

LES GRANDS CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES

mise en contexte et émergence de la problématique :

document 1 : conséquences de la modification des cycles biogéochimique du carbone et de l'azote par les activités anthropiques

Un cycle biogéochimique se caractérise par les transferts ou flux d'un élément chimique entre les différents réservoirs que constituent la **biosphère**, les enveloppes terrestres : **atmosphère, hydrosphère et lithosphère et le sol** à l'interface entre la lithosphère et l'atmosphère.

Pour construire un cycle biogéochimique, il faut déterminer avec précision :

- quels sont **les différents réservoirs** de l'élément concerné
- sous **quelle(s) forme(s)** il est présent dans ces réservoirs
- **quantifier** cet élément dans chaque réservoir
- **déterminer** comment s'effectuent **les transferts** entre les réservoirs et à quelle **vitesse** ils s'effectuent

Les éléments chimiques nécessaires à la constitution de la matière organique trouvent leur origine dans le monde minéral.

Les réservoirs minéraux disponibles pour les êtres vivants sont **l'atmosphère, la lithosphère et l'hydrosphère.**

Le **carbone** est **capté** dans le dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique **lors de la photosynthèse** chez les producteurs primaires.

L'azote est **capté dans le diazote (N_2) atmosphérique** par des bactéries fixatrices d'azote ou **puisée sous d'ions** (ammonium NH_4^+ , nitrate NO_3^-) **dans l'eau ou le sol**

Après avoir circulé dans les réseaux trophiques, tous ces éléments peuvent se retrouver sous forme de matière organique morte dégradée par des organismes décomposeurs.

Les éléments minéraux issus de cette minéralisation vont rejoindre l'atmosphère, l'eau ou les sols.

Les éléments **passent de l'état minéral à l'état organique, dans des cycles biogéochimiques** impliquant des **processus abiotiques** (dissolution, sédimentation, volatilisation, etc.) **mais aussi une majorité de processus biologiques** (photosynthèse, respiration, ingestion, excrétion, décomposition, nitrification et dénitrification, etc.).

Les activités anthropiques modifient les flux entre les réservoirs et donc les cycles du C et de l'N à l'origine du **changement climatique** et impactent la biodiversité du fait l'interdépendance entre le biotope et la biocénose

Problématique :

Comment les cycles biogéochimiques du C et de l'N sont-ils structurés et comment les activités humaines sont-elles à l'origine de leur perturbation ?

I. Le cycle du carbone

document 2 : le cycle du carbone.

1. les réservoirs de carbone sous ses différentes formes

Un réservoir correspond à une zone dans laquelle un élément chimique, ici le carbone est présent. Il est caractérisé par sa localisation et par la masse de l'élément chimique considéré qu'il renferme, exprimée en gigatonnes.

Document 3 : les différents réservoirs et leur taille respective

1.1 la biosphère et les sols, des réservoirs de carbone organique à l'état solide

Les **êtres vivants** sont à l'origine du **carbone organique**, forme réduite du carbone, dans leurs biomolécules, lipides, protéides, glucides et acides nucléiques

A leur mort, ce carbone réduit rejoint la **nécromasse du sol** plus ou moins bien minéralisée par les décomposeurs et **l'humus** dont la minéralisation secondaire est lente.

Le réservoir de la **biosphère représente 600 Gt** de C et celui du **sol représente 1500 Gt**.

1.2 l'atmosphère contient du carbone minéral et du carbone organique à l'état gazeux

L'atmosphère contient le **carbone à l'état gazeux**, le **CO₂** et le **CO** (20 ppmv) sont des formes de **carbone minéral** et le **CH₄** (1,8 ppmv), forme réduite et donc **organique, d'origine biologique**.

Le **CH₄** est néanmoins **rapidement oxydé en CO₂** en présence d'eau **sous l'effet du rayonnement solaire**.
Le CO₂ ne représente que 0,04 % (400 ppmv) des gaz de l'atmosphère mais c'est un **gaz à effet de serre** et son **importance est considérable sur l'évolution des climats**.

L'atmosphère représente 850 Gt de carbone

Remarque : *d'autres gaz contiennent de carbone, ce sont les composés azotés HCN, les composés soufrés CS₂, les halogénures CCl₄, les fréons CF₂Cl₂, en quantité très négligeable, ils ont néanmoins, comme le méthane un effet important dans l'effet de serre mais aussi dans la destruction de la couche d'ozone O₃.*

1.3 l'hydrosphère océanique contient du carbone sous forme d'ions

Dans l'hydrosphère océanique (c'est à dire sans prendre en compte les eaux douces et les glaces), le **carbone minéral** se présente principalement sous la forme **d'ions solubles**.

Au **pH8** de l'eau de mer les **ions hydrogénocarbonates HCO₃⁻** sont **très majoritaires (93%)**, on trouve également la forme plus basique **CO₃²⁻**. Et du **CO₂ dissout**

Cette hydrosphère représente un **réservoir considérable de 40 000 Gt**.

1.4 la croûte contient principalement du carbone sous forme de sédiments et de matière organique fossile (cf STE)

➤ les roches carbonées : elles sont **formées par diagenèse au cours de l'enfouissement d'une partie de la MO ayant échappée à la minéralisation.**

Ce sont la **tourbe, le charbon, le pétrole et le gaz naturel** (mélange gazeux d'hydrocarbure dont le méthane). Ces roches carbonées, formées de **matière organique fossile** représentent **20.10⁶ Gt**.

