

Chapitre II : Les cycles biogéochimiques et leur perturbation

2.1 Nature et constitution des cycles biogéochimiques

En principe, un cycle évoque un circuit fermé, l'élément considéré devant revenir à l'état initial après avoir suivi un parcours constitué par les différentes étapes de son histoire. Dans le cas qui nous préoccupe ici, cela a un sens si l'on envisage le fonctionnement global du système terre, donc si l'on s'intéresse au bilan, aux transferts et aux stocks d'éléments à toutes les échelles de temps et d'espace ; c'est ce que l'on désigne alors par le terme cycle global.

Le cycle biogéochimique représente un mécanisme fondamental pour maintenir l'homéostasie de la biosphère, C'est un flux continu de matière qui circule entre les organismes vivant, chaîne alimentaire et le milieu ; ce qui a pour conséquence de faire passer de nombreux éléments de l'état minéral à l'état organique et inversement. De sorte que, les divers compartiments du système biosphère sont liés par un transfert de matière et d'énergie.

On distingue habituellement dans le cycle général, trois sous-cycles qui sont en interaction :

- le sous-cycle biologique proprement dit, qui correspond à la circulation des éléments entre le sol et la plante (prélèvement), puis entre la plante et le sol (restitutions par les litières aériennes et souterraines, exsudats radiculaires, sécrétion) ;
- le sous-cycle biochimique, qui recouvre la redistribution des éléments au sein des plantes pérennes ; il s'agit des translocations internes des éléments des tissus âgés vers les organes en croissance, qui donnent à la plante une certaine autosuffisance, diminuent la demande au sol et contribuent à une certaine résilience par rapport aux contraintes de l'environnement ;
- le sous-cycle géochimique, qui correspond à l'ouverture des cycles précédents d'un côté vers l'atmosphère avec les rejets atmosphériques et la fixation symbiotique ou non de l'azote, et de l'autre vers les eaux de surface et les nappes phréatiques par suite des pertes par drainage au-delà de la zone radiculaire. Le plus actif des trois est le sous-cycle biologique.

En bio géochimie, et notamment en agrochimie, on le désigne aussi quelque fois sous le nom de cycle interne, car il correspond à la circulation en permanence des éléments minéraux (en provenance des sols et des roches) vers les êtres vivants (micro-organismes et végétaux notamment).

Puis après la mort de ces derniers au sein des matières organiques inertes qui s'accumulent à la surface des sols (litières–rhizosphère) avant d'être minéralisées à leur tour (on parle quelquefois de reminéralisation) et de constituer dès lors des nutriments pour les êtres vivants.

2.2 Rôle du « système écologique »

Ce système correspond au domaine spécifique des êtres vivants, notamment des micro-organismes (hétérotrophes) et des végétaux (autotrophes), le développement de ces derniers reposant dans les zones terrestres sur deux interfaces :

- d'une part, les organes foliaires du couvert aérien (phyllosphère) très liés aux flux en eau et en carbone (CO₂) ;
- d'autre part, l'appareil racinaire souterrain (rhizosphère), qui assure la nutrition minérale par l'intermédiaire du sol (azote, phosphore, potassium, soufre. . .).

Entre ces deux interfaces, il ne faut pas oublier d'indiquer qu'une redistribution générale des éléments chimiques est aussi assurée par voie interne entre tous les organes de la plante (cycle biochimique). Au total, la circulation des éléments repose sur trois processus :

- les transferts entre l'atmosphère et la plante ; ils relèvent du domaine de la bioclimatologie, qui est essentiellement de type physico hydrique en relation avec les phénomènes d'évapotranspiration ;
- les redistributions entre les différents organes de la plante, donc au sein même du végétal. Reposant sur des processus biochimiques, ce genre de circulation s'intègre dans le domaine de l'écophysiologie fonctionnelle ; ce dernier ne sera pas, non plus, traité directement, même si en de nombreuses occasions il y sera fait allusion ;
- enfin, les transferts sol-plante, qui sont à la base de la nutrition minérale des végétaux et donc de la production de biomasse. Ils sont typiquement biogéochimiques, puisque ceux-ci mettent en jeu à la fois des processus biochimiques liés aux organismes vivants et aux matières organiques résiduelles et des processus géochimiques associés aux constituants minéraux (primaires et secondaires). C'est ce dernier domaine, intermédiaire entre le monde minéral et le monde vivant, qui sera privilégié dans ce rapport consacré aux cycles biogéochimiques des écosystèmes continentaux.

