

Popular Democratic Republic of Algeria
Ministry Of High Education and Scientific Research
Abbes Laghrour University Khenchela
Faculty of Natural and Life Sciences
Department Of Ecology and Environment

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة عباس لغرور خنشلة
كلية علوم الطبيعة والحياة
قسم البيئة والمحيط



CYCLES

HYDROBIOGÉOCHIMIQUES

Cours destiné aux étudiants : Master 2 Protection des Ecosystèmes (M2 PE)
Unité d'enseignement fondamentale II (UEF II)
Volume horaire (VH) : 40 heures
Coefficient : 02
Crédit : 04

Année universitaire 2019/2020

Proposé par :
Dr. Omar Ramzi ZIOUCH

Préface

L'environnement sur la planète Terre et son évolution sous l'influence des activités humaines sont devenus des préoccupations majeures pour l'ensemble de la population mondiale.

Le sujet des cycles biogéochimiques et écosystèmes correspond à la prise de conscience encore plus aiguë de la valeur de notre environnement mais aussi de sa fragilité.

Ainsi, la poussée démographique, et les développements industriels et agricoles qui s'y ajoutent, provoquent un profond déséquilibre des cycles biogéochimiques globaux.

Une connaissance très approfondie des mécanismes faisant intervenir un élément dans un certain nombre de processus biologiques a ainsi été acquise au cours des dernières décennies, ce qui permettra de déterminer une nouvelle approche de la nutrition, de la santé, de l'environnement et du climat.

Ce cours s'est intéressé plus spécialement à un certain nombre de problèmes biogéochimiques en fonction de leurs impacts actuels sur la société: production de CO₂, pluies acides, phénomènes de pollution ...

Le cours s'articule de ce fait selon un plan rigoureux avec un premier chapitre introduisant le cadre historique de la biogéochimie, ensuite un second qui explique l'influence anthropique sur le fonctionnement des écosystèmes, un troisième qui traite les structures trophiques et les flux de la matière et d'énergie ainsi que la productivité des différents écosystèmes, le cours s'achève en fin par un chapitre exposant 07 cycles biogéochimiques importants : le cycle de l'Eau, Matière organique, Carbone, Azote, Phosphore, Silicium et Soufre.

| Table des matières: | Page |
|---|-------------|
| I - CHAPITRE 1: CADRE HISTORIQUE DE LA BIOGEOCHIMIE | 1 |
| 1- Géochimie et biogéochimie | 1 |
| 2- Domaines spécifiques de la géochimie et de la biogéochimie | 2 |
| 3- Cycle biogéochimique: nature et constitution | 5 |
| 4- Cycles biogéochimiques et anthropisation | 6 |
| II - CHAPITRE 2: L'HOMME ET L'ECOSYSTEME | 8 |
| 1- Structure et fonctionnement des écosystèmes | 8 |
| 2- Services écosystémiques | 10 |
| 3- Changement globaux | 11 |
| 4- Modification des écosystèmes | 13 |
| 5- Bénéfices de l'homme au détriment des écosystèmes | 22 |
| III - CHAPITRE 3: STRUCTURE TROPHIQUE ET FLUX DE LA MATIERE ET D'ENERGIE | 23 |
| 1. Les structures trophiques | 23 |
| 2. Capture, emmagasinage et circulation de l'énergie dans l'écosystème | 25 |
| 3. Flux d'énergie | 27 |
| 4. Nourrir les humains | 30 |
| 5. Productivité des différents écosystèmes | 33 |
| VI- CHAPITRE 4: CYCLES DE LA MATIERE (BIOGEOCHIMIE) | 36 |
| 1- cycle de l'eau (H ₂ O) | 39 |
| 2- cycle de la matière organique (MO) | 43 |
| 2- cycle du carbone (C) | 46 |
| 3- cycle de l'azote (N) | 53 |
| 4- cycle du phosphore (P) | 60 |
| 5- cycle du silicium (Si) | 66 |
| 6- cycle du soufre (S) | 70 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 74 |

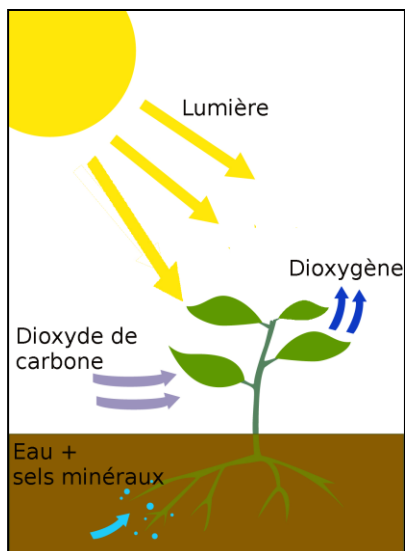
CHAPITRE I

CADRE HISTORIQUE DE LA BIOGEOCHIMIE

1. Géochimie et biogéochimie

La géochimie, qui a introduit au 19^{ème} siècle la chimie dans l'étude des phénomènes globaux mis en œuvre au cours de l'histoire de la Terre, est la science qui traite de la répartition des éléments chimiques dans la géosphère (minéraux et roches). Elle consiste essentiellement en l'application des lois de la chimie minérale aux processus géologiques, qui séparent ou rassemblent les différents éléments chimiques constituant la planète.

Mais, à partir de là, la présence des êtres vivants à la surface du globe a conduit à réfléchir aux relations de ceux-ci avec l'atmosphère et la géosphère, dont une idée schématique est indiquée dans la figure 1 pour les végétaux en tant qu'organismes phototrophes, le fonctionnement de base de la plupart des écosystèmes continentaux.



1 m² de céréales nécessite pour son développement :

– 660 g d'oxygène, 630 g de carbone, 90 g d'hydrogène ;

– 20 g d'azote (N), 8 g de phosphore (P₂O₅), 25 g de potassium (K₂O), 8 g de calcium (CaO), 6 g de Soufre (SO₃), 4 g de magnésium (MgO) ;

– des oligo-éléments : 0,15 g de fer, 0,05 g de manganèse, 0,05 g de zinc, 0,01 g de cuivre, 0,006 g de bore et 0,001 g de molybdène

Figure 1 : Fonctionnement schématique d'un système végétal à la surface du globe.

Lavoisier a été le premier à attirer l'attention sur l'existence d'un cycle de la matière à travers les trois règnes (minéral, végétal et animal) et a donné une interprétation chimique. Il suffit de se reporter à la synthèse qu'il a proposée à ce sujet à la fin du 18^{ème} siècle et qui correspond aussi au libelle du Prix de l'Académie des sciences pour 1794 (écrit de la main de Lavoisier, Archives de l'Académie des sciences – Dossier Lavoisier, 732 b):

« Les animaux se nourrissent ou des végétaux ou d'autres animaux, en sorte que les matières qui les forment sont toujours, en dernier résultat, tirés de l'air et des minéraux. Enfin la fermentation, la putréfaction et la combustion rendent continuellement à l'air et au règne minéral les principes que les végétaux et les animaux leur ont empruntés »

« Rien ne se crée, rien ne se perd, tout se transforme »

La géochimie, qui reposait au départ sur la seule chimie et confortait par la suite au cours du 19^{ème} siècle par les observations et réflexions de divers savants parmi lesquels on se doit de citer A. de Humboldt, JB. Dumas, JB. Boussingault, J. Von Liebig, C. Bernard et L. Pasteur.

Mais c'est W. Vernadsky qui, influencé par les idées de son maître BB. Dokouchaev, fondateur de la Science des sols (pédologie), a été amené en 1920, à mettre en cohérence les différents savoirs en concevant l'existence d'une enveloppe autonome qu'il a identifiée à la **biosphère**; celle-ci étant formée par l'ensemble des organismes vivants ainsi que par les divers milieux de la surface de la terre qui leur sert d'environnement.

Dès 1924, en effet, dans le cours sur la géochimie, qu'il a dispensé à la Sorbonne, Vernadsky a proposé une extension de la géochimie aux êtres vivants, celle-ci devant dorénavant s'appuyer aussi sur la géochimie organique et la biochimie.

De ce fait, il a fait appel aux biologistes pour que les phénomènes vitaux soient rattachés à la géochimie, le **sol**, en tant que maillon d'entrée de la chaîne alimentaire, servant de lieu privilégié pour assurer les échanges d'atomes entre le monde vivant et le monde inerte.

L'appel a été plus ou moins entendu; il a été en tout cas ultérieurement par un certain nombre de biologistes, notamment par GE. Hutchinson (1948) et EP. Odum (1953) qui, conscients de l'unité profonde existant entre les êtres vivants (*Biocénose*) et leur environnement (*biotope*), ont introduit dans ce genre de problèmes la démarche de **l'écologie fonctionnelle**.

A partir de là, ces auteurs se sont intéressés à ce qui constitue désormais la **«biogéochimie»** et ont été les premiers à proposer la notion de **cycles biogéochimiques** (appelés par eux cycles *inorganiques-organiques*) et ils ont l'appliqué à plusieurs éléments, tels le carbone, le phosphore, le strontium.

[La biogéochimie est donc bien aujourd'hui la géochimie de la biosphère.](#)

2. Domaines spécifiques de la géochimie et de la biogéochimie

- **La géochimie** concerne les milieux minéraux, elle étudie la circulation des différents éléments de la classification périodique au sein de la géosphère; elle caractérise donc avant tout le domaine de la profondeur (**géochimie de la profondeur**), sans oublier cependant l'évolution minérale qui concerne les relations roches-altérites se développant au sein des niveaux superficiels situés au contact des milieux biotiques (**géochimie de surface**).

Les réactions engendrées dépendent avant tout des caractéristiques chimiques des éléments et des conditions du milieu (composition, concentration, PH, potentiel d'oxydoréduction, température, pression...).

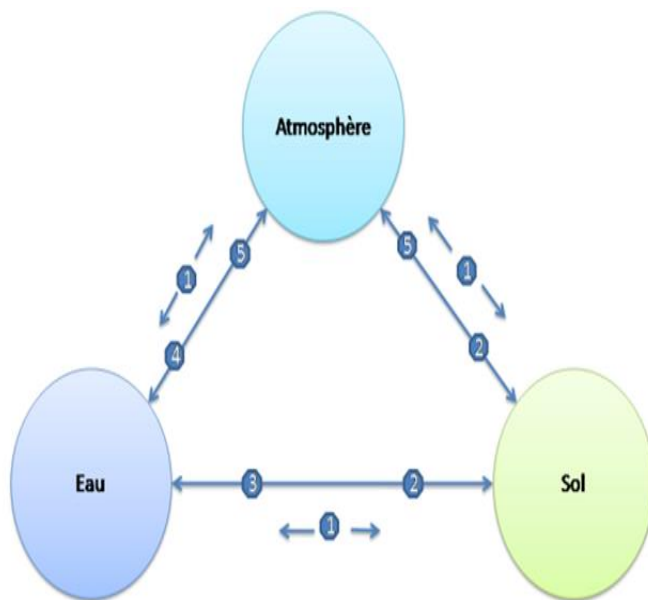
Elles sont soumises aux lois de la thermodynamique qui permettent de caractériser les équilibres minéraux-solution et d'établir ainsi des diagrammes de stabilité des constituants minéraux suivant les conditions du milieu.

Beaucoup de travaux ont été réalisés dans ce domaine durant les dernières décennies, en sorte que ces phénomènes sont aujourd'hui de mieux en mieux maîtrisés au plan quantitatif et qualitatifs.

- **La biogéochimie**, quant à elle, s'intéresse aux domaines superficiels où règne la photosynthèse et qui sont caractérisés par la présence à la fois de constituants minéraux et d'êtres vivants; mais ce sont ces derniers (macro- et micro-organismes) qui, en raison de leur mode d'existence (biosynthèse de matière organique **vivante**, puis production de matière organique **morte**), gouvernent en fait le fonctionnement chimique de ces milieux, avec toutes les répercussions que cela comporte, tant dans le domaine de la constitution minéralogique des **matériaux de surface** (les sols en particulier) que dans celui de la **composition de l'air atmosphérique**.

La biogéochimie correspond bien ainsi à la **géochimie de la biosphère**, avec ses différentes phases, qui présente de ce fait plusieurs caractéristiques:

- Elle s'intéresse plus spécialement aux **éléments chimiques** qui sont en relation directe avec la vie et ce, qu'ils soient majeurs ou en traces et par ailleurs qu'ils soient indispensables (éléments d'ordre constitutionnel et oligo-éléments à activité métabolique) ou bien Toxiques;
- Elle se développe au sein des **enveloppes externes de la planète** qui sont marquées par des conditions physiques particulières: faibles températures, basses pressions, présence d'eau libre, intervention de l'énergie solaire qui est le moteur de la photosynthèse . . . ;
- Elle correspond dans son fonctionnement a des **périodes beaucoup plus courtes** que celles mises en œuvre dans la géochimie classique; comme par exemple les variations climatiques, que celles-ci soient saisonnières, annuelles ou interannuelles.



Tous les éléments présents sur la croûte terrestre (d'origine naturelle ou anthropique) sont soumis à des transformations et de réactions entraînant une répartition de ces éléments dans les trois principaux compartiments: **l'atmosphère, l'eau, le sol**. Les différents processus favorisant les échanges entre les différents compartiments sont :

- (1) le transport des particules
- (2) l'adsorption
- (3) la désorption
- (4) la dissolution
- (5) l'évaporation

Figure 2 : Les processus favorisant les échanges entre l'atmosphère, l'eau, le sol.

L'importance des mécanismes (1) (2) (3) (4) et (5) dépend des réactions **géologiques**, **biologiques** ou **chimiques** se produisant dans les 3 compartiments. Ces réactions sont interdépendantes et concernent les domaines de la **géologie**, la **biologie** et la **chimie**.

La **biogéochimie** est une science qui s'intéresse aux réactions biologiques, géologiques et chimiques subies par un élément au cours de ses différents transferts dans les 3 principaux compartiments (Géosphère, atmosphère et hydrosphère).

L'étude d'un cycle biogéochimique consiste à étudier le transport et les différentes transformations des substances chimiques entre les trois compartiments : eau, air, sol.

En définitive la biogéochimie, qui traite avant tout du retour au monde minéral des éléments ayant participé à la vie, se trouve à l'interface de trois grands Secteurs scientifiques: géosciences, biologie et chimie et, plus particulièrement de trois sous-secteurs, qui sont la géochimie, la biochimie et l'écologie (fig 3)

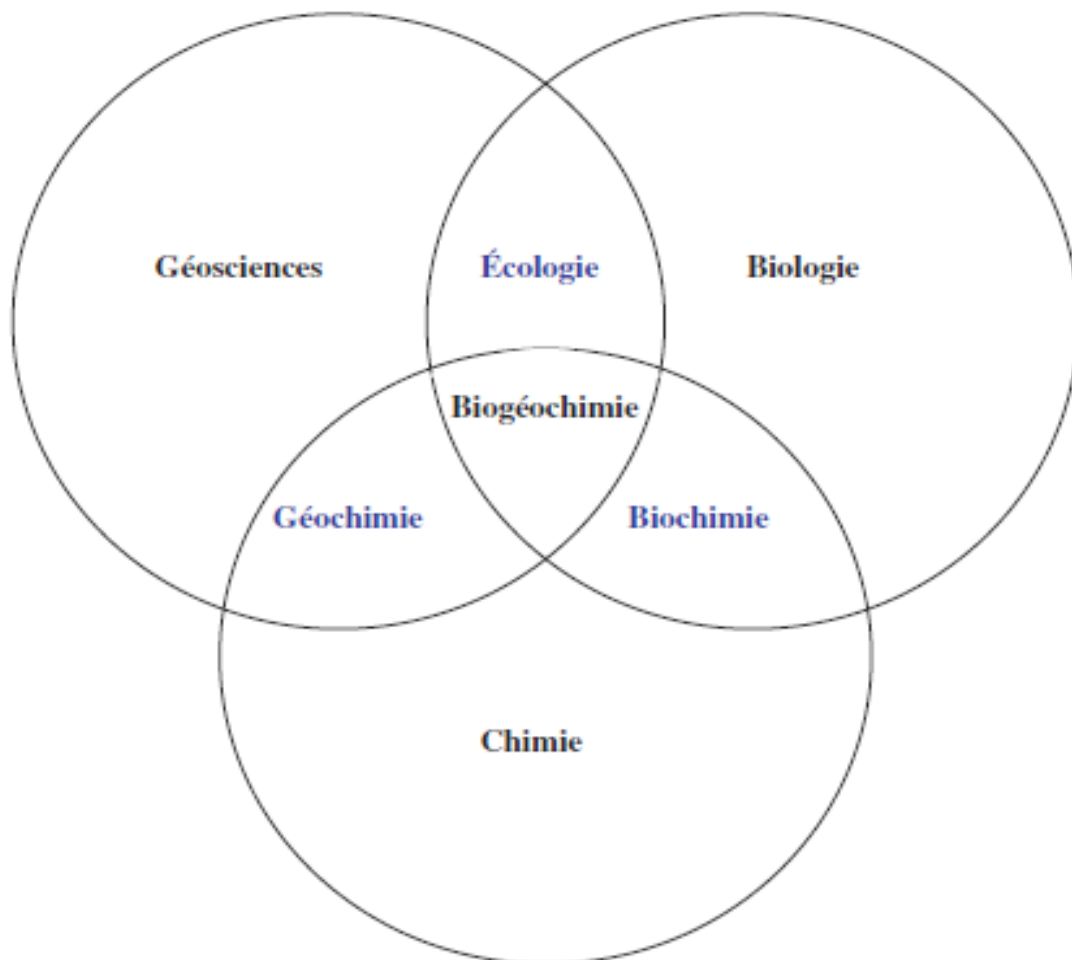


Figure 3. Place de la biogéochimie

3. Cycles biogéochimiques: nature et constitution

En principe, un cycle évoque un circuit fermé, l'élément considéré doit 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 à 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 par le terme **cycle global**.

En réalité, on prend en compte de petites échelles de temps et des espaces territoriaux plus restreints, les cycles étudiés sont toujours partiellement ouverts en sorte qu'on ne boucle pratiquement jamais. Il est clair en effet que certains éléments peuvent être soustraits, car stockés à long terme.

Aussi, ce qu'on étudie souvent, ce sont des parties de cycle de nature et de durée variées (sous-cycle ou para cycle), plus ou moins autonomes qui, à certains moments de l'évolution, peuvent être reliées entre elles au sein du système géochimique général.

En **biogéochimie terrestre** par exemple, sous l'influence des spécialistes des écosystèmes forestiers, 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;

– *Le sous-cycle biochimique*, qui recouvre la redistribution des éléments au sein des plantes;

– *Le sous-cycle géochimique*, qui correspond à l'ouverture des cycles précédents d'un côté vers l'atmosphère avec les rejets atmosphériques, et de l'autre vers le sol, les eaux de surface et les nappes phréatiques par suite des pertes au-delà de la zone racinaire.

Le plus actif des trois est le sous-cycle biologique. En biogéochimie, on le désigne aussi quelquefois 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 *reminéralisations*) et de constituer des nutriments pour les êtres vivants.

Dans ce cas, la notion de **recyclage** prend tout son sens (*turn-over*), celui-ci pouvant se faire –de manière continue ou discontinue– à des vitesses très variées suivant les milieux, mais qui correspondent généralement à des pas de temps relativement courts, donc se situant à l'échelle **humaine (Echelle biologique ou écologique)**. Et c'est dans ce cadre qu'il semble nécessaire de se pencher brièvement sur le problème des relations entre **cycles biogéochimiques et anthropisation**.

4. Cycles biogéochimiques et anthropisation

Les cycles biogéochimiques des différents éléments fonctionnent dans la nature à leur manière suivant les caractéristiques chimiques propres à chaque élément et selon le rôle que ceux-ci jouent au cours du développement de la biosphère.

Il en a été ainsi jusqu'à l'apparition de l'homme qui, du fait de son activité dans les terres émergées (agriculture, industrie, urbanisme, voies de communication), a contribué à perturber – *souvent sans s'en rendre compte dans les premières phases* – les écosystèmes et les cycles; ceci, de façon de plus en plus marquée avec le temps, surtout depuis les années 1850, jusqu'à aboutir à des nuisances majeures (certaines étant à dimension planétaire), toujours inquiétantes et quelquefois même irréversibles.

Ces changements environnementaux résultent d'un coté de l'augmentation de ses capacités technologiques (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 :

– **A remettre en circuit du carbone** provenant des combustibles fossiles (qui était jusque-là soustrait) et a libérer de grandes quantités de CO₂ ne provenant pas de la biomasse; sans oublier le carbone émis dans l'atmosphère à la suite des opérations de déboisement. . .

– **A perturbé le cycle de l'azote** en fabriquant, puis en utilisant des engrais azotes et en accentuant dans les régions tempérées et tropicales de la planète, les problèmes d'acidification des terres ;

– **A 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 ;

– **A 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;

– **A mettre en circulation des radionucléides** a longue durée de vie en rapport avec l'utilisation de l'énergie nucléaire ;

– **A produire de grandes quantités de déchets** (industriels, agricoles et urbains) qu'il s'agit maintenant de résorber. . .

Il s'en suit **l'émergence de problèmes** en relation avec la modification des systèmes écologiques et la détérioration des cycles biogéochimiques, tels l'effet de serres, l'eutrophisation des eaux, l'acidification ou la salinisation des sols, les dépérissements forestiers (pluies acides), les phénomènes de pollution . . ., avec des conséquences qui sont loin d'être négligeables pour les sociétés au plan de l'avenir de l'humanité, dans les domaines de l'alimentation et de la santé notamment.

Ceci étant, la solution à notre époque n'est pas de bloquer toute nouvelle activité humaine en raison de l'intense pression démographique actuelle, mais de relever le défi majeur que constituent, de nos jours, la préservation du capital naturel et la qualité de la vie sur la planète.

Et c'est là qu'entrent en jeu, notamment, les cycles biogéochimiques qui permettent de **raisonner** les interventions humaines, afin que ces dernières soient les plus profitables possible tout en étant les moins néfastes, suivant la conception de ce qu'on appelle à l'heure actuelle:

le développement durable cette notion vise à prendre en compte, outre l'économie, les aspects environnementaux et sociaux qui sont liés à des enjeux de long terme.

Selon la définition donnée dans le rapport Brundtland en 1987, *le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins.*

Quelques exemples peuvent illustrer brièvement l'intérêt d'une bonne connaissance des cycles biogéochimiques des milieux affectés par l'activité anthropique; ils seront d'ailleurs repris ultérieurement sous la forme d'études de cas par exemple:

- la fertilisation des terres de culture, et notamment la fertilisation azotée qui atteint le continent;
- les effets néfastes des barrages sur la géochimie de quelques éléments et leurs répercussions sur l'environnement et sur l'homme...

Importance des cycles biogéochimiques :

Le fonctionnement général de la biosphère 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:

1. seuls les cycles biogéochimiques permettent d'avoir une vision globale du comportement dynamique des éléments chimiques dans l'environnement (quantité dans chaque réservoir, flux mis en jeu et donc les temps de renouvellement);
2. seuls, ils sont à même de conduire l'homme à prendre conscience de son action trop pressante sur des systèmes naturels en évolution permanente;
3. seuls enfin, ils sont susceptibles de lui suggérer des modalités en vue de la gestion ou la régénération des écosystèmes (base pour la modélisation quantitative).

Ces diverses constatations montrent que les cycles biogéochimiques sont à la base de la maîtrise d'un développement durable de la planète, notion qui essaie de concilier aujourd'hui la gestion des ressources naturelles ainsi que la protection de l'environnement avec le développement indispensable à la survie dans l'avenir d'un grand nombre de sociétés humaines.

CHAPITRE II

L'HOMME ET L'ÉCOSYSTÈME

1. Structure et fonctionnement des écosystèmes

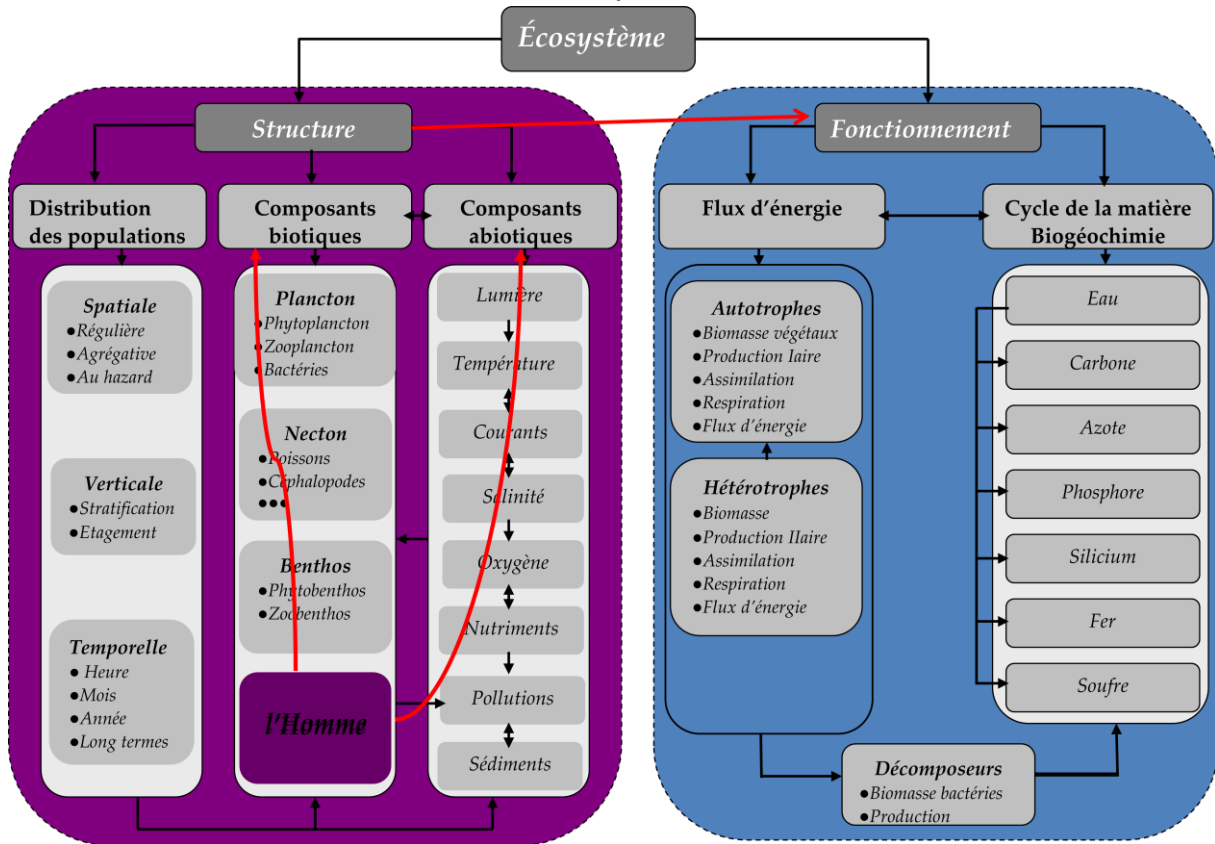


Figure 4 : Schéma simplifié de la structure et du fonctionnement des écosystèmes

a. Rappel: Élément d'écologie

Espèce: Groupe d'êtres vivants pouvant se reproduire entre eux et dont la descendance est fertile. L'espèce est l'entité fondamentale des classifications, qui réunit les êtres vivants présentant un ensemble de caractéristiques morphologiques, physiologiques et génétiques, communes.

Population: ensemble d'individus d'une même espèce vivante se perpétuant dans un territoire donné

Peuplement: ensemble des populations appartenant souvent à un même groupe taxonomique, qui présentent une écologie semblable et occupent le même habitat

Biotope: un type de lieu de vie défini par des caractéristiques physiques et chimiques déterminées relativement uniformes.

Biocénose: ensemble des êtres vivants coexistant dans un espace écologique donné, plus leur organisation et interactions.

Ecosystème: ensemble formé par une association ou communauté d'êtres vivants (biocénose) et son environnement biologique, géologique, édaphique (sol), hydrologique, climatique, etc. (le biotope). Ecosystème = *biotope* + *biocénose*

Écologie: science qui étudie les êtres vivants dans leur milieu et les interactions entre eux.

Environnement: ensemble des éléments (biotiques ou abiotiques) qui entourent un individu ou une espèce et dont certains contribuent directement à subvenir à ses besoins

Biochimie: discipline scientifique qui étudie les réactions chimiques ayant lieu au sein du vivant.

Géochimie: discipline qui applique les concepts de la chimie à l'étude de la terre

Démographie: est l'étude quantitative et qualitative des populations et de leurs dynamiques, à partir de thèmes telles que la natalité, la fécondité, la mortalité et la migration.

Structure de l'écosystème : Ecosystème = biotope (composants abiotiques) + biocénose (composants biotiques)

Facteurs biotiques: ensemble des interactions du vivant sur le vivant dans un écosystème. Il s'agit des ressources alimentaires, des relations trophiques de prédation, compétition, parasitisme... On distingue deux catégories de facteur biotique: les relations **intra** et **interspécifiques**.

Facteurs abiotiques: ensemble des facteurs physico-chimiques d'un écosystème ayant une influence sur une biocénose donnée. C'est l'action du non-vivant sur le vivant.

Flux d'énergie: c'est le transport et le déplacement d'énergie et de matières entre les acteurs des écosystèmes.

Biomasse: masse totale des organismes vivants mesurée dans une population, une aire ou autre échantillon

Décomposeurs sont - dans le réseau trophique- les êtres vivants participant directement à la décomposition de la matière organique morte ou des excréments d'êtres vivants. Ils jouent un rôle majeur, nécessaire au recyclage des éléments (minéraux, oligoéléments...) qui composent la matière organique.

Fonctionnement de l'écosystème: réfère aux propriétés et processus biologiques et physico-chimiques au sein des écosystèmes, comme par exemple le *recyclage* ou la *production de biomasse*.

Services écologiques ou écosystémiques représentent tous les bénéfices que les populations humaines obtiennent des écosystèmes exp. la production de nourriture, la régulation du ruissellement, la pollinisation

b. Fonctionnement des écosystèmes et interaction avec les sociétés humaines.

Le fonctionnement des écosystèmes naturels est affecté par l'action de l'homme, qui impacte notamment la diversité des communautés.

Ceci de façon directe (extinctions par surexploitation ou perte d'habitat par exemple); **mais aussi indirecte**, en agissant sur les facteurs écologiques qui la détermine, aussi bien les facteurs physiques (climat, pollutions, etc.) que biologiques (introduction de nouvelles espèces).

Le fonctionnement de l'écosystème affecte en retour toute une gamme de **services écosystémiques** dont l'homme bénéficie.

Les écosystèmes sont composés de communautés de végétaux, d'animaux et de micro-organismes vivants. Ces espèces vivantes interagissent avec leur environnement non-vivant et ils **fonctionnent** comme un tout.