Remarque : *le méthane (qui fait partie des gaz naturels peut également être produit physiquement lors de l'enfouissement de la matière organique par un phénomène de craquage (dissociation des grosses biomolécules en molécules plus petites, sous l'effet de la température).*

➤ les clathrates ou hydrates de méthane : le **méthane** peut former **en se combinant à des molécules d'eau** de l'hydrate de méthane, appelé clathrate, On en trouve **dans les sédiments marins ainsi que dans les pergélisols ou permafrost**. Les hydrates d'hydrocarbures sont des molécules très instables et hautement inflammables. Il représente une réserve d'environ 10 000 Gt.

➤ les roches carbonatées : ce sont des **roches sédimentaires formées par diagenèse**, les carbonates de calcium et de magnésium, calcite (CaCO_3), l'aragonite (CaCO_3 structure cristalline différente de la calcite) et la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Elles représentent **70.10⁶ Gt de Carbone**.

1.5 le manteau

La quantité de carbone présente dans le manteau est déterminée de manière indirecte par des mesures effectuées sur des gaz volcaniques (produits du dégazage du manteau). Les **diamants** d'origine mantelliques sont constitués de carbone pur. On estime la quantité de carbone présente dans le manteau à **100 .10⁶ Gt**.

2. des réservoirs plus ou moins mobilisables

- **Les enveloppes les plus superficielles** de la Terre, **atmosphère, hydrosphère, biosphère** ne contiennent «**que**» **43 000 Gt de Carbone**, principalement sous forme d'ions hydrogénocarbonates dissous dans l'eau de mer, **cependant, ces réservoirs superficiels, de taille réduite sont très dynamiques grâce à la disponibilité du C, et sont impliqués dans d'importants couplages climatiques à court et moyen terme.**

- **Les réservoirs profonds de la croûte et du manteau**, contiennent la très grande majorité du **carbone terrestre, toutefois, ce carbone est très peu échangé avec les autres réservoirs. Le carbone est donc séquestré à très long terme dans ces réservoirs.**

3. Les flux entre les réservoirs permettent de caractériser un cycle rapide et un cycle lent.

3.1 la notion de temps de résidence

Le temps de résidence est le **temps moyen de présence d'un élément chimique dans un réservoir donné.**

Si les flux entrants et sortants sont égaux, la taille du réservoir ne varie pas, il est à l'équilibre mais le temps de résidence est lui non nul (grand ou petit), le temps de résidence s'exprime en Gt/an.

Si flux entrants et sortants sont différents, on calcule un flux moyen :

$$\text{Temps de résidence } \tau = \frac{\text{Quantité élément}}{\text{Flux}}$$

$$\tau = \frac{\text{Quantité élément}}{\frac{\text{Flux}_{\text{ENTRANT}} + \text{Flux}_{\text{SORTANT}}}{2}}$$

Un temps de résidence élevé dans un réservoir traduit une forte capacité à fixer cet élément.

3.2. les flux entre biosphère, hydrosphère et atmosphère sont à l'origine d'un cycle rapide du carbone

3.2.1 les flux entre la biosphère et l'atmosphère

- La photosynthèse agit comme une pompe biologique de carbone.

Document 5 : la photosynthèse agit comme une pompe biologique du carbone atmosphérique

Les **organismes photo-lithotropes comme les végétaux ou les cyanobactéries** prélève du CO₂ et donc baisse la PCO₂ atmosphérique.

Dans l'océan, la photosynthèse réalisée par le phytoplancton déplace l'équilibre et induit un passage du CO₂ de l'atmosphère vers l'océan où il s'y dissout.

Document 6 : les transferts de matière et d'énergie au sein de la chaîne alimentaire (pour rappel)

Le carbone ainsi réduit par la photosynthèse est à la base de la matière organique pour l'ensemble des consommateurs par le biais des réseaux trophiques.

- La respiration est une source biologique de carbone restitué à l'atmosphère

document 7 : la respiration mitochondriale est une oxydation complète de la matière organique.

Les êtres vivants aérobies, y compris les décomposeurs **oxydent totalement le carbone organique lors de la respiration mitochondriale** et libèrent le CO₂ dans l'atmosphère.

- Les microorganismes anaérobies du sol produisent du CO₂ et du méthane par fermentations, également sources de carbone

Document 8 : les fermentations de la matière organique du sol par les micro-organismes en anaérobie

Document 9 : les différents types de fermentation et leur produits

Dans un premier temps, les matières organiques complexes polysaccharidiques comme la **cellulose**, la **pectine**, la **chitine**, subissent des fermentations qui libèrent une **grande variété d'acides organiques et d'alcools, mais aussi CO₂ et H₂**. Les métabolites organiques dérivés peuvent être convertis à leur tour dans un deuxième temps des **bactéries acétogènes**. L'acide acétique est le principal produit de cette fermentation. Les **bactéries acétogènes** occupent un créneau intermédiaire dans les peuplements anaérobies entre les

fermentants qui les précèdent et les **bactéries méthanogènes**, le troisième groupe d'anaérobies strictes qui leur succèdent. Ces bactéries méthanogènes sont des **chimolithotrophes** qui réduisent le CO_2 à partir d'hydrogène : $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$

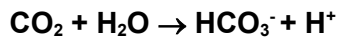
remarque : ces fermentations se produisent également dans la panse des Ruminants qui rejettent par éructation de grandes quantités de CO_2 et de CH_4 .