2.3 Importance du facteur sol et ses conséquences dans le domaine biogéochimique

Au sein de la biosphère terrestre, le sol, qui constitue le nœud du système biogéochimique, est un objet infiniment plus complexe et moins homogène que l'air et les eaux. De nature organo-minérale, il est en effet meuble, poreux, hydraté, tout en abritant de nombreux micro-organismes. C'est la raison pour laquelle, il constitue un bioréacteur de premier plan, ce qui lui permet d'assurer de nombreuses fonctions, dont entre autres :

- la régulation permanente des phénomènes biologiques et notamment le développement de la végétation ;
- le recyclage en continu de nombreux éléments chimiques, suite à la décomposition par les micro-organismes telluriques, des composés organiques, que ceux-ci soient naturels ou artificiels et qu'ils soient bénéfiques ou nocifs ; ce qui donne au sol, à condition de ne pas dépasser les capacités de recyclage, un certain pouvoir épurateur, qui est connu depuis le début de l'humanité. Mais par ailleurs, du fait de son « pouvoir absorbant » caractéristique, le sol constitue aussi un réceptacle tout indiqué pour capter divers éléments minéraux introduits ou disséminés, en relation avec l'activité humaine ;
- Les éléments considérés comme nutriments pour les plantes, le carbone, l'azote, le phosphore, le soufre et le potassium sont les plus importants quantitativement. Les dysfonctionnements de leurs cycles liés aux activités humaines posent également les plus graves problèmes.

2.4 Illustration des cycles biogéochimiques

Le fonctionnement général de la biosphère, et notamment de la biosphère continentale repose avant tout sur la maîtrise des cycles géochimiques des différents éléments chimiques qui participent à la vie de la planète ; et ceci résulte de plusieurs constatations :

- a. seuls en effet les cycles biogéochimiques permettent d'avoir une vision globale du comportement dynamique des éléments chimiques dans l'environnement, aussi bien à travers les divers compartiments (biotiques et abiotiques) de la planète qu'au cours des différents âges qui ont marqué son évolution ;
- b. seuls, ils sont à même de conduire l'homme à prendre conscience de son action trop pressante sur des milieux où il doit continuer à vivre ;

c. seuls, ils permettent d'apprécier le degré de sollicitation que ce dernier fait peser sur des systèmes naturels en évolution permanente ;

d. seuls enfin, ils sont susceptibles de lui suggérer des modalités en vue de la gestion des écosystèmes ou encore de lui apporter des formules permettant la régénération des environnements perturbés.

Donc l'unité de la biosphère apparaît particulièrement lorsque l'on considère le cycle des divers éléments nécessaires à la manifestation et au déploiement de la vie. Pour l'illustrer on présentera le cycle de l'eau puis les cycles du carbone, l'azote, phosphore, le soufre et le silicium.

2.4.1 Le cycle de l'eau

L'eau est un constituant essentiel de la biosphère : la vie apparut dans l'océan ; les êtres vivants sont constitués d'eau pour 70% de leur poids en moyenne ; l'eau est le substrat fondamental des activités biologiques.

La biosphère renferme environ 1390 millions de km³ d'eau dont la majeure partie (97%) constitue les océans et est salée. L'eau douce ne représente donc que 41,7 millions de km³ ; dont 33 immobilisés dans les glaciers. L'atmosphère en renferme 13000 km³ sous forme de vapeur alors que, la biomasse animale et végétale renferme seulement 400 km³. Ainsi, la part des réserves d'eau de la biosphère présente dans les êtres vivants est absolument infime (0,00005% !).

Les principaux flux qui constituent le cycle de l'eau sont schématisés dans la figure 15.

L'énergie solaire provoque une évaporation annuelle de 425000 km³ au-dessus des océans et une évapotranspiration à la surface des continents de l'ordre de 111000 km³ par an. Cette eau retombe sous forme de précipitations mais le bilan est négatif pour les océans (385000 km³/an), positif pour les continents (71000 km³/an). Le surplus terrestre revient aux océans par les fleuves (28000 km³/an), et plus lentement, par infiltration (12000 km³/an),

Le cycle de l'eau comporte deux parties principales :

- la partie atmosphérique : Transport d'eau par les vents, essentiellement sous forme de vapeur.
- la partie terrestre du cycle, représentée par l'écoulement superficiel ou souterrain des eaux.

