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 25

Le cycle du carbone sur Terre

Des transferts entre atmosphère, hydrosphère, biosphère et lithosphère

Objectifs : extraits du programme

Connaissances clefs à construire	Commentaires, capacités exigibles
6.3 Le cycle du carbone sur Terre : des transferts entre atmosphère, hydrosphère, biosphère et lithosphère	
Le carbone existe sous différentes formes, réparties dans les différentes enveloppes terrestres.	- identifier les différentes formes et les réservoirs de carbone minéral et organique. **Limite** : Seule l'importance relative des différents réservoirs est exigible.
Des transferts de carbone plus ou moins rapides s'établissent entre les différents réservoirs. Les principaux transferts reposent sur des réactions chimiques et des changements d'état (dissolution, dégazage).	- associer les réactions chimiques avec les transferts entre réservoirs - montrer l'importance des êtres vivants, en particulier les micro-organismes et la diversité des types trophiques observés dans la biosphère. **Lien** : 6.1 [chapitre 23. L'altération des roches en domaine continental], travaux pratiques [TP 6.3. Roches sédimentaires] **Lien Biotechnologies** : 3.1 - comparer les temps de résidence afin d'identifier des cycles à différentes échelles de temps.
La modification quantitative d'un flux déplace les équilibres entre les différents réservoirs. La cinétique de transfert est modérée par des systèmes tampons.	- envisager les conséquences d'un déplacement d'équilibre entre deux réservoirs : il s'agit de montrer ici qu'on a affaire à un système complexe. Il n'est pas demandé une liste exhaustive des interactions entre réservoirs. - présenter un mécanisme de rétroaction. - montrer le rôle central de l'océan.
Les activités humaines modifient actuellement les flux.	- quantifier les flux de libération anthropique de CO_2 dans l'atmosphère. - discuter les limites des systèmes tampons dans le cas des perturbations anthropiques.

Introduction

Le **carbone** est un ***élément chimique de numéro atomique 6*** (figure 1) qui constitue seulement **0,02 % (200 ppm) de la masse terrestre** mais qui représente **10 et 20 % de la masse des êtres vivants**, soit jusqu'à **1000 fois plus**.

Malgré sa faible présence sur Terre, le **carbone** est le ***quatrième élément le plus abondant dans l'Univers*** !

Il existe naturellement sous **trois isotopes** (pourcentage sur Terre précisé) :

- Deux **isotopes stables (= non radioactifs)** : le **carbone 12 ^{12}C (98,89 %)** et le **carbone 13 ^{13}C (1,11 %)** ;
- Un **isotope instable radioactif** : le **carbone 14 ^{14}C** (pourcentage négligeable : on compte **un atome de ^{14}C pour 1000 milliards de ^{12}C** !).

Le **carbone 14 ^{14}C** est un **isotope cosmogénique**, c'est-à-dire ***formé dans la haute atmosphère grâce au rayonnement cosmique (essentiellement solaire)***.

Il se forme à partir d'**azote 14 ^{14}N** selon la réaction : $^{1}_{0}\mathrm{n} + ^{14}_{7}\mathrm{N} \rightarrow ^{14}_{6}\mathrm{C} + ^{1}_{1}\mathrm{H}$

Notons que le **rapport $^{14}C/C_{total}$** sert à **estimer l'âge d'objets récents** contenant du **carbone** (âge < 50 000 ans). C'est la « **datation au carbone 14** ».

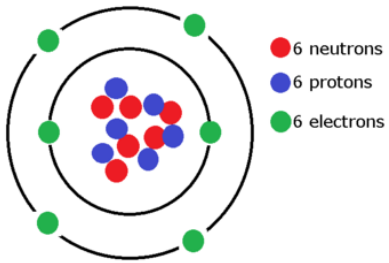


FIGURE 1. Atome de carbone ^{12}C ($Z = 6$).
https://study.com/academy/lesson/what-is-carbon-facts-history-lesson-for-kids.html
(consultation avril 2019)

- Le **carbone** est représenté sous des **formes physiques** (gaz, solide…) et **chimiques** (molécules diverses) **variées** sur **Terre** et se trouve dans **plusieurs compartiments** de la **planète**. Des **transferts**, plus ou moins **importants** et **rapides**, s'établissent **entre ces réservoirs** et décrivent le **cycle de carbone** qui est un **cycle biogéochimique**.

On appelle **cycle biogéochimique** (= **cycle de la matière**) ***l'ensemble cyclique des déplacements de matière impliquant un élément chimique sous des états (physiques et chimiques) souvent variés transitant entre des compartiments différents de la planète (ou d'un écosystème)***.

Comment et sous quelles formes transite le carbone de la planète ?

I. Le cycle du carbone, un cycle qui implique des formes variées de carbone stockées dans des réservoirs

Capacité exigible	✓ **Identifier** les différentes formes et les réservoirs de carbone minéral et organique.

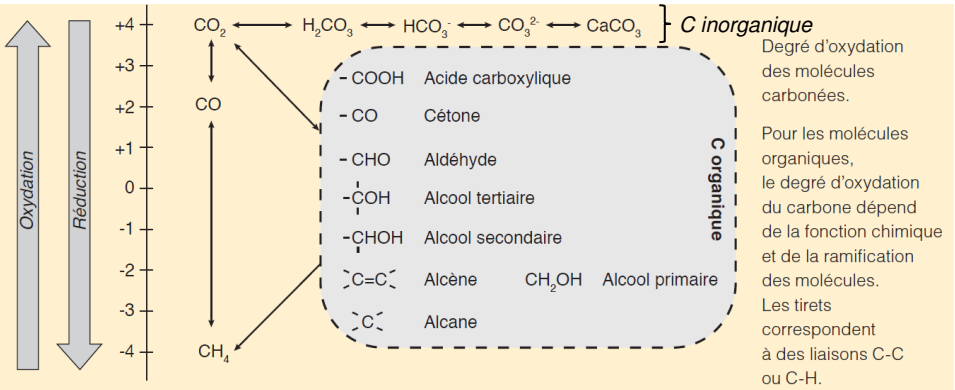
A. Les différentes formes du carbone

- Le **carbone** existe sous **forme organique** et **inorganique** (= **minérale**).

1. Le carbone organique (état réduit) : les molécules biologiques (dans le vivant) et les produits qui en dérivent

a. Notion de molécules organiques

- Les **molécules organiques** sont les ***molécules au moins partiellement réduites (= où le carbone est combiné à au moins un hydrogène)***. Le **degré d'oxydation** de l'atome de carbone (= ***sa charge théorique, si les électrons impliqués dans chaque liaison covalente étaient attribués à l'atome le plus électronégatif***) varie selon la molécule considérée (figure 2).



Le carbone est plus réduit sous forme organique, et plus oxydé sous forme minérale. La **synthèse de matière organique** implique donc une **réduction de matière minérale**, et la **minéralisation des molécules organiques** implique une **oxydation**.

FIGURE 2. Degré d'oxydation et fonctions organiques. D'après SEGARRA *et al.* (2015).

b. Les molécules biologiques : protides, lipides, glucides, acides nucléiques et leurs dérivés

- Les **molécules organiques** comprennent notamment les **molécules biologiques** (= ***celles qui composent les êtres vivants***) : **protides**, **lipides**, **glucides**, **nucléotides** / **acides nucléiques**, et leurs **dérivés** (ex. **lignine**, dérivé d'un acide aminé).

c. Les molécules organiques issues des organismes morts : la nécromasse

Revoir le **chapitre sur les écosystèmes** (chapitre 20)

- Les **molécules organiques** également les molécules de la **nécromasse** ou **sapromasse**, ***ensemble des déchets / débris organiques présents dans les écosystèmes***. On y trouve par exemple les **molécules humiques**, issues du processus de **décomposition**.

d. Les roches carbonées (molécules organiques fossilisées) : le « carbone organique fossile »

Revoir le **chapitre sur la sédimentation** (chapitre 24)

- Les **roches carbonées** sont également un important **réservoir de carbone organique**. Le carbone ici contenu peut être nommé **carbone organique fossile**.

e. Le méthane CH_4

- Le méthane est bien une **molécule organique**. Il est formé soit par les **organismes méthanogènes**, soit par **craquage thermique naturel** de la **matière organique fossile**.

