUX, J.-F. & A. MAMECIER (2012). *Les sciences de la Terre.* Nathan, Paris, 2e édition (1e édition 2010).

BEAUX, J.-F., J.-F. FOGELGESANG, P. AGARD & V. BOUTIN, 2011. *Atlas de Géologie Pétrologie. BCPST 1re et 2e années.* Dunod, Paris.

BERNARD, J.-J., D. CONTINI, G. GODET & G. GOHAU (1995). *Le Temps en géologie. Sciences de la Terre.* Hachette, Paris.

BIJU-DUVAL, B. (1999). *Géologie sédimentaire. Bassins. Environnements de dépôts. Formation du pétrole.* Technip, Paris, Institut français du pétrole (École du Pétrole et des Moteurs), Rueil-Malmaison (92).

BISHOP, A. C., W. R. HAMILTON, A. R. WOOLEY (2001). *Guide des minéraux, roches et fossiles.* « Les Guides du naturalistes », Delachaux et Niestlé, Paris, 336 pages.

BORDI, C., F. SAINTPIERRE (dir.), M. ALGRAIN, R. BOUDJEMAÏ, H. CLAUCE, O. GUIPPONI & Y. KRAUSS (2018). *Mémento Géologie BCPST 1re et 2e années.* Vuibert, Paris.

BOTTINELLI, L., A. BRAHIC, L. GOUGUENHEIN, J. RIPERT & J. SERT (1993). *La Terre et l'Univers. Sciences de l'Univers.* Hachette, Paris.

BOULVAIN, F. (2014), en ligne. Diagenèse carbonatée. *Pétrologie sédimentaire.* Département de Géologie, Université de Liège (B).
URL : http://www.geolsed.ulg.ac.be/sedim/diagenese.htm (consultation août 2018)

BOULVAIN, F. (2017a), *en ligne.* Éléments de sédimentologie et pétrologie sédimentaire. *Pétrologie sédimentaire.* Département de Géologie, Université de Liège (B).
URL : http://www.geolsed.ulg.ac.be/sedim/sedimentologie.htm (consultation août 2018)

BOULVAIN, F. (2017b), *en ligne.* Identification microscopique des principaux constituants des roches sédimentaires (notes de travaux pratiques). *Pétrologie sédimentaire.* Département de Géologie, Université de Liège (B).
URL : http://www.geolsed.ulg.ac.be/TP/TP.htm (consultation août 2018)

BOULVAIN, F. (2017c), *en ligne.* Dynamique des bassins sédimentaires. *Pétrologie sédimentaire.* Département de Géologie, Université de Liège (B).
URL : http://www.geolsed.ulg.ac.be/sedim/dyn_bassins.htm (consultation août 2018)

BOULVAIN, F. (2018), *en ligne.* Une introduction aux processus sédimentaires. *Pétrologie sédimentaire.* Département de Géologie, Université de Liège (B).
URL : http://www.geolsed.ulg.ac.be/processus/processus.htm (consultation août 2018)

BOULVAIN, F. & P. DUMONT (non daté), *en ligne.* Lexique de géologie sédimentaire. *Pétrologie sédimentaire.* Département de Géologie, Université de Liège (B).
URL : http://www.geolsed.ulg.ac.be/sedim/lexique.htm (consultation août 2018)

BRUNET, F., D. ANDRAULT & G. CHAZOT (2007). *La Terre interne. Roches et matériaux en conditions extrêmes.* Vuibert, Paris.

CARON, J.-M., A. GAUTHIER, J.-M. LARDEAUX, A. SCHAAF, J. ULYSSE & J. WOZNIAK (2003) (2e édition, 1989). *Comprendre et enseigner la planète Terre.* Ophrys, Gap – Paris, 303 pages.

CHAMLEY, H. (2000). *Bases de sédimentologie.* Dunod, Paris, 2 édition (1e édition 1987).