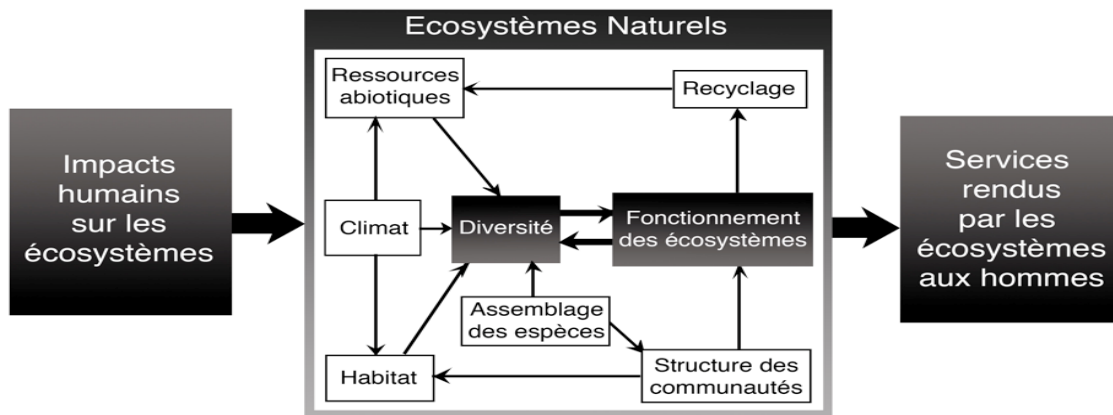


Figure 5 : Fonctionnement des écosystèmes et interaction avec les sociétés humaines.

Tous les écosystèmes sont liés et existent **grâce à l'eau**. Les écosystèmes qui présentent une grande **diversité** d'espèces ont moins de risques d'être sérieusement endommagés par les interactions humaines, les catastrophes naturelles et le changement climatique.

Les écosystèmes d'eau douce, riches de ressources naturelles, sont des éléments vitaux pour tous les organismes vivants et les principaux écosystèmes, tout comme pour **la santé humaine, la production de nourriture et le développement économique**.

2- Services écosystémiques

À l'échelle mondiale, les écosystèmes d'eau douce nous fournissent gratuitement des services vitaux dont la valeur annuelle se chiffre en **billions de dollars**. Alors que la population devrait atteindre **9 milliards d'individus en 2050**, avec la pression croissante exercée sur les ressources en eau et la menace que représente le changement climatique, il n'a jamais été aussi important et urgent **d'optimiser** ces bénéfices.

D'après Millennium Ecosystem Assessment (2005) les services écosystémiques sont «*les avantages que les populations et les entreprises tirent des écosystèmes*». Ces **services écologiques** ou **services écosystémiques** qu'on classe parfois comme bien commun (bien public), souvent vitaux ou utiles pour l'être humain, les autres espèces et les activités économiques par exemples:

a. La pollinisation par les abeilles et autres apidés, papillons et parfois oiseaux (colibri) est un des nombreux exemples de service écosystémique. Elle est indispensable à la fructification de nombreuses espèces cultivées par l'Homme.



b. D'autres services sont l'élimination des déchets et de la matière organique par les détritivores (bousiers) qui contribuent aussi à enrichir les sols, à les décolmater, et à la bonne germination de certaines plantes.



c. Les zones humides sont à la fois des stations d'épuration et de recharge des nappes pour la nature, des puits et des sources de poisson, animaux et plantes utiles pour l'homme.



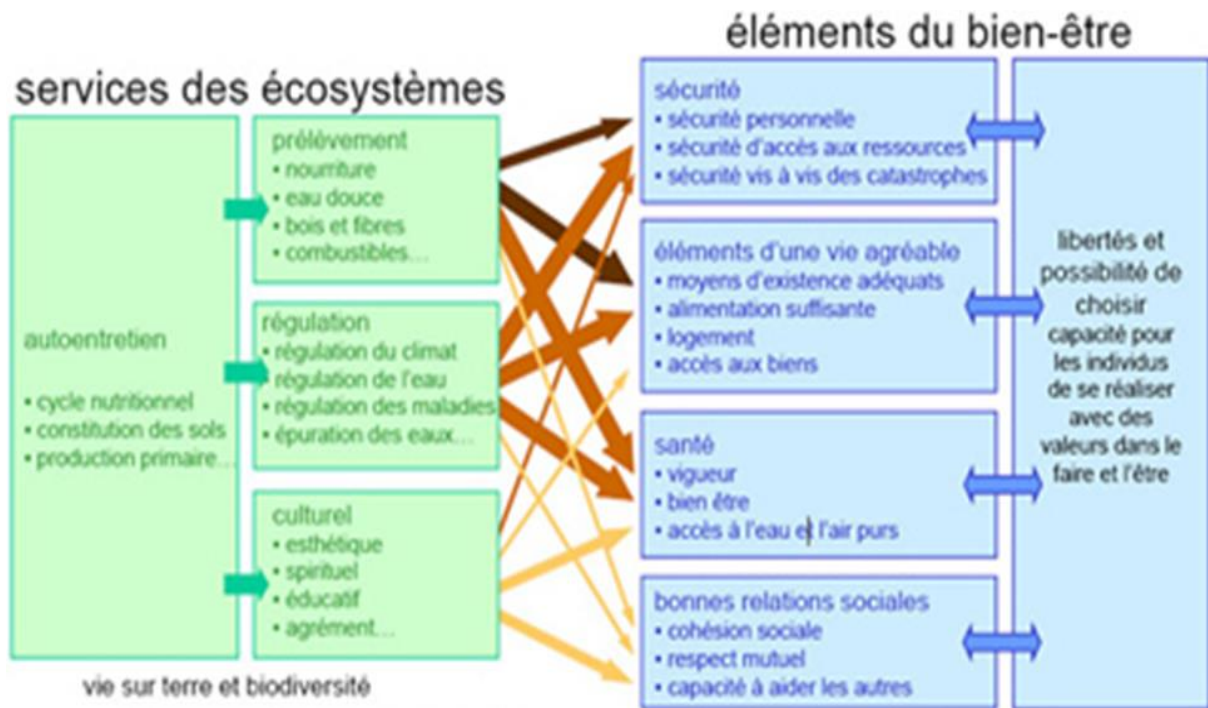


Figure 6 : Les bénéfices tirés des écosystèmes et leurs liens avec le bien être de l'homme (Millenium Ecosystem Assasement)

3. Changement globaux

Le Changement Global est plus qu'un changement climatique

- Il englobe le naturel et l'effet de l'Homme
- On peut voir par exemple, d'importants changements globaux :

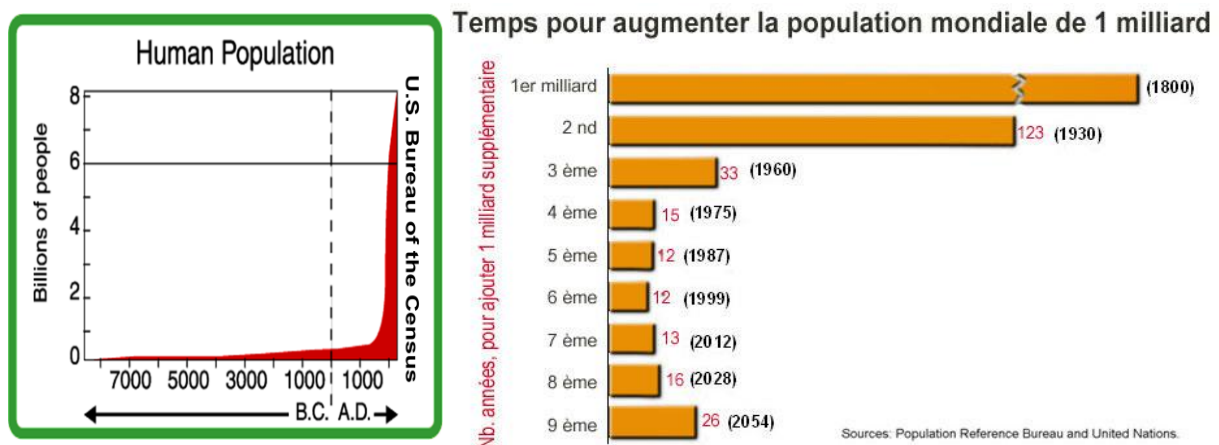


Figure 7 : Changement global d'origine naturelle : l'explosion démographique

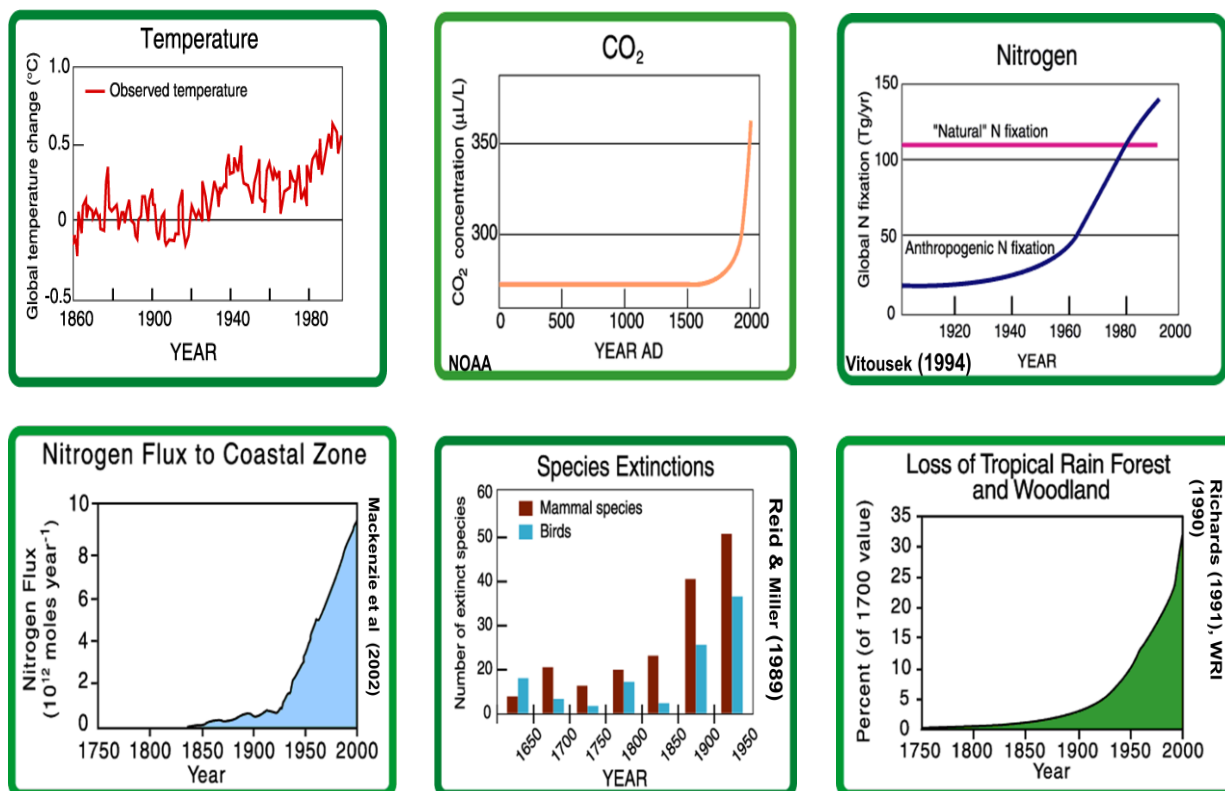


Figure 8 : Exemples de changements globaux d'origine anthropique

Les changements globaux occasionnés par l'homme sur les écosystèmes ont contribué substantiellement au bien-être et au développement économique de l'homme, mais ces gains ont été achevés à des coûts élevés sous forme de dégradation de beaucoup de services d'écosystèmes, augmentant les risques de changements irréversibles et de pauvreté pour certains peuples.

La dégradation des services de l'écosystème devrait significativement augmenter durant la première moitié de ce siècle et constitue une barrière aux objectifs du développement attendus pour ce millénaire.

Le déficit d'inversement de la dégradation des écosystèmes avec l'exploitation et la demande croissantes de ses services, peut être partiellement réalisée sous certains scénarios considérés par l'Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire. Or cela implique des changements significatifs au niveau des politiques, des institutions et des pratiques qui ne sont pas actuellement suivies.

Approximativement 60% des services des écosystèmes sont devenus dégradés ou sont utilisées de façon intenable. La dégradation des écosystèmes s'accompagne souvent de la dégradation de son bien être à travers la perte des richesses naturelles des pays.

- 20% des récifs coralliens sont perdus ou dégradés durant les dernières décennies
- 35% des mangroves ont été perdus durant les dernières décennies

4- Modification des écosystèmes

Durant les dernières décennies, l'homme a changé les écosystèmes plus rapidement et extensivement sans précédent dans son histoire, pour satisfaire son développement rapide et sa demande en eau, aliment, carburant, bois. Par conséquent il y a eu beaucoup de changements de la structure et du fonctionnement des écosystèmes, entre autres :

a. La modification de l'agriculture

Un agrosystème est un écosystème modifié (à la fois le biotope et la biocénose) et contrôlé par l'homme à des fins agricoles.

- **L'expansion** des terres agricoles signifie la récupération des espaces et des terres qui ne sont pas exploitées pour les transformer en terres agricoles pour augmenter la production agricole.

- **L'intensification** des terres agricoles est un système de production agricole cherchant à maximiser la production et qui est caractérisé par l'usage d'importantes quantités d'intrants:

* **Des engrais** pour stimuler la productivité primaire (part apport d'éléments minéraux).

* **Des produits phytosanitaires** ou pesticides pour lutter notamment contre les espèces indésirables. On peut citer les insecticides, les fongicides, les herbicides....

* **De l'eau pour l'irrigation**

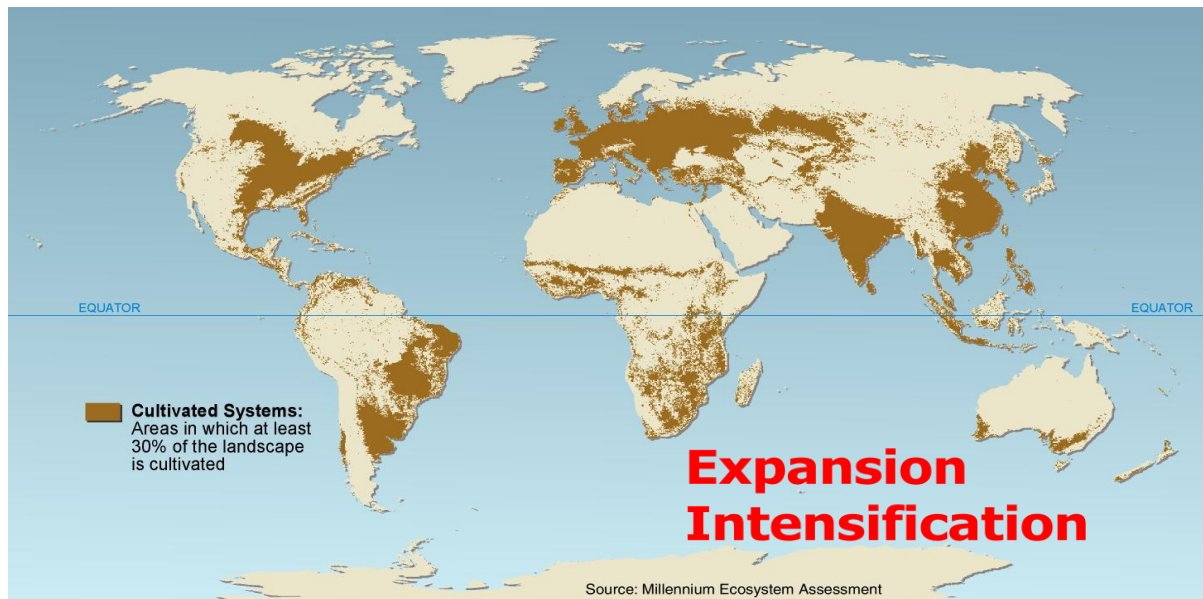


Figure 9 : Systèmes de cultures couvrant 30% de la surface terrestre en 2000, (En couleur marron)

b. La modification de l'état quantitatif des eaux de surface

- La quantité d'eau des barrages à **quadruplé** depuis 1960
- Le retrait d'eau des rivières et des lacs a **double** depuis 1960
- L'écoulement continental retenu dans les réservoirs est **3-6 fois** plus important que celui des rivières naturelles
- Les grands réservoirs totalisent **~65%** du volume global

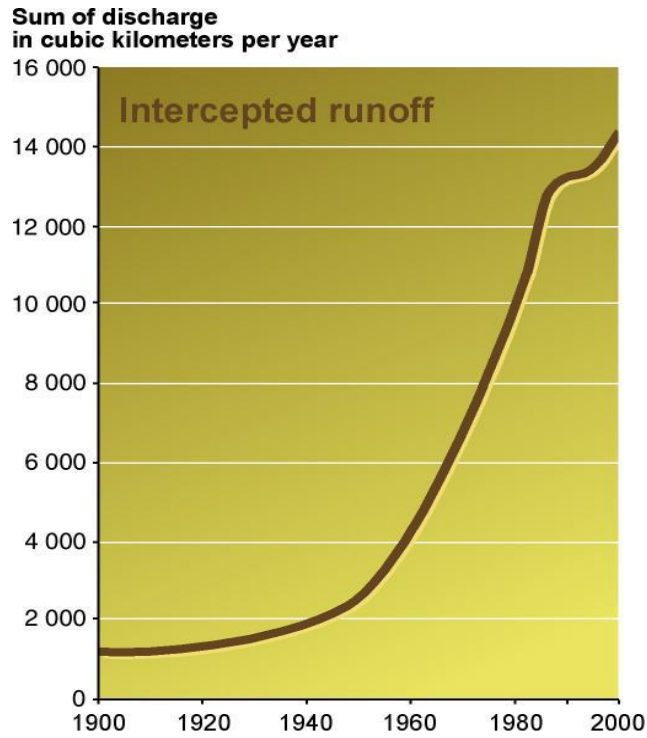


Figure 10 : La somme des écoulements retenus

c. Réduction des décharges à la zone cotière

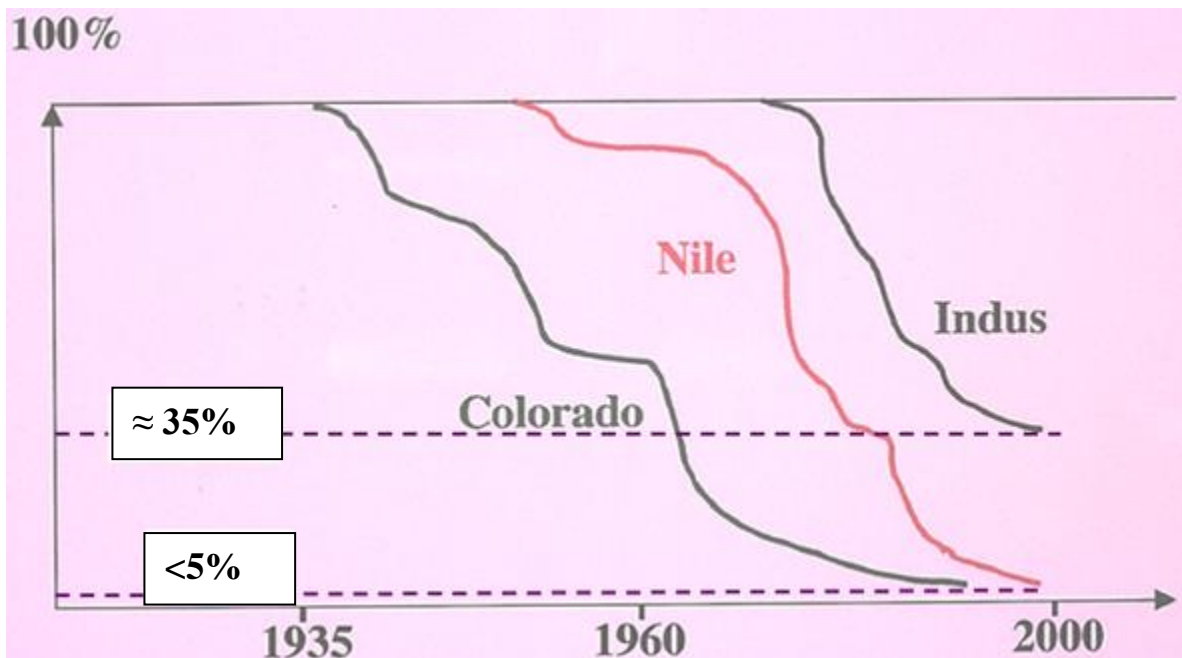


Figure 11 : Tendence schématique des débits de rivières à l'embouchure

La diminution des débits de rivières diminue le flux de nutriments et de sédiments, ce qui entraîne d'énormes impacts non seulement sur la zone côtière locale (delta du Nile) mais s'étend sur l'hydrodynamique et la pêche en Méditerranée et même en Atlantique.

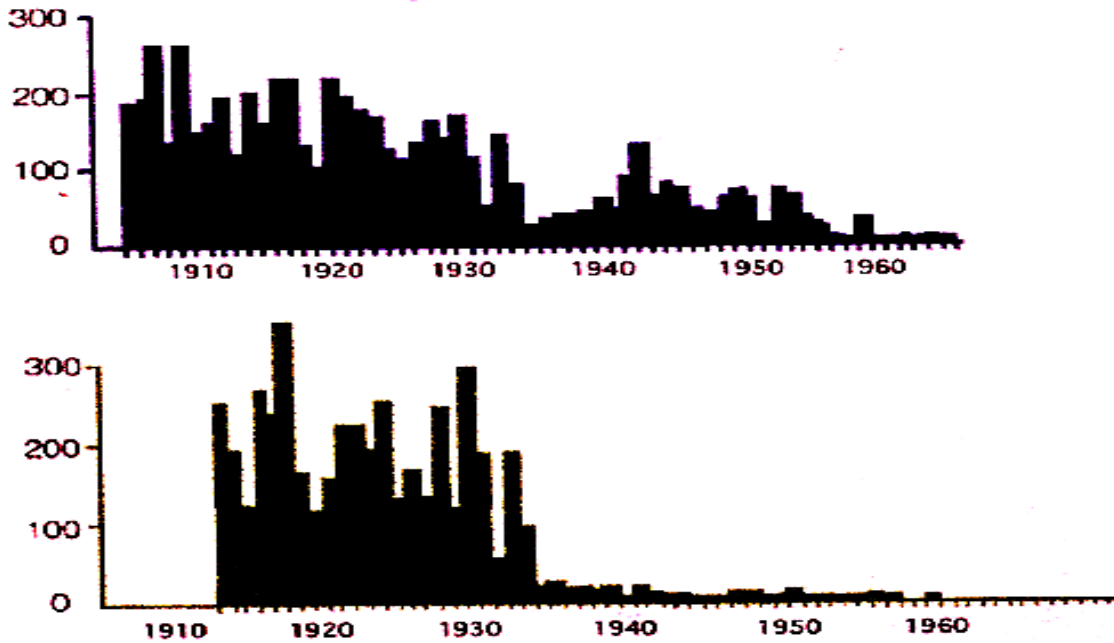


Figure 12 : Tendance des flux d'eau (m^3/s) et de sédiment dans le fleuve Colorado (1910-1960) après la construction du barrage Hoover en 1936

Le changement du Colorado après la rétention des eaux dans le barrage du Hoover est l'une des plus dramatiques modifications des systèmes de rivières

d. Changements des cycles biogéochimiques

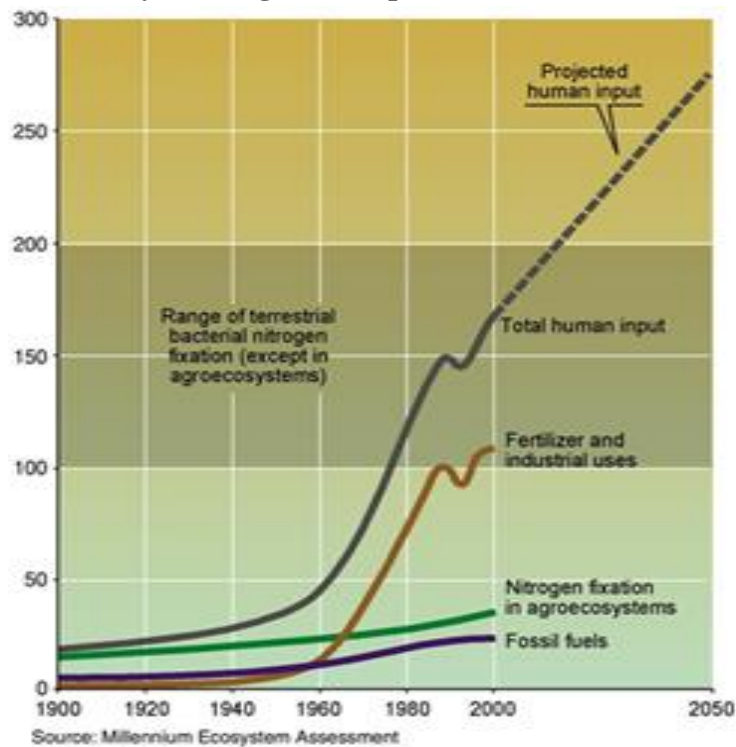


Figure 13 : Production de l'azote réactif en Million de tonnes par ans

Depuis 1960 :

- Le flux d'azote biodisponible d'écosystèmes terrestres a doublé
- Le flux du phosphore a triplé
- Plus de 50% de l'azote synthétique fertilisant a été utilisé depuis 1970
- 60% de l'augmentation de [CO₂] atmosphérique depuis 1750 s'est fait à partir de 1960
- L'homme produit des quantités d'azote biodisponible autant que toute source naturelle, ce qui conduit à une augmentation de 65% à l'horizon 2050

e. Flux global de l'azote des rivières

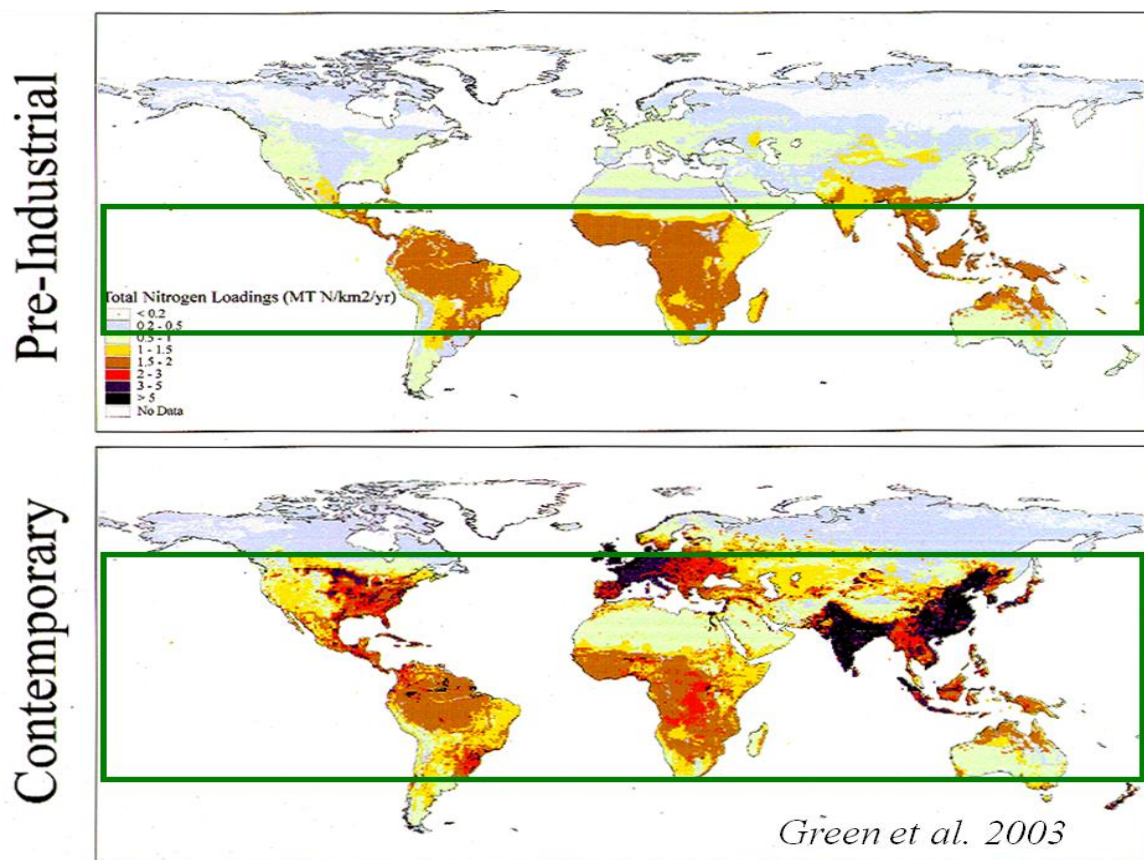


Figure 14 : Distribution de l'azote dans les rivières mondiales

- Le flux global de l'azote a plus que triplé (3 fois)
- Sur le plan régional, le flux a augmenté de 10 fois
- L'Agriculture & l'urbanisation sont les sources majeures d'azote

f. Tendence des nitrates dans les principales rivières mondiales

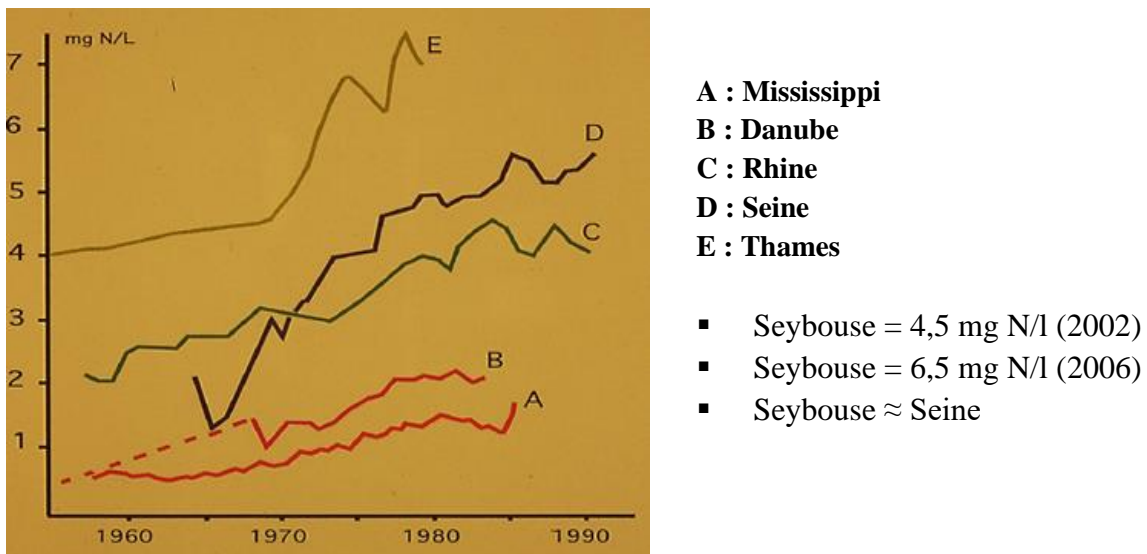


Figure 15 : Evolution chronologique des teneurs des nitrates dans les principales rivières mondiales

- De 1960 à 1990 les nitrates ont au moins doublé dans la plupart des grandes rivières
- Les teneurs maximales sont aussi observées dans les petits bassins versants exposés à l'usage de fertilisants agricoles

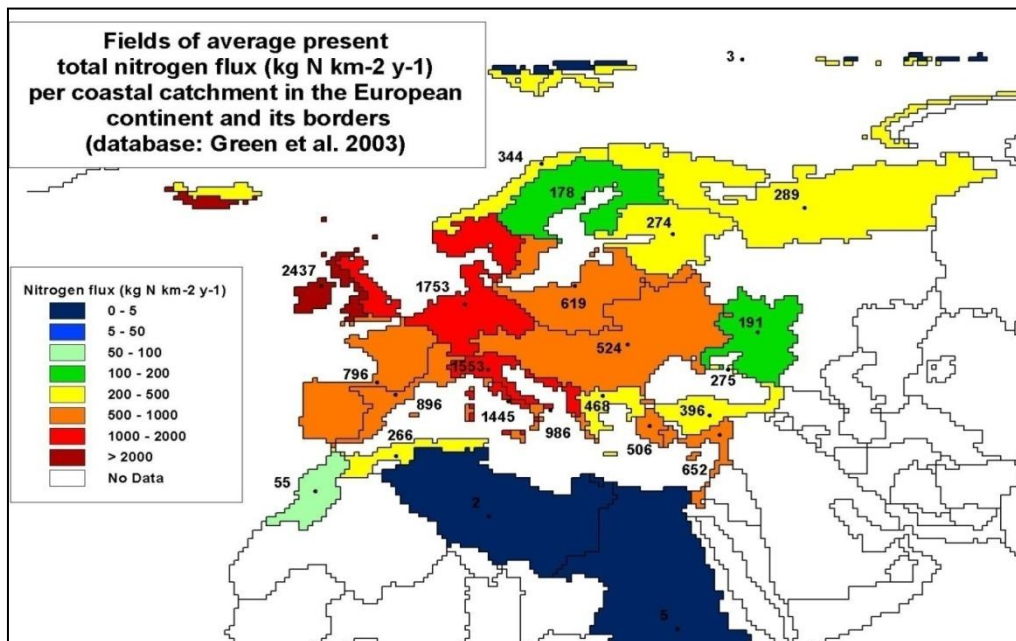


Figure 16 : Flux spécifique de l'azote dans les européens et méditerranéens bassins versants

Les bassins côtiers sont très explicite pour la comparaison du flux global, exemple :

Seybouse (2003): 850 kg N /km²; Mafragh (2003): 220 kg N /km²

Seybouse (2009): 700 kg N /km²; Mafragh (2009): 150 kg N /km²

g- Déficience des réserves en eau

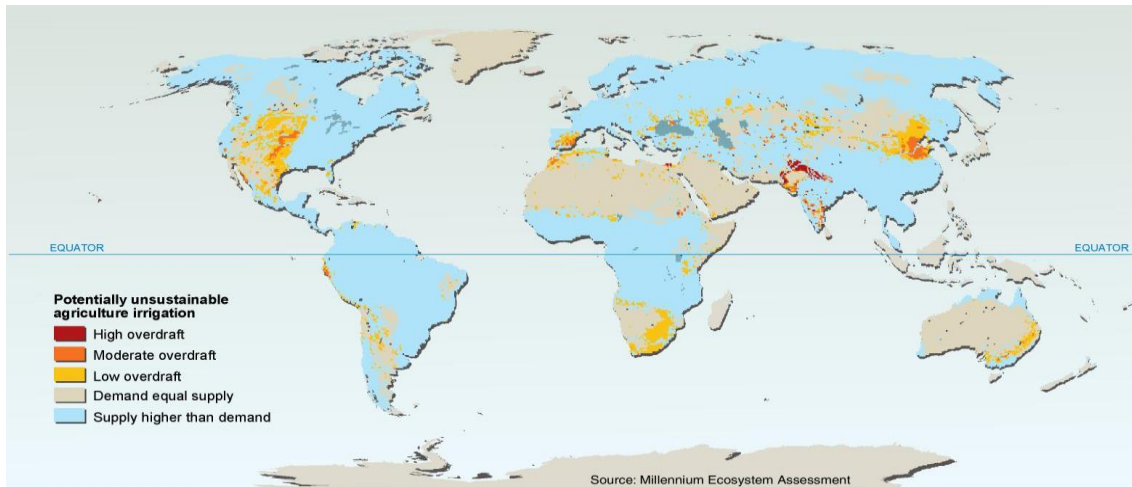


Figure 17 : Irrigation agricole potentiellement non durable

15 - 35% des prélèvements d'irrigations excèdent le taux des apports

h- Expansion des régions arides et risques de salinisation globale des eaux souterraines



Figure 18 : Expansion des régions arides et semi-arides du monde et des grands fleuves qui leur sont associés.