2. Le carbone inorganique : les espèces chimiques minérales

a. Des minéraux carbonés en cristaux (rares) : graphite, diamant…

- Il existe, quoiqu'en **quantité négligeable**, des **assemblages carbonés cristallisés** (diamant, graphite…) formés à **très forte profondeur** par **chauffage** / **compression** de **matière organique carbonée**.
- Ces éléments sont **négligeables**, de même que leur **participation au cycle du carbone**.

b. Des molécules où le carbone est oxydé

- Le **carbone minéral** ou **inorganique** est fondamentalement un ***ensemble de molécules où le carbone est à l'état oxydé***.

α. Le carbone à l'état gazeux : surtout du dioxyde de carbone (éventuellement dissous)

- Le **carbone** existe **à l'état gazeux** (parfois **dissous** dans l'eau) :
  - **Dioxyde de carbone CO_2** essentiellement.
  - **Monoxyde de carbone CO**, à l'état de traces.

β. Le carbone à l'état ionique : les ions hydrogénocarbonates et bicarbonates

- Le **carbone** se trouve enfin **complexé** dans des **ions polyatomiques** :
  - Les **ions carbonates CO_3^{2-}**
  - Les **ions hydrogénocarbonates** ou **bicarbonates HCO_3^-**
- Ces ions se trouvent **à l'état dissous** dans les **eaux** ou bien, dans le cas du **premier**, à l'état **complexé dans des minéraux**, notamment **la calcite** ou **l'aragonite** (**carbonate de calcium $CaCO_3$**), voire la **dolomite $CaMg(CO_3)_2$**.

B. Du carbone stocké dans des réservoirs

- On appelle **réservoir** (ou parfois **puits**) un ***compartiment terrestre dans lequel est stocké l'élément chimique dont on étudie le cycle***.

1. Un stockage de durée variable : la notion de temps de résidence (τ)

- On appelle **temps de résidence (= temps de stockage = temps de séjour)** (souvent noté *τ*) le ***temps moyen pendant lequel l'élément chimique séjourne dans un réservoir donné*** ; les **temps de résidence varient** en fonction du **réservoir** considéré (tableau I).

TABLEAU I. Temps de résidence de quelques réservoirs.
D'après EMMANUEL *et al.* (2007).

	Lithosphère	Hydrosphère	Biosphère	Atmosphère
Temps de résidence = Taille du réservoir /Flux d'échange	> à 1 Ma et jusqu'à 200 Ma	Environ 380 ans dans les eaux superficielles à plus de 100 Ka pour l'océan profond	Entre 5 et 50 ans pour la biosphère continentale et seulement 1 mois à 1 an pour la biosphère marine	3 à 5 ans

Un **réservoir** est un **compartiment** qui :
- **Stocke transitoirement** le carbone – selon un temps moyen constituant le **temps de résidence τ**) ;
- Présente des **flux entrants** de carbone ;
- Présente des **flux sortants** de carbone.

- On peut noter la **formule** suivante :

$$\boxed{\tau = \frac{M}{F}}$$

Où *τ* est le **taux de résidence** (souvent en années)
M est la **masse de carbone du réservoir** (souvent GtC)
F est le **flux moyen** (souvent en GtC • a^{-1}).

Ce flux moyen correspond à :

$$F = \frac{1}{2}(Fe + Fs)$$

Où *Fe* est la somme des **flux entrants** et *Fs* la somme des **flux sortants**.

2. Les différents réservoirs de carbone

- Les **estimations** des **différents réservoirs de carbone** peuvent **varier** selon les auteurs.
- L'**unité** généralement la plus couramment utilisée est la **GtC** (= ***gigatonne de carbone*** = **10^9 t de carbone** = **10^{12} kg de carbone**).

On utilise aussi parfois la **ppm** (partie par millions), notamment la **ppmv** (partie par million en volume), notamment en **domaine gazeux**.

- La dichotomie que j'ai suivie, empruntée à divers auteurs, entre « **réservoirs superficiels** » et « **réservoirs profonds** » est un peu artificielle.

a. Les réservoirs superficiels : une quantité modérée de carbone, le plus souvent mobilisable rapidement

α. L'atmosphère (750 GtC)

- L'**atmosphère** désigne ***l'enveloppe superficielle gazeuse terrestre***. Il contient **750 GtC** ; il s'agit d'un **petit réservoir** mais le **faible temps de résidence** du carbone (tableau I : **3-5 ans**) en fait un **acteur de premier plan** du cycle du carbone.
- Le **carbone** s'y trouve sous forme :
  - Pour **99 %** sous forme de **CO_2** qui compose **0,04 % de l'atmosphère**.
  - D'autres gaz : **méthane CH_4**, **monoxyde de carbone CO**, **gaz artificiels** d'origine anthropique (comme les **CFC**, chlorofluorocarbones, aujourd'hui interdits mais jadis abondants dans les aérosols).

β. La biosphère comprise au sens large

- La plupart des auteurs incluent dans le **réservoir « biosphère »** la **biomasse** et la **nécromasse**. Le **temps de résidence** y est compris :
  - Entre **5 et 50 ans** pour la **biosphère continentale** ;
  - Entre **1 mois et 1 an** pour la **biosphère marine**.

i. La biomasse (matière organique vivante) (600 GtC)

- L'ensemble des **molécules biologiques** contenues dans la **biomasse** représenterait **environ 600 GtC**. La **biomasse** est essentiellement due aux **organismes continentaux** (**595 GtC**, soit 99 % – contre seulement **5 GtC** dans les **océans**). En leur sein, les **végétaux** sont **ultra-dominants**, la biomasse des **Animaux** ou des **unicellulaires** semblant **négligeable**.

ii. La nécromasse des sols (estimation difficile : en moyenne 1600 GtC)

- La **nécromasse des sols** et **tourbières** présente des **estimations variables** selon les auteurs, souvent comprises **entre 1200 et 2200 Gtc** (mais on a proposé récemment jusqu'à 3400 GtC !). On retiendra la valeur moyenne de **1600 Gtc**.

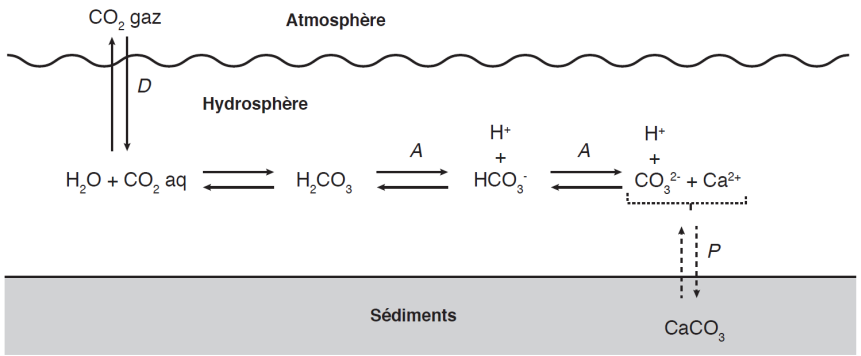
γ. L'hydrosphère (carbone dissous) (39 000 GtC)

- L'**hydrosphère** (***ensemble de l'eau présente à la surface de la planète***), notamment représentée par **l'océan mondial**, est un **réservoir plus important** que les précédents comprenant **39 000 GtC** (soit **50 fois plus que l'atmosphère**).
- On trouve ainsi :
  - Environ **1000 GtC** dans les **200 premiers m** (comprenant la **zone photique**) pour un **temps de résidence** moyen de **380 ans**.
  - Environ **38 000 GtC** dans **l'océan profond** (profondeur > 200 m) pour un **temps de résidence** très **variable**, allant **jusqu'à 100 000 ans**.

Le **carbone organique dissous (COD)**, ***carbone issu de la dégradation de la biomasse marine***, représente **seulement 2 à 3 % du carbone total dissous**.

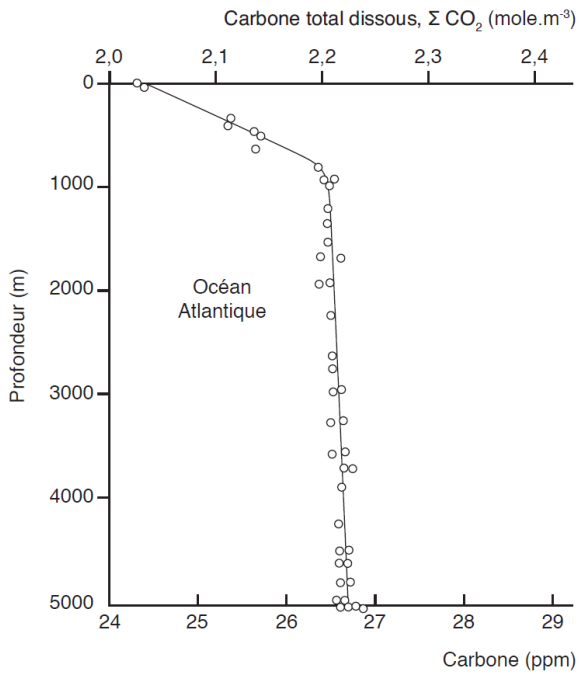
- Le **carbone inorganique dissous (CID)** comprend :
  - Le **CO_2 dissous (1 % CID)**
  - Les **ions carbonates CO_3^{2-} (6 %)** et **hydrogénocarbonates HCO_3^- (93 %)**

  L'acide carbonique H_2CO_3 *est une* ***forme transitoire*** *à* ***durée de vie instantanée***.
- Il existe un **équilibre entre CO_2 dissous** (lui-même dépendant de la pression partielle en **CO_2 atmosphérique**) et les **ions minéraux présents dans l'eau**, comme nous l'avons vu dans les chapitres 23-24 (figure 3).