3.2.2 Les flux entre océan et atmosphère

Document 10 : l'océan agit comme un puit ou une source de carbone en fonction de la latitude.

Il s'agit ici d'un transfert physique selon l'équation :



Or la température influe sur la solubilité du CO_2 , une **baisse de la température augmente la solubilité du CO_2** , en hiver ou lorsque les courants de surface provenant des tropiques remontent vers les latitude polaire, **les masses d'eau refroidies au niveau des pôles absorbent du CO_2 atmosphérique**, l'océan agit alors comme un **puits de carbone**.

Ces eaux froides plus denses et enrichies en CO_2 plongent en profondeur. **Aux latitudes tropicales, au niveau des up welling, les eaux profondes remontent en surface** et se réchauffent, elles **libèrent** alors du CO_2 dans l'atmosphère, l'océan agit alors comme une **source de carbone**.

3.2.3 de petits réservoirs et des flux de grandes ampleurs induisent des temps de résidence faibles et donc un cycle de carbone court

→ cf Document 4

Document 11 : temps de résidence du carbone dans les réservoirs superficiels

➤ Concernant la biosphère :

Les flux de carbone entre la biosphère et l'atmosphère sont de l'ordre de 120Gt / an et ceux entre l'hydrosphère et l'atmosphère sont de l'ordre de 90Gt/an

Le calcul du temps de résidence dans la biosphère au sens large (sols inclus) s'effectue à partir de la masse de matière organique carbonée, soit Biosphère + Sols = 600 + 1 500 = 2 100 GtC.

On observe les flux entrants et sortants de 120 Gt de C par an.

Temps de résidence du C dans la biosphère = Masse réservoir / Flux = 2 100 Gt / 120 Gt.an⁻¹ = 17,5 ans

➤ Concernant l'hydrosphère :

Le réservoir hydrosphère contient 40 000 Gt de C .

On observe les flux entrants et sortants de 90 Gt de C par an.

Temps de résidence du C dans l'hydrosphère = Masse réservoir / Flux = 40 000 Gt / 90 Gt.an⁻¹ = 444 ans

➤ Concernant l'atmosphère :

Le réservoir atmosphère contient 850 Gt de C.

On observe des flux entrants et sortants de 210 Gt de C par an (120 + 90)

Temps de résidence du C dans l'atmosphère = Masse réservoir / Flux = 850Gt / 210 Gt.an⁻¹ = 4 ans

En conclusion, le cycle rapide de C est instantané à l'échelle des temps géologiques.

3.3. les flux impliquant la géosphère sont à l'origine d'un cycle lent du carbone.

→ cf Document 4

Ces flux sont **mille à 10 mille fois plus faibles** que le flux du cycle rapide, parmi eux on peut distinguer :

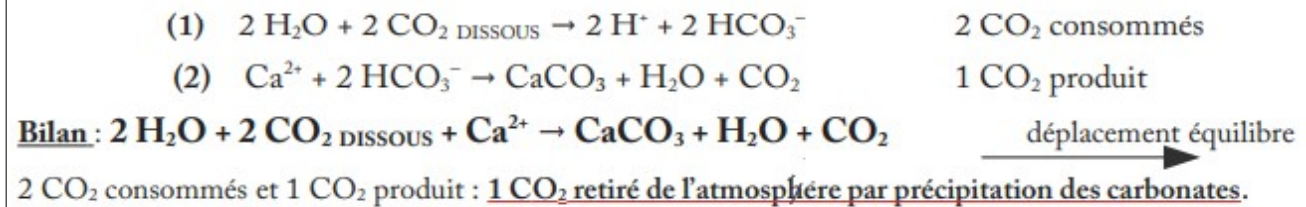
3.3.1 la précipitation et la dissolution des carbonates mais aussi leur métamorphisme

La majorité du carbone des réservoirs superficiels se trouve sous forme d'ions HCO_3^- dissous dans les eaux continentales et marines, dont le C provient initialement de l'atmosphère.

Document 12 : précipitation et dissolution des carbonates

➤ La précipitation des carbonates

Lorsque la concentration locale en ions HCO_3^- et Ca^{2+} est saturante, une **précipitation de carbonates de calcium** a lieu selon l'équilibre :



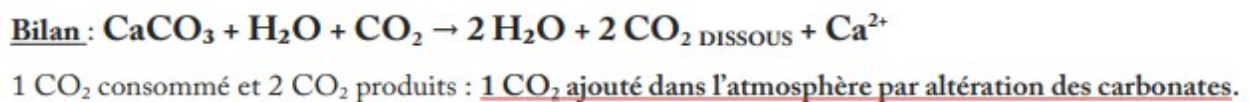
A cette précipitation chimique, s'ajoute la précipitation biochimique des carbonates correspondant à la biominéralisation lors de la formation des tests (eucaryotes unicellulaires photosynthétiques comme les Coccolithophoridés ; hétérotrophes comme les Foraminifères [Globigérines, Fusulines, Nummulites]), des valves (Mollusques) et des endosquelettes carbonatés (oursins, coraux...).

Cependant le bilan de cette précipitation quelle soit chimique ou biochimique reste le même.