Le risque de salinité des eaux souterraines, lié à l'équilibre des eaux (eaux marine/eau souterraine), s'étend sur l'ensemble des continents.

L'irrigation inadéquate aboutirait à l'accumulation sels dans les sols, à long terme salinisation des nappes, des rivières, limitant les usages en amont.

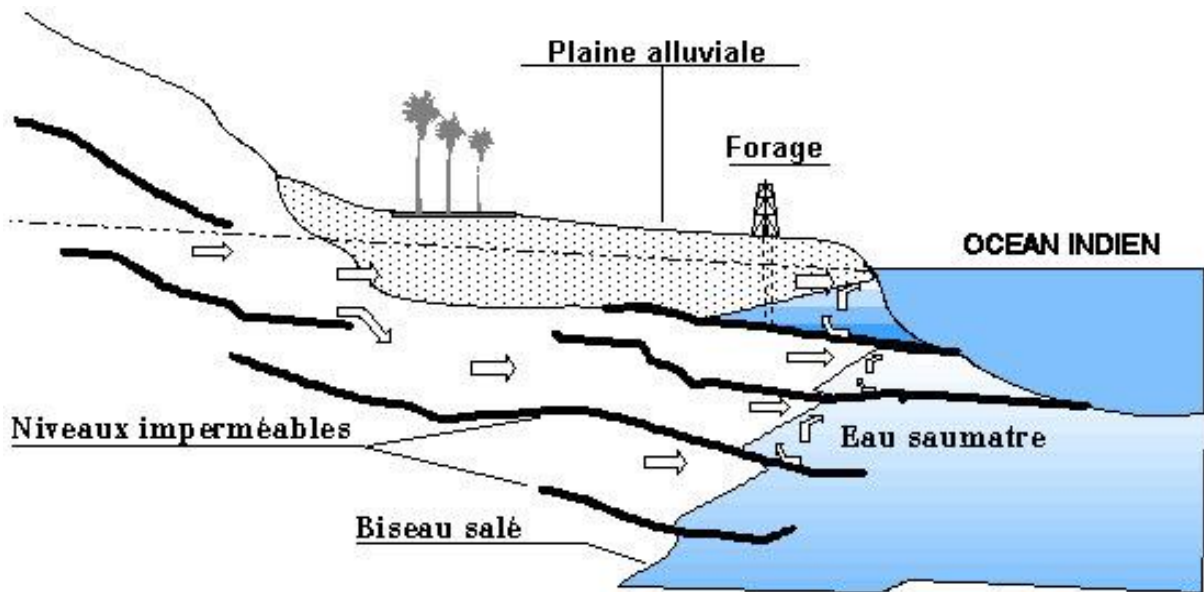


Figure 19 : Impact d'un pompage sur l'interface eau douce/eau salée

Le degré d'envahissement de la nappe dépend de facteurs naturels (géologie, pluies) mais aussi de l'intensité des prélèvements par pompage.

i- Zones humides et régulation des risques naturels

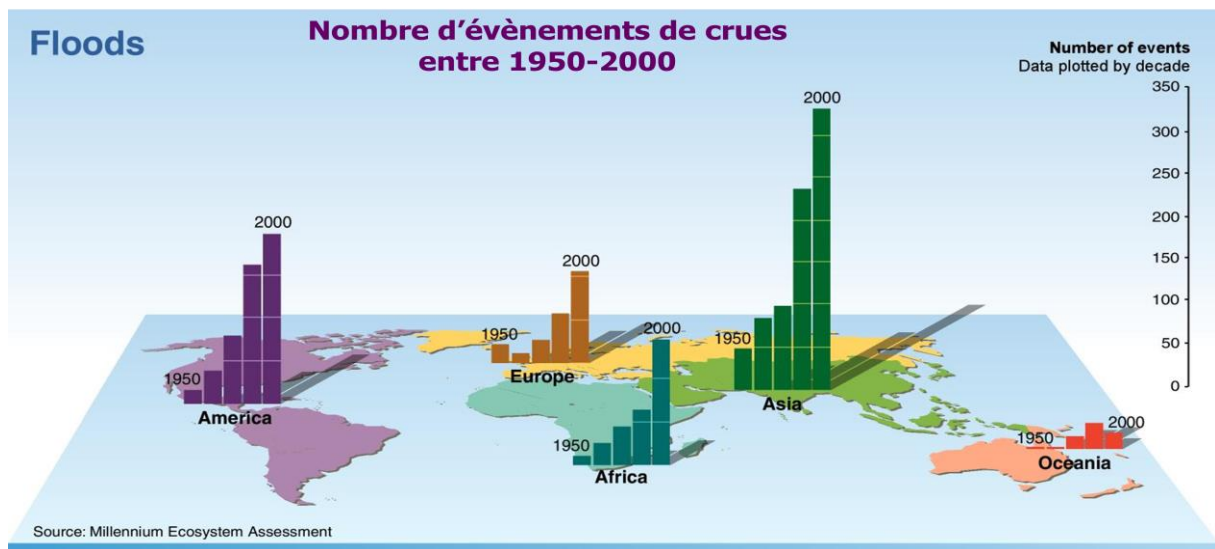


Figure 20 : Nombre d'événements de crues entre 1950-2000

La capacité tampon des écosystèmes pour les événements extrêmes a été réduite par suite des pertes de zones humides, de mangroves et de forêts.

Les populations occupent d'avantage les zones aux risques naturels extrêmes.

j- Irrigation, barrages et eutrophisation: La rétention du silicium

Le secteur agricole consomme 80% du capital hydrique pour satisfaire les besoins d'irrigation.

La rétention des nutriments par les barrages tel que le silicium combinée avec l'augmentation des flux en N et en P durant les 70 dernières années a généré des changements majeurs du rapport N:P:Si dans les eaux de rivières introduites au littoral.

Il s'ensuit des dystrophies comme pour les côtes adjacentes au Danube et au Mississippi (la Seybouse n'échappe pas à ce constat, comme on le verra plus ultérieurement)

| | Mississippi | | Seybouse |
|------------|-------------|------|----------|
| | 1900 | 2000 | 2007 |
| Si:N (g/g) | 48 | 0.9 | 0,5 |

Etude de cas:

Transferts et géochimie de l'azote, du phosphore et du silicium des bassins côtiers au littoral

Le transfert des matières de rivières à la mer joue un rôle crucial dans les équilibres hydrologiques, du carbone, des nutriments (Azote N, Phosphore P et Silicium Si), des sédiments et de la biodiversité des eaux de surface.

Les rivières jouent un rôle particulier dans le soutien de la production marine où les zones productives sont limitées à la côte adjacente.

La préservation de la productivité et de l'état de l'écosystème côtier devient donc une priorité pour la stabilité du développement socio-économique de la région méditerranéenne.

La construction des barrages sur les rivières méditerranéennes et les prélèvements d'eau pour l'irrigation ont évolué depuis les années 1960 et ont largement réduit le débit des rivières d'au moins 20% ce qui a profondément modifié leur fonctionnement naturel.

Parallèlement à la réduction des débits et du Si retenu dans en grandes proportions dans les barrages, les flux en N et en P ont 3 à 5 fois augmenté et les rapports Si/N/P se sont modifiés.

La diminution du rapport Si/N occasionne de sévères modifications du réseau trophique côtier y compris les ressources halieutiques. Pourtant les ressources côtières représentent l'essentiel du revenu des populations riveraines.

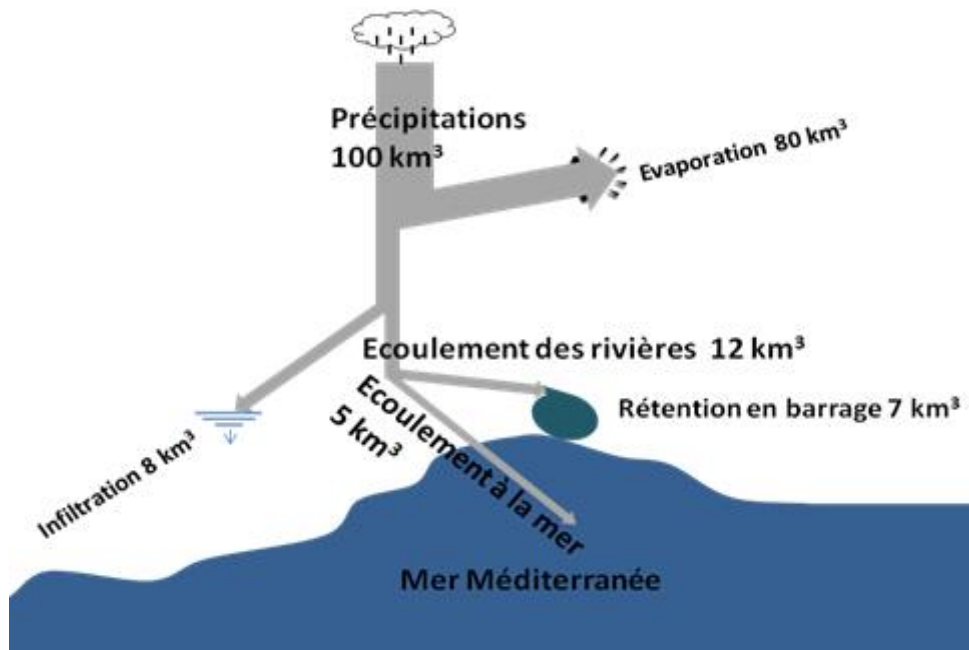


Figure 20 : Capital d'eau en Algérie

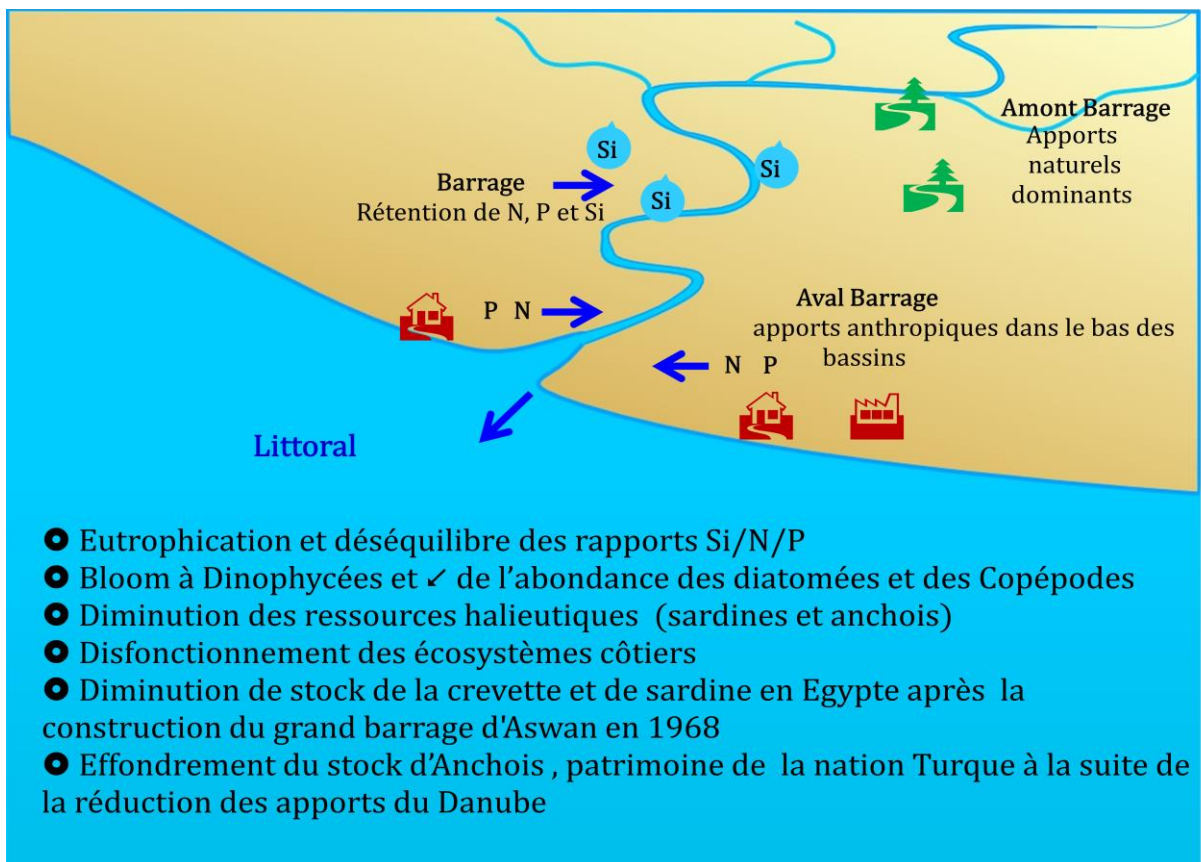


Figure 21 : Transferts et modifications biogéochimiques de N, P et Si le long du continuum aquatique

5- Bénéfices de l'homme au détriment des écosystèmes

Croissance rapide de la demande des services de l'écosystème entre 1960 et 2000 :

- La population mondiale a doublé passant de 3 à 6 Milliards d'habitants
- L'économie globale a augmenté **plus que 6 fois**

Pour satisfaire la demande :

- La production d'aliments a augmenté **2 ½**
- La consommation de l'eau a **doublé**
- La production de bois (pour fabrication de tissus et de papiers) a **triplé**
- Les installations hydroélectriques ont **doublé** de capacité

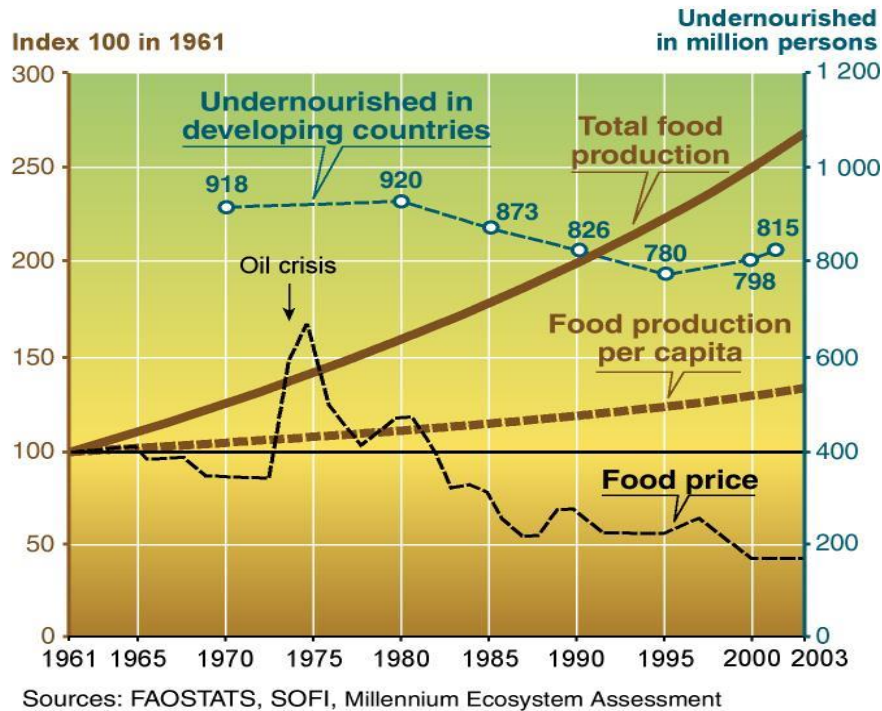


Figure 22 : Bénéfices de l'homme durant la période 1961-2003

- La production d'aliments a plus que **doublé** depuis 1960
- La production d'aliments par habitant s'est également **accrue**
- Le prix de l'aliment a **diminué**

L'économie humaine est basée sur les industries des services de l'écosystème

- Contribution de l'agriculture

- L'Agriculture offre **50%** des forces de travail de la population mondiale
- L'Agriculture représente **25%** du Produit National Brut (production annuelle de richesses) pour beaucoup de pays en voie de développement

- Valeur marchande de l'industrie des services de l'écosystème

- Production d'aliments: **980** Milliards \$ par an
- Industrie du bois: **400** Milliards \$ par an
- Pêche marine: **80** Milliards \$ par an
- Aquaculture marine: **57** Milliards \$ par an
- Tourisme (y compris chasse et pêche): **>75** Milliards \$ par an

CHAPITRE III: STRUCTURE TROPHIQUE ET FLUX DE MATIERE ET D'ENERGIE

1. Les structures trophiques

- **Ecosystème**: est l'ensemble formé par une association ou communauté d'êtres vivants (biocénose) et son environnement biologique, géologique, édaphique, hydrologique, climatique, etc. (le biotope). Ecosystème = *biotope* + *biocénose*
Ensemble des organismes (végétaux, animaux, etc..) qui interagissent entre eux et avec leur environnement énergétique et matériel. Ces interactions entre organismes, forment des chaînes alimentaires
- **Chaîne alimentaire**: ensemble des êtres vivants qui se nourrissent les uns des autres afin d'avoir de l'énergie pour survivre.

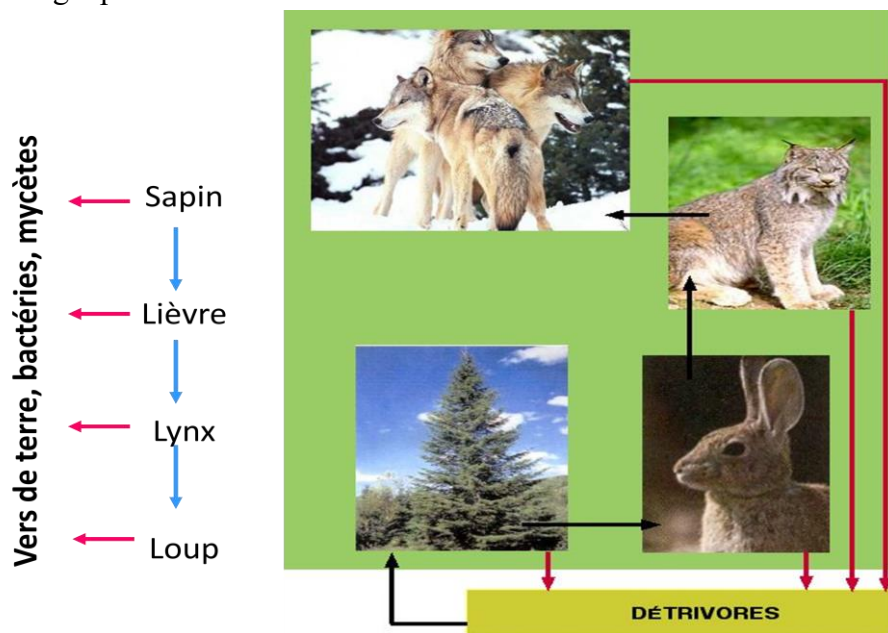


Figure 23 : Chaîne alimentaire terrestre

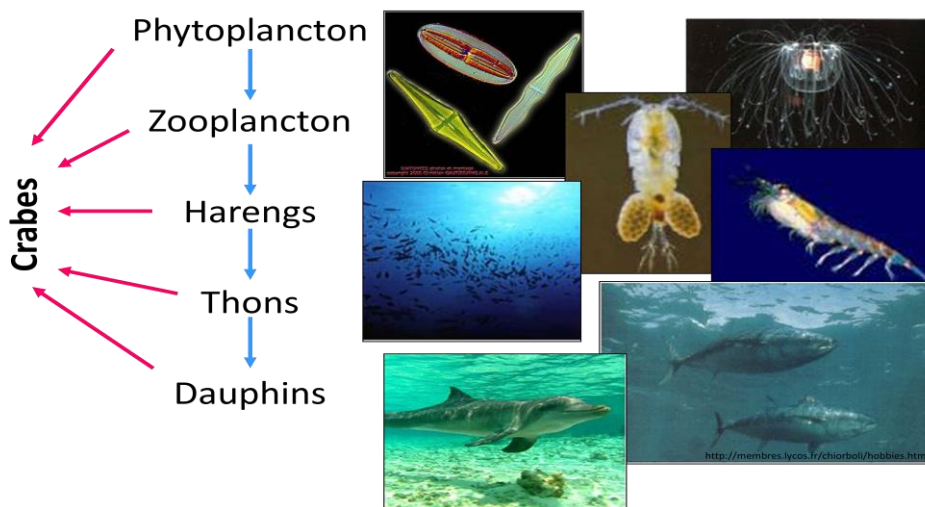


Figure 24 : Chaîne alimentaire marine

- **Niveau trophique** : C'est le rang qu'occupe un être vivant dans une chaîne alimentaire. Chaque maillon de la chaîne correspond à un niveau trophique. On retrouve les niveaux suivants:

1- Les producteurs (autotrophes/phototrophes): Ce sont les organismes qui sont capables de synthétiser par la photosynthèse du (C₆H₁₂O₆) à partir (CO₂ et H₂O). Exemples: Algue, herbe, arbre, etc.

2- Les consommateurs

- **Les consommateurs du 1^{er} ordre:** Ce sont les herbivores qui mangent des végétaux. Ex. : Sauterelle, lapin, cerf, escargot, etc.
- **Les consommateurs du 2^e ordre:** Ce sont les carnivores qui mangent les herbivores. Ex. : Chat, coccinelle, renard, hibou, etc.
- **Les consommateurs du 3^e ordre:** Ce sont des carnivores qui mangent les consommateurs du 2e ordre. Ex. : Lion, ours, loup, etc.

3- Les décomposeurs: Ils décomposent la matière organique des cadavres et redonnent aux plantes les sels minéraux essentiels à la photosynthèse. Ex. : Bactéries, vers de terre et champignons

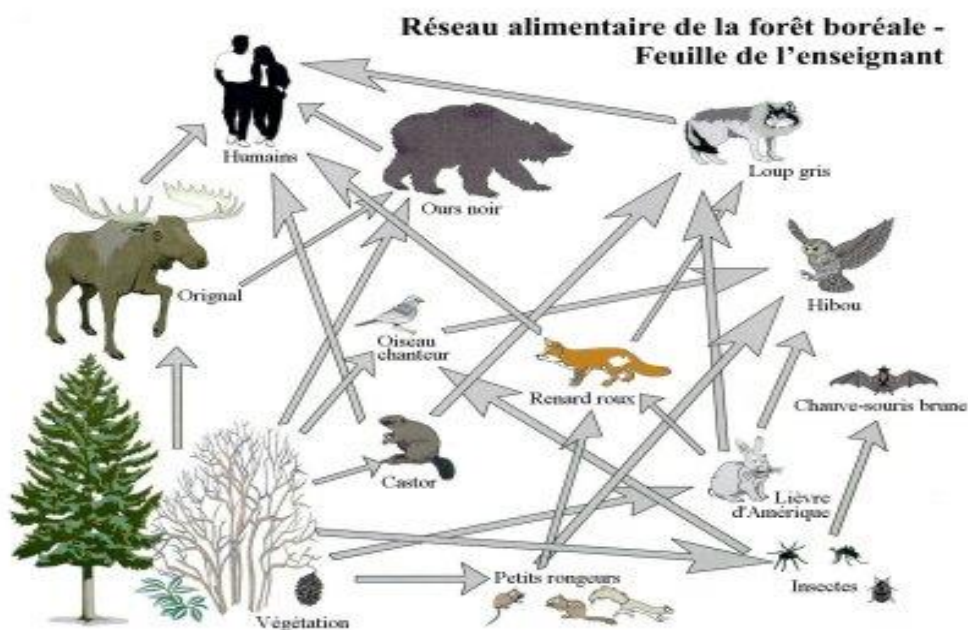


Figure 25 : Réseau trophique

- **Réseau trophique** : C'est l'ensemble de chaînes alimentaires inter-reliées: transfert d'énergie et de matière en zigzag.

2. Capture, emmagasinage et circulation de l'énergie dans l'écosystème

Capter l'énergie du soleil : Les organismes utilisent cette énergie provenant du soleil pour assurer leurs fonctions vitales (**Le carburant d'un écosystème!**)

- Moins de **5%** de la lumière visible est captée par les chloroplastes des plantes.
- **100 milliards** de tonnes de matière organique par année.

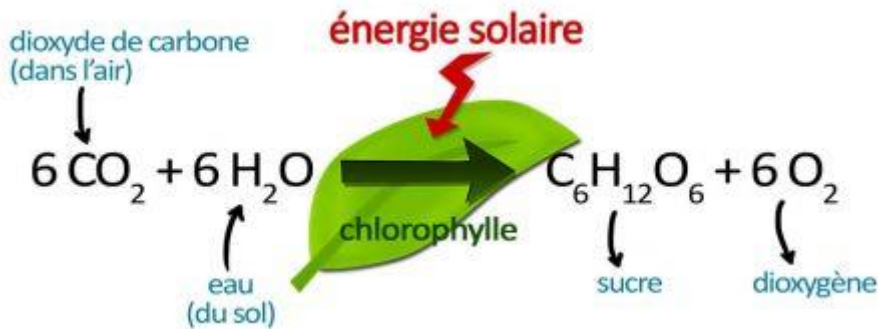


Figure 26 : Le principe de la photosynthèse

Le glucose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) : Le glucose est une molécule que les plantes produisent et qui contient beaucoup d'énergie (énergie emmagasinée).

- Les pyramides écologiques : Il y a trois types

1. Pyramide de nombre: Nombre d'individus qui occupent chaque niveau trophique et disponible pour le niveau suivant.

- Elle montre le **nombre** d'organismes en fonction de l'énergie dont ils disposent pour survivre.
- Il y a **moins d'énergie** à chaque étape d'une chaîne alimentaire.

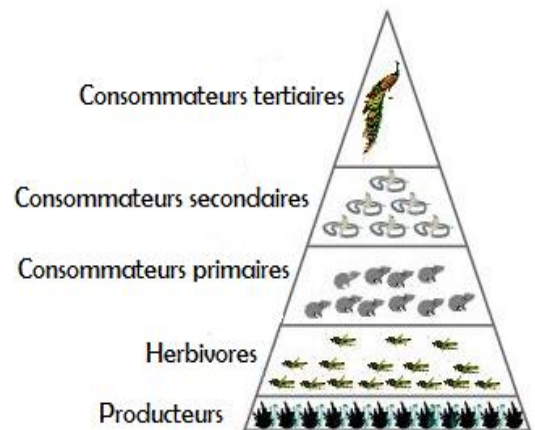


Figure 27 : La pyramide du nombre

2. Pyramide de biomasse: Masse des organismes présents aux divers niveaux trophiques et disponible pour le niveau suivant.

- Ne montre pas le nombre d'organismes à chaque niveau, mais la **quantité** de matériel biologique.