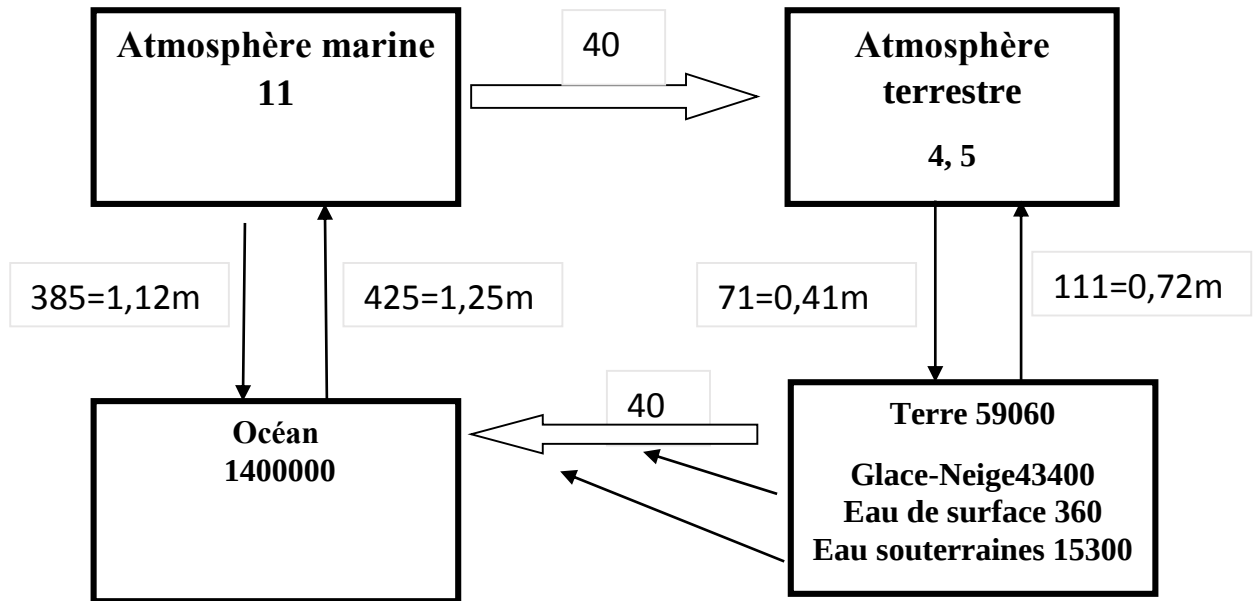
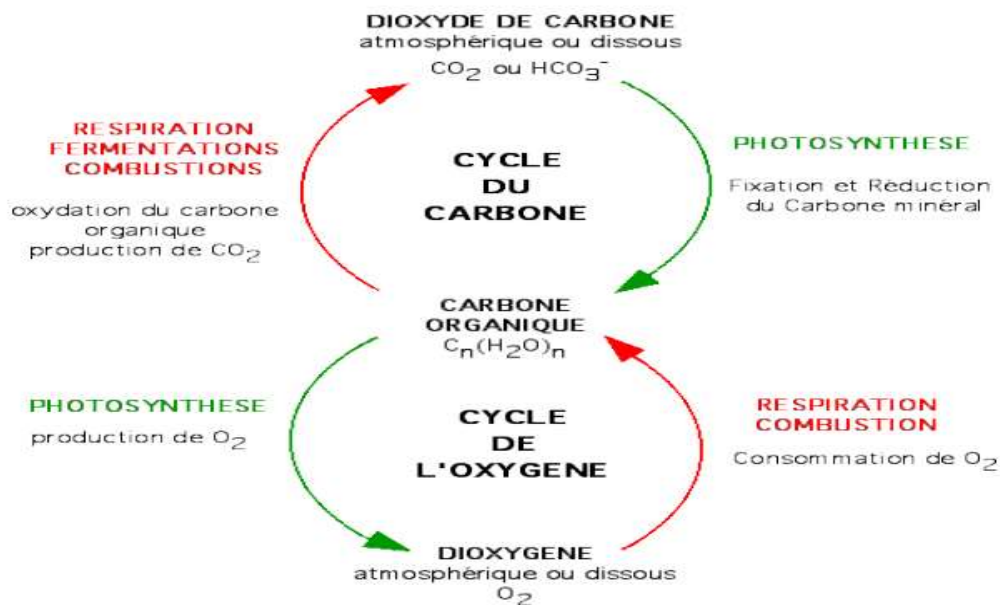


Figure 1 6 : Cycle de l'eau (Boulaine J, 1996)

2.4.2 Le cycle de l'oxygène et du carbone

La photosynthèse des végétaux chlorophylliens est responsable de la fixation et de la réduction de CO_2 , ainsi que de la libération de l' O_2 . A l'inverse, la fonction respiratoire des organes et organismes non chlorophylliens est responsable de l'oxydation des composés organiques (consommation de O_2 , et libération de CO_2). Il en résulte un cycle pour le carbone et un cycle pour l'oxygène qui sont antiparallèles

Figure 17 : Cycle de l'oxygène et du carbone (<https://planet-vie.ens.fr/>)

2.4.3 Le cycle de l'azote

A la différence du carbone l'atmosphère est riche en azote (79%), mais peu d'organismes sont capables de l'utiliser sous cette forme (N_2). Du point de vue biologique le principal réservoir d'azote est constitué par l'azote organique (urée, protéine, acide nucléique) et minéral (ammoniac, nitrite, nitrate). Le cycle de l'azote implique une série de transformations chimiques qui sont l'œuvre d'un petit nombre d'organismes spécialisés (fig18).