CAMPY, M. & J.-J. MACAIRE (2003). *Géologie de la surface.* Dunod, Paris, 2e édition (1e édition 1989).

CHANTRAINE, J., A. AUTRAN, C. CAVELIER (dir.) et collaborateurs (2003). *Carte géologique de la France à l'échelle du millionième.* Service géologique national, Bureau de Recherches géologiques et minières, Orléans, 6e édition.

CHAPUS, J.-L. (2006) (2e). *Initiation à la géomorphologie.* « Universités Géographie », Ellipses, Paris, 172 pages.

COJAN, I. & M. RENARD (2006). *Sédimentologie.* Dunod, Paris, 2e édition (1e édition 1999).

CORDIER, P. & H. LEROUX (2008). *Ce que disent les minéraux.* Belin, Paris.

DANIEL, J.-Y., C. AUBOURG & P. DE WEVER (dir.) (2000). *Problèmes résolus de Sciences de la Terre et de l'Univers.* Vuibert, Paris.

DANIEL, J.-Y. (dir.), A. BRAHIC, M. HOFFERT, R. MAURY, A. SCHAAF & M. TARDY (2006). *Sciences de la Terre et de l'Univers.* Vuibert, Paris, 2e édition (1e édition 1999).

DE WEVER, P., L. LABROUSSE, D. RAYMOND & A. SCHAAF (2005). *La mesure du temps dans l'histoire de la Terre.* Vuibert, Paris.

DEBELMAS, J., G. MASCLE & C. BASILE (2008). *Les grandes structures géologiques.* Dunod, Paris, 5e édition (1e édition 1991).

DECONINCK, J.-F. (2006). *Paléoclimats. L'enregistrement des variations climatiques.* Société géologique de France – Vuibert, Paris.

DELMAS, R., S. CHAUZY, J.-M. VERSTRAETE & H. FERRÉ (2007). *Atmosphère, océan et climat.* Belin, Paris.

DAUTEL, O. (dir.), A. PROUST, M. ALGRAIN, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, F. SAINTPIERRE, M. VABRE & C. BOGGIO (2017). *Biologie Géologie BCPST 1re année.* Vuibert, Paris.

DENŒUD, J., T. FERROIR, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2011). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

DENŒUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2013). *Biologie-Géologie BCPST-véto 1e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

DENŒUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2014). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

DERCOURT, J. (2002). *Géologie et géodynamique de la France. Outre-mer et européenne.* « Sciences Sup », Dunod, Paris, 3e édition (1e édition 1997), 330 pages.

DERCOURT, J., J. PAQUET, P. THOMAS & C. LANGLOIS (2006). *Géologie. Objets, méthodes et modèles.* Dunod, Paris, 12e édition (1e édition 1974).

DUCO, A. (dir.), D. AUGUSTIN, C. BONNET, F. CARIOU, F. CASTÉRAS, M. CHARLES, G. CHERRORET, I. DELARBOULAS, F. DENEUVY-PROST, A. DENIZOT, S. DIEF, J.-P. ESTEBAN, F. GUITTON, C. LENNE, Y. LÉVIGNE, C. MULNET, D. MULNET, M. NAESSENS & S. ROBEYROLLES, 2002. *SVT Sciences de la Vie et de la Terre Terminale S Spécialité.* Belin, Paris.

EMMANUEL, L., M. DE RAFÉLIS & A. PASCO (2007). *Maxi fiches Géologie.* Dunod, Paris, 228 pages + VIII.

DUCHAUFOUR, P. (2001). *Introduction à la science du sol. Sol, végétation, environnement.* Dunod, Paris, 6 édition (1e édition 1984, *Abrégé de pédologie*).

FOUCAULT, A. & J.-F. RAOULT (2005). *Dictionnaire de Géologie.* Dunod, Paris, 6e édition (1e édition 1980).

FOUCAULT, A., J.-F. RAOULT, F. CECCA & B. PLATEVOET (2014). *Dictionnaire de Géologie.* Dunod, Paris, 8e édition (1e édition 1980).