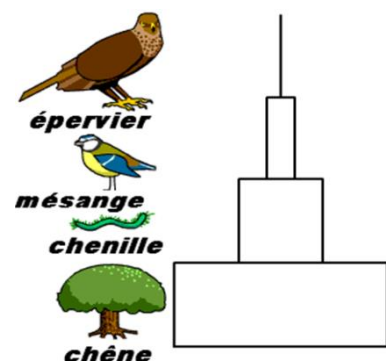


Figure 28 : La pyramide de biomasse

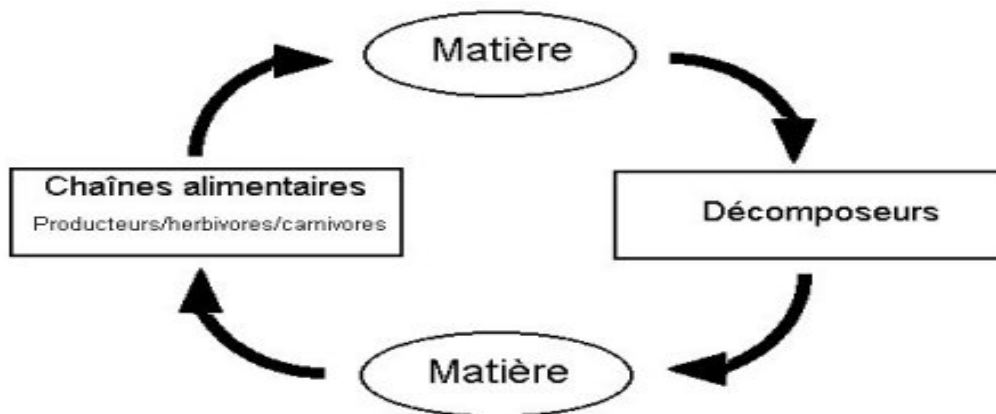


Figure 29 : Cycle de la matière (la biomasse)

- Cette matière (la biomasse) est entièrement recyclable.
"Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme".

3. Pyramide d'énergie: Quantité d'énergie disponible de chaque niveau trophique et disponible pour le niveau suivant.

- Il y a **moins d'énergie** à chaque étape d'une chaîne alimentaire.

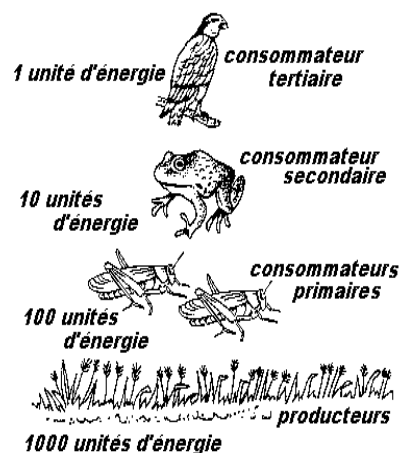


Figure 30 : La pyramide du nombre

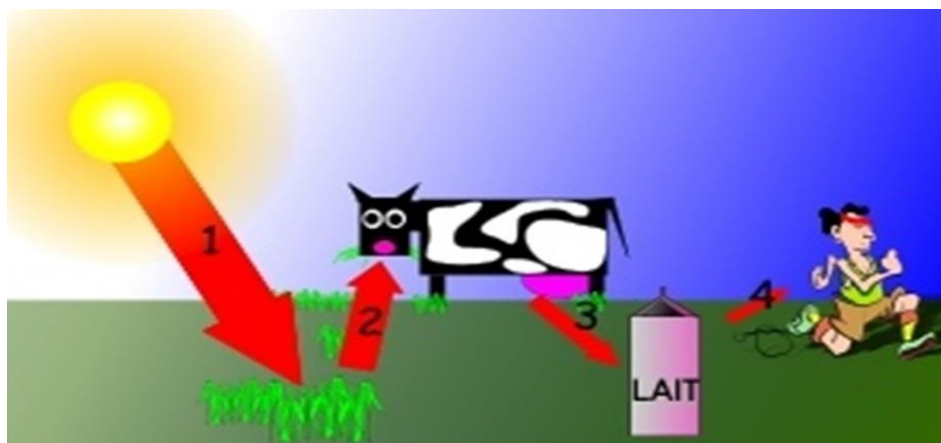


Figure 31 : Transfert de l'énergie entre les niveaux trophiques

- L'énergie n'est pas recyclable comme la biomasse, elle se perd.
- La source d'énergie primaire est le soleil. Cette énergie se transforme et passe d'un niveau trophique à l'autre en subissant beaucoup de perte.
- **L'énergie** : Il y a une perte moyenne de **90%** d'énergie à chaque niveau trophique.
- Donc, seulement **10%** de l'énergie contenue dans un niveau est transmise aux individus du niveau supérieur.

3. Flux d'énergie

L'Énergie traversant les écosystèmes provient de l'**énergie solaire**. Cette énergie passe à travers une série de stockage dans diverses voies, avant de retourner finalement à l'espace comme **énergie radiative**.

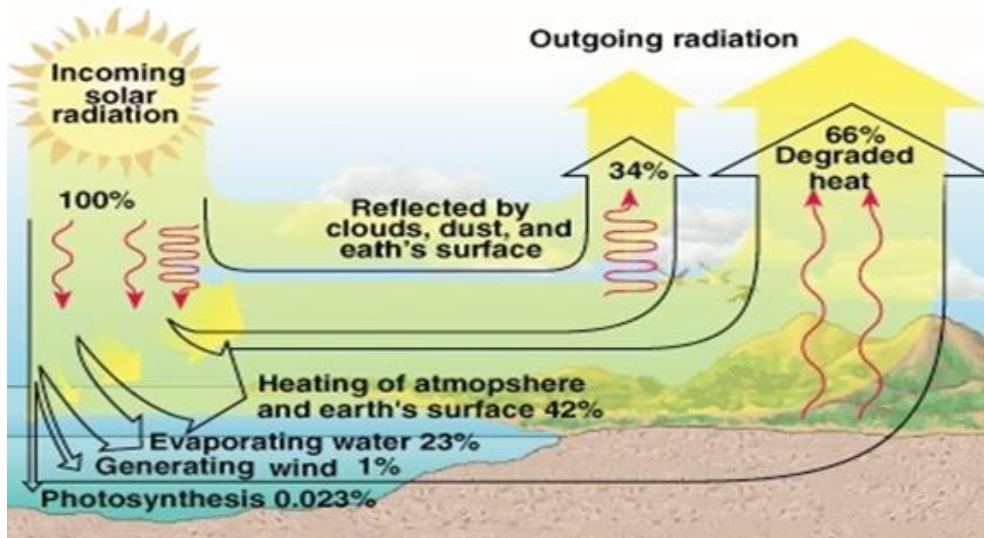


Figure 32 : La source d'énergie ultime traversant les écosystèmes est l'énergie solaire

Deux Lois fondamentales gouvernent tout transfert d'énergie : la première et la seconde lois de la thermodynamique.

a. **La première loi** de la thermodynamique est la **loi de conservation** de l'énergie, mais elle gouverne aussi la conservation de la matière. Elle énonce simplement que dans tout transfert d'énergie, l'énergie totale est inchangée. **L'énergie n'est ni créée ni détruite.**

b. **La seconde loi** dénommée la **loi de l'entropie**. Elle énonce que dans chaque conversion d'énergie d'une forme en une autre, la conversion est inefficace. L'énergie est toujours convertie en une forme moins concentrée ou dissipée sous forme de **chaleur**. L'entropie est une mesure du degré d'organisation. **Forte entropie signifie forte désorganisation.**

La photosynthèse est une **stimulation** de réactions chimiques qui transforment H_2O et CO_2 en hydrocarbure $(CH_2O)_n$, avec libération d' O_2 comme sous-produit métabolique. Dans cette production de matière organique **primaire**, il y a perte d'énergie radiative par les feuilles des plantes ou cellules phytoplanctoniques, perte d'eau, aussi la respiration convertit l'énergie d'aliment en chaleur (énergie calorifique).

En définitive, seulement environ **1%** ou un peu moins de l'énergie solaire incidente est convertie en biomasse végétale ou en énergie

- Les groupes électrogènes fournissent un autre exemple.
- Seulement environ 35% de l'énergie consommée est convertie en énergie électrique.
- Une certaine quantité de chaleur est perdue dans l'échappement, dans l'environnement immédiat par friction dans les parties en mouvement. Le reste est dissipé sous forme de chaleur. Cette dissipation d'énergie est un exemple **d'entropie**.

Dans la nature, le rendement écologique varie de 5% à 20% de l'énergie disponible entre niveaux trophique successifs (perte de 95% à 80%). Environ 10% d'efficacité est la règle générale.

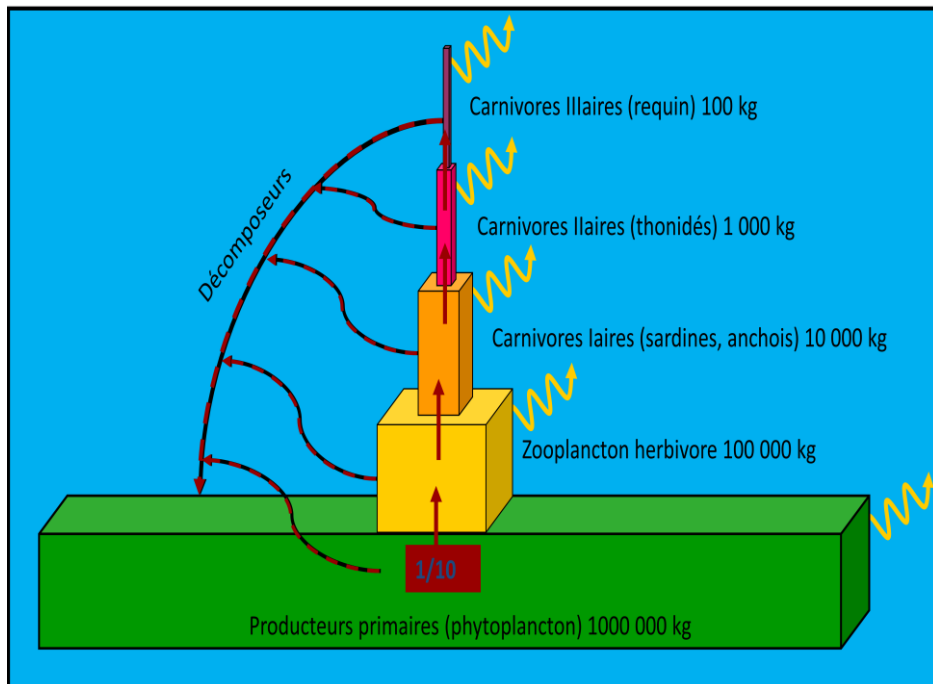


Figure 33 : Pyramide schématisque de la biomasse et du flux de matière (recyclage d'éléments) et de l'énergie (chaleur et énergie transférée dans la chaîne trophique)

Exemple : Flux d'énergie traversant une population. Efficience de consommation: I/P_{n-1}

$$A/I = 35\%$$

$$P_n/A = 20\%$$

W= déchets

R= respiration

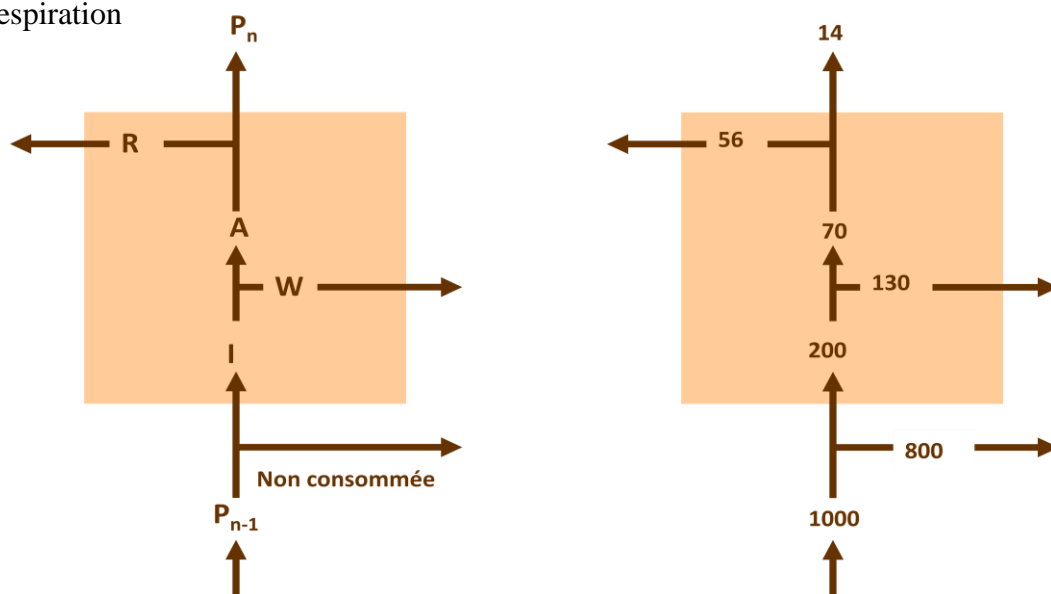


Figure 34 : Efficience des invertébrés herbivores $I/P_{n-1} = 20\%$

Modèle simple du flux d'énergie du consommateur

I: **Ingestion** de la nourriture

A: Partie **assimilée**

W: Le reste est rejeté comme **déchet**

R: De l'énergie Assimilée, une partie est utilisée pour la **respiration**

P: Le reste de l'énergie est alloué à la **production** (croissance)

Se basant sur ces données, on peut calculer :

- **L'efficacité d'Ingestion (d'Exploitation ou de Consommation) $EI = I/D$** , rapport de l'ingestion à l'énergie disponible, mesure l'efficacité avec laquelle le consommateur ingère fraction de la matière (énergie) par rapport à la matière disponible.
- **L'efficacité d'Assimilation $EA = A/I$** , rapport de l'assimilation à l'ingestion, mesure l'efficacité avec laquelle le consommateur tire l'énergie de la nourriture.
- **L'efficacité de Production $EP = P/A$** , rapport de la production à l'assimilation, mesure l'efficacité avec laquelle le consommateur incorpore l'énergie assimilée dans la production secondaire.
- **Le rendement écologique $Rec = P_{n-1}/P_n$** , correspond au rapport entre la production au niveau n-1 et à la production du niveau n

L'efficacité de production varie selon le consommateur

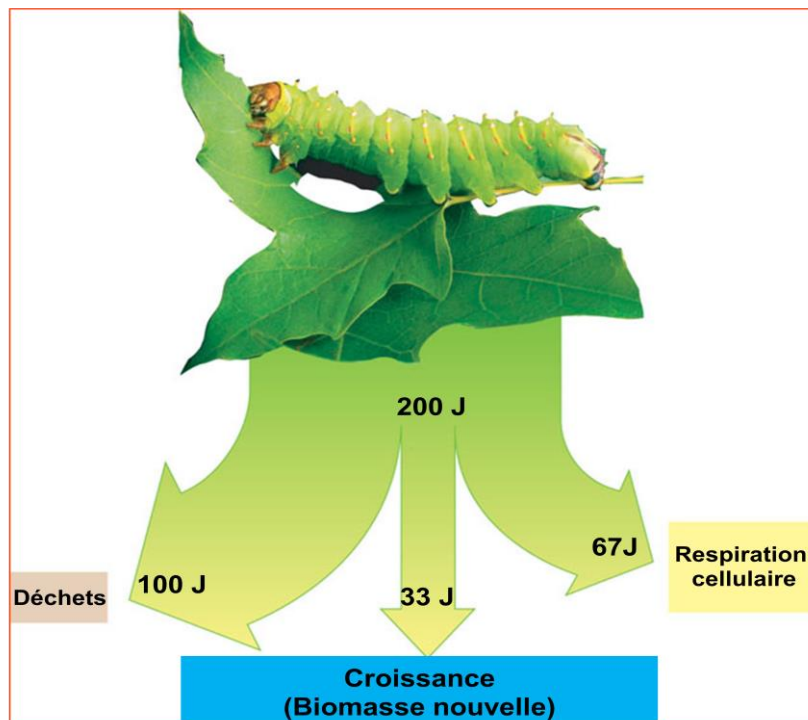


Figure 35 : Efficacités de production des invertébrés herbivores

Seulement environ 1/6 de l'énergie consommée est utilisée pour la production secondaire

Tableau 1 : Efficience de production (P/A . 100) de divers groupes d'animaux marins

| Groupe | P/A x 100 |
|------------------------|-----------|
| Oiseaux | 1,26 |
| Mammifères | 2,92 |
| Poissons | 9,74 |
| Mollusques | 21,59 |
| Crustacés | 24,96 |
| Herbivores invertébrés | 18,81 |
| Carnivores invertébrés | 25,05 |

4. Nourrir les humains

Une population: Tous les individus d'une espèce qui occupent une certaine région géographique pendant un certain temps.

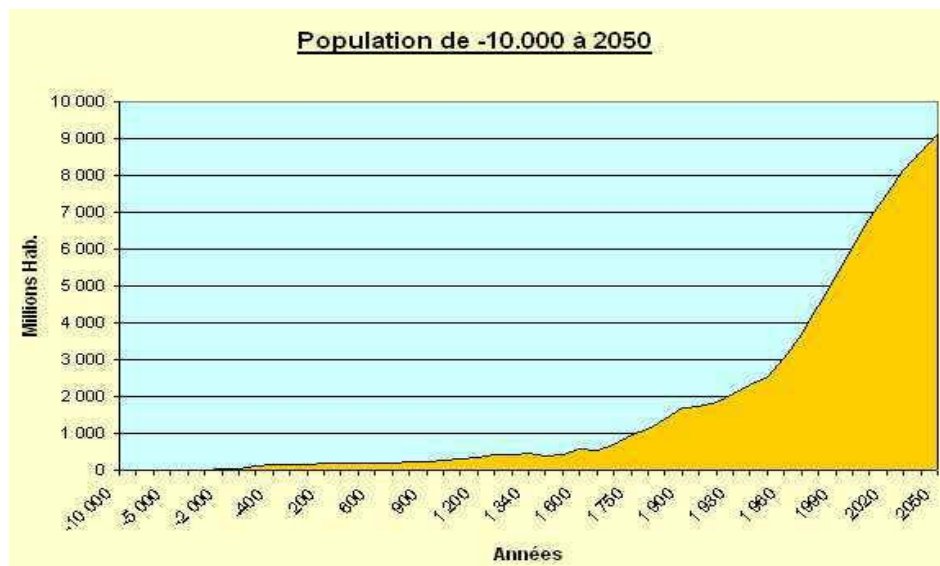


Figure 36 : Evolution chronologique du nombre de population sur terre

- Les structures d'un écosystème

L'habitat: C'est l'endroit où vit un organisme

Exemple: Dans une forêt on retrouve un grand nombre d'habitats. Pour un vers de terre son habitat est le sous-sol de la forêt tandis que l'escargot vit dans la mince couche de feuilles humides qui recouvre le sol de la forêt.

La niche écologique: C'est le rôle global et l'ensemble des interactions entre un organisme et son milieu

Exemple: le rôle de la grenouille est de se nourrir d'insectes, de fournir du sang aux insectes piqueurs, de servir de repas au raton laveur, de fertiliser l'eau de son étang par ses excréments et d'être décomposé par les micro-organismes à sa mort.

L'habitat d'une espèce désigne son adresse tandis que la niche correspond à son métier.

La capacité biotique: population **maximale** d'une espèce qu'un environnement peut soutenir.



Figure 37 : Capacité biotique de la planète terre

- La capacité biotique de la planète terre des fortement influencée par la niche écologique de l'espèce humaine (le comportement de l'homme dans son environnement)

Principaux facteurs déterminant la capacité biotique:

1- Les facteurs abiotiques représentent l'ensemble des facteurs physico-chimiques d'un écosystème. C'est l'action du non-vivant sur le vivant.

Les matières et énergies (quantité d'énergie, d'eau et autres matières essentielles disponible limitent la capacité biotique).



Figure 38 : Matières et énergie

2- Les facteurs biotiques: représentent l'ensemble des interactions du vivant sur le vivant dans un écosystème.

A- Les chaînes alimentaires (la quantité de nourriture disponible des niveaux trophiques inférieures limite la capacité biotique).



Figure 39 : Chaines alimentaires

B- La compétition (compétition pour les ressources)
Intra spécifique: entre individus de la même espèce
Extra spécifique: entre individus d'espèce différente



Figure 40 : Compétition pour les ressources

C- La densité:
(Certain individus ont besoin de plus espace que d'autre déterminant combien d'individus de cette espèce il y aura dans la population).

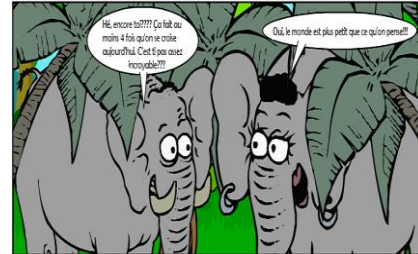


Figure 41 : Densité des populations

La capacité de nourrir les humains est basée sur la productivité.

La productivité est la quantité moyenne de biomasse de nouvelles plantes produites chaque année par unité de surface.

Facteurs qui influent sur la productivité:

1- La productivité végétale et le climat:

Si le climat est chaud et humide, la productivité sera très élevée.

Si le climat est froid et sec la productivité sera plus faible.

2- La nourriture et la taille de la population

Certain peuples mangent beaucoup et d'autres très peu. Tout dépend de la quantité d'énergie et de matière (nourriture) disponible pour nourrir chacun des individus.

- **Exemple:** au Canada il y a beaucoup de terrains où l'on peu faire pousser des céréales et où les animaux peuvent se nourrir et croître. Donc il y a une très grande productivité et pas beaucoup de gens (nourriture en abondance). En Afrique c'est tout le contraire.

3- La nourriture et la compétition

Dans tout les pays, les récoltes de céréales sont constamment protégées contre la compétition.

Nous ne sommes pas la seule espèce qui doit manger pour survivre.

Les insectes, oiseaux, animaux et autres organismes en profitent eux aussi, causant ainsi une compétition extra spécifique.

4- Les substances toxiques dans les chaînes alimentaires

Plusieurs années passées, les pesticides étaient beaucoup utilisés.

Ces pesticides protégeaient les récoltes contre la compétition (insectes et autres).

Maintenant ces pesticides font aujourd'hui parti de la chaîne alimentaire et nous en payons le prix (empoisonnement au mercure, DDT, cyanure, etc...)

5. Productivité des différents écosystèmes

1- La productivité primaire

a- Productivité primaire brute (PPB) : Quantité totale d'énergie lumineuse que les plantes transforment en **énergie chimique**. Correspond donc à la **photosynthèse**.

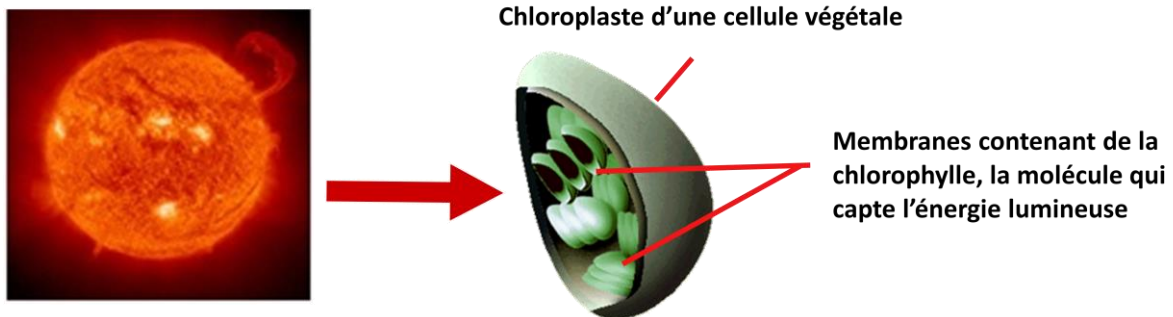


Figure 42 : Productivité primaire brute (PPB)

b- Productivité primaire nette (PPN) : Quantité d'énergie nécessaire produite par photosynthèse pour **ajouter une nouvelle biomasse**.

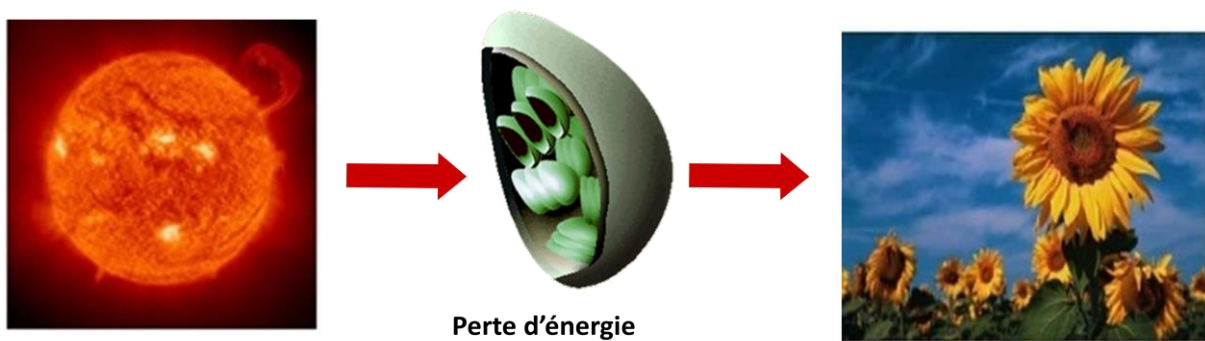


Figure 43 : Productivité primaire nette (PPN)

- Productivité primaire nette et Biomasse mesurable

Productivité primaire nette : C'est l'ajout de **nouvelle** biomasse chaque année.

Biomasse mesurable : C'est la **quantité totale** de végétaux qui existe dans l'écosystème et qui s'est accumulée au fil des ans.

Tableau 2 : Productivité primaire nette vs Biomasse mesurable

| | Productivité primaire nette | Biomasse mesurable |
|----------------|--|---|
| Forêt | Faible productivité car elle consomme une grande portion des produits de sa photosynthèse (par respiration). | Grande biomasse végétale accumulée dans ses grands arbres formés de substances difficiles à digérer. |
| Prairie | Grande productivité car ses petites plantes respirent de façon modérée. | Faible biomasse végétale car les petites plantes annuelles sont rapidement dévorées par les herbivores. |

Tableau 3 : Biomasse mesurable et productivité de quelques écosystèmes

| Type d'écosystème | Superficie couverte (Mkm ²) | Biomasse moyenne (kg matière sèche /m ²) | PPN moyenne (kg/m ² /an) |
|-------------------------------|---|--|-------------------------------------|
| Forêt tropicale sempervirente | 17 | 45 | 2,2 |
| Forêt tempérée caducifoliée | 7 | 30 | 1,2 |
| Forêt boréale | 12 | 20 | 0,8 |
| Savane | 15 | 4 | 0,9 |
| Prairie tempérée | 9 | 1,6 | 0,6 |
| Toundra et pelouse alpine | 8 | 0,6 | 0,14 |
| Semi-désert/steppe | 18 | 0,7 | 0,10 |
| Océan | 332 | 0,003 | 0,13 |
| Récifs coralliens | 1 | 2 | 2,5 |
| Estuaire | 2 | 1 | 1,5 |

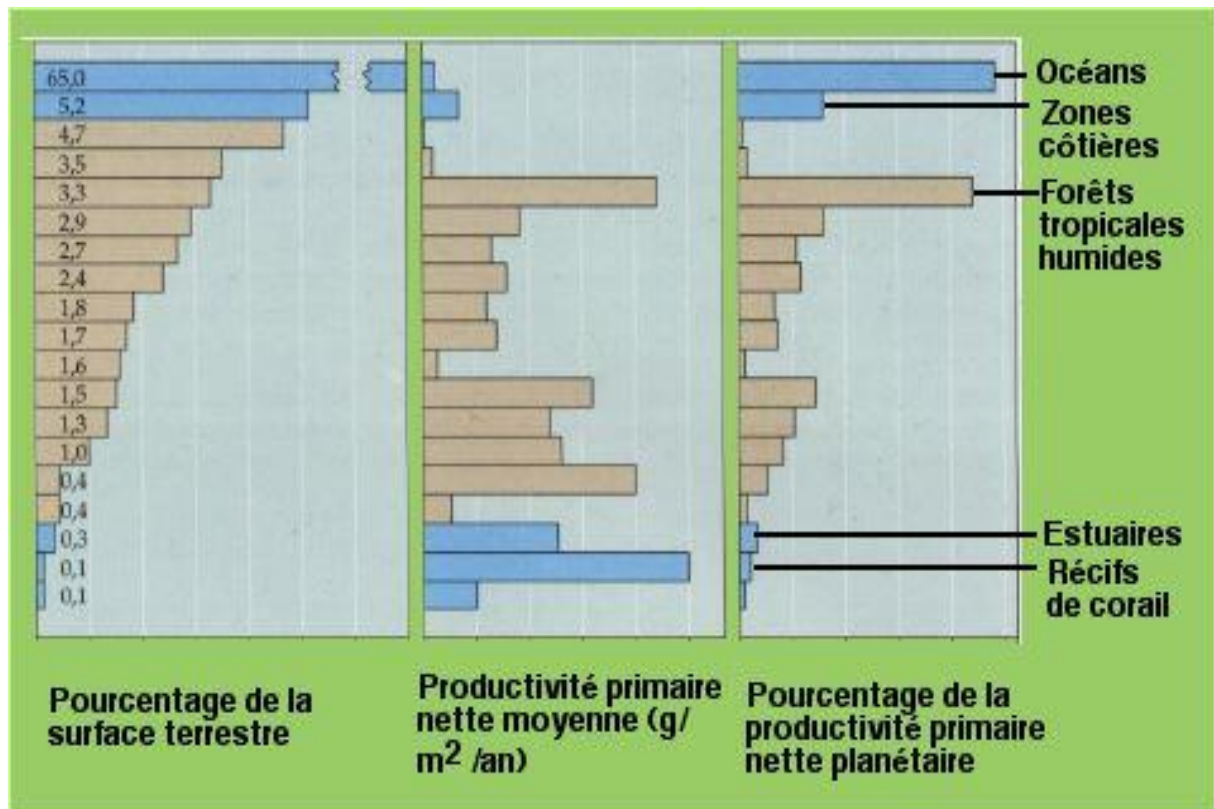


Figure 44 : Contribution de la production primaire nette des écosystèmes terrestres et aquatiques

- Variation géographique de la production primaire (PPN) continentale

(en g de matière sèche/m²/an; estimations)

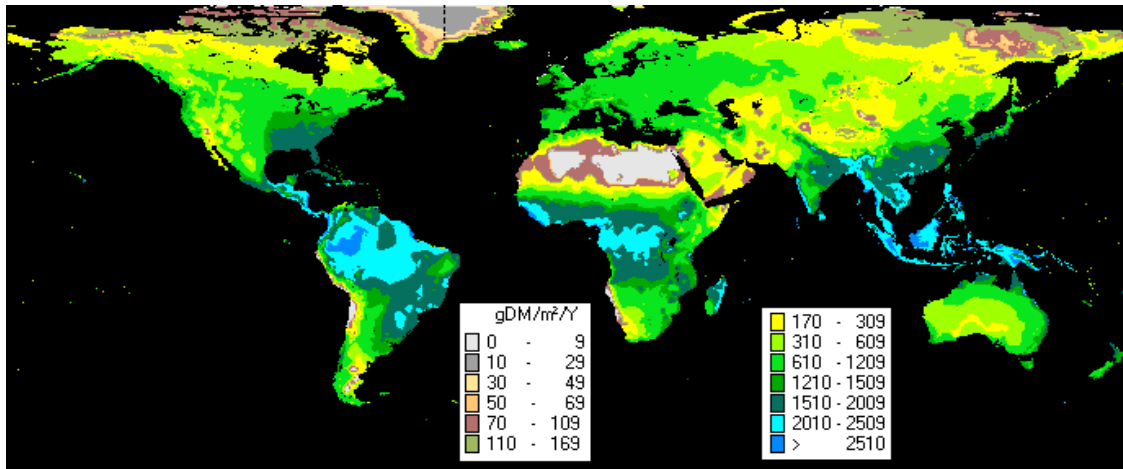


Figure 45 : Variation géographique de la production primaire marine

- Variation géographique de la production primaire nette (PPN) marine

- Transport de nutriments du fond à la surface
- Forte productivité le long des régions côtières (Apports de nutriments terrestres)

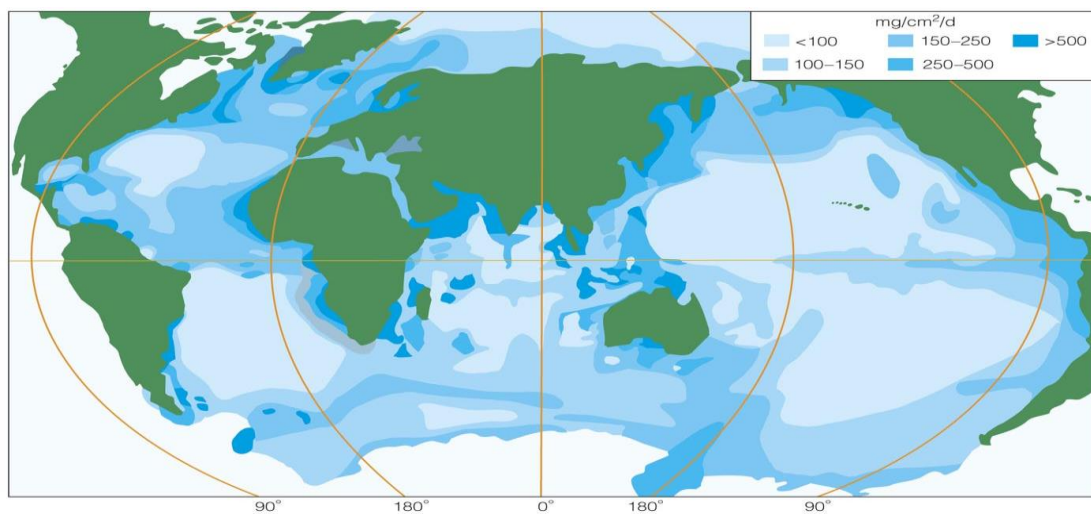


Figure 46 : Variation géographique de la production primaire marine

2. La productivité secondaire

- Production de molécules organiques par les consommateurs.
- Taux auquel les consommateurs convertissent l'énergie chimique de leur nourriture en biomasse (**rendement écologique**).