D = dissolution ; A = équilibre acido-basique ; P = précipitation
D'après Cojan I. et Renard M. (2006), *Sédimentologie*.

FIGURE 3. Le système carbonates : rappels. D'après SEGARRA *et al.* (2015).



Sur l'axe des abscisses est représentée la teneur en carbone dissous, en mole.m^{-3} et en ppm. La teneur passe de 2,0 à 2,2 mole.m^{-3} entre la surface et les eaux profondes (> 1 000 m), soit une augmentation de 10 %.
D'après Cojan I. et Renard M. (2006), *Sédimentologie*.

FIGURE 4. Profil vertical de variation de $[CO_2]_d$ dans l'Océan atlantique.
D'après SEGARRA *et al.* (2015).

- L'**inhomogénéité de la répartition du carbone** dans **l'océan** (peu en surface, davantage en profondeur) s'explique en partie par **l'oxydation** (surtout bactérienne) de **matière organique** et la **dissolution** des **tests carbonatés** (notamment **sous la CCD**), ce qui aboutit à une **forte libération de CO_2** en profondeur (figure 4). Ce **CO_2** est ensuite **converti en ions**.

δ. La masse carbonée des pergélisols (10 000 GtC ?) et des océans (estimation difficile)… une « bombe à retardement » ?

- La **nécromasse non dissoute des fonds océaniques** est très **difficile à évaluer** ; aucun chiffre ne fait l'unanimité.
- On peut noter aussi que les **pergélisols** (***sols gelés en permanence des régions polaires***) contiennent une **quantité importante** d'***hydrates de méthane*** (**clathrates**) ; le chiffre de **10 000 GtC** est souvent avancé. « Coincés » dans les sols gelés, ces **clathrates** pourraient bien être **libérés abruptement dans l'atmosphère** en cas de **fonte des pergélisols**, à craindre avec le **réchauffement climatique**, et avoir des **effets désastreux sur l'effet de serre**, augmentant le réchauffement.

b. Les réservoirs « profonds » : une quantité importante de carbone, le plus souvent mobilisée lentement

- Il s'agit ici de **réservoirs importants** mais impliquant des **flux généralement modérés** à **courte échelle de temps** et donc présentant des **temps de résidence élevés** (tableau I).

α. La croûte terrestre

- Le **carbone** présent dans la croûte terrestre se trouve dans **deux types de roches**. Les **temps de résidence** sont **supérieurs à 1 Ma** et peuvent atteindre **jusqu'à 200 Ma**.

i. Les roches carbonatées (calcaires, marnes, dolomies) (80 • 10^6 GtC)

- Les **roches sédimentaires carbonatées** (calcaires, marnes, dolomies) constituent un **important réservoir de carbone** estimé à **80 millions de GtC**. On trouve le **carbone** dans le **carbonate de calcium** (**calcite** et **aragonite**) et la **dolomite**.

ii. La matière organique fossile (15 à 20 • 10^6 GtC)

- La **matière organique fossile**, qu'elle soit contenue dans les **roches carbonées** (pétroles, charbons, kérogènes…) ou **dispersée dans d'autres roches** (cas de l'essentiel de ce carbone fossile !) est estimé à **15 à 20 millions de GtC**.

iii. Les roches silicatées (env. 50 • 10^6 GtC)

- Bien que le **carbone** soit **proportionnellement très peu présent** dans les **roches silicatées** (de l'ordre de **200 ppm**, soit **200 mg • kg^{-1}**), le volume très important des roches silicatées en fait in fine un **réservoir important de carbone**, difficilement estimé (on avance le chiffre de **50 millions de GtC** !).

β. Le manteau et le noyau (10 à 100 • 10^6 GtC)

- Ce sont des **réservoirs mal connus** où le **carbone** (dispersé dans les roches silicatées, dans quelques carbonates enfouis…) serait présent en **très forte quantité**, de l'ordre de **10 à 100 millions de GtC**, des chiffres allant **jusqu'à 400 millions de GtC** ayant été avancés. Leur **participation au cycle du carbone** est toutefois difficile à évaluer.

TABLEAU I. Les réservoirs de carbone : une vue d'ensemble.
Inspiré de PEYCRU *et al.* (2008, 2015)

Réservoir	État	Forme du carbone	Masse de C	Temps de résidence
Atmosphère	Gazeux	**CO_2** (99 %) + **CH_4**, CO…	750 GtC	3 à 5 ans
Biomasse	Liquide ou solide	**Biomolécules**	600 GtC	**Biosphère** 5-50 ans (continents) 1 mois – 1 an (océans)
Nécromasse des sols	Solide / liquide / dissous	**Biomolécules + Molécules humiques**	1600 GtC	
Hydrosphère	Dissous	**Carbone organique dissous** (1 %)	39 000 GtC	- En surface : 380 ans - En profondeur : variable
		Carbone inorganique dissous : - 93 % HCO_3^- - 6 % CO_3^{2-} - 1 % CO_2		
[Pergélisols]	Solide	Clathrates	10 000 Gtc ?	?
Croûte terrestre	Solide (liquide pour pétroles)	**Roches carbonatées** → calcite, aragonite, dolomite	80 • 10^6 GtC	De l'ordre du Ma à la centaine de Ma
		MO fossile (dont **roches carbonées**) : charbons, pétroles, kérogènes…	15 à 20 • 10^6 GtC	
		Roches silicatées	50 • 10^6 GtC	
[Manteau et noyau]	Solide	C dispersé dans les réseaux cristallins (200 ppm)	10 à 100 • 10^6 GtC	

Bilan (adapté du programme)	✓ Le **carbone** existe sous **différentes formes**, réparties dans les différentes **enveloppes terrestres**.

II. Le cycle du carbone, un cycle qui implique des flux (= transferts) entre réservoirs

- Pour désigner les ***mouvements entrants ou sortant d'un compartiment lors d'un cycle biogéochimique***, on parle de **flux** ou **transferts**.
- Ces **flux** reposent sur des **réactions chimiques ou biochimiques**, ainsi que des **changements d'état**.

Capacités exigibles	✓ **Associer** les réactions chimiques avec les transferts entre réservoirs ✓ **Montrer** l'importance des êtres vivants, en particulier les micro-organismes et la diversité des types trophiques observés dans la biosphère. ✓ **Comparer** les temps de résidence afin d'identifier des cycles à différentes échelles de temps. ✓ **Envisager** les conséquences d'un déplacement d'équilibre entre deux réservoirs : il s'agit de montrer ici qu'on a affaire à un système complexe. ✓ **Présenter** un mécanisme de rétroaction. ✓ **Montrer** le rôle central de l'océan.