GODINOT, C., H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2010). *Biologie-Géologie 1re année BCPST-véto.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

JAUJARD, D. (2015). *Géologie. Géodynamique. Pétrologie. Études de terrain.* Maloine, Paris.

JOLIVET, L. & H.-C. NATAF (1998). *Géodynamique.* Dunod, Paris.

JUNG, J. (1958). *Précis de pétrographie. Roches sédimentaires, métamorphiques et éruptives.* Masson et Cie, Paris.

JUPIN, H. (1996). *Le Cycle du carbone.* Hachette supérieur, Paris.

LAGABRIELLE, Y., R. MAURY & M. RENARD (2013). *Mémo visuel de Géologie. L'essentiel en fiches. Licence. Prépas. CAPES.* Dunod, Paris.

LIZEAUX, C., D. BAUDE (dir.), A. ANDRÉ, C. BRUNET, J.-Y. DUPONT, B. FORESTIER, E. FRANÇOIS, Y. JUSSERAND, G. LÉVÊQUE, P. PILLOT, S. RABOUIN & A. VAREILLE, (2012). *Sciences de la Vie et de la Terre Terminale S. Enseignement de spécialité.* Bordas, Paris.

MARSHAK, S. (2010). *Terre, portrait d'une planète.* Traduction O. ÉVRAD. De Boeck, Bruxelles (3e édition américaine 2008).

MASCLE, G. (2008). *Les roches, mémoire du temps.* EDP Sciences, Les Ulis (91).

MATTAUER, M. (1998). *Ce que disent les pierres.* Belin – Pour la Science, Paris.

PEYCRU, P. (dir.), J.-M. DUPIN, J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, C. VAN DER REST, F. CARIOU, C. PERRIER & B. AUGÈRE (2008). *Géologie tout-en-un 1re et 2e années BCPST.* Dunod, Paris.

PEYCRU, P., J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, C. BECK, F. CARIOU, J.-M. DUPIN, J.-L. SCHNEIDER, M. TARDY & C. VAN DER REST (2015). *Géologie tout-en-un BCPST 1er et 2e années.* Dunod, Paris.

POMEROL, C., Y. LAGABRIELLE, M. RENARD & S. GUILLOT (2011). *Éléments de géologie.* Dunod, Paris, 14e édition (1e édition 1965).

PROVOST, A. & C. LANGLOIS (2011). *Mini manuel de Géologie – Roches et géochimie.* Dunod, Paris.

RENARD, M., Y. LAGABRIELLE, E. MARTIN & M. DE RAFÉLIS (2018). *Éléments de géologie. 16e édition du « Pomerol ».* 1e édition 1965 (Armand Colin). Dunod, Paris.

ROBERT, C. & R. BOUSQUET (2013). *Géosciences. La dynamique du système Terre.* Belin, Paris.

ROTARU, M., J. GAILLARDET, M. STEINBERG & J. TRICHET (2006). *Les climats passés de la Terre.* Société géologique de France – Vuibert, Paris.

SOREL, D. & P. VERGELY (2010). *Atlas. Initiation aux cartes et aux coupes géologiques.* Dunod, Paris, 2e édition (1e édition 1999).

TROMPETTE, R. (2003). *La Terre. Une planète singulière.* Belin, Paris.