Le carbone est alors stocké sous forme de carbonates dans le réservoir des roches carbonatées crustales. Le flux annuel est de 0,4 Gt/an.

➤ La dissolution des carbonates

La dissolution des carbonates (ou leur altération) est le processus inverse :



Cette dissolution a lieu en eau profonde en dessous de la CCD ou lors de l'altération des carbonates continentaux par les eaux douces.

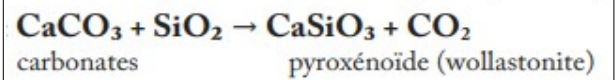
En conclusion

Le couple « précipitation – dissolution » des carbonates a un donc bilan nul car ces deux phénomènes s'équilibrent à l'échelle des temps géologiques, on l'estime à **0,4 Gt/an**.

➤ Le métamorphismes des carbonates au niveau des zones de subduction

Document 13 : le métamorphisme des carbonates au niveau des zones de subduction

Au niveau des zones de subduction, le **métamorphisme des carbonates** aboutit également à la production d'1 CO₂ :



Ce CO₂ retourne alors dans l'atmosphère lors du volcanisme . Le flux est estimé à **0,1 GT/an**

3.3.2 l'altération des roches silicatées contenant du calcium

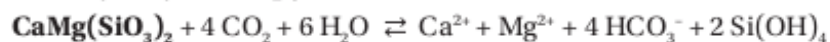
Cette altération peut être d'origine

- **biologique** par les micro-organismes du sol lors de la **formation du lithosol** ou suite à l'action des racines végétales,
- **atmosphérique** lors de la **mise à l'affleurement des roches silicatées** par les orogénèses.

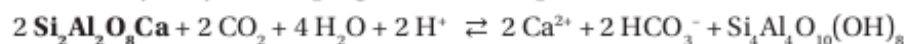
Document 14 : altération des silicates contenant du calcium

L'hydrolyse des minéraux contenant du calcium comme certains pyroxènes (diopside) ou plagioclases (anorthite) consomme du CO₂ atmosphérique et **forme des ions hydrogénocarbonates**.

Équation-bilan de l'hydrolyse d'un **pyroxène** :



Équation-bilan de l'hydrolyse d'un **plagioclase calcique**



Ce flux lent est à l'origine d'un **flux sortant de CO₂ atmosphérique vers les roches carbonatées à la suite de grandes orogénèses**. Il est estimé à **0,1 GT/an**

3.3.3 la fossilisation de la matière organique en matière carbonée

Dans certaines conditions, la **matière organique** est préservée de l'oxydation des minéralisateurs et **se trouve fossilisée**, c'est à dire transformée en roches carbonées (bitumes, charbons, pétroles).

Les milieux propices à la fossilisation de la matière organique sont variés, **se caractérisent en général par** :

- une **productivité biologique élevée**, excédant l'oxydation de matière organique
- des **conditions anoxiques**, limitant l'oxydation de la matière organique
- un **taux de sédimentation élevé**, permettant un **enfouissement rapide** à l'échelle des temps géologiques. L'intensité de cette fossilisation de la matière organique a beaucoup varié au cours des temps géologiques.

Après leur formation en profondeur, les **roches carbonées peuvent lentement être exhumées sous l'action de la tectonique et de l'érosion**. Une fois en surface, leur altération-oxydation libère du CO₂, qui avait été piégé des milliers ou des millions d'années plus tôt par photosynthèse.

Actuellement, cette oxydation naturelle des roches carbonées libère environ **0,1 Gt/an de CO₂**.

3.3.4 de grands réservoirs et des flux très faibles induisent des temps de résidence très longs et donc un cycle de carbone lent

Document 15 : temps de résidence du carbone dans les réservoirs profonds

Temps de résidence dans les roches carbonatées : $7 \cdot 10^7 / ((0,4+0,1)) = 14 \cdot 10^7$ ans soit **140 millions d'années**

Temps de résidence dans les roches carbonées : $2 \cdot 10^7 / 0,01 = 200 \cdot 10^7$ soit **2 milliards d'années**

Temps de résidence dans le manteau : $10 \cdot 10^7 / 0,1 = 100 \cdot 10^7$ soit **1 milliard d'années**

Conclusion :

Le cycle géochimique du Carbone comprend de nombreux éléments situés dans les quatre enveloppes de la Terre : biosphère ; atmosphère ; hydrosphère et lithosphère.

Les réservoirs superficiels possédant un temps de résidence court, sont les plus dynamiques et les êtres vivants y jouent un rôle majeur.

Les réservoirs profonds sont plutôt des **stockeurs** que des échangeurs.

Le cycle du Carbone était équilibré ... avant la révolution industrielle

II. Le cycle biogéochimique de l'azote

document 16 : le cycle de l'azote.

Comparé au carbone, à l'oxygène et à l'hydrogène, l'**azote** est un **constituant minoritaire des êtres vivants, mais essentiel**.

En effet, l'**azote organique** qui désigne l'azote à l'état réduit présent dans la matière organique, est un **constituant fondamental des tissus vivants**, son absence empêche la croissance, il assure des **rôles de structure** (protéines), **de fonction** (enzymes, coenzymes, chromo protéines, acides nucléiques...), **de réserve** (réserves protidiques des graines).