CHAPITRE VI

CYCLES BIOGEOCHIMIQUES: EAU; MATIERE ORGANIQUE; CARBONE; AZOTE; PHOSPHORE; SILICIUM; SOUFRE.

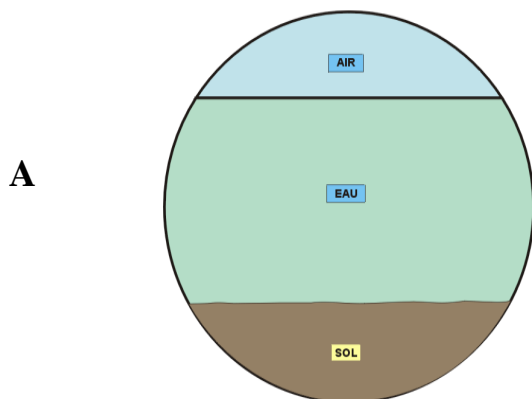
1. Introduction

Depuis la formation de la terre ($\approx 4,5 \times 10^9$ ans) :

- l'apport de matériaux (atomes) extra-terrestre (météorites) est resté mineur (négligeable)
- la gravitation empêche les pertes de matériaux vers l'espace (à l'exception H et He) (négligeable)
- \Rightarrow L'ensemble des atomes constituant le système terrestre est conservé :

Terre \approx système fermé

Exemple d'un petit écosystème :



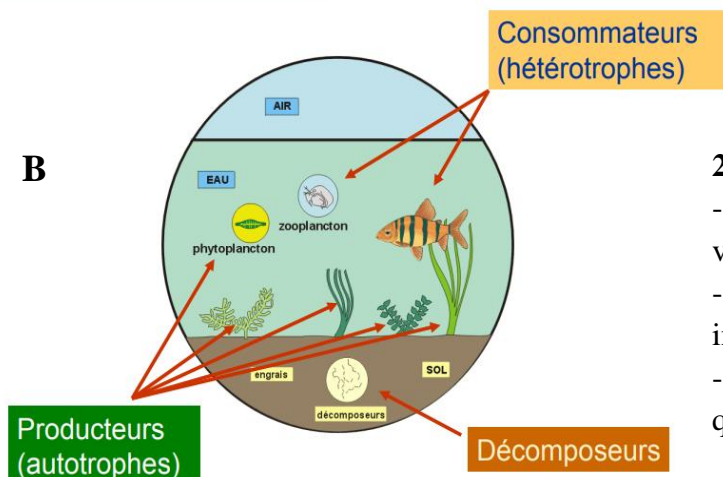
L'écosystème est composé par :

1- Biotope (Facteurs abiotiques):

- Sol (Roches, cailloux, vase, sels...)
- Eau (Composition minéralogique: sels)
- Air : gaz carbonique et oxygène...

Composantes physiques

Composantes biologiques

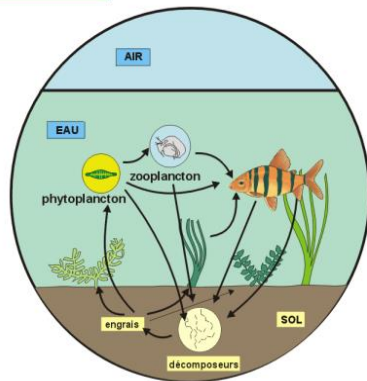


2- Biocénose (Facteurs biotiques):

- Producteurs (Autotrophes) : algues, végétaux aquatiques, phytoplancton...
- Consommateurs (Hétérotrophes): insectes, petits et gros poissons...
- Décomposeurs: micro-organismes qui décomposent la matière organique

Chaîne alimentaire

C



Une **chaîne alimentaire** est une suite d'êtres vivants dans laquelle chacun est mangé par celui qui le suit.

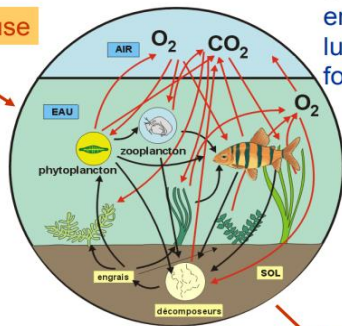
Le premier maillon d'une **chaîne** est très souvent un végétal chlorophyllien (vert) et est appelé producteur primaire.

Ensuite il y a typiquement des animaux végétariens, puis des animaux carnivores.

Échanges gazeux

Énergie lumineuse

D



Système **ouvert** au point de vue énergie. Énergie entre sous forme de lumière et sort sous forme de chaleur.

Système **fermé** au point de vue matériaux: rien n'entre dans le système, rien n'en sort, tout est recyclé.

Chaleur

Fonctionnement de l'écosystème :

- Flux d'énergie
- Recyclage de la matière

Même chose à l'échelle de la planète !!!

Énergie lumineuse

E



Système **ouvert** au point de vue énergie.

Système **fermé** au point de vue matière: tout est recyclé.

Chaleur

Ça se passe exactement la même chose au niveau planétaire

Figure 47: A, B, C, D, E : Model général du flux d'énergie et de recyclage de la matière

- Les atomes, assemblés en molécules diverses, sont en migration incessante entre les différents compartiments de la terre (atmosphère, océan, croûtes terrestres ...).
- A l'échelle globale, le transfert des éléments entre les différents compartiments est de nature cyclique.
- Cycle biogéochimique = étude des flux d'éléments entre les trois compartiments (atmosphère, géosphère, hydrosphère)

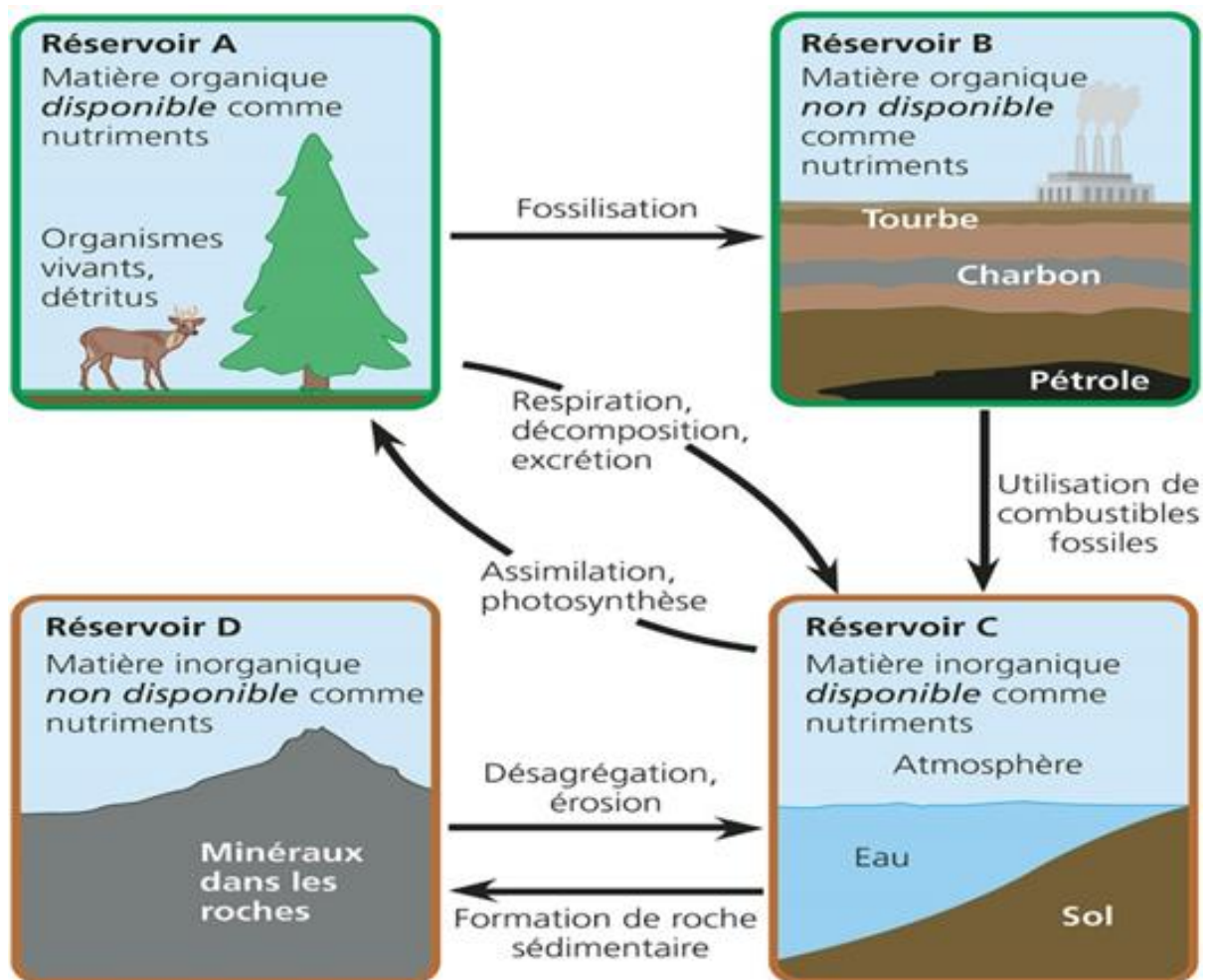


Figure 48: Cycles biogéochimiques: réservoirs et processus généraux

- ▶ En fonction de l'atome étudié, le réservoir dominant change (ex.: atmosphère pour l'azote, roches pour le phosphore).
- ▶ Les processus ne se font pas tous à la même vitesse
 - Lents: formation de roches, érosion, fossilisation
 - Rapides: assimilation, excrétion, décomposition, respiration, photosynthèse
 - Les cycles biogéochimiques peuvent être
 - Ouverts: à une échelle biologique et/ou dans des espaces restreints
 - Fermés: à une échelle géologique et/ou en considérant toute la planète

Cycles Biogéochimiques: mouvement d'élément ou de matière (carbone, oxygène, azote, phosphore, eau, etc) à travers les écosystèmes sur une période de temps bien déterminée.

Certain cycles biogéochimiques sont dominés par une longue conservation dans l'atmosphère, comme le cycle de l'azote. D'autres cycles sont dominés par le stockage terrestre, généralement dans les roches et les sédiments tels que les cycles de phosphore, silicium, soufre, calcium. Leur tendance est similaire.

Ces cycles biogéochimiques sont d'une importance capitale dans la régulation des processus naturels et affectent fortement la viabilité des ressources naturelles. Ils constituent des moyens majeurs pour le renouvellement de la ressource tirée de l'environnement naturel.

L'élimination ou l'introduction de substances a une implication sur la fonction des cycles biogéochimiques

- Par exemple, l'usage d'azote en tant qu'engrais augmente ce fertilisant dans le sol, les rivières, les lacs, la mer et about à des problèmes de pollution des eaux et des écosystèmes. S'ajoute à l'eutrophisation des écosystèmes, des problèmes de santé humaine si l'eau de consommation était surchargée en nitrate
- Aussi l'usage de pesticides en agriculture contamine l'ensemble du réseau trophique. Le cas de folie des abeilles est très démonstratif

Les cycles biogéochimiques servent ainsi comme conduits d'énergie et de matière d'une partie à une autre de l'environnement. Les activités humaines affectent ces cycles et étendent leurs effets au delà de l'impact spatiotemporel immédiat

On expose dans ce programme d'enseignement 7 cycles biogéochimiques important: Cycle Hydrologique, Matière Organique, Carbone, Azote, Phosphore, Silicium et le Soufre.

2. Le cycle de l'eau (H₂O)

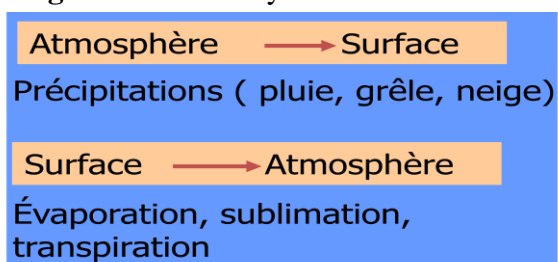
Le cycle de l'eau, appelé aussi cycle hydrologique, est l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau. Ces mouvements, accompagnés de changements d'état, peuvent s'effectuer dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sous-sol. Chaque particule peut n'effectuer qu'une partie de ce cycle (Cycle ouvert/fermé) et avec des durées très variables :

Une goutte de pluie peut retourner à l'océan en quelques jours alors que sous forme de neige, en montagne, elle pourra mettre des dizaines d'années.

Le cycle de l'eau ou cycle hydrologique décrit le constant mouvement de l'eau **sur** et **sous** la Terre. L'eau passe des états **solides**, **liquides** et **gazeux** dans ce cycle.

Le moteur du cycle hydrologique

- 1- l'énergie solaire
- 2- la gravité



2.1. Etats et situations de l'eau

Classiquement, on schématise les états et les situations de l'eau dans le cycle de la façon suivante :

Tableau 5 : Situations de l'eau dans le cycle hydrologique

| Etats | Principaux stocks | Phénomènes de transport |
|-----------------------------|---|--|
| Vapeur (nuages, brouillard) | Humidité atmosphérique, évapotranspiration | évaporation |
| Liquide | Océan, mers, lacs, eaux souterraines | Pluie, cours d'eaux, nuages, circulations souterraines |
| Solide | Glaciers, manteaux neigeux, calottes polaires | Neige, grêle, écoulement des glaciers |

Le cycle hydrologique est un ensemble de voies qui permettent le passage de l'eau de l'atmosphère à la terre et son retour. Le cycle hydrologique n'est pas comme les autres cycles biogéochimiques mais plutôt est un régulateur du flux d'énergie et du cycle des éléments chimiques et des nutriments.

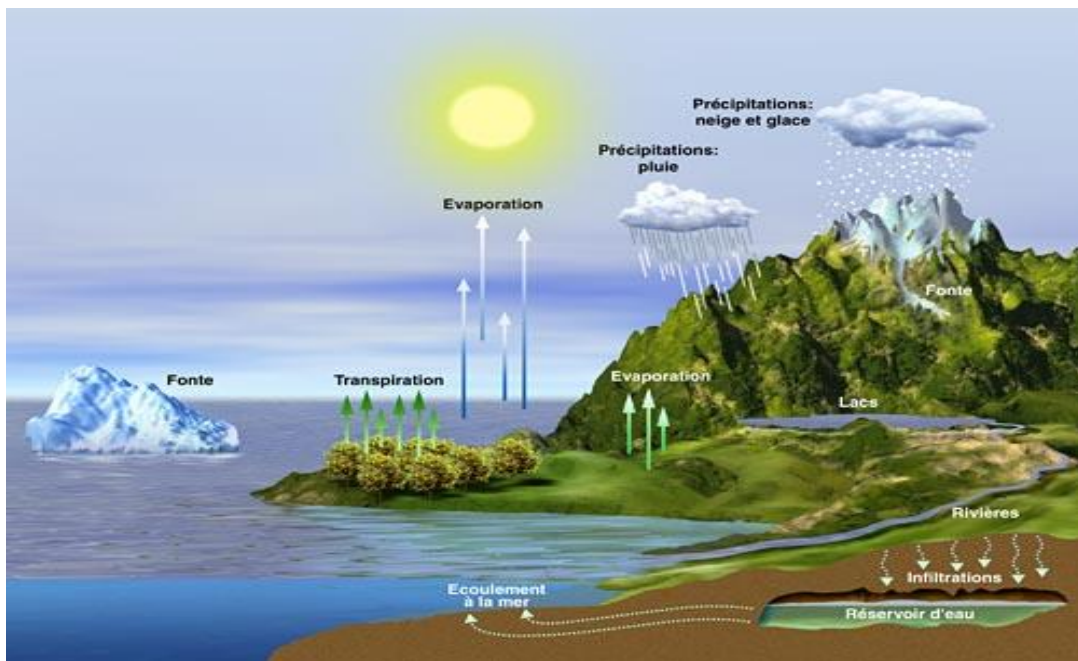


Figure 49 : Cycle hydrologique

2.2. Distribution de l'eau en terme de volumes

En surface, les terres émergées ne représentent que $146 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ sur une surface totale de la planète de $510 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ (soit sensiblement 1/4). Cette disparité entre océans et terres est beaucoup plus accentuée entre eaux douces et eaux salées.

Le volume total des eaux douces est d'environ $36 \cdot 10^6 \text{ km}^3$, soit 3 % des réserves totales en eau.

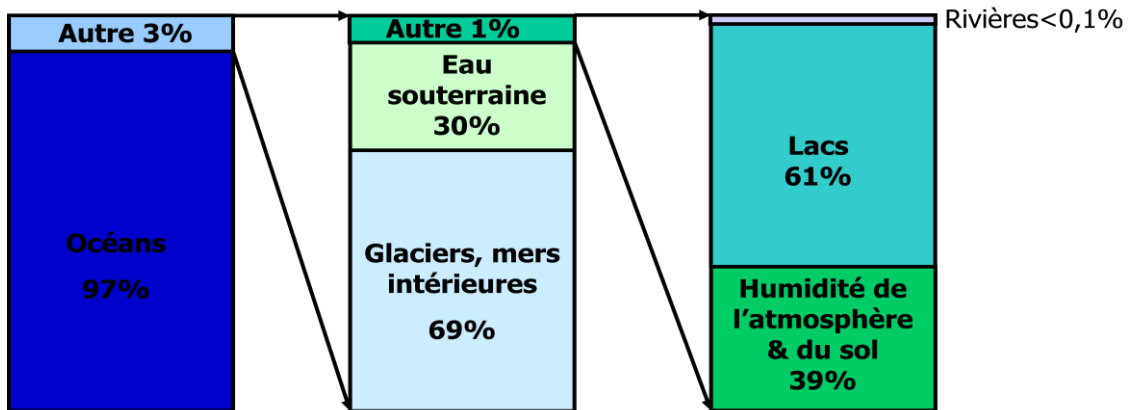


Figure 50: Distribution de l'eau dans la terre en termes de pourcentage (%)

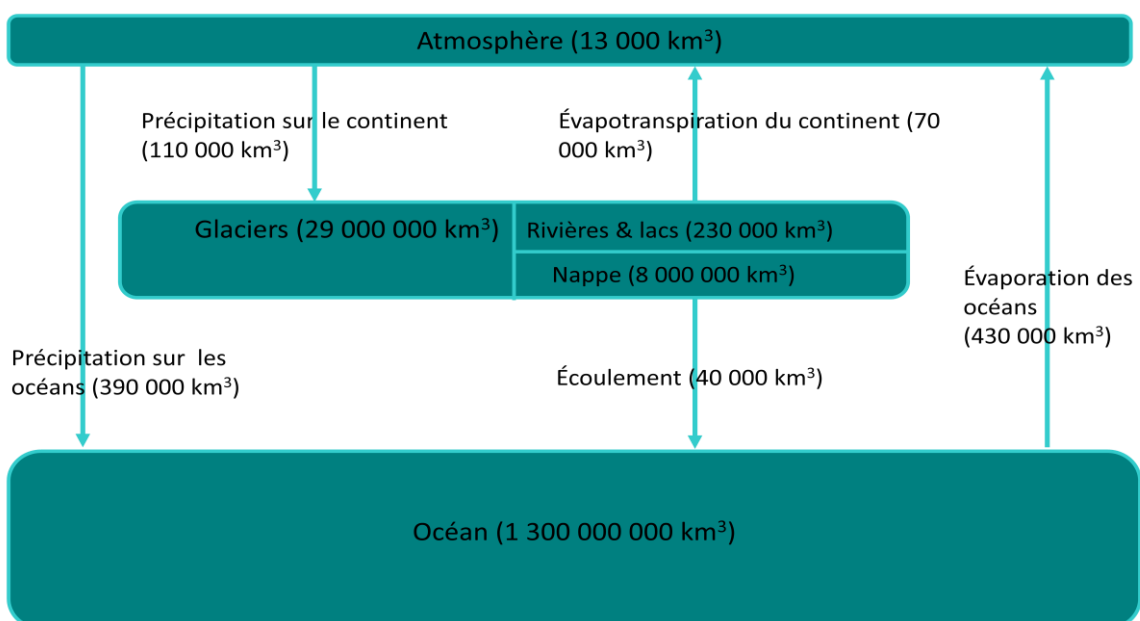


Figure 51: Distribution de l'eau dans la terre en termes de volume (Km³)

Remarquer que l'océan contient 100 000 fois plus d'eau que l'atmosphère.

2.3. Distribution de l'eau en termes de lame d'eau (épaisseur)

Par ailleurs, les eaux se répartissent à peu près ainsi, exprimées en **épaisseur** uniformément réparties sur la terre :

Tableau 6 : Distribution de l'eau en termes d'épaisseur

| | | | |
|--------------------|-----------|---------------------|-----------|
| Mers et océans | 2500m | Eaux souterraines | 300-600mm |
| Glaciers | 50-100m | Eaux atmosphériques | 20-30mm |
| Eaux continentales | 350-700mm | Matière vivantes | ε ! |

On retiendra que ce qui circule dans les **cours d'eau** ne représente qu'une partie absolument **infime** du volume d'eau total.

2.4. Distribution de l'eau en termes de flux

La vitesse avec laquelle l'eau circule est très variable; généralement, on prend l'année comme période de référence. Les flux annuels sous forme liquide et gazeuse (les plus importantes) sont sensiblement les suivants :

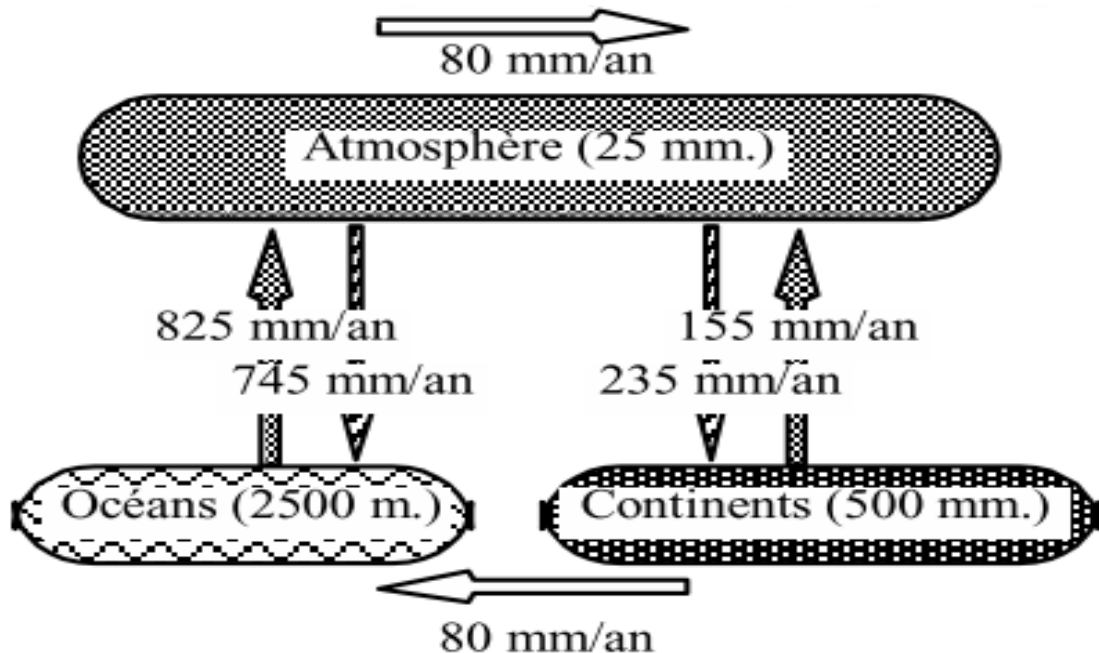


Figure 52: Distribution de l'eau dans la terre en termes de flux (mm/ans)

Un système constitué de plusieurs réservoirs qui réalisent entre eux des échanges est en **équilibre** si les sommes des flux entrants et sortants sont égaux pour chacun des réservoirs; si ce n'est pas le cas, le système est en *déséquilibre* : un des réservoirs s'enrichit ou s'appauvrit.

2.5. Inertie des systèmes

"Le temps de séjour" il correspond au rapport du volume du système (V) sur le débit qui l'alimente

$$T_s = V \text{ (m}^3\text{)} / Q \text{ (m}^3\text{/h)}$$

Exemple:

Une station équipée d'un bassin de 5 150 m³, reçoit un débit moyen 24 h (Q₂₄) de 160 m³ /h et un débit de pointe (Q_p) de 250 m³ /h.

Quel est le temps de séjour dans le bassin d'aération en (Q₂₄) et (Q_p) ?

sur le Q₂₄ : $T_s \text{ moyen} = 5150/160 = 32,2 \text{ heures}$

sur le Q_p = $T_s \text{ pointe} = 5150/250 = 20,6 \text{ heures}$

Plus le temps de séjour est important, plus l'inertie du système est importante: c'est par exemple le cas des eaux souterraines où il atteint couramment, pour des nappes importantes, 10 à 50000 ans; en revanche la quasi totalité des eaux continentales ont un temps de séjour relativement **limité**, de l'ordre de quelques jours à un an.

3. Cycle de la Matière Organique (MO)

3.1. Définition

- La matière organique (MO) est l'ensemble des molécules contenant du carbone (C) (formant la chaîne carbonée) et d'hydrogène (H) et éventuellement des atomes d'oxygène (O) de chlore (Cl) d'azote (N), et plus rarement des atomes de phosphore (P), de soufre (S) ...
- La matière organique c'est toute molécule qui a un lien direct entre l'atome du carbone et celui de l'hydrogène. Toute molécule qui ne correspond pas à cette définition c'est la matière minérale. La matière organique regroupe:
 - a- les métabolites produits par les êtres vivants
 - b- les cellules vivantes ou mortes, animales ou végétales et toutes les molécules résultant de la décomposition de ces cellules.
 - c- les molécules de synthèse dont font partie les produits phytosanitaires.

3.2. La matière organique présente dans les eaux de surface : Elle peut avoir deux origines :

- **La matière organique autochtone :** vivante ou détritique, elle est constituée en majeure partie de phytoplancton, de zooplancton et de bactéries, mais aussi de macrophytes et d'autres algues benthiques. La matière organique autochtone est issue d'une production interne aux masses d'eau et se forme principalement par voie photosynthétique. Elle est très abondante dans les étendues d'eau stagnantes (lacs, étangs) riches en sels nutritifs et de ce fait soumis au processus d'eutrophisation.

La contribution de la matière organique autochtone peut être non négligeable surtout lors des blooms planctoniques du printemps et de l'été. Cependant, à l'échelle annuelle, la contribution autochtone des rivières est largement minoritaire par rapport à la contribution allochtone. Elle varie d'une rivière à l'autre, mais reste presque toujours inférieure à 10% du flux annuel total de matière organique transportée.

On notera que la matière organique autochtone se forme à partir des transferts de nutriments (azote, phosphore) en provenance des sols des bassins versants. Sa production est une conséquence directe des activités humaines sur les bassins versants.

- **La matière organique allochtone,** issue de la végétation, des sols et des roches mères des bassins versants. Les matières organiques provenant de la végétation (litières) sont plus ou moins indépendantes des apports minéraux, tandis que celles issues des sols et des roches mères sont liées à la matrice minérale des particules en suspensions. Les transferts au réseau hydrographique se font par des vecteurs hydrologiques (ruissellement, écoulements hypodermiques et de nappe), éoliens ou par chute directe. Ce compartiment comprend également les apports de matière organique anthropique, par exemple ceux provenant des déjections animales (fumier, lisier), des résidus urbains et/ou industriels (eaux usées, boues de stations d'épuration, hydrocarbures).

Ces deux types de matière organique peuvent se trouver dans les masses d'eau soit sous forme particulaire, soit sous forme dissoute dépendant de la taille des molécules d'origines ou de l'état de décomposition de leurs précurseurs végétaux ou animaux.