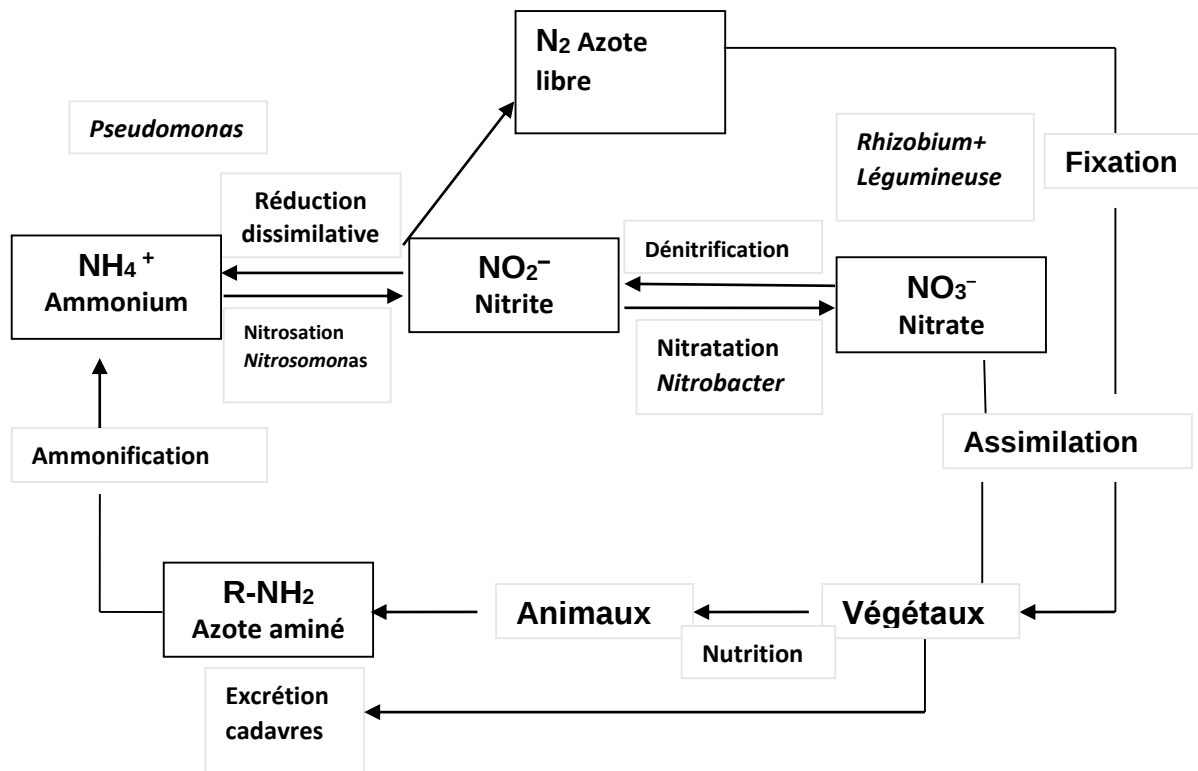


Figure 18 : Voies et mécanismes fondamentaux du cycle de l'azote impliquant les êtres vivants ((Boulaine J, 1996)

Fixation de l'azote : Pour devenir biologiquement utilisable l'azote doit être fixé sous forme de molécules inorganiques telles que l'ammoniac (NH_4) et les nitrates (NO_3^-). Cette fixation peut résulter de processus physico-chimiques. La quantité de nitrates ainsi produite annuellement s'élève à quelque 7,5million de tonnes. Bien que importante est la fixation biologique qui est estimée à 44million de tonnes par an. En fin il ne faut pas oublier la synthèse industrielle d'engrais qui atteignait déjà 30 million de tonnes par an à la fin des années soixante et qui n'a cessé de croître depuis.

La fixation biologique d'azote est le fait des bactéries, d'algues bleues et de certains champignons.

La majeure partie fait intervenir des formes symbiotiques, telles que les bactéries du genre *Rhizobium* qui forment des nodules dans les racines de légumineuses. Il existe aussi des formes libres capables d'effectuer cette opération, soit en condition d'aérobiose (*Azotobacter*), soit en condition d'anaérobiose (*Clostridium*).

L'ammonification : Le métabolisme des êtres vivants implique l'élimination de déchets azotés. Les cadavres constituent aussi partiellement une source de matière azotée organique. De nombreux organismes hétérotrophes, bactéries, actinomycètes et champignons, vivent de ces substrats organiques en libérant de l'azote inorganique (NH_4^+). C'est un processus de minéralisation appelée ammonification. L'énergie est utilisée par les bactéries.

La nitrification : La plupart des organismes ne peuvent utiliser l'azote sous forme d'ammonium et celui-ci doit être transformé en nitrate. Cette nitrification se déroule en deux étapes :

- la nitrosation (conversion de l'ammonium en nitrite)
- et la nitrification (conversion de nitrite en nitrate).

Chacune est contrôlée par des micro-organismes spécifiques, tels que les *Nitrosomonas* dans le premier cas et les *Nitrobacter* dans le second.

La dénitrification : La nitrification rend l'azote utilisable pour le métabolisme des êtres vivants. Cependant, certains organismes sont capables de couper le cycle en convertissant les nitrates en nitrites puis les nitrites en ammonium.

2.4.4 Le cycle du phosphore

Le phosphore, élément important de la matière vivante, est un constituant de l'ADN, de l'ARN et de l'ATP. Il est plus rare que l'azote dans la biosphère et son réservoir principal est constitué par diverses roches qui cèdent peu à peu leurs phosphates aux écosystèmes.

Dans le milieu terrestre la concentration en phosphore assimilable est souvent faible et joue le rôle de facteur limitant. Une partie importante du phosphate est entraînée en mer où elle peut se retrouver immobilisée dans les sédiments profonds. Lorsqu'il n'existe pas de courants ascendants permettant la remontée des eaux en surface, la pénurie de phosphore est un facteur limitant. Le passage de l'état organique à l'état inorganique est assuré par des bactéries.

Le phosphore entre dans les chaînes alimentaires marines par l'intermédiaire du plancton et des poissons.

Les oiseaux marins piscivores assurent son retour, au moins partiel, dans le milieu terrestre. Les engrais phosphatés excédentaires et les divers produits contenant des phosphates comme les lessives sont, comme les nitrates, emportés dans les eaux de surface et souterraines où ils contribuent à l'eutrophisation.