A. Les principaux flux de carbone sur Terre

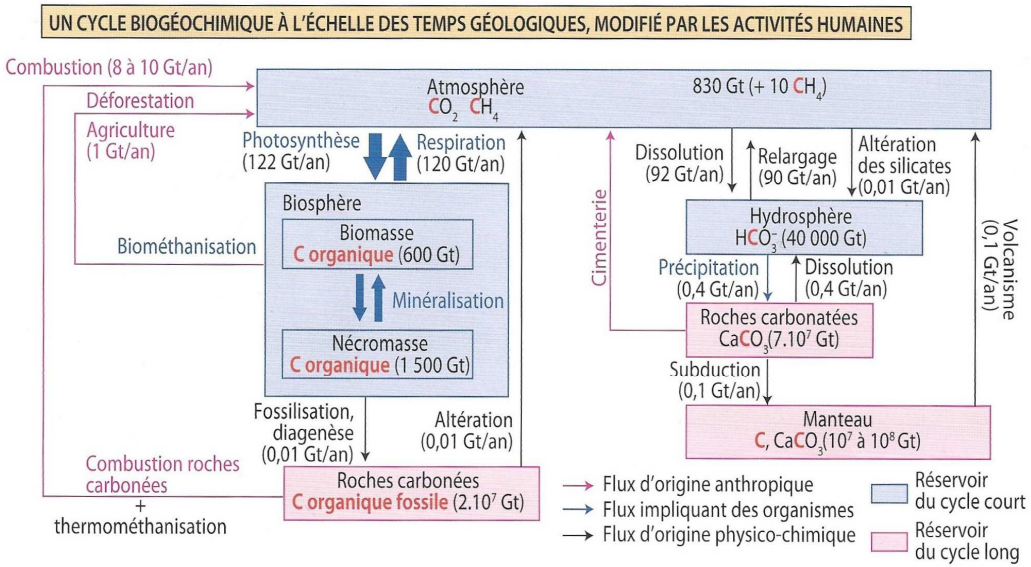


FIGURE 5. Le cycle global du carbone : une vue d'ensemble.
D'après SAINTPIERRE *et al.* (2017).

- Une **vision globale du cycle du carbone** est proposée à la figure 5. Les **valeurs de flux varient** selon les auteurs ; j'ai choisi de suivre la figure 5.

1. Les flux d'origine biologique

- Les **flux d'origine biologique** sont dus à des **réactions métaboliques**.

a. Préalable : un panorama rapide des types trophiques

- Le tableau III – que j'emprunte à mon collègue Joseph SEGARRA – et la figure 6 permettent de revoir la **typologie des principaux types trophiques** existants et qui sont traités en cours de **Biotechnologies**.

TABLEAU II. Panorama des principaux types trophiques.
Document J. SEGARRA (TB2, ENCPB, Paris 13), modifié.

type trophique	source d'énergie	source de carbone	source d'électrons	Exemples d'organismes
Photo-lithotrophes	lumière	CO_2	composés minéraux réduits H_2O *→ photosynthèse oxygénique* H_2S, H_2… *→ photosynthèse anoxygénique*	Cyanobactéries, Eucaryotes photosynthétiques (plastes) Bactéries photosynthétiques vertes et pourpres sulfureuses
Photo-organotrophes	lumière	mat. organique	composes organiques pyruvate, acétate	Bactéries vertes et pourpres non sulfureuses
Chimio-lithotrophes	compose chimique minéral	CO_2	composés minéraux réduits NH_4^+, NO_2^- H_2S, S, RS Fe_{III} H_2	Bactéries nitrifiantes Sulfobactéries Archées thermo-acidophiles Sidérobactéries *Hydrogenomonas*, Archées méthanogènes
Chimio-organotrophes	compose chimique organique	matière organique	composés organiques Accepteur final d'électron O_2 *→ respiration aérobie* *composé minéral autre que* O_2 *→ respiration anaérobie* *composé organique → fermentations*	bactéries, eucaryotes animaux ou mycéliens

- On rappelle qu'on **distingue** (tableau I et figure 6) :
  Les **organismes autotrophes au carbone**, qui sont capables de ***réduire le carbone inorganique en carbone organique***.
  - **Organismes photolithotrophes** qui ***réalisent la photosynthèse*** : 'plantes', Cyanobactéries, Bactéries pourpres sulfureuses…
  - **Organismes chimiolithotrophes** qui ***réalisent la chimiosynthèse*** : Bactéries nitrifiantes, Archées thermo-acidophiles, Sulfobactéries…

  Les **organismes hétérotrophes au carbone**, qui ***utilisent du carbone déjà réduit (matière organique existante) prélevé dans l'environnement***.
  - Surtout les **organismes chimioorganotrophes** dont ***l'énergie comme la matière proviennent de matière organique pré-existante*** : Animaux, 'mycètes', Bactéries variées…

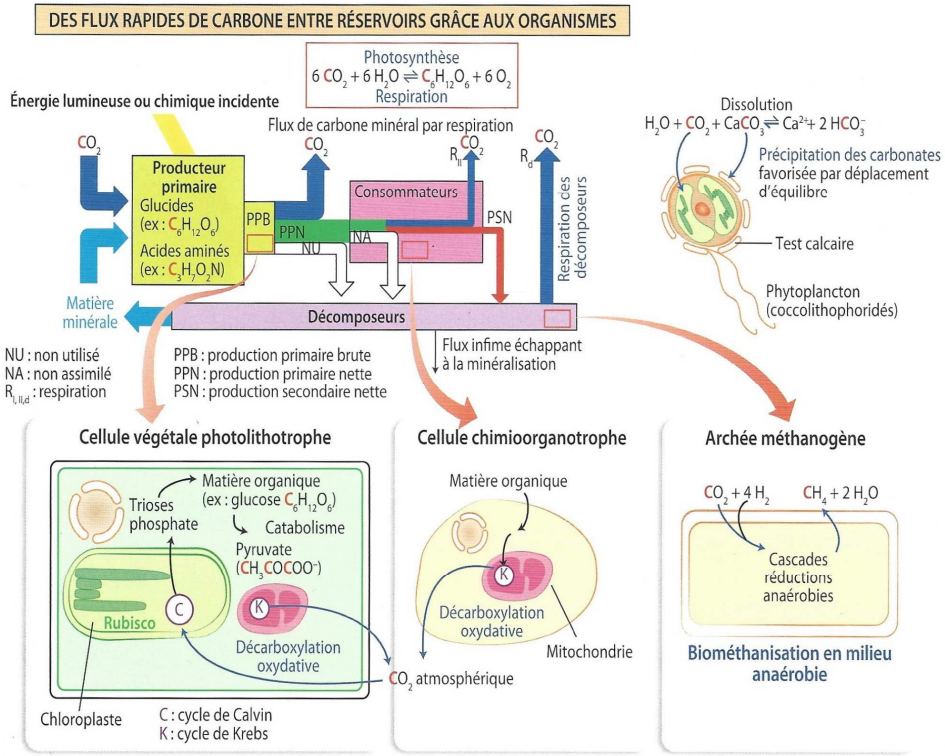


FIGURE 6. Types trophiques et place du carbone. D'après SAINPIERRE *et al.* (2017).

b. Un piégeage du carbone minéral (CO_2) atmosphérique dans la biosphère par les autotrophes (notamment par la photosynthèse)

- Le **dioxyde de carbone** de **l'atmosphère** est **réduit** en **molécules biologiques** par la **photosynthèse** (et **certaines chimiosynthèses**).
- Rappelons **l'équation bilan** typique de la **photosynthèse** :

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrows CHO + O_2$$

- La **photosynthèse** piège ainsi environ **122 GtC par an** qui transitent ainsi du réservoir « **atmosphère** » ou « **hydrosphère** » vers le réservoir « **biosphère** ».

c. Un relargage de carbone minéral (CO_2) atmosphérique dans l'atmosphère (et l'hydrosphère) par les oxydations biologiques (respiration, fermentations, minéralisations dans le sol…)

- La **respiration**, les **fermentations** et les **autres oxydations biologiques** (ex. minéralisations ayant lieu dans les sols) libèrent du **dioxyde de carbone** dans **l'atmosphère**.
- Rappelons **l'équation bilan** typique de la **respiration cellulaire** :

$$\boxed{CHO + O_2 \leftrightarrows CO_2 + H_2O}$$

- Ces **oxydations biologiques** libèrent environ **120 GtC par an** qui transitent ainsi du réservoir « **biosphère** » vers le réservoir « **atmosphère** » ou « **hydrosphère** » en milieu aquatique.

d. Une libération de méthane dans l'atmosphère (ou l'hydrosphère) par les Archées méthanogènes

- La **biométhanisation** (***production de méthane par les Bactéries méthanogènes***) est le fait d'**Archées méthanogènes** dans les **milieux humides continentaux ou deltaïques anoxiques**, les **zones océaniques anoxiques** ou encore le **tube digestif de nombreux animaux** dont les Ruminants

Revoir le **chapitre sur la sédimentation** (chapitre 24)
Revoir le **chapitre sur la Vache** (chapitre 7)

- Citons :
  - La **fermentation acétique** : $CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$
  - La **réduction de CO_2 par le dihydrogène** : $CO_2 + 4\,H_2 \rightarrow CH_4 + 2\,H_2O$

On notera que les **processus en jeu** peuvent être **producteurs** ou **consommateurs** de **CO_2**.