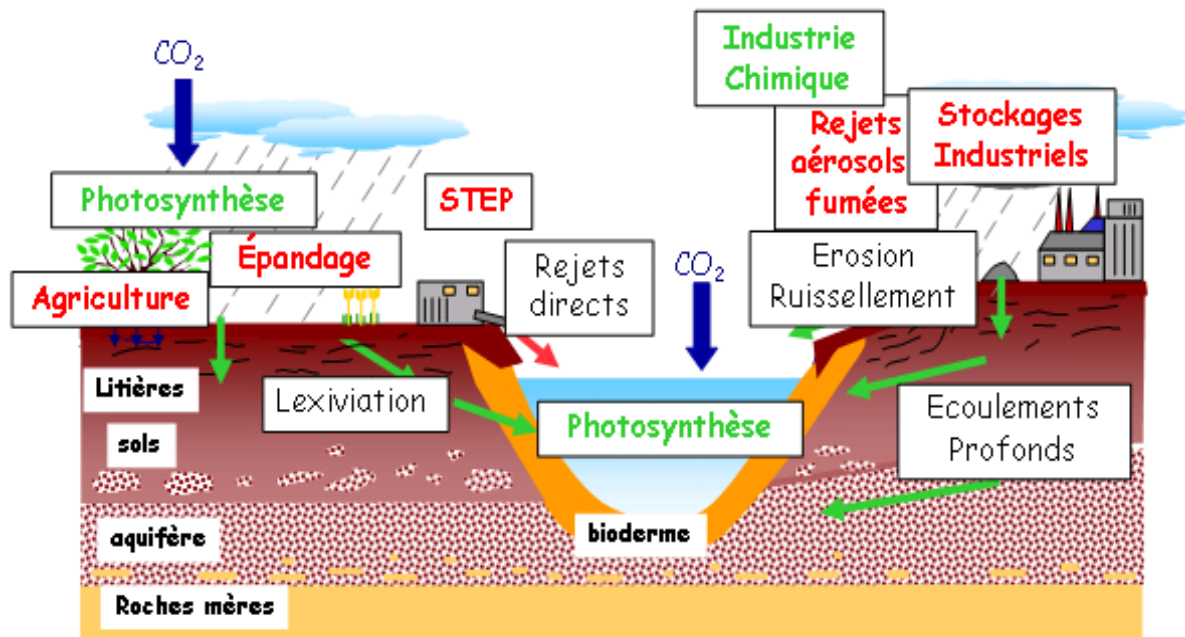


Figure 53 : Multiplicité des sources de matière organique

3.3. La matière organique présente dans les sols

La matière organique est l'un des principaux composants des sols. On la reconnaît facilement à sa couleur très sombre, voire noire, et à son odeur. Elle est, en général, très présente dans la partie supérieure du sol où elle joue un rôle clef dans les relations entre le sol et les plantes, dans la structure du sol et dans sa richesse.

On distingue quatre groupes de matières organiques dans les sols :

1- La matière organique vivante, végétale et animale, qui englobe la totalité de la biomasse en activité. La biomasse végétale et microbienne est supérieure à la biomasse animale. Elle est essentiellement représentée par les champignons, puis les bactéries et les actinomycètes. Le rôle de cette microflore de décomposition est de se nourrir des matières organiques mortes (nécromasse), ce qui conduit à les minéraliser.

2- Les débris d'origine végétale (résidus végétaux, exsudats) et d'origine animale (déjections et cadavres) qui sont regroupés sous le terme de matière organique fraîche. La nature de cette MO fraîche est directement liée aux activités de surface et en premier lieu au couvert végétal (forêt, prairie, cultures). Elle est donc en majorité composée de MO végétale (cellulose, lignines, pectines, algues, etc.)

3- Des composés organiques intermédiaires sont les matières organiques en cours d'évolution entre la MO fraîche et les composés organiques stabilisés : les matières humiques (humus).

4- Les composés organiques stabilisés : phase aboutie de la décomposition de la matière organique (acides fulviques, acides humiques, humine).

La matière organique des sols peut se retrouver dans les cours d'eau sous forme particulaire (COP) à l'occasion des phénomènes d'érosion et de ruissellement ou sous forme dissoute (COD) lors des processus de lessivage.

3.4. Conclusion

- La matière organique est issue de l'assemblage du carbone (C) et l'hydrogène (H), et éventuellement d'autres atomes (N, P, Cl, Si....)
- La matière organique présente dans les rivières provient de deux origines : une origine allochtone (sol, litières, rejets urbains) et une origine autochtone (issue d'une production interne à la rivière).
- La matière organique allochtone parvient à la rivière d'une part sous forme particulaire (MOP) à l'occasion des phénomènes de ruissellement ou par chute directe (cas des feuilles). D'autre part, elle peut être acheminée à la rivière sous forme dissoute (MOD) lors des processus de lessivage.
- La matière organique autochtone correspond aux plantes aquatiques, au phytoplancton, aux bactéries, aux mousses, etc., et à leur dégradation dans le milieu aquatique. On la retrouve à la fois sous forme particulaire et dissoute dans la rivière.
- La matière organique autochtone se forme à partir des transferts de nutriments (azote, phosphore) en provenance du bassin versant. Sa production est donc une conséquence directe des activités humaines sur les bassins versants.
- La contribution de la matière organique autochtone peut être non négligeable surtout lors des blooms planctoniques du printemps et de l'été. Cependant, à l'échelle annuelle, la contribution autochtone des rivières est largement minoritaire par rapport à la contribution allochtone. Elle varie d'une rivière à l'autre, mais reste presque toujours inférieure à 10% du flux annuel total de matière organique transportée.
- La décomposition de la matière organique donne des minéraux (C, N, P, S, Si....) qui seront utilisés par les plantes (producteurs) pour fabriquer encore une fois la matière organique et le cycle recommence.

4. Cycle du carbone (C)

4.1. Introduction

- Le carbone est l'un des principaux éléments chimiques sur Terre. Cet atome se trouve partout et en perpétuel mouvement: dans l'eau, dans l'air, dans les sols... Nous, êtres vivants, sommes aussi carbonés. Cet atome est à l'origine de la vie sur Terre.
- D'autre part, le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre, qui a offert à la planète la chaleur suffisante pour abriter cette vie. Pourtant, le carbone a aujourd'hui un rôle dans le changement climatique
- Le **cycle biogéochimique du carbone** sur Terre est rendu plus complexe par l'existence d'importantes masses d'eau océaniques, et surtout par le fait que la vie y tient une place importante.
- Il existe quatre réservoirs de carbone: l'hydrosphère, la lithosphère, l'atmosphère et la biosphère.

4.2. Les grands réservoirs de carbone

Tableau 7 : Distribution du carbone dans les grands réservoirs

| Réservoirs | Valeurs de carbone en Giga Tonnes (GT) ($\times 10^9$) |
|-----------------------------------|--|
| atmosphère | 750 GT |
| Biosphère | 2360 GT |
| Hydrosphère (océans) | 38 000 GT |
| Lithosphère (sédiments et roches) | 35 500 000 GT |

- La plus **grande** partie du carbone terrestre est piégée dans des composés qui participent **peu** au cycle: roches sous forme de carbonates et océan profond.
- L'essentiel du cycle se fait entre l'atmosphère, les couches superficielles du sol et des océans, et la biosphère (biomasse et nécromasse).
- En mer, le carbone se trouve surtout sous forme de carbonate et de biomasse planctonique.
- Sur les continents, les tourbières, prairies et forêts, mais aussi certains sols jouent un rôle plus ou moins important de stockage de carbone ou de puits de carbone.

4.3. La base du cycle du carbone

Le carbone est un des atomes les plus présents dans les organismes vivants. Il se trouve sous deux formes principales dans les écosystèmes:

- Le dioxyde de carbone (CO_2)
- Le glucose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)

4.4. Fonctionnement

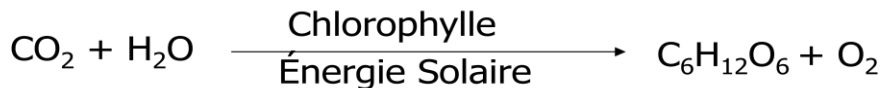
4.4.1. Le cycle du carbone organique

La vie sur terre influence profondément la composition de l'atmosphère en libérant du dioxyde de carbone CO_2 et du méthane CH_4 . Les processus de respiration et de fermentation fabriquent la plus grande partie de ces émanations.

La photosynthèse et la respiration sont les 2 réactions chimiques de base du recyclage du C.

a- Photosynthèse:

Processus utilisé par les plantes pour transformer le CO_2 en glucose. Cette réaction s'effectue dans les chloroplastes. La lumière activera une molécule la chlorophylle qui permettra le déroulement de la réaction.



b- Respiration cellulaire:

Mécanisme par lequel les cellules vont brûler le glucose pour produire de l'énergie. Réaction ayant lieu dans les mitochondries de **TOUS** les êtres vivants pour produire leur énergie.

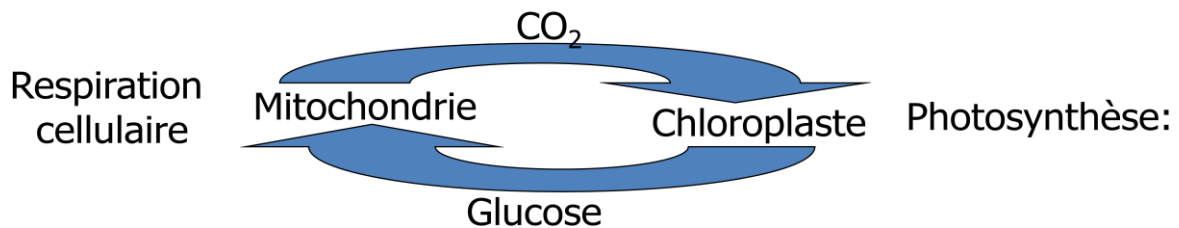


Figure 54: Les deux processus essentiels du cycle biogéochimique du carbone

Le bilan (photosynthèse et respiration) net d'une forêt mature est nul, c'est l'océan (phytoplancton) à lui seul qui joue le rôle de régulateur de l' O_2/CO_2 atmosphérique (2 notions liées: séquestration du Carbone et production d'Oxygène)

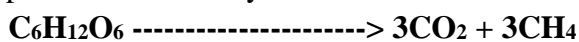
c- Fermentation

Le rôle de la fermentation, dans le cycle du carbone, est d'utiliser le carbone non atmosphérique.

Deux groupes de microorganismes décomposent cette matière organique en dégageant du dioxyde de carbone et/ou du méthane.

- Le premier groupe se compose des organismes aérobies qui décomposent la matière organique en dégageant du dioxyde de carbone (respiration).

- Le deuxième groupe se compose d'organismes anaérobies qui décomposent la matière organique en produisant du dioxyde de carbone et du méthane par fermentation.



Matière organique -----> dioxyde de carbone + méthane

4.4.2. Le cycle du carbone inorganique

Les processus qui entrent en jeu dans le cycle du carbone inorganique sont de nature géologique et s'étendent sur plusieurs milliers d'années. Ce carbone est contenu dans les océans, l'atmosphère et les sédiments et les roches carbonatées. L'altération des roches continentales va transformer le CO₂ dissout dans l'eau en HCO₃⁻ (bicarbonate).

Des organismes assemblent HCO₃⁻ au Ca²⁺ pour sécréter leur coquille ou leur squelette.

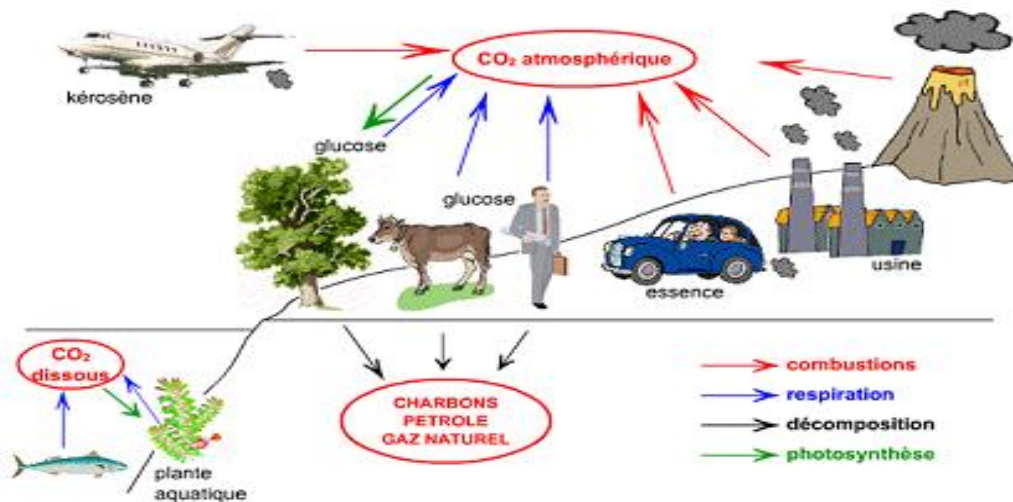
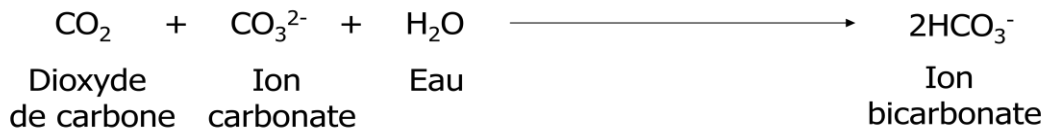


Figure 55: Processus généraux du cycle biogéochimique du carbone

Ensembles, la photosynthèse et la respiration cellulaire forment les deux moitiés essentielles du cycle du carbone.

4.5. Cycle terrestre du carbone

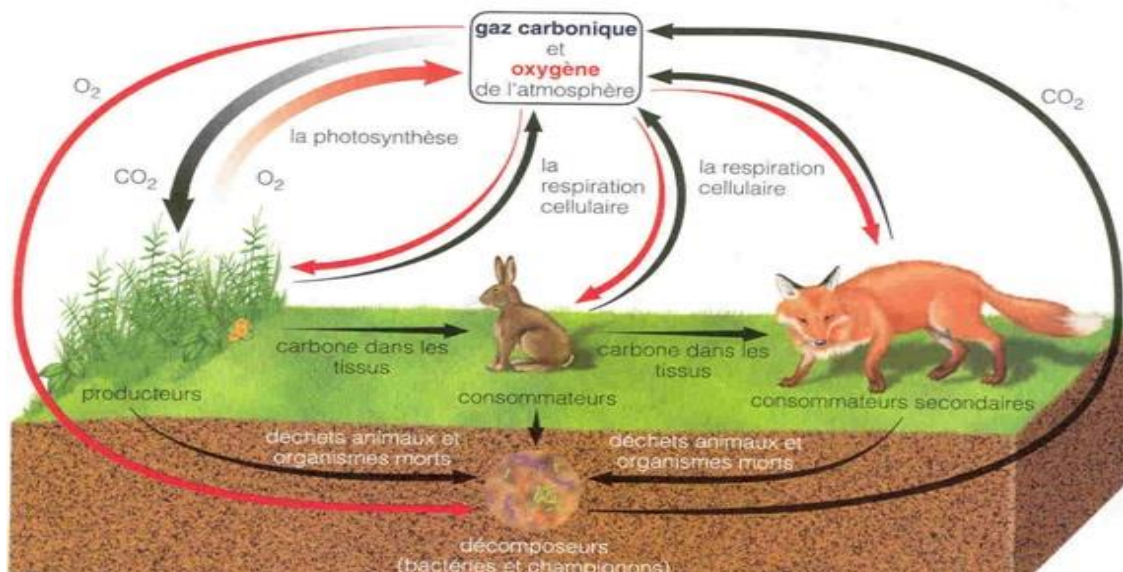


Figure 56: Cycle terrestre du carbone

- La combustion de combustibles fossiles augmente le CO₂ dans l'atmosphère.
- Les décomposeurs utilisent les déchets pour se procurer le glucose pour effectuer la respiration cellulaire et rejeter du CO₂.
- Le glucose passe entre niveaux trophiques dans les chaînes alimentaires.
- Seuls les végétaux ont le pouvoir d'éliminer le CO₂ et de produire de l'oxygène qui sera utilisé par tous les organismes.

4.6. Cycle aquatique du carbone

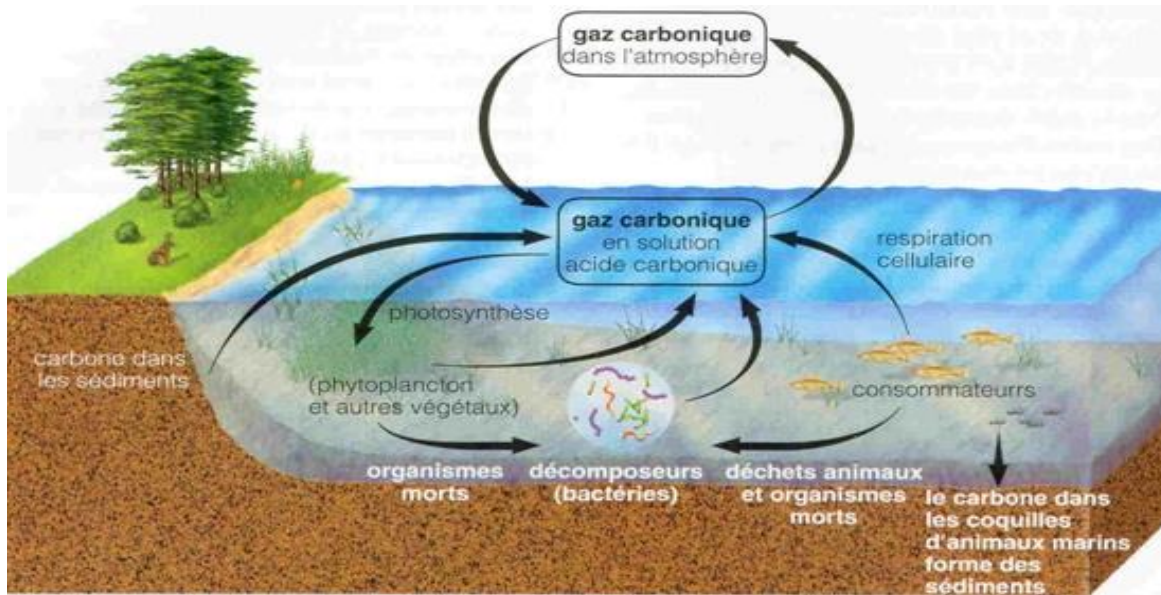


Figure 57: Cycle aquatique du carbone

- Le CO₂ est transformé en acide carbonique.
- Le phytoplancton et les algues effectueront la photosynthèse.
- Les coquilles de mollusque augmenteront la quantité de C dans l'eau.

4.7. Un déséquilibre du cycle du carbone: l'effet de serre

- L'**effet de serre** est un processus naturel résultant de l'influence de l'atmosphère sur les différents flux thermiques contribuant aux températures au sol d'une planète. Sans effet de serre, la température moyenne sur la Terre serait de -18 °C au lieu de +15 °C ... L'effet de serre est donc un phénomène bénéfique!

- Les gazes à l'effet de serre sont: la vapeur d'eau (H₂O), Dioxyde de carbone (CO₂), Méthane (CH₄), Oxyde nitreux (N₂O), l'ozone (O₃).

- Le réchauffement climatique est du à l'effet de serre additionnel provoqué par l'homme, c'est l'effet de serre anthropique ou les rayons du soleil restent emprisonnés dans l'atmosphère. Il est causé essentiellement par:

A- La déforestation: Diminution de la capacité à éliminer le CO₂

B- La trop grande utilisation de la combustion fossile: Augmentation directe de la quantité de CO₂ rejetée dans l'atmosphère.

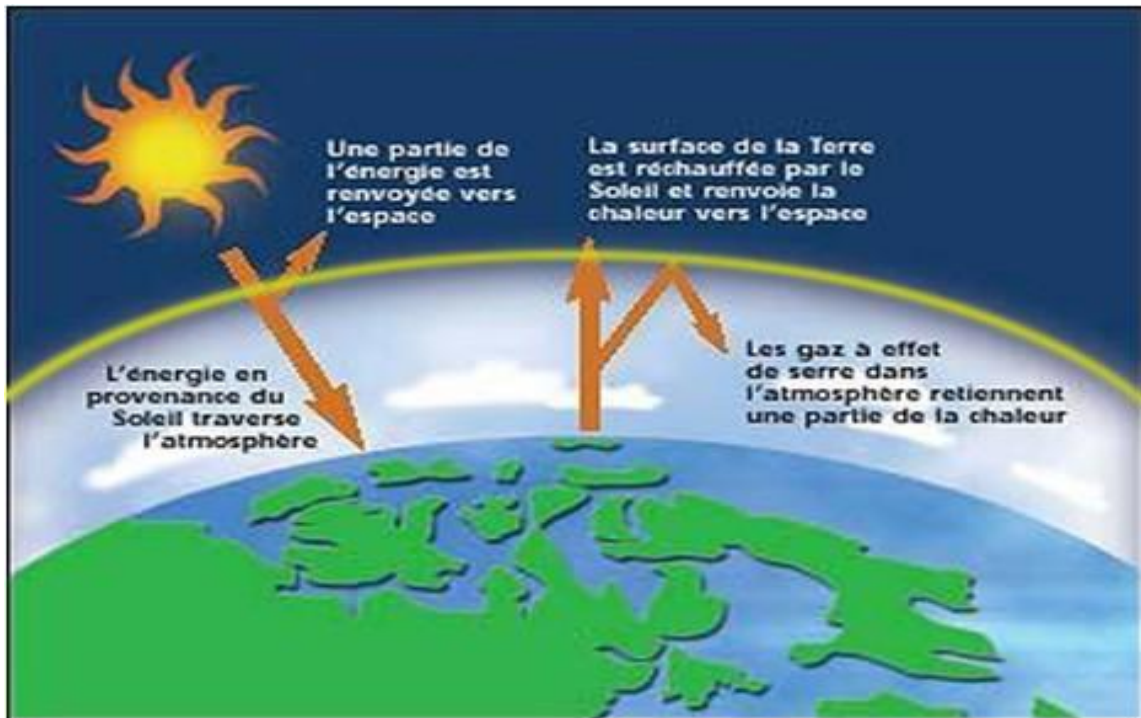


Figure 58 : L'effet de serre

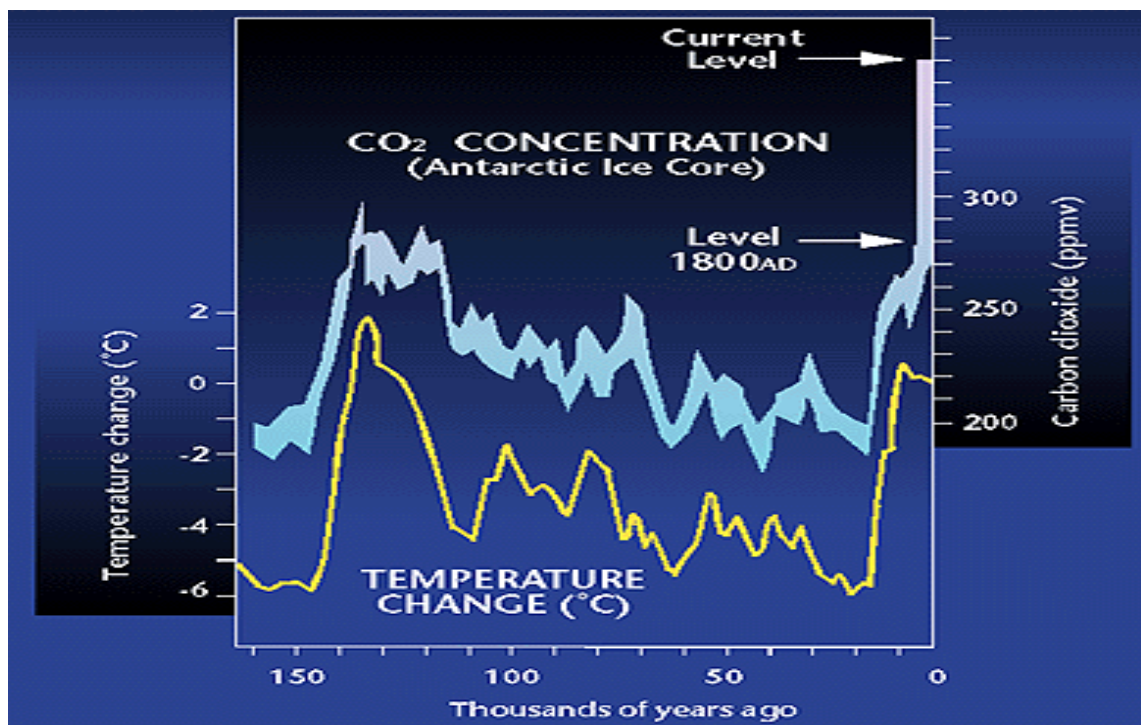


Figure 59: Rapport entre émissions de gaz à effet de serre par l'homme et réchauffement climatique

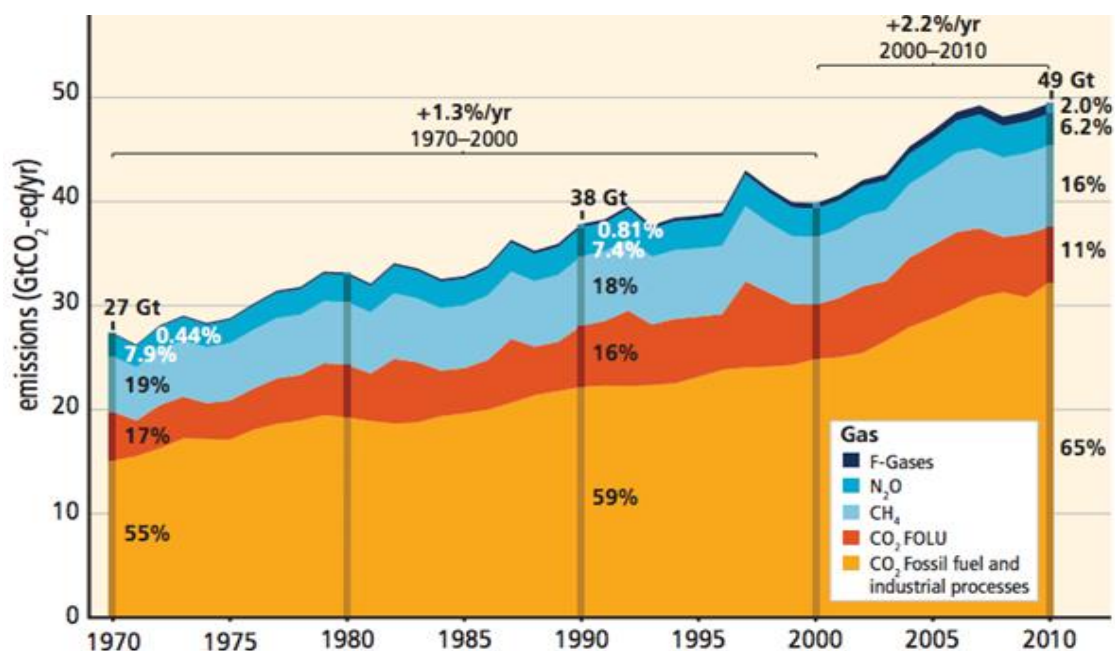


Figure 60: Emissions anthropiques totales annuelles de gaz 1970-2010

Les émissions d'équivalent CO₂ par an atteignent 49 Gigatonnes. C'est presque le double de la quantité émise dans les années 1970. La majeure partie de ces émissions (76%) est du CO₂. Vient ensuite le méthane (16%) l'oxyde nitreux (6,2%) et les composés fluorocarbonés (2%).

Tableau 8 : Sources naturelle et anthropiques du méthane (CH₄)

| Source de méthane | Estimation CH ₄ (Tg/an) |
|--|------------------------------------|
| Naturelle | |
| Zones inondées naturelles | 110 |
| Termites | 20 |
| Océans | 10 |
| Eaux naturelles | 5 |
| Hydrates de gaz | 5 |
| Total naturelles | 150 |
| Anthropiques | |
| Mines de charbon, gaz naturel et industrie pétrolières | 100 |
| Rizières | 60 |
| Animaux domestiques | 80 |
| Excréments d'animaux | 25 |
| Traitement des déchets | 25 |
| Décharges d'ordures | 30 |
| Combustion de biomasse | 20 |
| Total anthropiques | 340 |
| Total naturelles + Total anthropiques | 490 |

Cycle du carbone

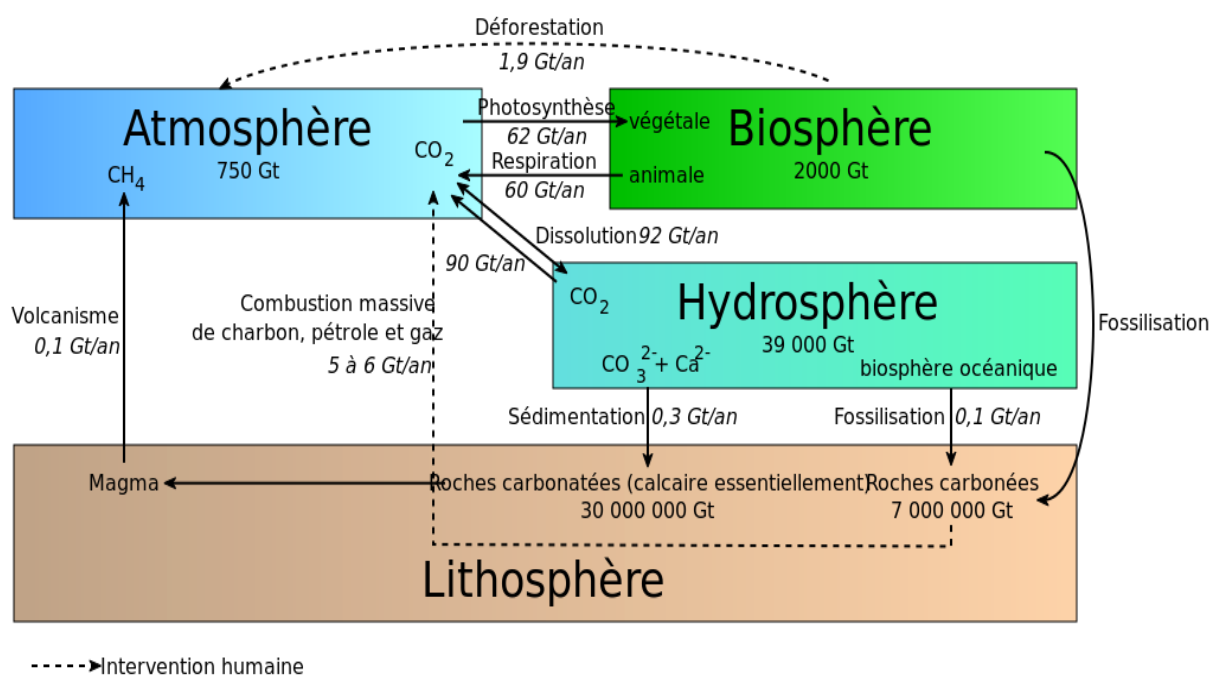


Figure 61 : Cycle du carbone: Grands réservoirs et processus de transfert

4.8. Conclusion

- L'émission d'énergie rayonnante par le Soleil constitue le point de départ du *transfert* de matière et *d'énergie* dans le monde vivant.
- Le cycle biogéochimique du C participe (au même titre que les cycles de l'N, du P, de l'H₂O...) à la circulation ininterrompue de matière entre biotope et biocénose;
- le C se trouvant alternativement sous forme réduite ou oxydée, les cycles du C et de l'O, le Si et du Ca sont interdépendants.
- Au cours du cycle d'un élément, la matière se trouve alternativement sous forme minérale et organique.
- Le cycle du carbone est donc un système de recyclage très complexe où les processus physiques, chimiques et biologiques sont si intimement liés qu'il devient difficile d'examiner séparément le recyclage des deux formes de carbone (carbone organique et inorganique).
- Si le cycle du carbone semble équilibré sur l'échelle des temps géologiques; il arrive souvent que les quantités et les flux de carbone varient de façon assez conséquente entre différents réservoirs et ont ainsi des implications climatiques majeures (Effet de serre/Changement climatique).