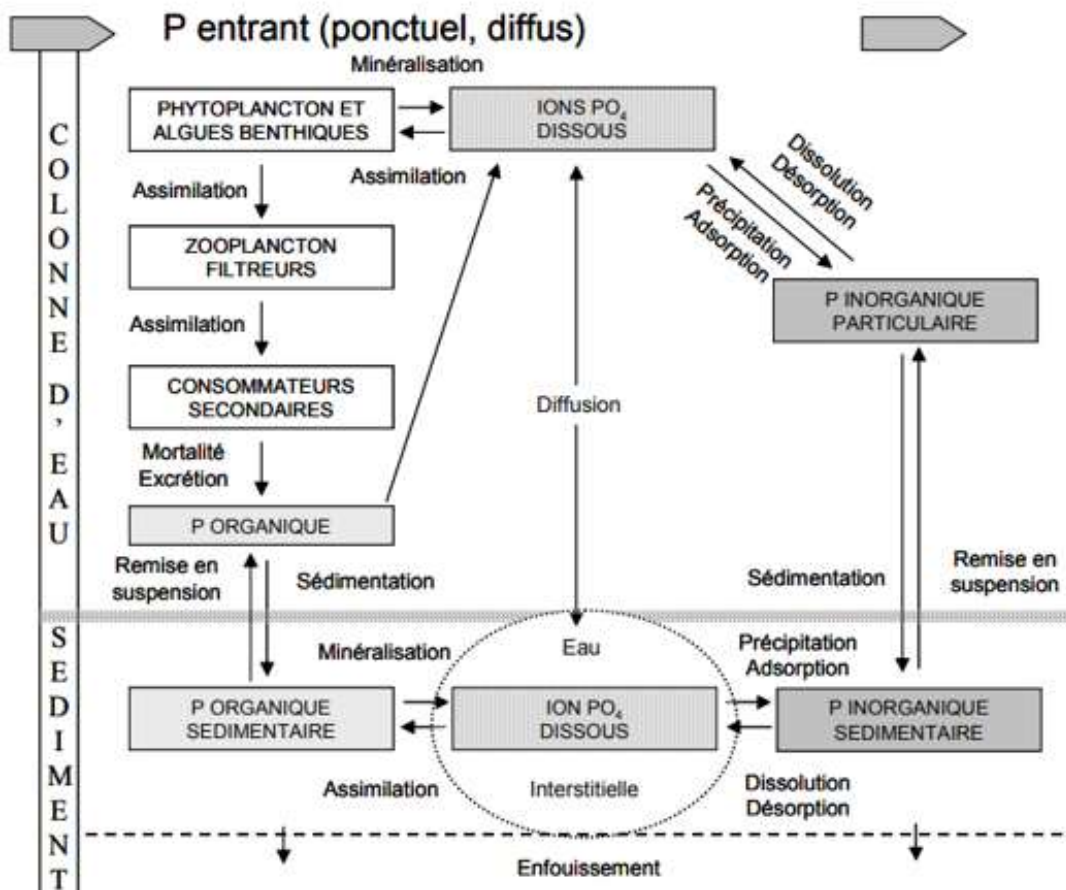


Figure 19 : Cycle du phosphore (La Jeunesse, 2001 cité par Némery J, 2003)

2.4.5 Le cycle du soufre

Le cycle biogéochimique de cet élément n'est surtout bien connu que par le phénomène des pluies acides où il se combine à l'action des oxydes d'azote. Comme les autres éléments le soufre est présent sous les deux formes, minérale et organique.

Comment se forme l'ion sulfate ?

En milieu aérobie : Si la quantité d' O_2 est suffisante, l'ion sulfate se forme dans l'eau et le sol par oxydation du soufre.

Au même temps de l'hydrogène sulfuré qui s'échappe aux sédiments anaérobies profonds réintégrant le cycle ; d'autre part, le H_2S formé s'oxyde pour donner du soufre par chimiosynthèse. Si le milieu reste encore ambiant (oxygénation) et le soufre sera en nouveau transformé en SO_4^{2-} pour d'autre organisme.

En milieu anaérobie ; Aux endroits où on rencontre des SO_4^{2-} dans des conditions anaérobies exp : vase noire, boue...etc

Les bactéries réductrices qui transforment sels en H_2S , ce gaz remonte et il est à son tour oxydé.

Le soufre existant dans les sols provient de la décomposition de la roche mère. Le soufre du sol est absorbé par les racines des plantes qui l'incorporent dans les acides aminés sulfurés.

Il est restitué au sol lorsque les plantes meurent. Sous l'action des microorganismes dont certains réduisent le soufre organique en H_2S et dont d'autre oxydent ces produits de décomposition en soufre ou en sulfate. Ces derniers sont repris par les racines des plantes et assurent la continuation du cycle. En dehors du soufre d'origine organique fourni par les plantes, il peut s'introduire dans le cycle des quantités importantes de soufre apportées par l'atmosphère et l'eau de pluie des régions industrielles (combustion, volcans...etc).