- Aujourd'hui **incluant l'activité agricole** (notamment **l'élevage**), la biométhanisation (allant du réservoir « **biosphère** » vers le réservoir « **atmosphère** » ou « **hydrosphère** ») s'élèverait à **1 GtC par an**.

e. Une bioprécipitation de carbonate de calcium dans les tests

- Comme nous l'avons vu dans le chapitre 24 (**sédimentation**), l'immense majorité de la **précipitation des ions carbonates** compris dans l'**hydrosphère** se fait dans les **eaux océaniques peu profondes et chaudes** (mais aussi dans **d'autres eaux**) sous l'effet d'**organismes** qui produisent leur **test** par ce processus :

$$\boxed{Ca^{2+} + 2HCO_3^- \longrightarrow CaCO_3 + H_2O + CO_2}$$

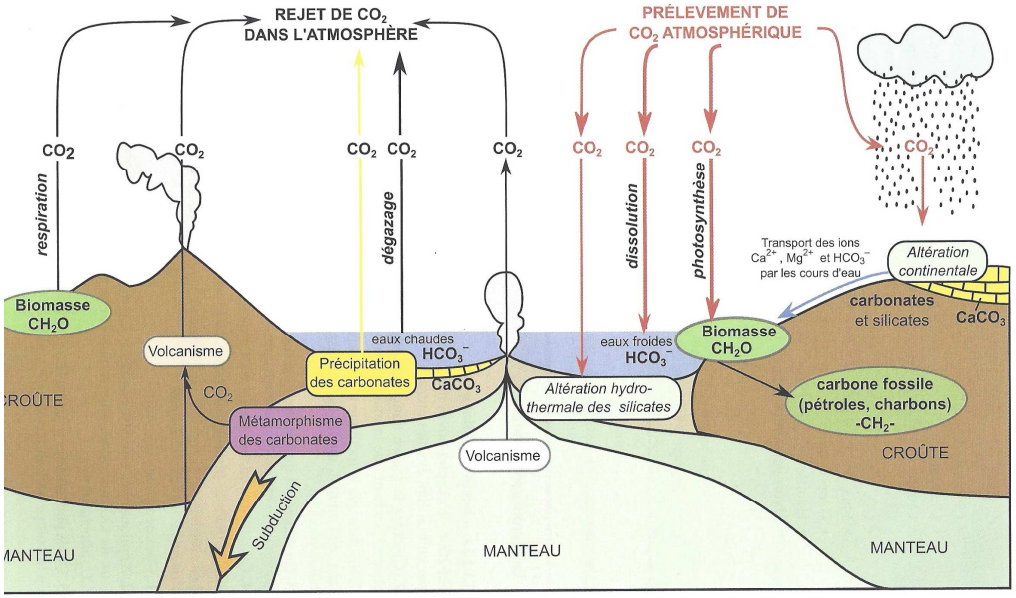
- Le **flux** – qui va du réservoir « **hydrosphère** » au réservoir « **biosphère** » – est estimé à environ **0,4 GtC par an**.

2. Les flux d'origine physico-chimique

- Ces **flux** sont particulièrement visibles sur la figure 7.

a. L'équilibre dissolution-relargage

- Entre **atmosphère** et **hydrosphère**, le **CO_2 atmosphérique transite** : environ **92 GtC** sont **dissoutes** chaque année et **90 Gt par an** sont **dégazées**.



À gauche : processus enrichissant l'atmosphère en CO_2. À droite : processus appauvrissant l'atmosphère en CO_2.
(pompe biologique : photosynthèse par la biosphère autotrophe ; pompe physique : dissolution dans l'hydrosphère).

FIGURE 7. Cycle du carbone centré autour du compartiment atmosphérique et montrant notamment les processus physico-chimiques en jeu. D'après PEYCRU *et al.* (2018).

b. La dissolution (altération chimique) des carbonates

- Comme nous l'avons vu dans le chapitre 24 (**sédimentation**), la **dissolution des carbonates** est surtout un **phénomène géologique** – malgré une **participation biologique** ! – qui aboutit à un **transfert de carbone** du réservoir « **biosphère** » (tests) ou « **croûte** » (roches sédimentaires) vers le réservoir « **hydrosphère** » (puis par dégazage, le réservoir « atmosphère »).

$$\boxed{CaCO_3 + CO_2 + H_2O \longrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-}$$

- Le **flux** – qui s'équilibre avec la **précipitation** – est estimé à environ **0,4 GtC par an**.

c. La production atmosphérique de dioxyde de carbone à partir de méthane et de monoxyde de carbone

- Spontanément, les **molécules de méthane** (demi-vie 10 ans) et de **monoxyde de carbone** (demi-vie 5 h) sont **converties en dioxyde de carbone** dans **l'atmosphère**, notamment sous l'effet des **UV** :

$$CO + 1/2\,O_2 \rightarrow CO_2 \qquad CH_4 + 2\,O_2 \rightarrow 2\,H_2O + CO_2$$

d. Quelques processus géologiques mineurs à courte échelle de temps … mais majeurs à l'échelle des temps géologiques

- Certains processus géologiques **mineurs à courte échelle de temps** (mais **importants sur le long terme**) participent aussi au **cycle du carbone** :
  - L'**altération des silicates** qui, comme nous l'avons vu (chapitre 23), **consomme du CO_2** [env. **0,1 GtC par an** du réservoir « atmosphère » vers le réservoir « croûte »]
    Exemple (anorthite hydrolysée en kaolinite) :
    $$2\,Si_2Al_2O_8Ca + 2\,CO_2 + 4H_2O \longrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^- + Si_4Al_4O_{10}(OH)_8$$
  - Le **volcanisme** qui rejette du **CO_2 atmosphérique** (0,1 Gtc par an ; manteau → atmosphère).

Les **périodes de très fort volcanisme** ont **historiquement drastiquement modifié le cycle du carbone** et le **climat** (aussi bien par le **CO_2, augmentant l'effet de serre**, que par les **suspensions atmosphériques, réduisant l'arrivée de rayonnement solaire** au sol).

  - Le **piégeage** (**0,1 GtC par an** ; biosphère → lithosphère) de **carbone organique** dans les **roches carbonées** et **l'altération naturelle** de ces **roches** (**0,1 GtC par an** ; productrice de CO_2 et autre gaz ; lithosphère → atmosphère).
  - La **subduction** et le **métamorphisme associé** des **carbonates** (ou des **roches carbonées**), piégeant dans le **manteau** environ **0,1 GtC par an** (croûte → manteau).

***Peu importants** à **courte échelle de temps**, ces **processus** permettent une **accumulation de carbone** dans les **réservoirs mobilisés** au cours des **temps géologiques**.*

B. Un système complexe

1. Le rôle central de deux compartiments : l'atmosphère et l'hydrosphère

a. Le rôle majeur du CO_2 atmosphérique

- On remarquera que, malgré sa **faible importance massique (750 GtC)** et son **faible temps de résidence (3 à 5 ans)**, le **réservoir atmosphérique** est mobilisé de **nombreux flux de carbone** : c'est donc une **interface centrale** entre de nombreux réservoirs.

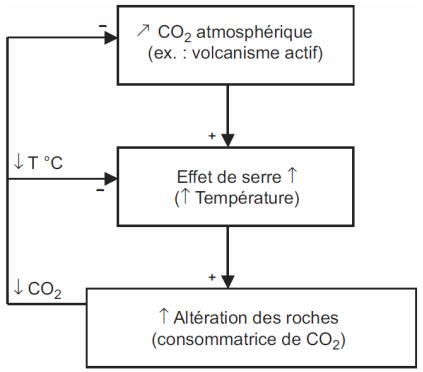
b. Le rôle central et tampon de l'océan (réservoir hydrosphérique) avec la possibilité d'un déplacement de l'équilibre du système carbonates

- On notera que l'**hydrosphère**, essentiellement **l'océan**, est également impliqué dans de très nombreux processus, avec une **faible importance massique** là encore (**39 000 GtC**) et un **temps de résidence peu élevé en surface** (**380 ans**).
- Par ailleurs, l'existence d'un **équilibre CO_2 atmosphérique / CO_2 dissous / hydrogénocarbonates / carbonates dissous / précipitation des carbonates** (revoir la figure 3 page 4) est tel qu'***en cas de hausse de la quantité de CO_2 atmosphérique, celui-ci est en partie absorbé par les océans et en partie séquestré sous diverses formes du système carbonate, ce qui tend à atténuer la hausse de CO_2 atmosphérique*** : on peut dire que l'océan a un **rôle tampon vis-à-vis du CO_2 atmosphérique**.