L'**azote minéral** désigne des formes plus ou moins oxydées de l'azote, dont le nombre d'oxydation varie entre 0 et +5 : **sous forme gazeuse** on trouve principalement le diazote N_2 et l'**oxyde nitreux** N_2O , **sous forme ionique en solution**, on trouve principalement les ions nitrates NO_3^- Les ions ammoniums NH_4^+ sont des **formes réduites** présentes en solution et **issues de l'activité biologique mais considérés comme de l'azote minéral**.

La **disponibilité de l'azote limite souvent le taux de production de la biosphère** (d'où le besoin d'utiliser autant de fertilisants azotés dans l'agriculture), **aussi bien sur les continents que dans l'océan**. La compréhension du cycle de l'N est fondamentale pour l'agriculture, notamment dans l'objectif de limiter ses éventuelles conséquences sur les milieux naturels.

1. les réservoirs de l'azote sous ses différentes formes

Document 17 : les principaux réservoirs d'azote et leur taille respective

Comme pour les réservoirs de carbone, on trouve de très grandes différences de répartition de l'azote.

1.1 le réservoir atmosphérique

Le N_2 constitue **79 % de l'atmosphère terrestre**, il représente **$3,8 \cdot 10^6$ Gt**

On trouve également des oxydes d'azote dont le N_2O en quantité plus négligeable (1,4 Gt) mais qui est un **gaz à effet de serre**.

1.2 l'hydrosphère océanique

Les océans contiennent également du N_2 **dissout estimé à $22 \cdot 10^3$ Gt** ainsi que des ions NO_3^- (570 Gt) et NH_4^+ (7 Gt).

1.3 La biosphère et les sols

L'**azote organique** rentre dans la composition des acides aminés et de nucléotides.

Les **êtres vivants ne représentent que 11 à 15 Gt**.

Le **sol** en contient beaucoup plus en considérant la **nécromasse (dont l'humus)** estimée à environ **300 Gt** mais également de l'**azote minéral**, **1/5** de sels ammoniacaux NH_4^+ retenus par les colloïdes chargés négativement et **4/5 de nitrates** lessivables et donc présents dans la solution du sol. Cet **azote minéral** représente **160 Gt**.

1.4 la géosphère

Le principal stocke d'azote de la géosphère est en réalité constitué par la **matière organique fossilisée** estimée à **10⁶ Gt**

2. Les flux biotiques ont une place prépondérante dans le cycle de l'azote.

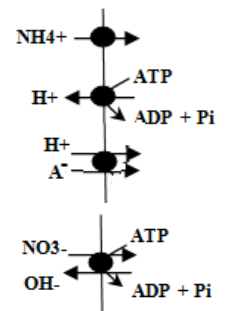
Document 18 : le cycle de l'azote et les réactions d'oxydo-réductions associées

2.1 les organismes autotrophes à l'azote réduisent l'azote minéral en azote organique (CF SVB2)

2.1.1 l'assimilation de l'azote du sol chez les végétaux

L'entrée des ions **NH₄⁺**, comme les autres cations, est **passive** et se fait par un canal transmembranaire sous l'effet de la différence de potentiel créée par un efflux de protons par une pompe ATPase, il y a donc diminution du pH.

L'absorption des ions **NO₃⁻** se fait **contre le gradient électrochimique**. Elle tire son énergie de l'hydrolyse de l'ATP. Le transporteur est une ATPase spécifique inductible par le nitrate lui-même. Des ions **OH⁻** sortent en échangeant et le PH augmente.



La **réduction des nitrates en acides aminés** peut se faire **selon les espèces au niveau des racines et/ou au niveau des feuilles**. Chez la plupart des arbres, en particulier les Rosacées (Pommier), elle y est si avancée que la sève brute ne contient plus de nitrates, mais seulement des traces de sels ammoniacaux et elle est riche en composés organiques (acides aminés, amides...). Chez beaucoup d'espèces herbacées, la réduction s'effectue aussi dans les feuilles vertes à la lumière (Blé : 50 % dans les racines, 50 % dans les feuilles, Tomates : presque totalement dans les feuilles).

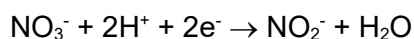
Document 19 : l'assimilation des nitrates dans une cellule chlorophyllienne

Cette assimilation comprend plusieurs étapes.

➤ La réduction du nitrate en ammonium

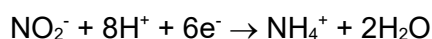
Cette réduction s'effectue en 2 étapes grâce à deux enzymes :

- la **réduction de NO₃⁻ en NO₂⁻ par la nitrate réductase (NAR)** a lieu **dans le cytosol** :



Le **donneur d'électrons** est le **NADH₂**, il est fourni par la **respiration**.

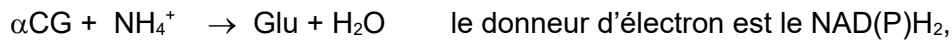
- la **réduction de NO₂⁻ en NH₄⁺ par la nitrite réductase (NIR)** a lieu **dans les plastes** :



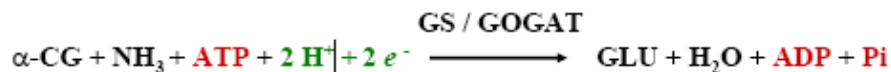
La **nitrite réductase** reçoit les électrons de la **ferredoxine** dans les feuilles (ou d'une autre protéine **FeS** dans les racines). La **ferredoxine** est de nouveau réduite par le **NADPH₂**. Il y a donc un **lien étroit entre la photosynthèse et la réduction des nitrites**.