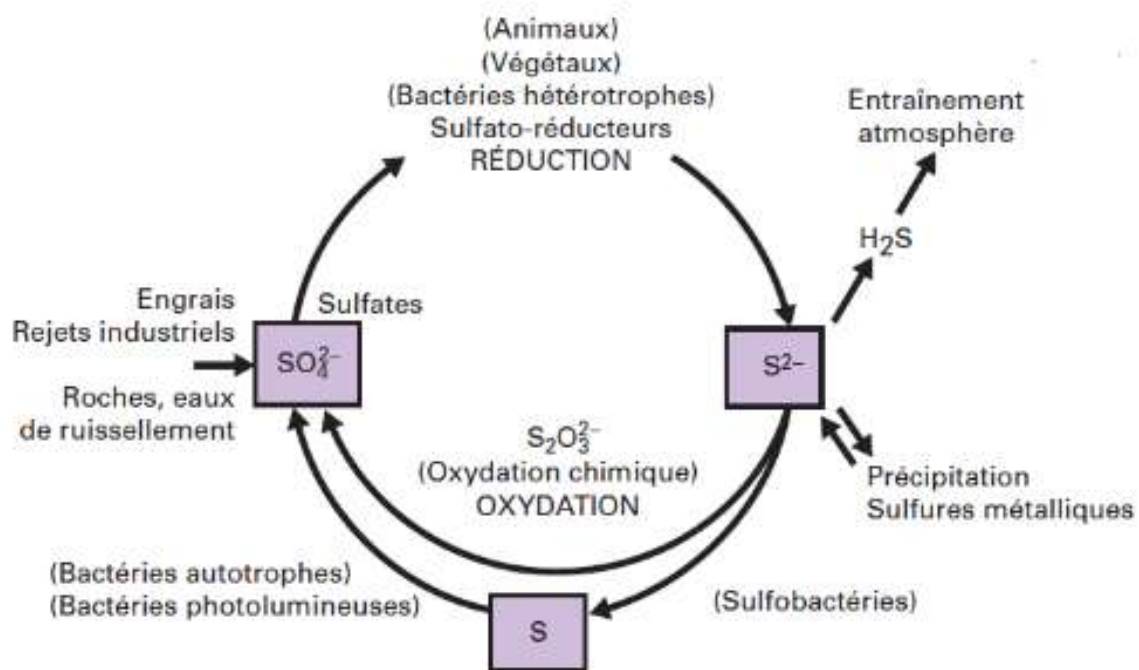


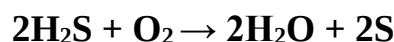
Figure 20 : Cycle du soufre (Memento Dégrement, 1990)

<https://www.suezwaterhandbook.fr>

Selon le schéma ci-dessus, présentant le cycle du soufre, on peut résumer les réactions de transformation du soufre en :

- Réactions simples d'oxydoréduction chez :

- les **Leucothiobactériales** (ou bactéries sulfuraires incolores), comme *Beggiatoa* ou *Thiothrix* :

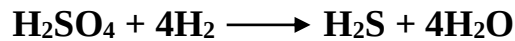


- certaines **Protobactériacées**, comme *Thiobacillus thiooxydans* qui oxyde ensuite le soufre en acide sulfurique :



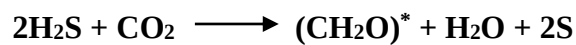
En milieu aérobie, le terme final peut donc être l'apparition de sulfates.

En revanche, en milieu anaérobie, ceux-ci peuvent être réduits par d'autres bactéries (*Desulfovibrio desulfuricans*, certains *Clostridium*...) qui sécrètent des sulfatoréductases capables de catalyser la réaction globale :



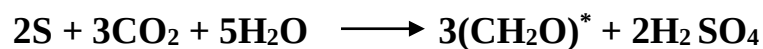
Certaines de ces bactéries interviennent dans les phénomènes de corrosion des canalisations en fonte, acier ou en béton.

- Réactions photosynthétiques chez les **Rhodothiobactériales** (ou bactéries sulfuraires pourpres) comme *Chromatium*, *Thiospirillum* ou *Thiopedia*, de même que chez les **Chlorothiobactériales** (ou bactéries sulfuraires vertes) comme *Chlorobium* ou *Chlorobacterium* ; le soufre réduit joue le rôle de donneur d'électrons pour transformer le carbone minéral (CO_2) en matière organique et il y a formation de soufre élémentaire :

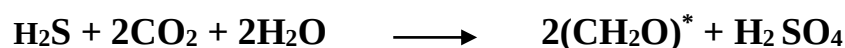


* Dans ces réactions (CH_2O) symbolise la matière organique synthétisée.

Le soufre produit est soit stocké dans la cellule bactérienne, soit excrété, suivant les espèces. Ultérieurement, il peut être transformé en acide sulfurique :



La réaction globale peut alors s'écrire



2.4.6. Le cycle du silicium

Le silicium, l'élément le plus abondant de la croûte terrestre après l'oxygène, constitue sous forme de tétraèdres $[\text{SiO}_4]$ la charpente de la silice, l'oxyde le plus répandu à la surface de la terre, et des minéraux silicatés (feldspaths, amphiboles, pyroxènes) qui représentent plus de 75 % des roches exposées à la surface de notre planète.