On notera toutefois que **l'acidification des océans** due à **l'accumulation de CO_2** tend plutôt à **favoriser l'altération des carbonates** et peut, cette fois, **déplacer l'équilibre** dans le **sens d'un rejet de CO_2**. Ce phénomène est **encore accentué en cas de hausse de température**… mais alors les **organismes bioprécipiteurs de carbonates** deviendront aussi **plus actifs**. Bref, le **système** est **complexe** !

2. L'existence de rétroactions : un exemple de rétroaction négative due au CO_2 atmosphérique

- Une **hausse importante de CO_2 atmosphérique** engendre une **augmentation de l'effet de serre** (voir chapitre 26 sur les paléoclimats). Cela engendre donc une **hausse de la température** qui aboutit *in fine* à une **hausse de l'altération des roches**, **consommatrice de CO_2** (figure 8). Il y a donc bien ici une **boucle de rétroaction négative**, même si les phénomènes se déroulent sur le **temps long** (**plus d'un siècle** ou d'un millénaire).



Lien entre CO_2 atmosphérique et climat : exemple de rétroaction négative.
L'altération des roches et minéraux silicatés est un puits de CO_2.

FIGURE 8. Un exemple de rétroaction négative mettant en jeu le CO_2.
D'après PEYCRU *et al.* (2008).

C. Deux cycles du carbone : un cycle court et un cycle long

- Revoir la figure 5 page 5.

1. Le cycle court : un couplage biosphère-atmosphère-hydrosphère

- On peut appeler **cycle court du carbone** ***l'ensemble des flux annuellement importants (de l'ordre de la centaine de GtC par an) et qui impliquent notamment l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère*** ; il s'agit d'un **cycle relativement équilibré** à **courte échelle de temps**.

2. Le cycle long : un cycle où interviennent les processus géologiques et les réservoirs à long temps de résidence

- On peut appeler **cycle long du carbone** ***la part du cycle du carbone qui implique les phénomènes géologiques (altération / précipitation de carbonates, fossilisation de matière organique…) peu importants à l'échelle annuelle (moins de 1 Gt par an)***. Ces processus sont toutefois **importants à l'échelle des temps géologiques** et impliquent des **réservoirs** (notamment la **croûte** et le **manteau**) contenant **beaucoup de carbone**, quoique **dispersé**, et à **fort taux de résidence**.

Bilan (adapté du programme)	✓ Le **carbone** existe sous **différentes formes**, réparties dans les différentes **enveloppes terrestres**. ✓ Des **transferts de carbone** plus ou moins rapides s'établissent entre les **différents réservoirs**. ✓ Les **principaux transferts** reposent sur des **réactions chimiques** et des **changements d'état** (**dissolution**, **dégazage**). ✓ La **modification quantitative** d'un **flux déplace** les **équilibres** entre les **différents réservoirs**. ✓ La **cinétique de transfert** est **modérée** par des **systèmes tampons**.

III. Le cycle du carbone, un cycle qui varie au cours des âges géologiques et sous l'effet de l'action humaine

Capacités exigibles	✓ **Quantifier** les flux de libération anthropique de CO_2 dans l'atmosphère. ✓ **Discuter** les limites des systèmes tampons dans le cas des perturbations anthropiques.

A. Un cycle qui a subi des variations à l'échelle des temps géologiques

- La **quantité de carbone total sur Terre** est **globalement stable** depuis sa **formation** il y a **4,6 Ga** (malgré quelques rarissime apports de météorites). En revanche, la **répartition** de changé au cours des **temps géologiques**.

1. Un outil de l'étude de l'évolution de la masse des réservoirs « carbonates » et « matière organique fossile » : le fractionnement isotopique du carbone ou $\delta^{13}C$

- Les **isotopes 12 et 13** du carbone sont tous deux **stables** et leur quantité ne varie pas ; on peut qualifier le **^{12}C** de « **carbone léger** » et le **^{13}C** de « **carbone lourd** ».
- On peut calculer un **fractionnement isotopique du carbone** ou **$\delta^{13}C$** défini par la formule :

$$\delta^{13}C = \frac{(^{12}C/^{13}C)échantillon - (^{12}C/^{13}C)PDB}{(^{12}C/^{13}C)PDB}$$

Où on évalue le **rapport $^{12}C/^{13}C$ de l'échantillon** comparé à un **standard**, le **PDB** (calcite d'un rostre de Bélemnite crétacée de Pedee aux États-Unis – *à cette période, les climats sont chauds et peu contrastés d'où ce référentiel*).

On admettra que la **photosynthèse** utilise **préférentiellement du $^{12}CO_2$ léger**, alors que le **$^{13}CO_2$ lourd** s'accumule plutôt dans les **océans** et dans les **carbonates** (par **précipitation**).

⇒ Le **$\delta^{13}C$** est **faible** dans les **roches carbonées** (issues de **biomasse**) et **élevé** dans les **carbonates**.

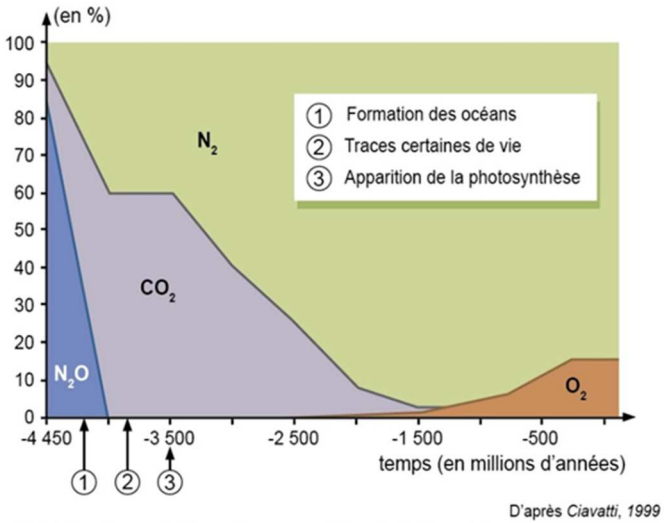
- On admet que le **$\delta^{13}C$ des carbonates** est équivalent à celui des **eaux océaniques** ; ses **variations** renseignent sur **l'importance du réservoir carbonates**. Comme son évolution dépend la **quantité de ^{12}C** lequel se trouve **préférentiellement dans la matière organique**, on en **déduit** indirectement l'importance de la **fossilisation de matière organique**.
  → *Le **$\delta^{13}C$ augmente** en cas de **hausse de la productivité primaire***
  → *Le **$\delta^{13}C$ diminue** en cas de **baisse de la productivité primaire***

2. Quelques variations du cycle du carbone : focus sur le CO_2

a. Au début de l'histoire de la Terre : un fort dégazage de CO_2 puis une forte consommation du CO_2 suite à la mise en place de la photosynthèse

- Voir la figure 9.
- Au **début de l'histoire de la Terre**, un **important dégazage de CO_2** et d'**eau** a conduit à une **atmosphère** essentiellement composée de **ces deux espèces chimiques**. L'essentiel de **l'eau** s'est **condensé en océans**.

- L'apparition des **Cyanobactéries photosynthétiques** il y a **3,5 Ma** aurait conduit progressivement au **remplacement du CO_2** par du **dioxygène** jusqu'à atteindre des **taux comparables aux taux actuels** il y a **500 Ma**.



L'histoire des variations de composition de l'atmophère terrestre.