Plan du chapitre

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 1

I. Les archives climatiques, témoins géologiques des variations climatiques 2
A. Les archives sédimentaires continentales : des dépôts à contrôle climatique 2
1. Les indices glaciaires et périglaciaires, indicateurs d'un climat froid 2
a. Les glaciers et les dépôts qu'ils génèrent immédiatement 2
α. Rappels : notion de glacier et typologie (glacier de montagne / calotte glaciaire / calotte polaire = *inlandsis*) 2
β. La production de moraines (à l'origine de tillites), de *dropstones* et de roches moutonnées par les glaciers 3
b. En domaine périglaciaire : des dépôts variés 4
α. Des dépôts éoliens fréquents (de type lœss) 4
β. Des pergélisols polaires (à l'origine de sols polygonaux parfois fossilisés) 4
γ. Des dépôts lacustres périglaciaires : les varves 4
c. Les dépôts fluvio-glaciaires en aval des glaciers : les terrasses alluviales 4
2. Les indices indicateurs d'un climat chaud : kaolinites, cuirasse latéritique et évaporites 5
B. Les archives paléontologiques : des fossiles indicateurs de conditions climatiques 6
1. Les fossiles océaniques : l'exemple des Foraminifères planctoniques 6
2. Les fossiles continentaux : l'exemple des pollens de Spermaphytes 6
a. Les pollens, une ressource fossile continentale abondante (notamment dans les argiles ou la tourbe) 6
b. La réalisation et l'interprétation de diagrammes polliniques 6
C. Les archives géochimiques de type isotopique : des paléothermomètres 7
1. Le $\delta^{18}O$ (rapport isotopique de l'oxygène) 7
a. Définition et formule 7
b. Fractionnement isotopique de l'oxygène et lien avec la température (et le niveau marin absolu) 7
c. Utilisation paléoclimatologique 8
α. Une variation du $\delta^{18}O$ dans les glaces semblable à la variation de température 8
β. Une variation du $\delta^{18}O$ dans les océans (et sédiments carbonatés océaniques) inverse à la variation de température 8
2. Le δD (rapport isotopique de l'hydrogène) dans la glace : une évolution semblable à celle de la température 8
D. Bilan 8

II. Les variations climatiques du dernier million d'années : caractérisation et contrôle 9
A. Mise en évidence de variations climatiques à l'échelle du dernier million d'années 9
1. À partir des indices glaciaires et périglaciaires 9
2. À partir de carottages dans les glaces (ou les sédiments) et d'études isotopiques 9
a. Des forages dans les glaces polaires antarctiques et dans les sédiments marins pacifiques 9
b. Deux variations cycliques mettant notamment en évidence une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires 9
c. Des événements ponctuels majeurs : les événements de HEINRICH 10
B. Mécanismes déclencheurs et amplificateurs des variations climatiques 10
1. Les mécanismes déclencheurs des variations climatiques du dernier million d'années : la théorie astronomique du climat 10
a. Une hypothèse qui s'est révélée juste 10
b. Les paramètres orbitaux (excentricité, obliquité et précession des équinoxes) et les variations climatiques qu'ils contrôlent 10
2. Les mécanismes amplificateurs des variations climatiques 11
a. L'effet de serre : l'absorption thermique de l'atmosphère 11
α. Fonctionnement très simple de l'effet de serre 11
β. Le rôle des gaz à effet de serre (GES) (notamment CO_2 et CH_4) 11
γ. Une action de ces gaz confirmée par les analyses de carottes glaciaires 11
δ. Une amplification notamment explicable par le rôle de l'océan (dissolution / dégazage de CO_2) 11
b. L'albédo : l'effet réfléchissant de la surface terrestre 12

III. Les variations climatiques récentes en lien avec les modifications anthropiques du réservoir de carbone atmosphérique 12
A. La réalité du changement global 12
1. Les perturbations d'origine anthropique, une réalité augmentant le taux atmosphérique de CO_2 12
a. Des perturbations variées, avec une prépondérance de la combustion des matières organiques fossiles (8 à 10 GtC par an) 12
b. La conséquence : une hausse de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone (+ méthane et autre GES) 12
2. Une compensation naturelle partielle des perturbations anthropiques par des pompes au rôle tampon 13
3. La conséquence : une hausse des températures 13
4. Un phénomène accentué par le recul des glaciers et la diminution de l'albédo 14
B. Quel avenir pour le climat ? 14
1. L'existence d'obstacles à la modélisation et à la prédiction du climat 14
2. Quelques conséquences probables du changement climatique à horizon 2100 14