Le cycle global du silicium comporte trois compartiments, continental, océanique et atmosphérique, aux stocks très inégaux : considérant les trois premiers mètres de roche, le stock continental est de l'ordre de $3,8 \cdot 10^{17}\text{kg}$, le stock océanique est de l'ordre de $2,5 \cdot 10^{15}\text{kg}$ et le stock atmosphérique est limité aux particules présentes dans les aérosols.

Le silicium est presque toujours présent parmi les produits libérés par l'altération des roches. Il est relativement soluble dans l'eau ($\approx 10^{-2,7} \text{ mol.kg}^{-1}$ à 20°C), sa concentration dans les eaux des sols et des nappes est contrôlée par les cinétiques de dissolution des minéraux des roches et par les dissolutions /précipitations des minéraux secondaires des sols, majoritairement des argiles. Il est transféré des continents vers les océans sous forme dissoute ($\approx 157 \text{ 109 kg.an}^{-1}$) et dans les particules détritiques ($\approx 4 \text{ 400 109 kg.an}^{-1}$). Sous forme dissoute, dans des conditions usuelles des eaux naturelles (pH 3-8), le silicium est essentiellement sous forme d'acide silicique H_4SiO_4 . Il se complexe peu avec les matières organiques naturelles, mais peut se combiner avec l'aluminium dans toutes les gammes de pH pour former des monomères et polymères aluminium-silicium.

Bien que le silicium soit fortement recyclé par de nombreuses espèces de plantes, ce n'est que depuis peu de temps que les agronomes s'y intéressent.

Il n'est avéré comme nutriment essentiel que pour certaines espèces, mais son utilisation comme fertilisant est bénéfique pour de nombreuses espèces, monocotylédones aussi bien que dicotylédones. Il augmente la qualité et la productivité des cultures aussi variées que le riz et la canne à sucre ou la laitue.

La teneur moyenne en silicium dans les phytolithes de plantes, d'après Blecker et al. (2006), est de 39.7% en poids sec. Une fois le végétal mort, ces phytolithes, sont ensuite libérés par dégradation des matières organiques dans les litières et peut être ensuite transférés aux sols ou évacués par voies aériennes ou hydrographiques. Ce cycle biogéochimique du silicium en milieu terrestre est représenté sur la figure 21 qui suit :

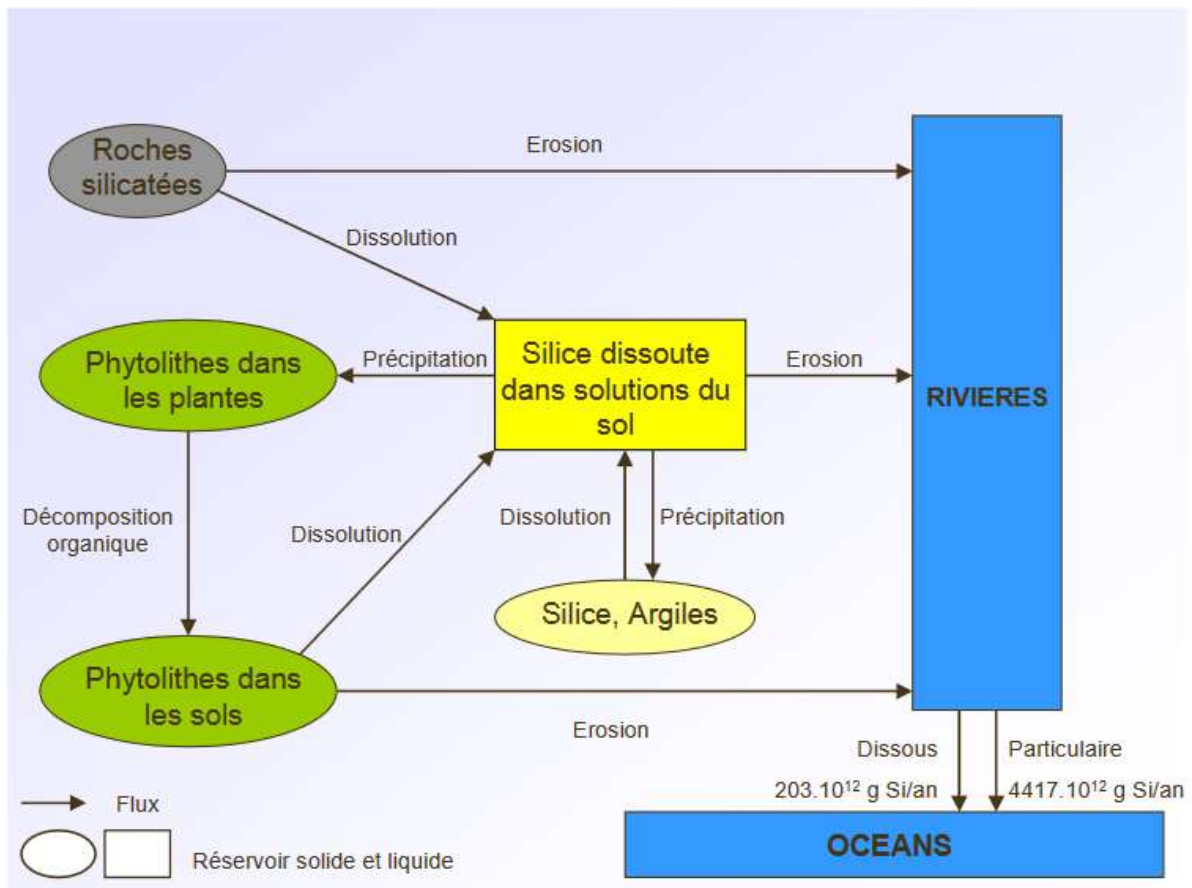


Figure 21 : Cycle biogéochimique du silicium en milieu terrestre (Meunier et *al.*, 2001).