5. Cycle de l'azote (N)

5.1. Introduction

- On a vu que la vie sur terre influence profondément la composition de l'atmosphère en produisant du dioxyde de carbone CO_2 et du méthane CH_4 à travers les processus de la respiration et la fermentation reliés au recyclage du carbone.
- La Vie a aussi influencé la composition de l'atmosphère à travers le recyclage d'un autre élément, l'azote (N). Ce gaz est le premier en importance dans l'atmosphère terrestre (78%). Il s'y trouve sous sa forme moléculaire normale diatomique N_2 , un gaz relativement inerte (peu réactif).
- Les organismes ont besoin d'azote pour fabriquer des protéines et des acides nucléiques, mais la plupart ne peuvent utiliser la molécule N_2 . Ils ont besoin de ce qu'on nomme l'azote fixée dans lequel les atomes d'azote sont liés à d'autres types d'atomes comme par exemple à l'hydrogène dans l'ammoniac NH_3 ou à l'oxygène dans les ions nitrates NO_3^- . Le cycle de l'azote est très complexe;

5.2. Formes, sources et distribution de l'azote

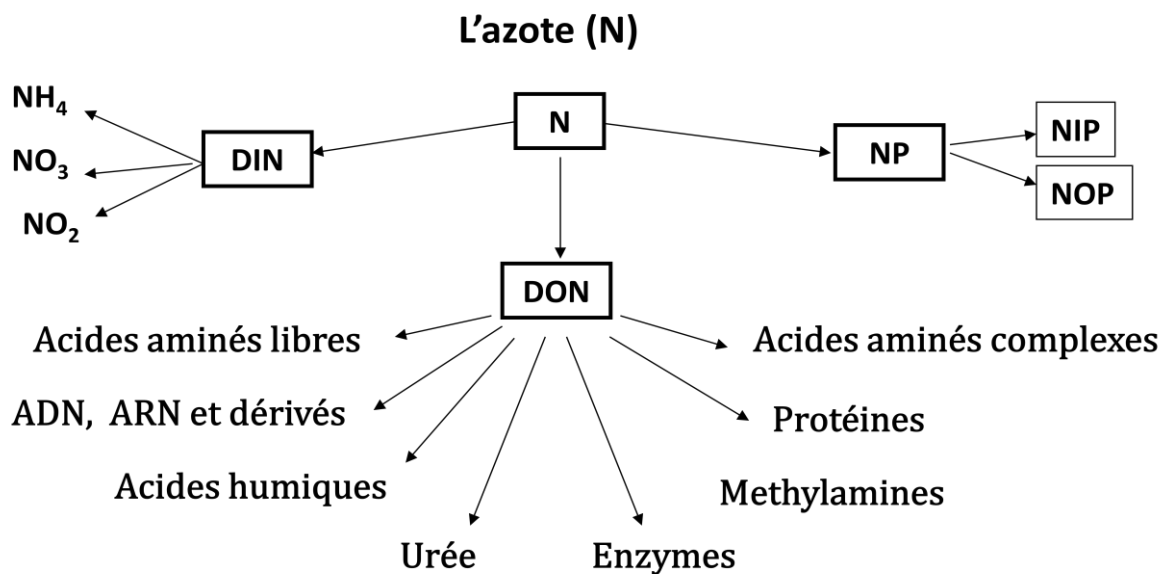


Figure 62: Composition de l'azote totale

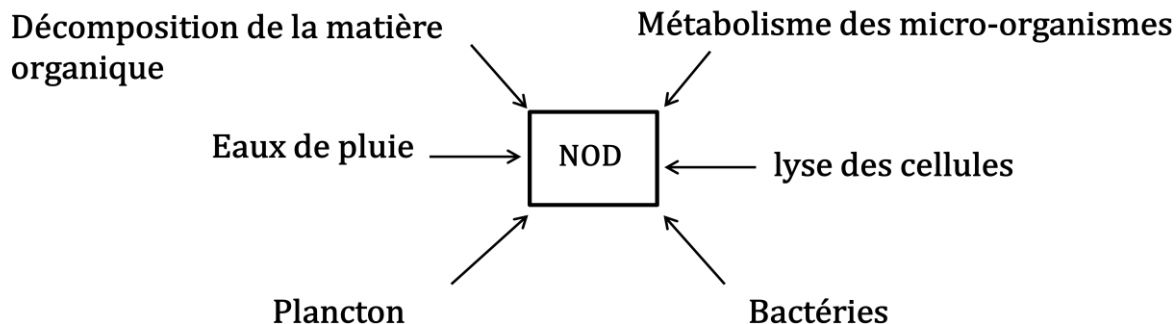


Figure 63 : Source de l'azote organique dissous

Les formes assimilables pour les producteurs primaires comme le phytoplancton et les organismes photosynthétiques en général sont :

- Les ions d'ammonium (NH_4^+), nitrites (NO_2^-) et nitrates (NO_3^-).
- L'azote organique dissous (NOD).

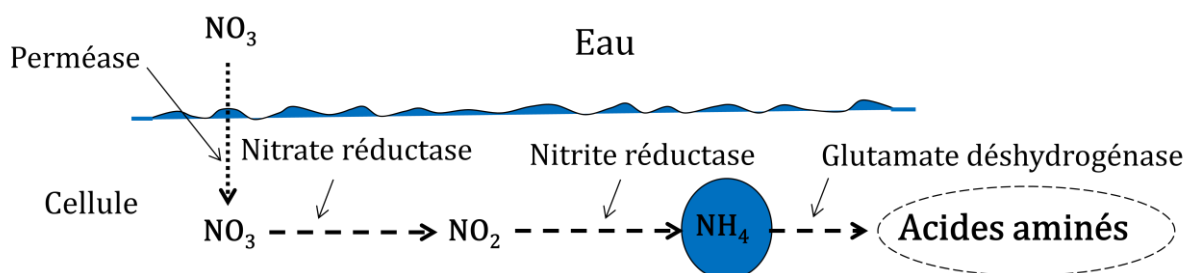


Figure 64 : Assimilation des différentes formes d'azote dans une cellule de phytoplancton

L'ammonium (NH_4) est la forme préférée pour le phytoplancton car énergétiquement avantageux, et directement convertit en acides aminés à l'aide de l'enzyme glutamate déshydrogénase.

L'assimilation des Nitrates (NO_3) a besoin de leur conversion en NO_2 et ensuite en NH_4 ce qui nécessite l'intervention de deux enzymes (nitrate réductase et nitrite réductase).

Tableau 9: Composition ionique des eaux de pluie (atmosphère) et des eaux de rivières

| Ions majeurs | Eau de pluie (P : μM) | Eau de rivières (R : μM) | R/P |
|--------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------|
| Ca^{++} | 3,9 | 41,1 | 10,5 |
| Na^+ | 5,2 | 37,8 | 7,3 |
| Mg^{++} | 1,6 | 15,6 | 9,8 |
| K^+ | 1,8 | 5,9 | 3,3 |
| SO_4^{--} | 30,2 | 65,5 | 2,2 |
| Cl^- | 13,3 | 15,5 | 1,2 |
| HCO_3^- | 0,1 | 15,1 | 151 |
| Nutriments | | | |
| NO_3^- | 27,3 | 32,4 | 1,4 |
| NH_4^+ | 12,2 | 2,2 | 0,2 |
| PO_4^{--} | 0,08 | 0,03 | 0,4 |

Noter que dépendant de l'élément, l'eau de rivière peut être plus ou moins concentrée que les eaux de pluie en raison de l'implication **biologique** et **pédologique** qui en modifient la concentration.

Tableau 10: Distribution des formes de l'azote dans l'atmosphère, l'océan et le continent

| Réservoir | Espèce ou forme d'azote | Stock en GT (10 ¹⁵ g) |
|-----------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Atmosphère | N ₂ , | 3800000 |
| | NO _x , N ₂ O | 1.4 |
| | NH ₃ | 0.0017 |
| Océan | N ₂ | 22000 |
| | NO ₃ | 570 |
| | NH ₄ | 7 |
| | NOD | 530 |
| | NOP | 3.2 |
| Biomasse continentale | N Organique Sol | 300 |
| | N Inorganique Sol | 160 |
| | Plantes | 11-14 |
| | Humus | 1.9-3.3 |
| | Biomasse animale | 0.17 |
| | Biomasse microbienne | 0.5 |

Tableau 11: Sources naturelle et anthropique de l'azote gazeux à effet de serre

| Sources de N en Tg . ans ⁻¹ | NO _x | N ₂ O | NH ₃ |
|--|-----------------|------------------|-----------------|
| Naturelles | | | |
| Océans | | 2 | 8.2 |
| Sols | 6 | 4.5 | 2.4 |
| Animaux sauvages | 4 | | 0.1 |
| Eclairs | 4 | | |
| Total sources naturelles | 14 | 6.5 | 10.7 |
| Anthropiques | | | |
| Combustibles fossiles | 22 | 1.2 | 0.1 |
| Combustible de biomasse | 7 | 0.5 | 5.7 |
| Sols cultivé (fertilisation) | 4 | 6.3 | 9 |
| Cultures (plantes) | | | 3.6 |
| Elevage | | | 21.6 |
| Total sources anthropiques | 33 | 8 | 40 |
| Total naturelles + anthropiques | 47 | 14.5 | 50.7 |

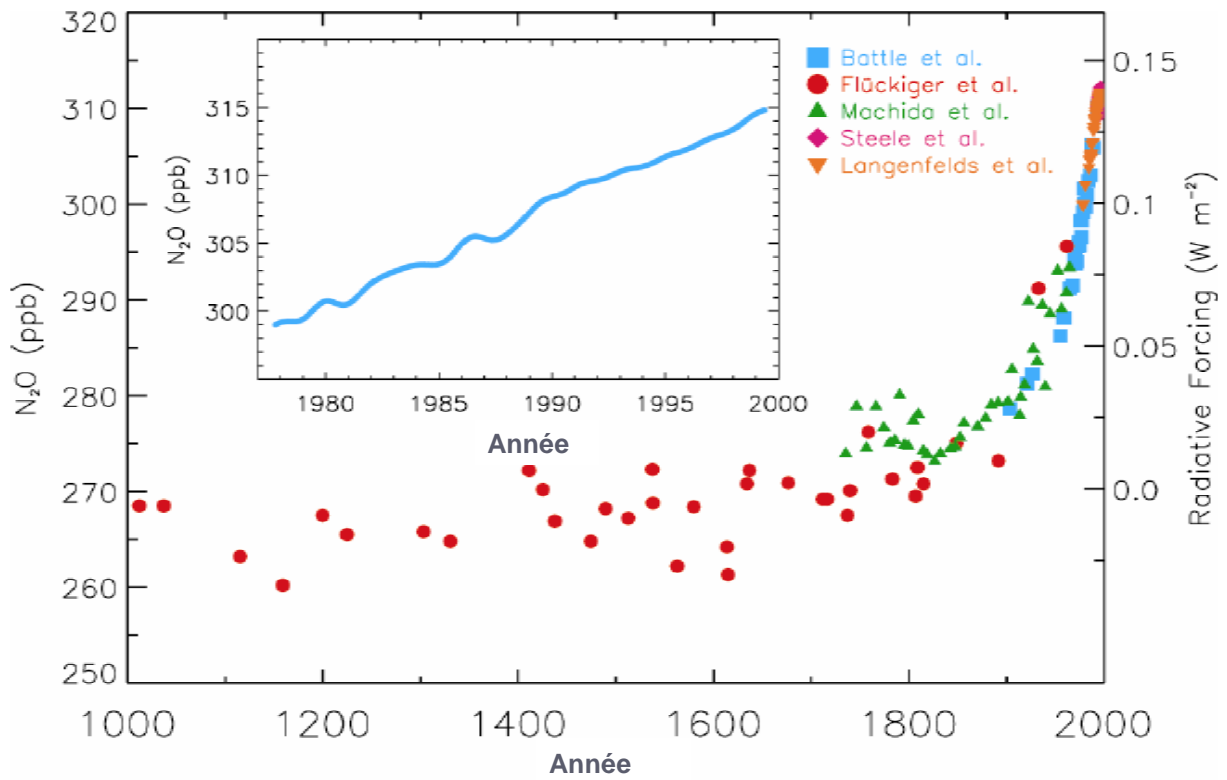


Figure 65 : Évolution de l'azote nitreux à effet de serre dans l'atmosphère au cours du dernier millénaire en particulier de 1977 à 2000

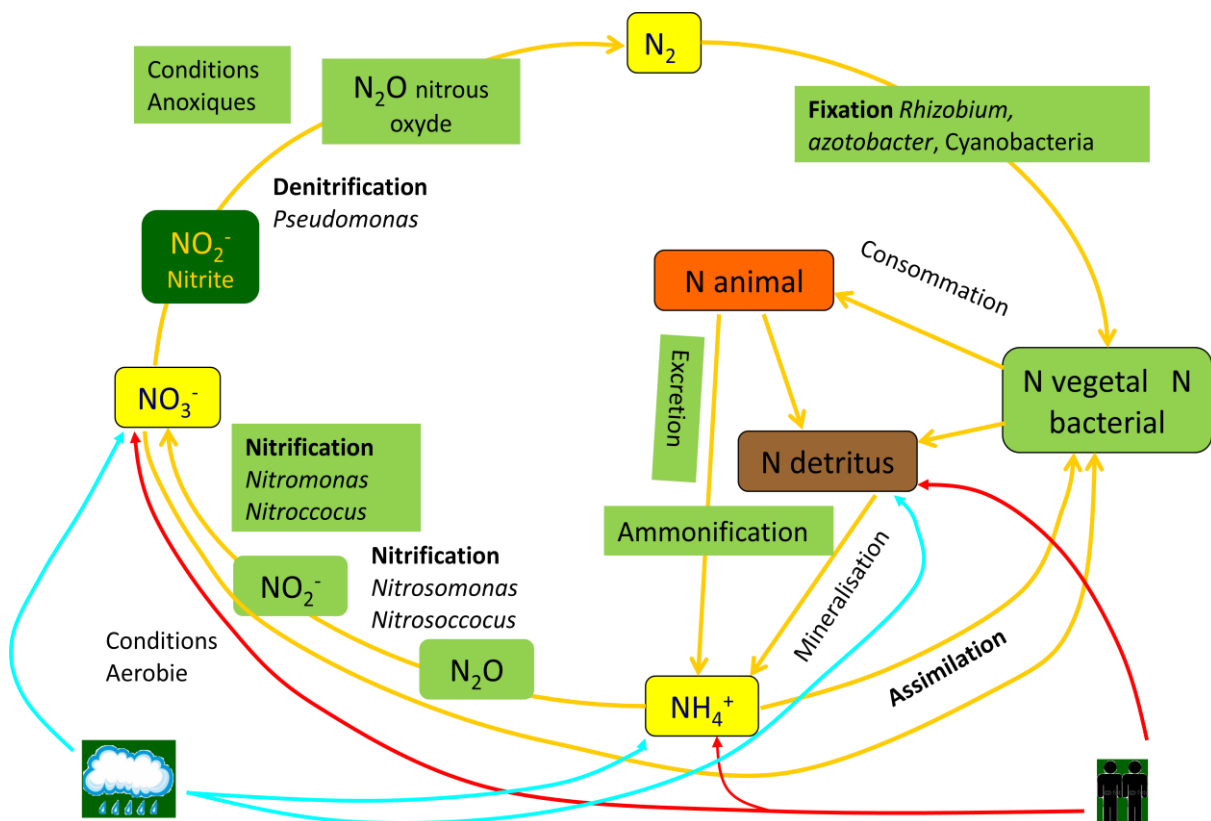
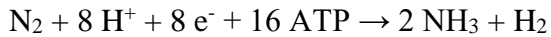


Figure 66 : Origine de l'azote dans l'environnement

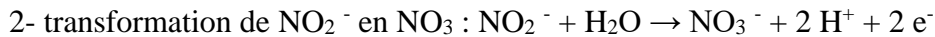
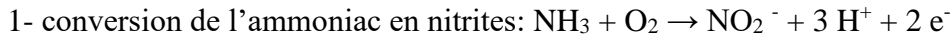
5.3. Expressions sur les termes du cycle de l'azote

- NH_3 , NO_x , N_2O sont libérés dans l'atmosphère
- NO_x est une forme des **précipitations acides** (HNO_3) alors que l'oxyde nitreux N_2O est un **gaz à effet de serre**
- NO_3^- est mobile dans l'eau à l'inverse de NH_4^+
- L'homme a presque doublé la quantité d'azote de la biosphère

- **La fixation d'azote:** réduit l'azote atmosphérique en ammoniac.

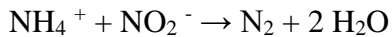


- **La nitrification:** Elle procède en deux étapes.



- **La dénitrification:** produit de l'azote à partir d'ammoniac et procède par plusieurs étapes intermédiaires. $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$

- **La fixation anaérobique d'ammonium:** Dans les milieux aquatiques, certaines bactéries produisent de l'azote moléculaire à partir d'ammoniac et de nitrites.



Dans l'océan ce processus représente la moitié de l'azote émis vers l'atmosphère.

Cette réaction est aussi utilisée dans le traitement des eaux usées.

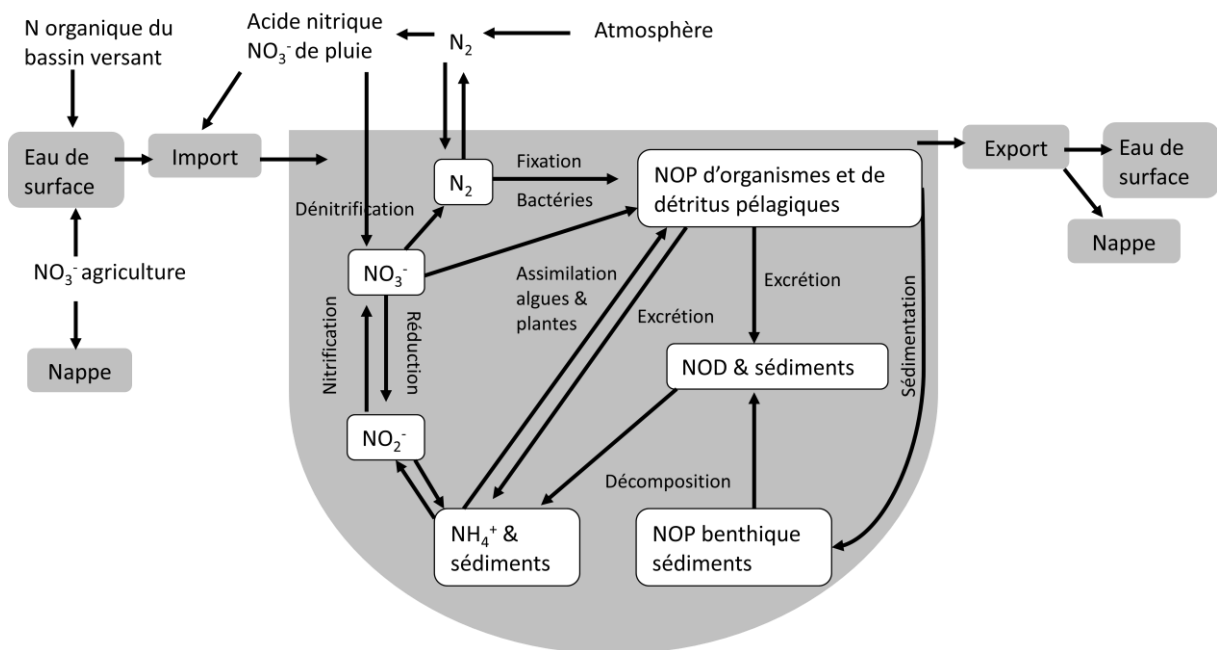
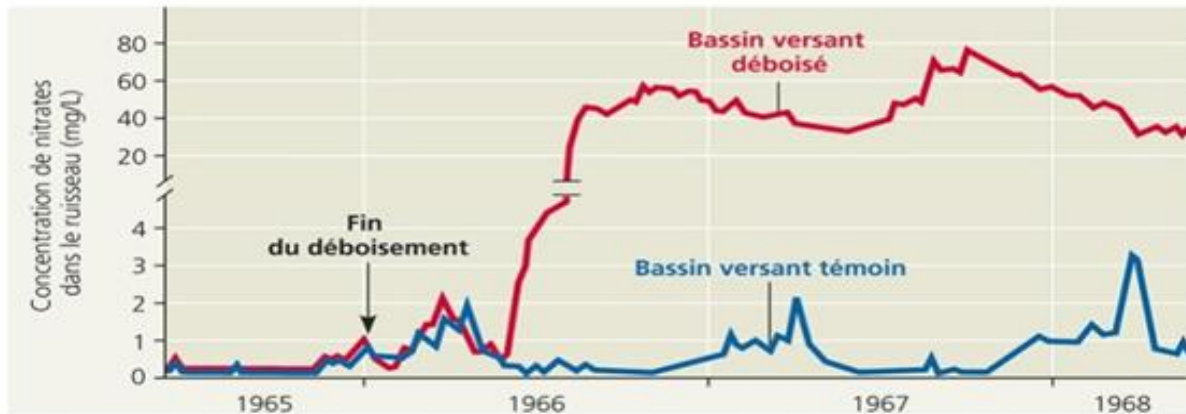


Figure 67 : Cycle aquatique de l'azote



(a) Les chercheurs ont fait construire des barrages et des déversoirs de béton en travers des ruisseaux qui drainaient les bassins versants de Hubbard Brook. Ils purent ainsi mesurer les sorties d'eau et de nutriments minéraux de l'écosystème.

(b) Les chercheurs ont déboisé complètement un bassin versant pour étudier les effets de la coupe à blanc sur le drainage et les cycles des nutriments. Ils laissèrent la matière végétale originale se décomposer sur place.



(c) Les eaux de ruissellement provenant du bassin versant déboisé contenaient 60 fois plus de nitrates que les eaux de ruissellement provenant d'un bassin versant témoin (non déboisé).

Figure 68 : Perturbations anthropiques du cycle de N

5.4. Sources de l'azote

► Sources ponctuelles

- Eaux usées urbaines
- Déjections humaines
- Lexiviat des dépotoirs
- Effluent d'usines
- L'incendie de combustibles fossiles

► Sources diffuses

- Surutilisation et lessivage des engrais
- Déjections animales (élevages)
- Déforestation (pâturages, agriculture)
- Érosion des sols

5.5. Effets d'une surcharge d'azote

- ▶ **L'azote supplémentaire dans le sol** augmente l'acidité du sol qui nuit aux racines des arbres, empêche la croissance et cause le changement de couleur des feuilles (jaune).
- ▶ **L'azote supplémentaire dans l'air** cause les précipitations acides qui peut nuire aux feuilles, aux plantes ainsi qu'acidifier les lacs et tuer leur faune.
- ▶ **L'azote supplémentaire dans l'eau:** plus il y a d'azote, plus les algues grandissent rapidement par conséquent, ils meurent vite et arrêtent de produire De l'oxygène. la décomposition provoquent un déclin dans les niveaux d'oxygène. moins d'oxygène dans l'eau tue les poissons et d'autres animaux qui exigent de hauts niveaux d'oxygène.

5.6. Conclusion

- L'azote est un gaz (N₂: inorganique non disponible) qui occupe les **trois quarts** $\frac{3}{4}$ de notre atmosphère (Réservoir principal: **atmosphère**).
- N est biologiquement très utile: protéines, ADN, ARN
- Un nutriment **limitant** qui stimule la productivité d'un milieu lors de son ajout. Absorbé par les plantes sous forme de **NO₃⁻ et NH₄⁺**
- L'azote est souvent limitant pour les plantes supérieures ou les algues macro et microscopiques (en eau douce et en eau salée).
- Comme le **nitrate** et **l'ammonium** sont des molécules chargées, une couche d'hydratation se forme autour d'elles. Ce sont des molécules hydrosolubles.
- Cette particularité permet le lessivage de ces molécules vers les cours d'eau.
- Le cycle de l'azote est très complexe;
- Une part **minime** de l'azote atmosphérique arrive au sol, à la suite de dépositions atmosphériques sèches ou humides
- Une part bien **plus importante** est fixée par les bactéries fixatrices d'azote qui vivent dans l'eau ou dans le sol soit librement, soit en symbiose avec certaines plantes (légumineuses par exemple)

6. Cycle du phosphore (P)

6.1. Introduction :

- ▶ Comme dans le cas de l'azote (N), le phosphore (P) est un élément nutritif indispensable à la fabrication de l'ARN et l'ADN. Il est d'une extrême importance pour la nutrition des plantes et la production de biomasse. On le retrouve aussi dans le squelette des organismes sous forme de PO_4 .
- ▶ Dans la Terre primitive, tout le P se trouvait dans les roches ignées. C'est par l'altération superficielle de ces dernières sur les continents que le P a été progressivement transféré vers les océans.
- ▶ Le cycle du P est unique parmi les cycles biogéochimiques majeurs: il ne possède pas de composante gazeuse, et par conséquent n'affecte pratiquement pas l'atmosphère. Ce cycle est appelé cycle sédimentaire car il s'effectue principalement entre les océans et les continents.
- ▶ Il se distingue aussi des autres cycles par le fait que le transfert de P d'un réservoir à un autre n'est pas contrôlé par des réactions **microbiennes**, comme c'est le cas par exemple pour l'azote.

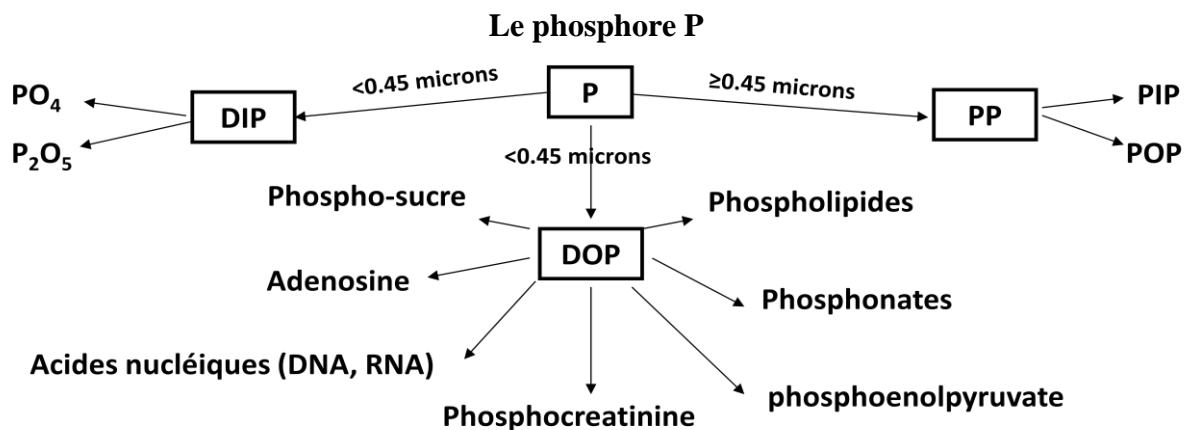


Figure 69: Composition du phosphore (P)

- Le phosphore n'est pas un élément abondant de l'écosphère. Il a tendance à se précipiter en présence de métaux bivalents (Ca^{2+} , Mg^{2+} et Fe^{3+}).
- Le phosphore doit être altéré pour devenir biologiquement disponible
- Le phosphore a peu de composant atmosphérique, sauf la poussière
- Le phosphore est facilement absorbé ainsi n'est pas très mobile
- Les humains ont augmenté le phosphore P disponible par 3 fois
- Seul le phosphore inorganique (principalement PO_4^{3-}) est directement ou indirectement assimilable par les algues.
- Le phosphore est un élément essentiel à tous les systèmes vivant. Dans les systèmes biologiques, les formes abondantes du P sont les esters de phosphate, les acides nucléiques, l'ATP et les phospholipides membranaires

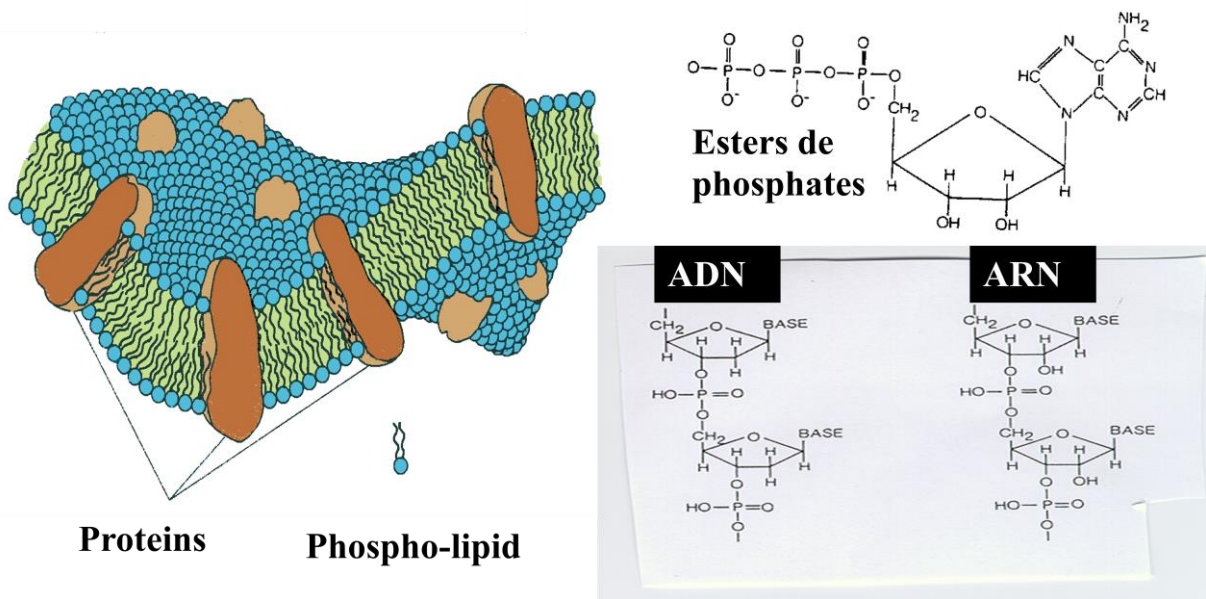


Figure 70: Exemples de molécules biologiques contenant du phosphore (P)

- ▶ **Origine:** Pratiquement tout P en milieu terrestre est dérivé de l'altération des phosphates de calcium des roches de surface, principalement de **l'apatite**. Bien que les sols contiennent un grand volume de P, une petite partie seulement est accessible aux organismes vivants.
- ▶ **Transfert milieu terrestre-milieu aquatique:** P est transformé dans les écosystèmes terrestres et aquatiques en P organique par le métabolisme des êtres vivants. Il est absorbé par les plantes et transféré aux animaux par leur alimentation. Une autre partie est transportée vers les océans où une fraction est utilisée par les organismes benthiques et du plancton pour secréter leur squelette.

6.2. Cycle biogéochimique (phosphore)

- Le phosphore est essentiel aux processus vitaux dans les plantes et animaux.
- Le phosphore fait partie d'une molécule qui transportent de l'énergie aux cellules.
- Le phosphore contribue au développement des racines, au renforcement de la tige, et la production de graines.
- Dans les animaux, le phosphore P et Ca sont importants pour les os forts.
- Tous les organismes vivants ont besoin du P pour construire ADN (instructions pour la fonction d'une cellule), la membrane cellulaire (couche extérieure d'une cellule) et le squelette/les dents (phosphate de calcium).
- Le phosphore n'est **PAS** emmagasiné dans l'atmosphère. Il est plutôt piégé dans les phosphates (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-) trouvées dans les roches et sédiments des fonds marins.