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 14
Références 15
Plan du chapitre 16
Plan simplifié 17
Plan très simplifié 17

Plan simplifié

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 1

I. Les archives climatiques, témoins géologiques des variations climatiques 2
A. Les archives sédimentaires continentales : des dépôts à contrôle climatique 2
1. Les indices glaciaires et périglaciaires, indicateurs d'un climat froid 2
2. Les indices indicateurs d'un climat chaud : kaolinites, cuirasse latéritique et évaporites 5
B. Les archives paléontologiques : des fossiles indicateurs de conditions climatiques 6
1. Les fossiles océaniques : l'exemple des Foraminifères planctoniques 6
2. Les fossiles continentaux : l'exemple des pollens de Spermaphytes 6
C. Les archives géochimiques de type isotopique : des paléothermomètres 7
1. Le $\delta^{18}O$ (rapport isotopique de l'oxygène) 7
2. Le δD (rapport isotopique de l'hydrogène) dans la glace : une évolution semblable à celle de la température 8
D. Bilan 8

II. Les variations climatiques du dernier million d'années : caractérisation et contrôle 9
A. Mise en évidence de variations climatiques à l'échelle du dernier million d'années 9
1. À partir des indices glaciaires et périglaciaires 9
2. À partir de carottages dans les glaces (ou les sédiments) et d'études isotopiques 9
B. Mécanismes déclencheurs et amplificateurs des variations climatiques 10
1. Les mécanismes déclencheurs des variations climatiques du dernier million d'années : la théorie astronomique du climat 10
2. Les mécanismes amplificateurs des variations climatiques 11

III. Les variations climatiques récentes en lien avec les modifications anthropiques du réservoir de carbone atmosphérique 12
A. La réalité du changement global 12
1. Les perturbations d'origine anthropique, une réalité augmentant le taux atmosphérique de CO_2 12
2. Une compensation naturelle partielle des perturbations anthropiques par des pompes au rôle tampon 13
3. La conséquence : une hausse des températures 13
4. Un phénomène accentué par le recul des glaciers et la diminution de l'albédo 14
B. Quel avenir pour le climat ? 14
1. L'existence d'obstacles à la modélisation et à la prédiction du climat 14
2. Quelques conséquences probables du changement climatique à horizon 2100 14

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 14
Références 15
Plan du chapitre 16
Plan simplifié 17
Plan très simplifié 17

Plan très simplifié

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 1

I. Les archives climatiques, témoins géologiques des variations climatiques 2
A. Les archives sédimentaires continentales : des dépôts à contrôle climatique 2
B. Les archives paléontologiques : des fossiles indicateurs de conditions climatiques 6
C. Les archives géochimiques de type isotopique : des paléothermomètres 7
D. Bilan 8

II. Les variations climatiques du dernier million d'années : caractérisation et contrôle 9
A. Mise en évidence de variations climatiques à l'échelle du dernier million d'années 9
B. Mécanismes déclencheurs et amplificateurs des variations climatiques 10

III. Les variations climatiques récentes en lien avec les modifications anthropiques du réservoir de carbone atmosphérique 12
A. La réalité du changement global 12
B. Quel avenir pour le climat ? 14

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 14
Références 15
Plan du chapitre 16
Plan simplifié 17
Plan très simplifié 17

© Tanguy JEAN. Les textes et les figures originales sont la propriété de l'auteur. Les figures extraites d'autres sources restent évidemment la propriété des auteurs ou éditeurs originaux.

Document produit en avril 2019 • Dernière actualisation : mars 2020.

Contact : Tanguy.Jean4@gmail.com

Adresse de téléchargement : https://www.svt-tanguy-jean.com/

Ces données sont placées sous licence *Creative Commons Attribution – Pas d'Utilisation commerciale 4.0 CC BY NC* qui autorise la reproduction et la diffusion du document, à condition d'en citer explicitement la source et de ne pas en faire d'utilisation commerciale.