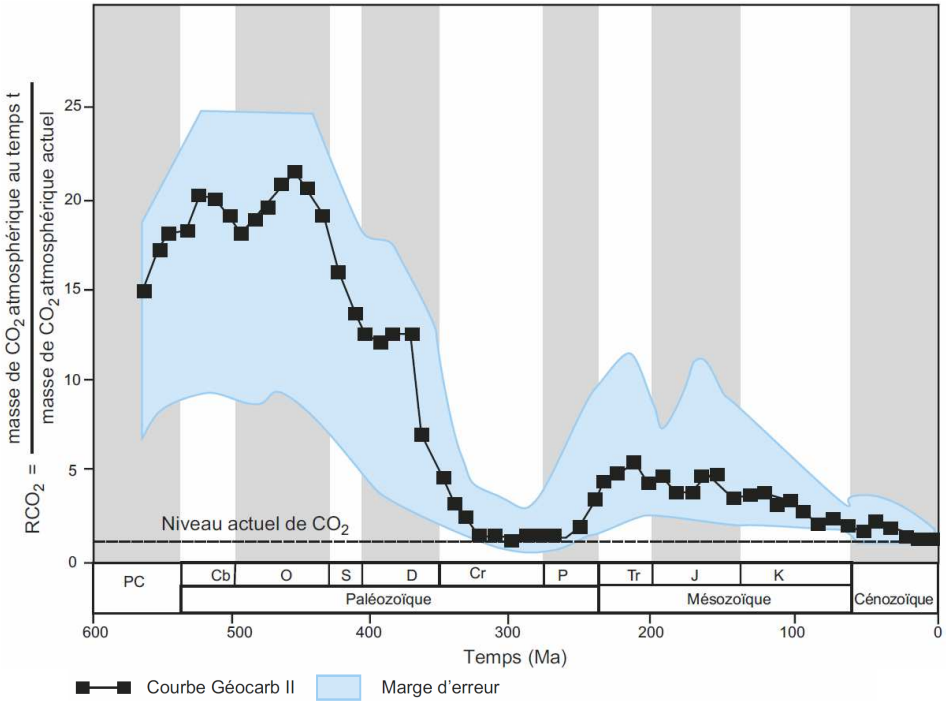
FIGURE 9. Évolution de la composition de l'atmosphère au cours de l'histoire de la Terre. https://leclimatdanstoussesetats.wordpress.com/2015/02/01/de-latmosphere-primitive-a-latmosphere-actuelle/ (consultation avril 2019)

b. Un suivi des fluctuations de la quantité de CO_2 atmosphérique sur les 600 derniers millions d'années : le modèle GÉOCARB

- Le **modèle GÉOCARB** (proposé en 1994) donne une ***évolution du taux de CO_2 atmosphérique sur les 600 derniers millions d'années en postulant que l'altération des roches est le principal élément régulant la quantité de CO_2 atmosphérique à l'échelle des temps géologiques***.
- On notera **d'importantes fluctuations** au cours de tout le **Phanérozoïque** (figure 10).

c. Les variations au cours du dernier million d'années : des alternances de périodes glaciaires et interglaciaires

- Comme nous le verrons dans le chapitre 26, le **dernier million d'années** se caractérise par des **variations cycliques de la teneur en CO_2** et du **climat** accompagnant des **glaciations** et **déglaciations**.



Modèle dévolution de la teneur en CO_2 de l'atmosphère au cours du Phanérozoïque.

FIGURE 10. Le modèle GÉOCARB. D'après PEYCRU *et al.* (2008).

B. Un cycle récemment et fortement modifié par l'activité humaine

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)

- L'action principale de **l'Homme** sur le **cycle du carbone** est **l'émission de carbone atmosphérique** particulièrement importante depuis la **Révolution industrielle** :
  - Une **combustion de carbone organique fossile (8 à 10 GtC par an)**
  - Une **agriculture fortement productrice de méthane** (culture de **riz**, élevage de **Ruminants**…) (certains auteurs avancent jusqu'à 1 GtC par an)

    Le **méthane** est un très **fort gaz à effet de serre**, toutefois **converti en CO_2 assez rapidement** (demi-vie du méthane : **10 ans**).
  - Une **déforestation** qui, sans produire d'émissions atmosphériques immédiates, **réduit l'activité photosynthétique**.

b. La conséquence : une hausse de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone

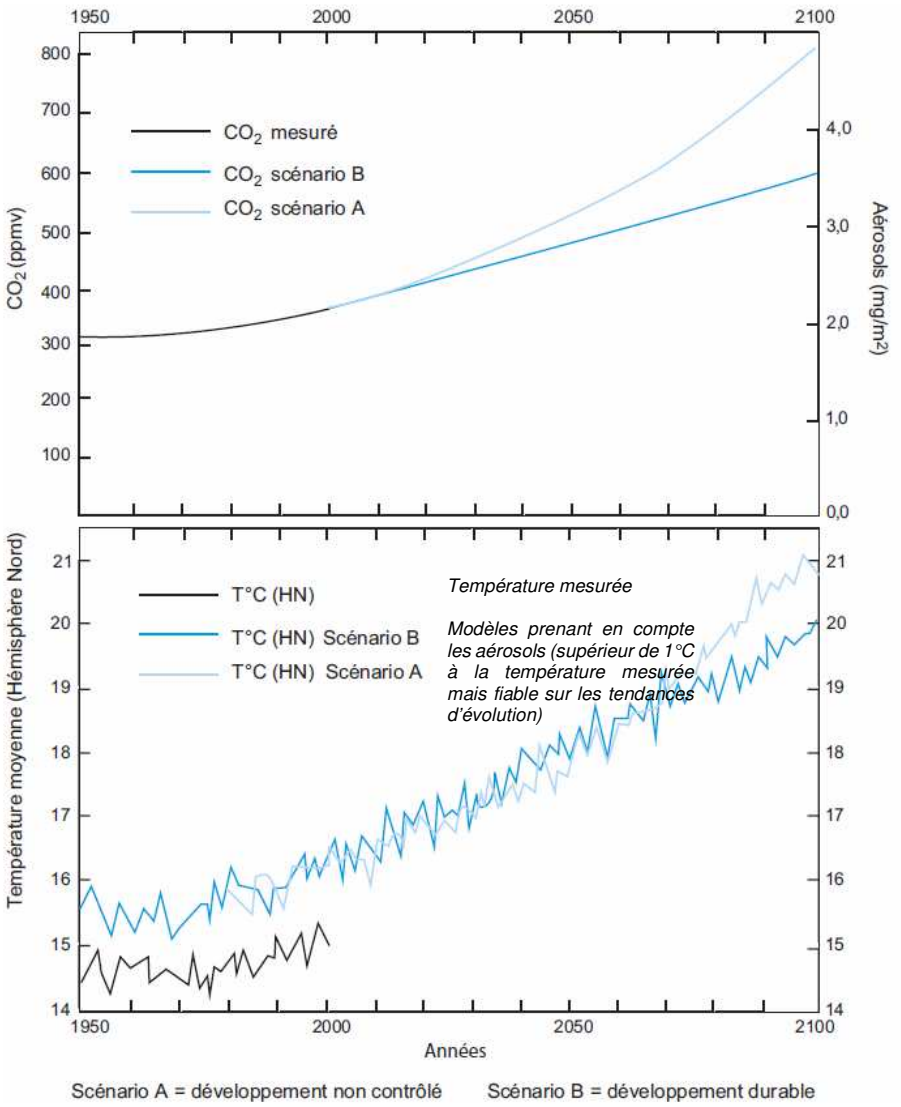


FIGURE 11. Courbes de KEELING (1989) : variations du taux de CO_2 atmosphérique et de la température moyenne dans l'hémisphère Nord depuis 1960.
D'après PEYCRU *et al.* (2008).

- La quantité de **CO_2 atmosphérique** est passée de **300 ppm** dans les **années 1950** à **400 ppm environ aujourd'hui** (figure 11).
- Les **modèles climatiques** prédisent une **augmentation largement accrue** au cours des **décennies à venir**.

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. Une conséquence : une hausse de l'effet de serre aboutissant au réchauffement climatique

- Comme nous le verrons dans le chapitre 26, l'accumulation de **CO_2 atmosphérique d'origine anthropique en excès** provoque une **hausse de l'effet de serre** et donc de la **température moyenne mondiale**.

Bilan (adapté du programme)	✓ Les **activités humaines modifient** actuellement les **flux**.

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.

À peu près **tous**… mais au minimum :
° le **tableau des réservoirs**
° un **cycle complet du carbone**
[Quelques **types trophiques** sont aussi bienvenus].

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.

CAMPBELL, N. A. & J. B. REECE (2004). *Biologie.* De Boeck Université, Bruxelles, 2e édition (1e édition 1995).

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).

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.

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.

PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, F. CARIOU, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER, J.-F. FOGELGESANG, S. MAURY, É. QUÉINNEC, E. SALGUEIRO & C. VAN DER REST (2018). *Biologie tout-en-un BCPST 2e année.* Dunod, Paris, 3e édition (1e édition 2007).

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.

SAINTPIERRE, F., C. BORDI (dir.), M. ALGRAIN, Y. KRAUSS, I. MOLLIÈRE & H. CLAUCE (2017). *Mémento Biologie BCPST 1re et 2e années.* Vuibert, Paris.