- la biosynthèse des acides aminés à partir de l'ammonium

Les aa sont formés à partir de la fixation du NH_4^+ absorbé directement ou provenant de la réduction des nitrates, **sur des acides α cétoniques, en particulier sur l' α cétooglutarate** provenant du cycle de Krebs et aboutissant à la formation de glutamate :



Cette réaction peut se faire directement dans la mitochondrie (cependant moins courante, en cas d'excès de NH_4^+) ou en général dans le chloroplaste où elle nécessite 2 étapes catalysée par 2 enzymes, la glutamine synthase (GS) puis la glutamate synthase (GOGAT). Cette voie est plus coûteuse en énergie car elle nécessite en plus 2 ATP. Cet ATP et le NADPH_2 sont fournis par la chaîne photosynthétique. Il y a donc **là encore compétition entre l'assimilation du CO_2 et celle de l'azote.**



A partir du glutamate formé, la cellule pourra **par transamination synthétiser de nombreux autres aa.**

Ce procédé très courant y compris chez les animaux consiste en l'échange de groupement cétonique et amine entre un acide aminé et un acide cétonique provenant en particulier du cycle de Krebs.

2.1.2 l'assimilation de l'azote atmosphérique, la diazotrophie

Le N_2 atmosphérique est donc une **réserve nutritive potentielle considérable** à condition de le transformer en forme minérale assimilable par les végétaux.

Une très faible fraction de l'azote atmosphérique peut être rendue assimilable par voie purement chimique (orage et UV). Le gain est surtout important en montagne dans les alpages où il peut atteindre 5 à 10 Kg par hectare et par an.

➤ La fixation biologique par l'association symbiotique Rhizobium/Légumineuse pour rappels

document 20 : rappel sur l'assimilation du N_2 par l'association symbiotique Rhizobium/Fabacée

Les fabacées ou Légumineuses réalisent une fixation biologique du diazote atmosphérique grâce à leur **association symbiotique** avec des **bactéries du genre Rhizobium**. La symbiose est visible par la présence de **nodosités** ou nodules, à la surface des racines.

La nitrogénase est un **complexe multienzymatique codée à partir de gènes bactériens**, les **gènes nif** et permettant la **fixation de l'azote atmosphérique et sa réduction en NH_4^+** :



Le NH_4^+ n'est pas exporté tel quel des bactéroïdes mais est rapidement fixé sur du glutamate pour former de la glutamine, forme de transport privilégiée dans la sève brute végétale.

10% de cet azote fixé est libéré dans la rhizosphère, le reste est exporté et utilisé par la plante pour la synthèse d'autres aa et autres molécules azotés (uréïdes) ou mis en réserve dans les graines.

La synthèse de la nitrogénase est inhibée par les ions NH_4^+ ainsi que par les nitrates (explique l'effet dépressif des engrais azotés sur la fixation de l'azote atmosphérique).

La nitrogénase est également inactivée par l'oxygène. Des protéines particulières, les nodulines, et plus particulièrement la leghémoglobine, chromoprotéine dont la globine est codée par le génome de la plante mais dont l'hème est synthétisé par la bactérie, permet de diminuer le taux d'O₂ (l'activité de la nitrogénase étant inhibée par l'O₂) tout en assurant la respiration des bactéries. La leghémoglobine, donnant une couleur rouge aux cellules infectées.

Remarque : un petit nombre d'espèces (quelques centaines) possèdent des nodules fixateurs d'azote. Ce sont des arbres ou des arbustes tels que l'Aulne (Bétulacée). La symbiose est alors réalisée avec des bactéries filamenteuses (les Actinomycètes) du genre Frankia.

➤ La fixation biologique est également réalisée par les microorganismes libres

Ces **bactéries diazotrophes libres dans le sol** possèdent également la nitrogénase et sont capables de fixer le N₂ atmosphérique et de le réduire en NH₄⁺.

Ces bactéries sont autotrophes au carbone mais présentent des métabolismes variés concernant l'assimilation du carbone, on peut retenir comme exemple :

- les *Azotobacters*, bactéries hétérotrophes aérobies,
- les *Clostridium*s, bactéries hétérotrophes anaérobies
- les *cyanobactéries* comme nostoc, bactéries autotrophes (**cf doc 5b**)

Cette fixation exige une température assez élevée (maximum vers 25°C). Les *Azotobacters* requièrent plutôt un sol sec et un pH > à 6 alors que les *Clostridium*s préfèrent un sol humide et supportent mieux l'acidité bien qu'ils préfèrent des sols neutres.

Dans les conditions normales, il n'y a généralement pas excrétion des produits azotés et **tout l'azote fixé l'est au profit des fixateurs, mais après leur mort, l'azote est mis à disposition des végétaux ; les fixateurs libres participent donc à l'enrichissement des sols en azote de 5 à 40 Kg/ha/an** selon les conditions (10 à 20 en moyenne). Ceci n'est pas négligeable bien que les besoins de la végétation soient de 100 à 200 Kg/ha/an.