2.5. Perturbation des cycles biogéochimiques

Les activités humaines se traduisent par le rejet dans la biosphère de nombreuses substances dont la présence perturbe les cycles biogéochimiques et est la cause de pollutions très diverses. Les polluants peuvent être des substances toxiques et non biodégradables qui s'accumulent dans les écosystèmes. Il peut aussi s'agir de substances qui sont présentes normalement dans la biosphère mais en faibles quantités. Ces substances ne peuvent plus être contrôlées par les cycles biogéochimiques quand elles deviennent trop abondantes.

La pollution des eaux par les matières organiques, l'accumulation dans l'atmosphère de CO₂ et de méthane qui augmentent l'effet de serre sont des exemples de pollutions provoquées par des substances normalement présentes en faibles quantités dans la biosphère.

Les pesticides, les métaux lourds sont des exemples de polluants non ou peu biodégradables normalement absents dans la biosphère.

Ainsi, le dépérissement des forêts tempérées a été attribué à des pollutions atmosphériques d'origine industrielle (SO_4^{2-} , NO_3^- , . . .) conduisant à une acidification des milieux ; d'où le nom de « pluies acides » donné à ce phénomène.

À l'instar de l'azote, le phosphore est également un nutriment indispensable à la croissance des plantes. La modification de son cycle biogéochimique, causée par l'agriculture (fertilisants, effluents d'élevage) et par les eaux usées urbaines (excréments et détergents), affecte la capacité de la biosphère à le séquestrer et entraîne l'eutrophisation des eaux douces.

Les flux de silicium des rivières sont en diminution, principalement en conséquence de l'eutrophisation et de la construction de barrages qui permettent le développement de diatomées d'eau douce consommatrices de silicium. L'exportation par les cultures est elle-même susceptible de participer à la diminution des flux de silicium. Ce dernier étant un nutriment limitant en milieu marin, il peut en résulter une perturbation notable de la production phytoplanctonique marine.

Ces changements environnementaux résultent d'un côté de l'augmentation de la capacité technologique humaine (développement industriel et urbain, fabrication de nouveaux composés, intensification de la production végétale, concentration de l'élevage dans certaines régions, . . .) et d'un autre de la nécessité de leur mise en œuvre du fait de l'accroissement sans précédent de la pression démographique qui impose au monde d'assurer une production de biomasse de plus en plus élevée.

C'est ainsi, entre autres, que l'homme a été amené :

- à remettre en circuit du carbone provenant des combustibles fossiles (qui était jusqu'à présent soustrait) et à libérer de grandes quantités de CO_2 ne provenant pas de la biomasse ; sans oublier le carbone émis dans l'atmosphère à la suite des opérations de déboisement, puis du labourage répétitif des terres à des fins agricoles, et ce depuis le néolithique ;
- à perturber le cycle de l'azote en fabriquant, puis en utilisant des engrais azotés et en accentuant dans les régions tempérées et tropicales de la planète, les problèmes d'acidification des terres ;
- à contribuer à la salinisation des sols dans les régions arides sous l'influence d'une irrigation régulière des cultures ;

- à modifier la redistribution de divers éléments (phosphore, potassium, chlore. . .) ou composés que l'on a introduit dans le circuit agronomique pour compenser les exportations par les récoltes ;
- à provoquer la dissémination de nombreux métaux en relation avec le développement de la métallurgie et de l'agronomie (cuivre, zinc, nickel, étain, plomb, mercure. . .) ou encore des molécules biocides de synthèse utilisées dans les traitements phytosanitaires ;
- à mettre en circulation des radionucléides à longue durée de vie en rapport avec l'utilisation de l'énergie nucléaire ;
- à produire de grandes quantités de déchets (industriels, agricoles et urbains) qu'il s'agit maintenant de résorber.
- Le cycle du carbone est fortement modifié par la fuite annuelle vers l'atmosphère de 6 à 8 Pg (peta gramme = 10^{15} g) par an de C provenant de la combustion des hydrocarbures fossiles et par le déstockage du C contenu dans la biomasse végétale et les sols. Le cycle de l'azote est affecté par l'addition de 200 Tg (tera gramme = 10^{12}) par an d'azote assimilable apporté sous forme d'azote fixé dans les agrosystèmes et les engrais chimiques ; cet apport qui représente le double des apports de l'ère préindustrielle (estimés à 90-130 tera grammes par an) n'est qu'en partie dénitrifié et l'azote assimilable s'accumule dans les écosystèmes terrestres et aquatiques. La dénitrification est en elle-même une source de pollution atmosphérique significative.