SEGARRA, J., E. PIÈTRE (dir.), G. BAILLY, O. CHASSAING, D. FAVRE, T. JEAN, F. METZ, C. MEUNIER (2015). *Biologie BCPST 2e année.* Ellipses, 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. Le cycle du carbone, un cycle qui implique des formes variées de carbone stockées dans des réservoirs 2
A. Les différentes formes du carbone 2
1. Le carbone organique (état réduit) : les molécules biologiques (dans le vivant) et les produits qui en dérivent 2
a. Notion de molécules organiques 2
b. Les molécules biologiques : protides, lipides, glucides, acides nucléiques et leurs dérivés 2
c. Les molécules organiques issues des organismes morts : la nécromasse 2
d. Les roches carbonées (molécules organiques fossilisées) : le « carbone organique fossile » 2
e. Le méthane CH_4 2
2. Le carbone inorganique : les espèces chimiques minérales 2
a. Des minéraux carbonés en cristaux (rares) : graphite, diamant… 2
b. Des molécules où le carbone est oxydé 2
α. Le carbone à l'état gazeux : surtout du dioxyde de carbone (éventuellement dissous) 2
β. Le carbone à l'état ionique : les ions hydrogénocarbonates et bicarbonates 2
B. Du carbone stocké dans des réservoirs 3
1. Un stockage de durée variable : la notion de temps de résidence (τ) 3
2. Les différents réservoirs de carbone 3
a. Les réservoirs superficiels : une quantité modérée de carbone, le plus souvent mobilisable rapidement 3
α. L'atmosphère (750 GtC) 3
β. La biosphère comprise au sens large 3
i. La biomasse (matière organique vivante) (600 GtC) 3
ii. La nécromasse des sols (estimation difficile : en moyenne 1600 GtC) 3
γ. L'hydrosphère (carbone dissous) (39 000 GtC) 3
δ. La masse carbonée des pergélisols (10 000 GtC ?) et des océans (estimation difficile)… une « bombe à retardement » ? 4
b. Les réservoirs « profonds » : une quantité importante de carbone, le plus souvent mobilisée lentement 4
α. La croûte terrestre 4
i. Les roches carbonatées (calcaires, marnes, dolomies) (80 • 10^6 GtC) 4
ii. La matière organique fossile (15 à 20 • 10^6 GtC) 4
iii. Les roches silicatées (env. 50 • 10^6 GtC) 4
β. Le manteau et le noyau (10 à 100 • 10^6 GtC) 4

II. Le cycle du carbone, un cycle qui implique des flux (= transferts) entre réservoirs 5
A. Les principaux flux de carbone sur Terre 5
1. Les flux d'origine biologique 6
a. Préalable : un panorama rapide des types trophiques 6
b. Un piégeage du carbone minéral (CO_2) atmosphérique dans la biosphère par les autotrophes (notamment par la photosynthèse) 6
c. Un relargage de carbone minéral (CO_2) atmosphérique dans l'atmosphère (et l'hydrosphère) par les oxydations biologiques (respiration, fermentations, minéralisations dans le sol…) 7
d. Une libération de méthane dans l'atmosphère (ou l'hydrosphère) par les Archées méthanogènes 7
e. Une bioprécipitation de carbonate de calcium dans les tests 7
2. Les flux d'origine physico-chimique 7
a. L'équilibre dissolution-relargage 7
b. La dissolution (altération chimique) des carbonates 7
c. La production atmosphérique de dioxyde de carbone à partir de méthane et de monoxyde de carbone 7
d. Quelques processus géologiques mineurs à courte échelle de temps … mais majeurs à l'échelle des temps géologiques 8
B. Un système complexe 8
1. Le rôle central de deux compartiments : l'atmosphère et l'hydrosphère 8
a. Le rôle majeur du CO_2 atmosphérique 8
b. Le rôle central et tampon de l'océan (réservoir hydrosphérique) avec la possibilité d'un déplacement de l'équilibre du système carbonates 8
2. L'existence de rétroactions : un exemple de rétroaction négative due au CO_2 atmosphérique 8
C. Deux cycles du carbone : un cycle court et un cycle long 8
1. Le cycle court : un couplage biosphère-atmosphère-hydrosphère 8
2. Le cycle long : un cycle où interviennent les processus géologiques et les réservoirs à long temps de résidence 8

III. Le cycle du carbone, un cycle qui varie au cours des âges géologiques et sous l'effet de l'action humaine 9
A. Un cycle qui a subi des variations à l'échelle des temps géologiques 9
1. Un outil de l'étude de l'évolution de la masse des réservoirs « carbonates » et « matière organique fossile » : le fractionnement isotopique du carbone ou $\delta^{13}C$ 9
2. Quelques variations du cycle du carbone : focus sur le CO_2 9
a. Au début de l'histoire de la Terre : un fort dégazage de CO_2 puis une forte consommation du CO_2 suite à la mise en place de la photosynthèse 9
b. Un suivi des fluctuations de la quantité de CO_2 atmosphérique sur les 600 derniers millions d'années : le modèle GÉOCARB 10
c. Les variations au cours du dernier million d'années : des alternances de périodes glaciaires et interglaciaires 10
B. Un cycle récemment et fortement modifié par l'activité humaine 10
1. Les perturbations d'origine anthropique, une réalité augmentant le taux atmosphérique de CO_2 10
a. Des perturbations variées, avec une prépondérance de la combustion des matières organiques fossiles (8 à 10 GtC par an) 10
b. La conséquence : une hausse de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone 11
2. Une compensation naturelle partielle des perturbations anthropiques par des pompes au rôle tampon 11
3. Une conséquence : une hausse de l'effet de serre aboutissant au réchauffement climatique 11

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 11
Références 12
Plan du chapitre 13
Plan simplifié du chapitre 14
Plan très simplifié du chapitre 14

Plan simplifié du chapitre

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 1

I. Le cycle du carbone, un cycle qui implique des formes variées de carbone stockées dans des réservoirs 2
A. Les différentes formes du carbone 2
1. Le carbone organique (état réduit) : les molécules biologiques (dans le vivant) et les produits qui en dérivent 2
2. Le carbone inorganique : les espèces chimiques minérales 2
B. Du carbone stocké dans des réservoirs 3
1. Un stockage de durée variable : la notion de temps de résidence (*τ*) 3
2. Les différents réservoirs de carbone 3

II. Le cycle du carbone, un cycle qui implique des flux (= transferts) entre réservoirs 5
A. Les principaux flux de carbone sur Terre 5
1. Les flux d'origine biologique 6
2. Les flux d'origine physico-chimique 7
B. Un système complexe 8
1. Le rôle central de deux compartiments : l'atmosphère et l'hydrosphère 8
2. L'existence de rétroactions : un exemple de rétroaction négative due au CO_2 atmosphérique 8
C. Deux cycles du carbone : un cycle court et un cycle long 8
1. Le cycle court : un couplage biosphère-atmosphère-hydrosphère 8
2. Le cycle long : un cycle où interviennent les processus géologiques et les réservoirs à long temps de résidence 8

III. Le cycle du carbone, un cycle qui varie au cours des âges géologiques et sous l'effet de l'action humaine 9
A. Un cycle qui a subi des variations à l'échelle des temps géologiques 9
1. Un outil de l'étude de l'évolution de la masse des réservoirs « carbonates » et « matière organique fossile » : le fractionnement isotopique du carbone ou $\delta^{13}C$ 9
2. Quelques variations du cycle du carbone : focus sur le CO_2 9
B. Un cycle récemment et fortement modifié par l'activité humaine 10
1. Les perturbations d'origine anthropique, une réalité augmentant le taux atmosphérique de CO_2 10
2. Une compensation naturelle partielle des perturbations anthropiques par des pompes au rôle tampon 11
3. Une conséquence : une hausse de l'effet de serre aboutissant au réchauffement climatique 11

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 11
Références 12
Plan du chapitre 13
Plan simplifié du chapitre 14
Plan très simplifié du chapitre 14

Plan très simplifié du chapitre

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 1

I. Le cycle du carbone, un cycle qui implique des formes variées de carbone stockées dans des réservoirs 2
A. Les différentes formes du carbone 2
B. Du carbone stocké dans des réservoirs 3

II. Le cycle du carbone, un cycle qui implique des flux (= transferts) entre réservoirs 5
A. Les principaux flux de carbone sur Terre 5
B. Un système complexe 8
C. Deux cycles du carbone : un cycle court et un cycle long 8

III. Le cycle du carbone, un cycle qui varie au cours des âges géologiques et sous l'effet de l'action humaine 9
A. Un cycle qui a subi des variations à l'échelle des temps géologiques 9
B. Un cycle récemment et fortement modifié par l'activité humaine 10

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 11
Références 12
Plan du chapitre 13
Plan simplifié du chapitre 14
Plan très simplifié du chapitre 14

© 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 : octobre 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.