Document 21 : bilan des différentes possibilités de la fixation biologique de l'azote minéral

2.2 l'activité microbienne du sol permet la minéralisation de l'azote organique et l'évolution de l'azote minéral jusqu'à sa forme N₂

La majeure partie de l'azote du sol est sous forme organique contenue dans la nécromasse. Cette matière organique d'origine animale et végétale s'accumule et subit par minéralisation des transformations plus ou moins poussées sous l'influence de la microflore du sol.

La MO végétale est faite de glucides facilement fermentescibles (amidon), de glucides plus résistants (cellulose, hémicellulose, lignine (10 à 30%)), de lipides divers et quelques protides. La MO animale est plus riche en protéines d'où une fermentation putride avec libération de H₂S et CH₄.

Document 22 : la minéralisation de la matière azotée

2.2.1 L'ammonification par les bactéries ammonifiantes minéralise l'azote organique

Document 23 : les différents type de métabolisme

Document 24 : l'ammonification

L'ammonification aboutit à la **libération d'ions NH_4^+** , elle est réalisée par les **bactéries ammonifiantes** et permet de dégrader les acides aminés de la nécromasse mais également l'urée issue de l'excrétion azotée des animaux.

Ces bactéries sont chimio-organotrophes aérobies et réalisent une dégradation totale de la matière organique carbonée et azotée

L'ammonification dépend de la composition de l'humus et du rapport C/N :

- si celui-ci est $<$ ou $=$ à 10, elle est importante et conduit à un humus de type mull ;
- si le / est $>$ à 25, le taux d'ammonification est faible, on obtient un humus de type mor.

Elle dépend aussi du type de sol :

- rapide sur sol neutres ayant une roche mère calcaire
- lente sur les sols acides

Elle nécessite une température élevée (25 à 40°) et une bonne humidité.

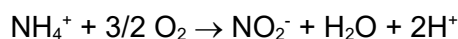
L'ammonification fondamentale puisqu'elle permet de reformer une forme directement assimilable pour les plantes.

2.2.2 La nitrification permet de former des nitrates à partir du NH_4

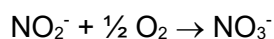
→ cf document 22

Elle conduit à la formation de nitrates et est réalisée en deux étapes :

- la **nitrosation** par des bactéries de type **Nitrosomonas** (bactéries nitreuses) :



- la **nitratation** par les bactéries de type **Nitrobacter** (bactéries nitriques) :



Document 25 : chaîne de transport des électrons chez Nitrobacter (pour rappels)

Les bactéries de la nitrification sont **chimolithotrophes** c'est-à-dire qu'elles **utilisent l'énergie libérée par les réactions d'oxydations** du NH_4^+ en NO_2^- et du NO_2^- en NO_3^- **pour réduire le CO_2** (ou les carbonates) **en glucides. Ce sont donc des producteurs primaires au sein de l'écosystème sol** puisque **autotrophes au carbone (comme les cyanobactéries)**

La nitrification exige donc de l'oxygène et donc un sol bien aéré, une température élevée (optimum entre 25 et 30°C) mais aussi une **bonne humidité et un pH basique** (optimum à 8.5).

Remarque :

Dans un sol pauvre en azote, les bactéries nitrifiantes sont en compétition avec d'autres micro-organismes du sol et les végétaux pour le NH_4^+ . Ce n'est qu'à partir d'une quantité seuil que le NH_4^+ permet la nutrition des bactéries nitrifiantes ET des végétaux qui sont en compétition..

Une partie de la MO du sol échappe à cette minéralisation primaire et subit l'humification → cf BGB

2.2.3 La dénitrification restitue l'azote minéral à l'atmosphère mais produit également des gaz à effet de serre

Document 26 : la dénitrification par les bactéries du genre *Pseudomonas*

Une partie des nitrates issus de la nitrification peut être réduit en nitrites, oxydes d'azote ou en diazote gazeux selon les espèces de bactéries **dénitrifiantes du genre *Pseudomonas***.

Cette dénitrification résulte d'une **respiration anaérobie** où **l'accepteur final des électrons** n'est pas l'O₂ mais le **NO₃⁻**

Lors de cette respiration anaérobie **le NO₃⁻ peut être en réduit en nitrite (NO₂⁻), en oxyde nitreux (N₂O), en azote (N₂) ou en ammoniac (NH₃)**, selon les espèces.

Lorsque le nitrate est principalement réduit en N₂ (gaz) et/ou en oxyde nitreux N₂O (gaz), le processus boucle le cycle de l'azote puisqu'il permet de restituer l'azote du sol vers l'atmosphère.

Les microorganismes impliqués dans le dénitrification coexistent dans les écosystèmes avec les microorganismes nitrifiants.

Remarque : Les bactéries du genre *Pseudomonas* sont des chimio-organotrophes mais il existe également des bactéries dénitrifiantes chimio-lithotrophes qui utilisent un composé réduit minéral tel que le H₂S ou le H₂ comme donneur d'électrons.

La dénitrification à des conséquences agronomiques car elle diminution de fertilité du sol par départ de nitrates **et des conséquences climatiques** car elle génère du N₂O qui est un gaz à effet de serre.

Conclusion :

Dans la biomasse, les valeurs (réflexion quantitative) sont faibles par rapport au Carbone (milliards de tonnes). Cela reflète la rareté de l'élément azote pour les êtres vivants (protéines, acides nucléiques). Cela rend donc encore plus nécessaire la rotation de cet élément (réflexion qualitative) au niveau du cycle de l'azote.

Les flux engendrés par les processus biologiques, contribuent à 95 % des flux totaux en azote.

III. Les cycle de l'azote et du carbone sont couplés

1. l'assimilation de l'azote minéral en azote organique entre en compétition avec la fixation du CO₂ lors de la photosynthèse

→ cf document 19

L'assimilation de l'azote chez les végétaux quand elle a lieu dans les feuilles, utilise une partie de l'énergie libérée par la chaîne photosynthétique au détriment du cycle de Calvin.

2. la minéralisation de la matière organique dépend du rapport C/N (→ cf B6B)

Document 27 : couplage des cycles du carbone et de l'azote lors de la minéralisation de la MO

La minéralisation de la matière organique par les micro-organismes du sol libère aussi bien du CO₂ que des nitrates et des ions ammonium. Cependant cette minéralisation dépend de l'activité des décomposeurs qui elle même dépend du taux C/N de la matière organique morte.

- **Quand le rapport C/N <15**, c'est à dire quand la MO est pauvre en lignine et cellulose et comparativement plus riche en azote, la **minéralisation est rapide**, et les **bactéries** nécessitant beaucoup d'azote (C/N de 6 à 8) se multiplie correctement. L'**humus** est alors de **type mull**

- **Quand le rapport C/N > 20**, c'est à dire quand la MO est riche en lignine et cellulose et comparativement plus pauvre en azote, la croissance bactérienne est alors limitée et la **minéralisation est lente** et effectuée en majorité par les **champignons mycorhiziens**. L'humus est alors de **type moder**.

Les cycles de carbone et de l'azote sont donc couplés par l'intermédiaire des êtres vivants.

La composition de la matière organique des sols permet ou non l'utilisation du carbone et de l'azote et donc la rotation de ces éléments au sein des cycles.

IV. Les activités anthropiques modifient les cycles du carbone et de l'azote

1. les activités humaines modifient le cycle biogéochimique du carbone

Document 28 : variations des flux de carbone en Gt/an entre les réservoirs dues aux activités anthropiques

Depuis la révolution industrielle, l'homme utilise comme source d'énergie principale la combustion des énergies fossiles c'est à dire des roches carbonée ainsi que la combustion du bois.

La combustion des roches carbonées libère actuellement près de **10 Gt/an de CO₂ vers l'atmosphère** et détourne ainsi le carbone du cycle lent vers le cycle rapide.

A cela il faut ajouter :

- les activités agricoles et notamment l'**élevage des bovins**, à l'origine de l'émission de méthane et de CO₂, conséquence de la rumination. Le flux estimé est de **1,5 Gt/an**.

- la déforestation diminue la « pompe photosynthèse » quand elle n'est pas remplacée par des cultures mais entraîne également un flux accru de CO₂ vers l'atmosphère quand le bois est utilisé pour le chauffage estimé à **3Gt / an**.

- la cimenterie qui utilise des roches carbonatées et des argiles qui par chauffage libèrent environ **0,2Gt /an**.

La hausse de la quantité de carbone dans l'atmosphère est cependant **modérée par la « pompe océanique »** qui absorbe 1/4 du CO₂ émis **et l'activité photosynthétique du phytoplancton** principalement qui absorbe également 1/4 environ du CO₂ d'origine anthropique.

Le bilan n'en est pas moins une hausse du réservoir atmosphérique estimée à 6 Gt/an.

Les activités humaines perturbent ainsi le cycle du carbone mais **modifient également le climat de la Terre par l'émission de gaz à effet de serre dont le CO₂ et le méthane font partie.** (CF BGC)

De plus, le réchauffement climatique accélèrent également la perturbation de ce cycle par la libération du méthane piégé dans le permafrost et par la diminution la pompe océanique.

2. les activités humaines modifient le cycle de l'azote

L'emploi des engrais azotés en excès dans l'agriculture à deux conséquences majeures pour l'environnement :

➤ conduit à une hausse des gaz azotés à effet de serre à court terme.

L'excès des nitrates dans le sols stimulent l'activité des bactéries dénitrifiantes qui libèrent de l'oxyde nitreux contribuant à l'effet de serre.

➤ entraîne l'eutrophisation des écosystèmes aquatiques par lessivage des nitrates

Document 29 : exemple du mécanisme de l'eutrophisation d'un lac

Les nitrates amis également des phosphates entraînés par lessivage dans les cours d'eau stimule la prolifération des algues. Cette prolifération en surface diminue la luminosité et la croissance des végétaux plus en profondeurs. L'accumulation de la MO morte au fond de l'eau et la baisse de la photosynthèse entraine une diminution de l'O₂ et l'accumulation de vase au fond qui conduit progressivement au comblement du lac.

Document 30 : l'eutrophisation à l'origine des marées vertes

Cette eutrophisation peut également se produire sur les côtes et provoquer ce qu'on appelle des « **marées vertes** » illustrant le couplage entre les écosystèmes continentaux et les écosystèmes océaniques.

En Conclusion :

Le cycle du carbone et de l'azote sont des **cycles complexes reposant sur l'activité des êtres vivants.** Ces cycles dont **l'équilibre repose sur des processus plus ou moins long** sont **bouleversés par les activités anthropiques** qui modifient les flux entre les réservoirs et participent non seulement au réchauffement climatique mais également perturbent les relations interspécifiques et les niches écologiques des êtres vivants.