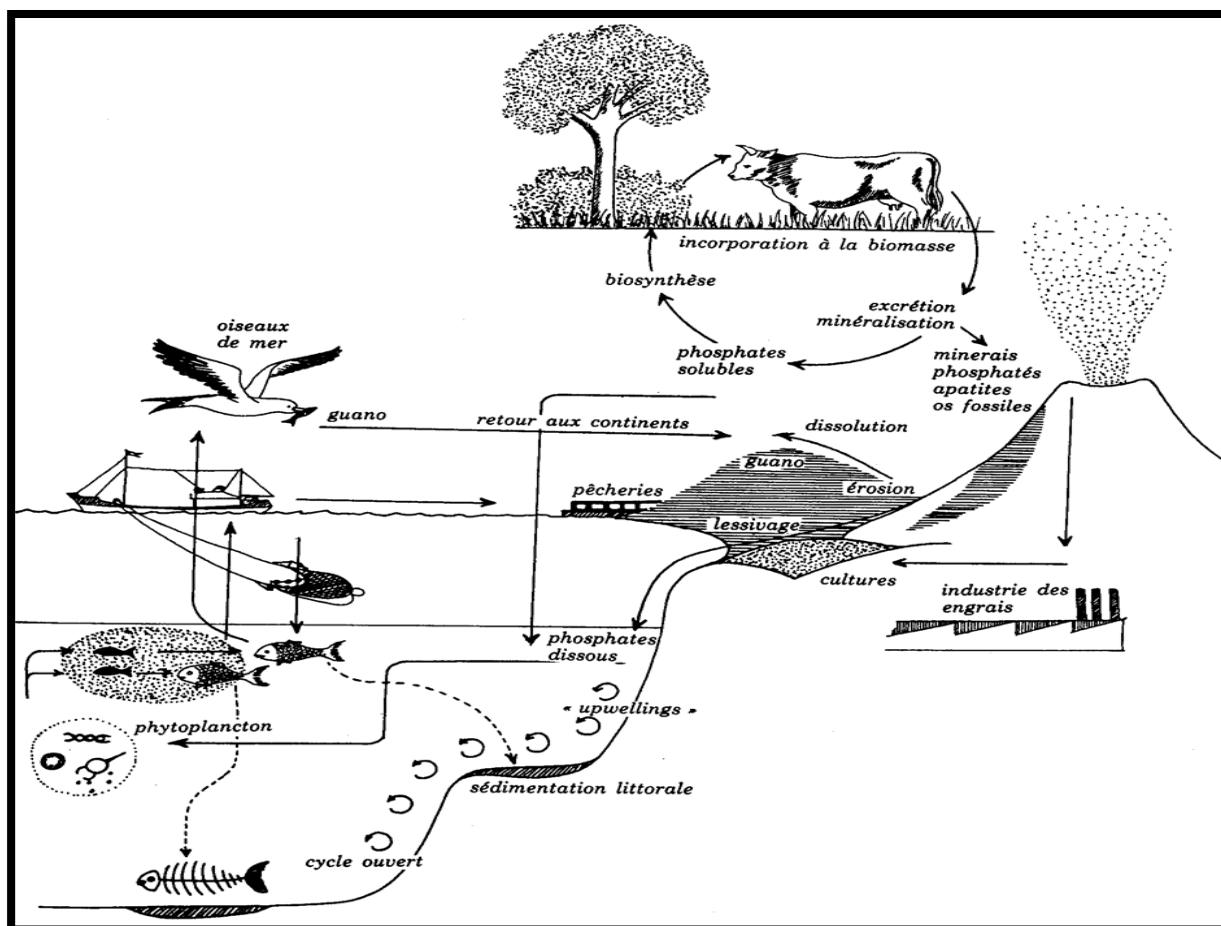


Figure 71 : Cycle biogéochimique du phosphore

- Le cycle microbien du P n'altère pas l'état d'oxydation du phosphore
- La plupart sont considérés comme des transferts de phosphate inorganique ou organique ou comme des transferts de phosphate de formes insolubles et immobilisées vers des composés solubles ou mobiles
- Le produit final de la réduction du P serait la phosphine (PH_3)
- Les phosphates peuvent se combiner avec le calcium, les rendant insolubles et inaccessibles aux plantes et à de nombreux micro-organismes.

La productivité dans de nombreux habitats est limitée en phosphate

- Dans les milieux aquatiques, les concentrations de phosphate présentent des fluctuations saisonnières associées à la prolifération d'algues et de cyanobactéries.
- Le phosphore existe sous forme soluble ou particulaire
- La précipitation du phosphore limite grandement la productivité primaire
- Les concentrations de phosphate dans l'eau douce sont étroitement corrélées avec l'eutrophisation
- Les lacs à phosphate limité sont normalement oligotrophes

6.3. La pollution par le phosphore :

- les phosphates rejetés dans l'environnement proviennent, à parts égales, de sources agricoles et industrielles, de déjections humaines et de détergents ou lessives phosphatées
- La pollution ponctuelle par les phosphates est estimée à **1,2 à 3,5 g/hab/j** et provient des excréments humains, et le reste surtout des détergents.
- En matière de pollution diffuse, on estime que **0,5 à 2,5%** du P des engrais utilisés est entraîné par l'eau, lors du lessivage des sols cultivés par les eaux de pluie et de drainage.
- Les phosphates sont les principaux responsables des phénomènes d'**eutrophisation** et de dystrophisation. En effet, non toxiques en eux-mêmes pour la vie animale et végétale, ils portent atteinte à l'environnement dès lors qu'ils sont en fortes concentrations: ils deviennent alors de véritables engrais pour les milieux aquatiques qu'ils contribuent à enrichir exagérément en matière **organique**.

a. Perturbations anthropiques du cycle du P

► Sources ponctuelles

- Eaux usées urbaines
 - Savons
 - Déjections humaines
- Lexiviat des dépotoirs
- Effluent d'usines

► Sources diffuses

- Surutilisation et lessivage des engrais
- Déjections animales (élevages)
- Déforestation
- Erosion des sols



Figure 72 : Eutrophisation des milieux aquatiques par le phosphore agricole

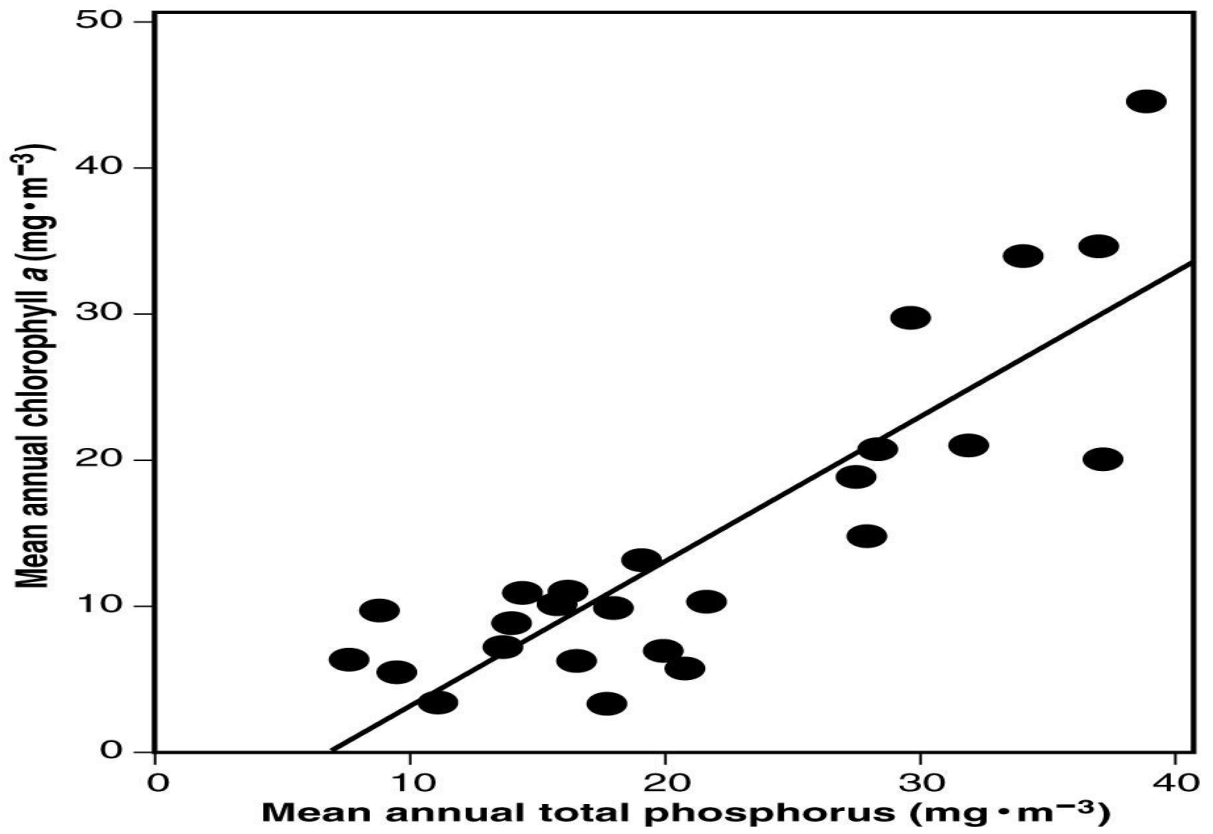


Figure 73 : Le phosphate: un nutriment limitant

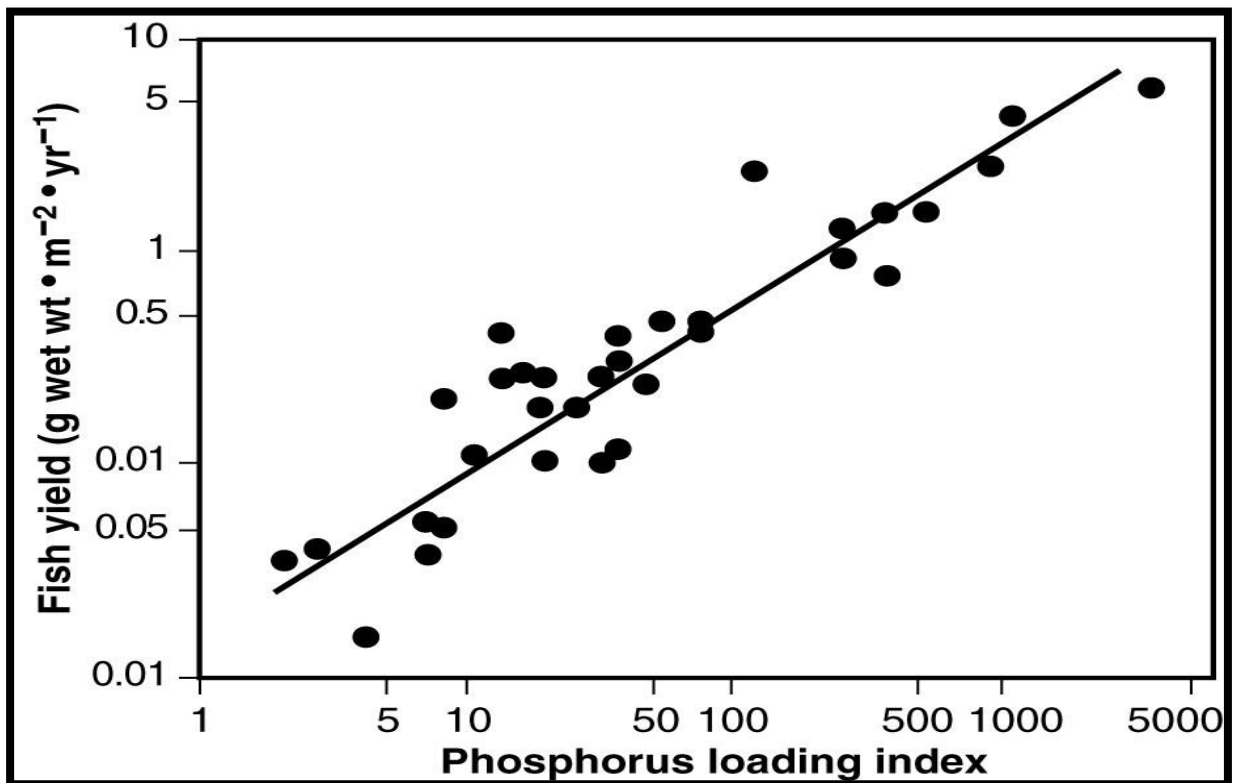


Figure 74 : Bénéfice de l'eutrophisation en culture

b. Démonstration de l'effet limitatif du phosphore

- ▶ Schindler sépare en deux un lac formé de deux bassins à la morphométrie similaire.
- ▶ D'un côté, il ajoute N et C. De l'autre côté, il ajoute N, C et P: les résultats sont spectaculaires



Figure 75 : l'effet limitatif du phosphore

6.4. Solutions aux problèmes d'azote et de phosphore

- ▶ Préservation de bandes riveraines significatives au bord des cours d'eau
 - Augmentent l'absorption des nutriments
 - Diminuent l'érosion des sols
- ▶ Consommation de produits qui réduisent l'apport en nutriments
 - Fruits et légumes biologiques: le compost est moins soluble que les engrais chimiques et libère ses nutriments plus lentement
 - Savons sans phosphate
 - Manger moins de viande: diminution de la demande de déforestation et de la production de déjections animales
- ▶ Composter
 - Diminution de la production de lixiviats riches en nutriment dans les dépotoirs
- ▶ Traitement des eaux usées de façon à réduire leur teneur en nutriments (ex.: utilisation de marais artificiels)

6.5. Conclusion :

- Élément essentiel à la vie, sous forme de phosphate; fabrication de: ATP, ADN, ARN, squelette
- Origine anthropique: agriculture, industrie, urbanisation
- Origine naturelle: P provient de l'altération superficielle dans les roches ignées (apatite), transportées progressivement vers les océans.
- Le cycle du P est unique, car il n'y a pas de composante gazeuse et par conséquent n'affecte pratiquement pas l'atmosphère.
- P est absorbé par les plantes et transféré aux animaux par l'alimentation.
- Une partie retourne au sol à partir des excréments des animaux et de la matière organique morte. Une autre partie est transportée vers les océans.

7. Cycle du Silicium (Si)

7.1. Introduction

- ▶ Le silicium est l'élément le plus abondant de l'écorce terrestre (après l'oxygène) formant **28,8%**.
- ▶ Il est présent dans plus de **370** minéraux composant les diverses roches. Les sols ont une énorme portée de teneur en Si (<1% en poids de Si dans Histosols, jusqu'à 45% en poids de Si dans des Podsoles. Quelques horizons sont presque entièrement constitués par Si ($\text{SiO}_2 > 95\%$ en poids).
- ▶ Le silicium ne se trouve pas à l'état natif, mais sous forme de silice et de silicates. Le silicium naturel correspond en réalité à un mélange de trois isotopes stables ^{28}Si (92,27 %), ^{29}Si (4,68 %) et ^{30}Si (3,05 %).
- ▶ Environ **40%** des minéraux courants contiennent du silicium: les variétés de quartz (l'onyx, le silex..) sont des cristaux de silice naturels, le dioxyde de silicium est le principal constituant du sable. Les silicates sont les principaux constituants des argiles, des sols et des roches
- ▶ Du point de vue écologique, au premier échelon de la chaîne alimentaire, le développement du phytoplancton est conditionné par la présence des sels nutritifs minéraux dissous tels que P, N et Si.
- ▶ La silice dissoute dans les eaux est pour **95%** sous forme d'acide silicique (ou silicate) $\text{Si}(\text{OH})_4$; elle est nécessaire aux algues siliceuses comme les silicoflagellés, les radiolaires et les diatomées.

7.2. Le Silicium dissous

- ▶ Si dans l'eau est présent sous différentes formes chimiques (acide orthosilicique $\text{Si}(\text{OH})_4$) éventuellement disponibles pour les diatomées, qui sont des microalgues unicellulaires ayant la particularité d'être entourées d'une paroi siliceuse appelée frustule.
- ▶ Les diatomées sont la principale source de silice biogénique à l'échelle de la planète, le métabolisme du silicium constitue chez ces microalgues un métabolisme majeur au même titre que celui du C ou de N. En effet, le Si est indispensable à leur croissance et à la division cellulaire. Il est donc d'intérêt majeur pour les biogéochimistes.

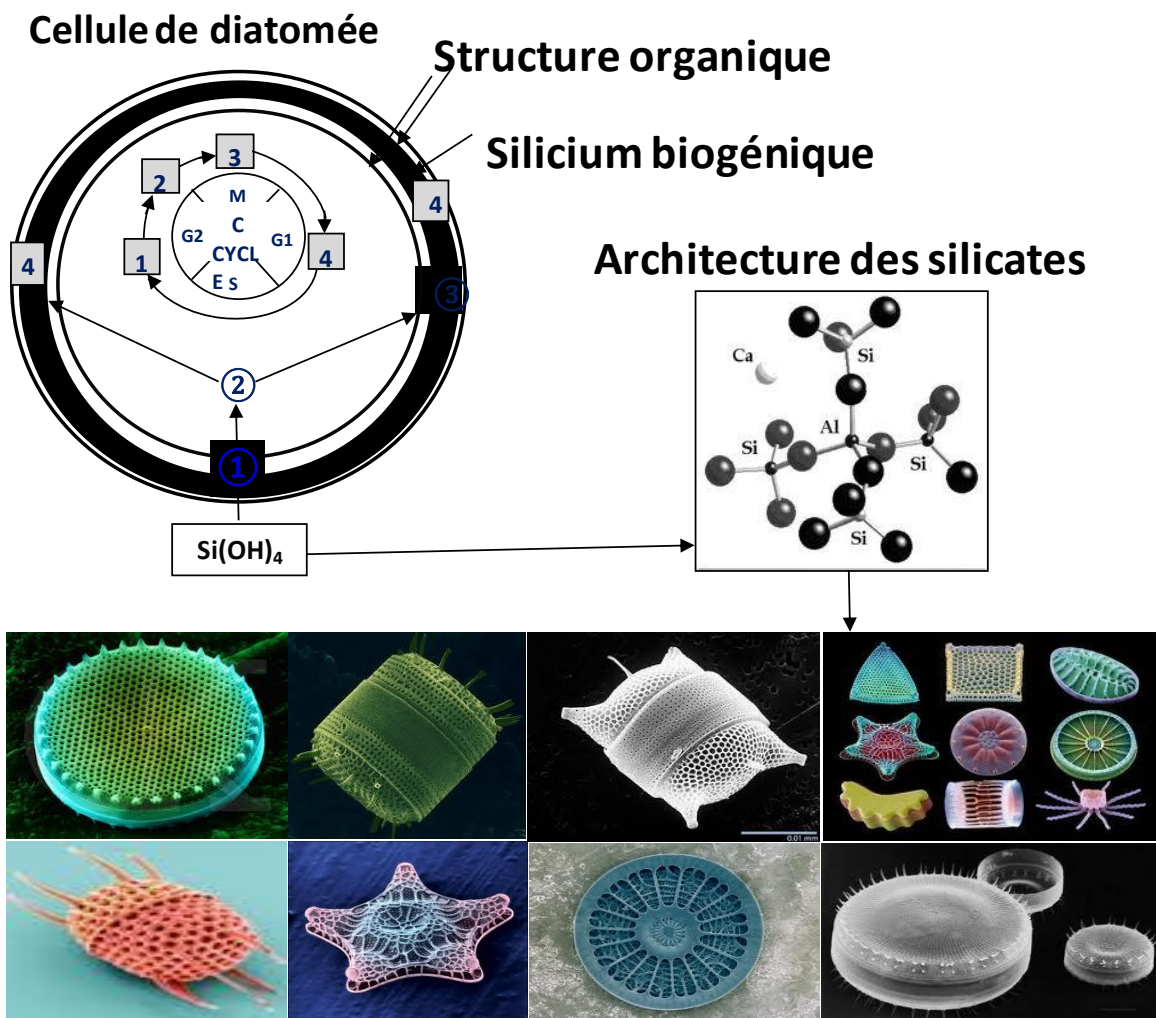


Figure 76 : Absorption du Si par les diatomées

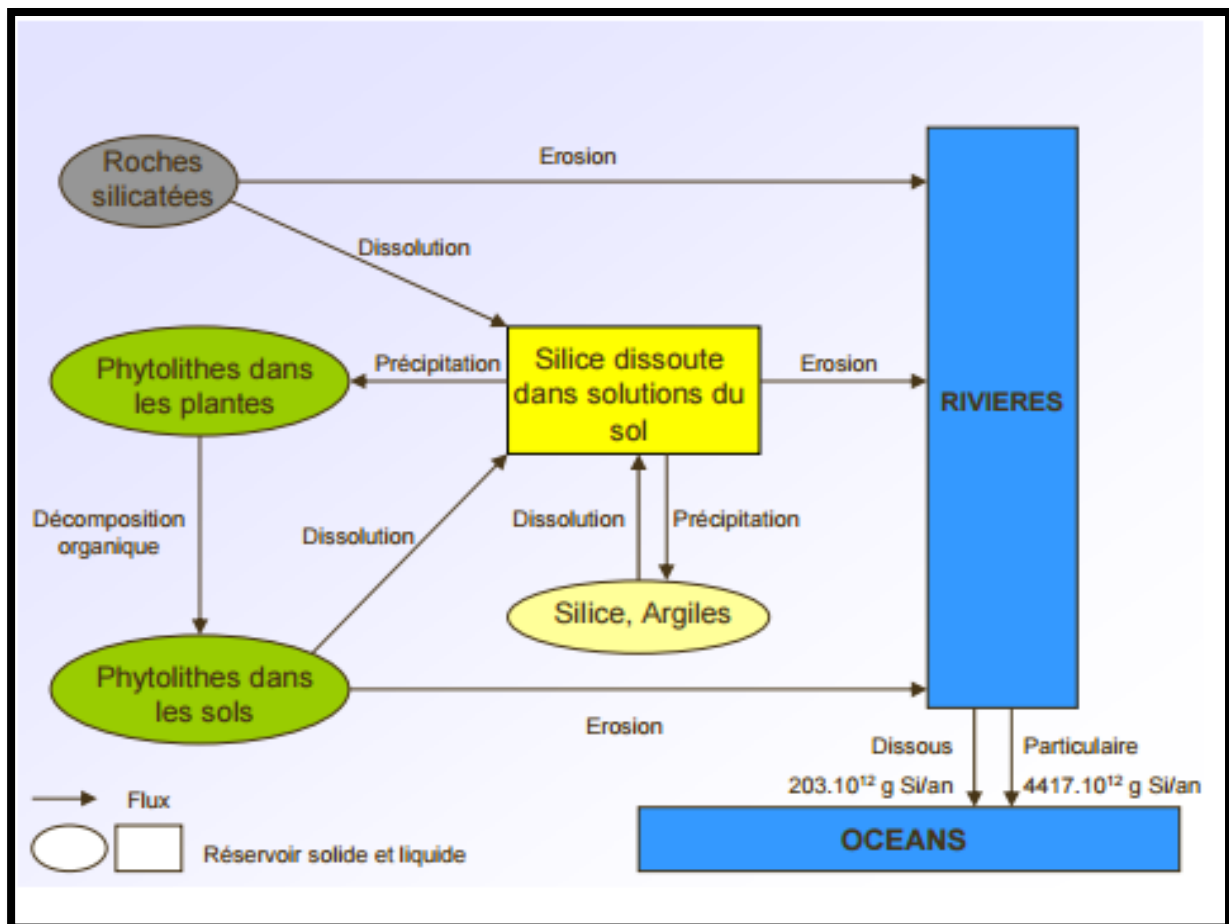
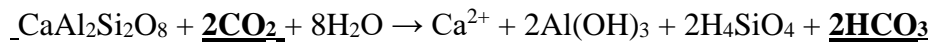


Figure 77 : Cycle biogéochimique du silicium

7.3. Cycle biogéochimique du silicium

- Le cycle global du Si joue un rôle important dans de nombreux processus biogéochimiques tels que la régulation du CO₂ atmosphérique via la nutrition des organismes aquatiques. Le cycle du silicium se divise en un cycle continental et un cycle marin.
- Le cycle biogéochimique du Si dans les écosystèmes terrestres est moins étudié que dans les écosystèmes aquatiques probablement parce qu'il était supposé moins soumis à des perturbations directes d'origine anthropique et ne constitue pas un facteur limitant eu égard à son abondance dans les eaux douces.
- Cet élément retient de nouveau l'attention des Biogéochimistes. Plusieurs études montrent que l'altération superficielle des silicates exerce un contrôle important sur la teneur en CO₂ de l'atmosphère consommé par les algues Planctoniques.
- Le silicium joue un rôle primordial dans le cycle global de la matière en particulier dans le cycle du carbone. Il contribue doublement à l'élimination du carbone atmosphérique par :

(1) Lessivage selon la réaction :



Où le carbone est transféré et stocké dans les biogéosystèmes marins

(2) élimination biologique:

Les diatomées absorbent le CO₂ atmosphérique dissous dans l'eau et les nutriments (N, P et Si) pour fabriquer leurs propres matières organiques et leur enveloppes formées essentiellement de Si selon la réaction :



D'où les Rapports ou coefficients de Redfield: **C/N/Si/P =106/15/15/1**

Les variations des flux de Si des rivières à la mer sont dépendant de la lithologie, du taux d'érosion, du climat et de la production des diatomées.

Enfin, on a pu dire en effet que **“What Carbon is to biosphère, Slica is to lithosphère”**.

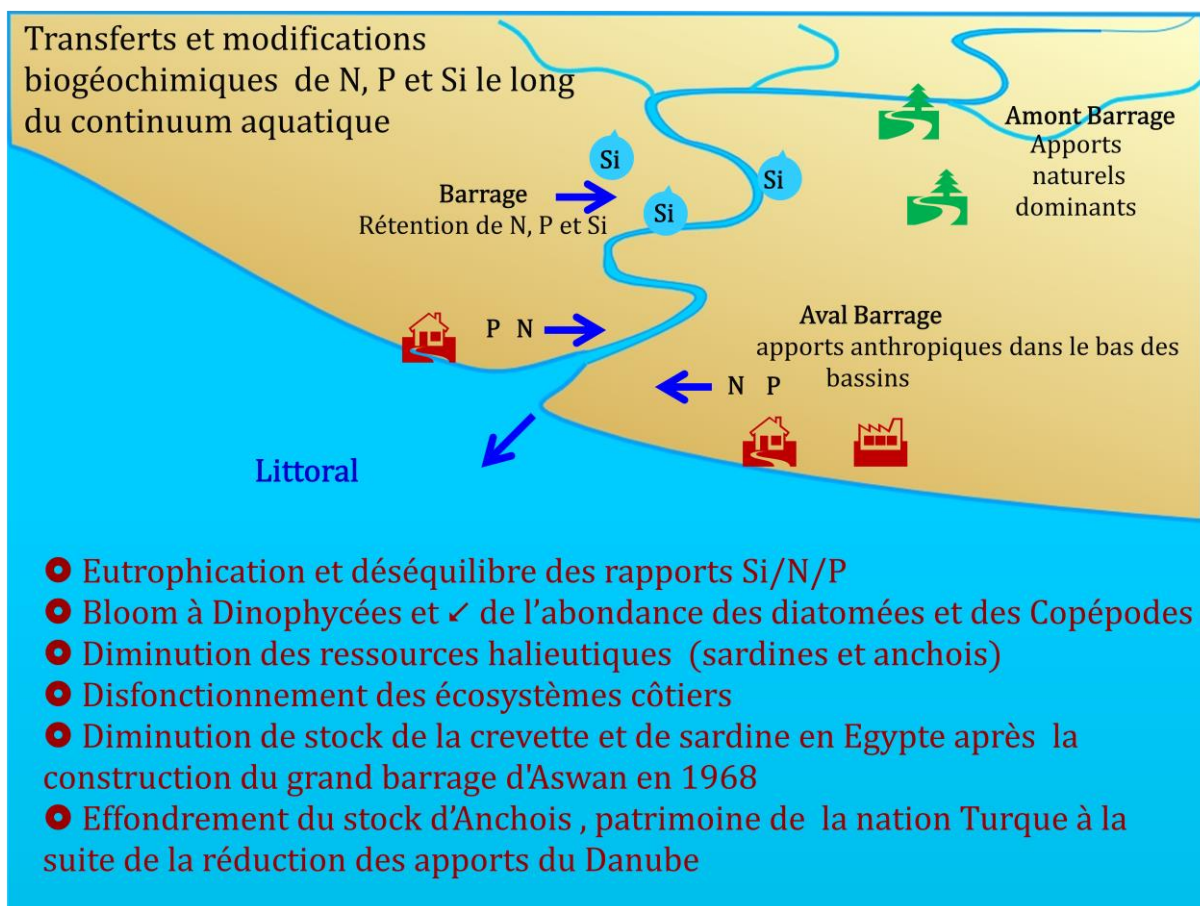


Figure 78 : Transfert et modifications biogéochimiques de N, P et Si le long du continuum aquatique

7.4. Conclusion

- Le Si est le 2^e élément abondant après l'O₂ dans la lithosphère, il représente 28%
- Il est présent dans plus de 370 minéraux et provient de l'altération des roches par les agents atmosphériques, ensuite transporté par les cours d'eaux
- Le silicium est un élément essentiel pour la croissance du phytoplancton siliceux (diatomées), des silicofalgellées, des radiolaires et des éponges.
- Les taxons de diatomées exigeants vis-à-vis du silicium, forment en effet plus de 60 % de la production primaire aquatique
- Le Si joue un rôle primordial dans le cycle global de la matière en particulier dans le cycle du carbone. Il contribue doublement à l'élimination du carbone atmosphérique par :
 - Lessivage
 - Elimination biologique

8. Cycle du Soufre (S)

8.1. Introduction

- ▶ Le soufre existe dans la biosphère sous plusieurs états d'oxydation, depuis le soufre hexavalent oxydé +6 (dans H₂SO₄ et ses dérivés) jusqu'au soufre réduit -2 (dans H₂S, HS⁻, S²⁻ et les sulfures métalliques).
- ▶ On estime que la croûte terrestre contient en moyenne 0.06% de soufre, mais sa distribution dans le sol est très variable, sa concentration varie de < 0,01%, dans des sols carencés à > 0,3% dans certains sols formés sur alluvions fluviomarines (mangroves).
- ▶ Il existe près de 2000 minéraux soufrés inorganiques. Le soufre est principalement présent dans les sols sous forme organique (acides aminés, polysaccharides soufrés, ester sulfates), une faible fraction seulement étant sous forme minérale (sulfate, soufre élémentaire ou sulfure).
- ▶ Dans les organismes vivants, le soufre est présent sous forme réduite dans des composés organiques essentiels tels que les protéines, des coenzymes ou dans d'autres métabolites. Il se trouve également sous forme oxydée (ester sulfates) dans des composés ayant un rôle structural tels que les polysaccharides sulfatés des parois cellulaires des algues.
- ▶ L'ensemble des processus métaboliques par lesquels ces différentes formes peuvent être inter-converties constitue le cycle biologique du soufre

8.2. Le cycle du soufre : Le cycle du soufre est le cycle biogéochimique des différentes formes du soufre. Le soufre est un élément essentiel à la vie qui, comme le carbone, le phosphore, l'oxygène, l'azote ou encore l'eau, possède son propre cycle de vie. En effet, le soufre est présent partout sur Terre, atmosphère, océans, continents, mais aussi chez tous les êtres vivants sous forme de molécules organiques: les acides aminés soufrés constituant de protéines (méthionine et cystéine)

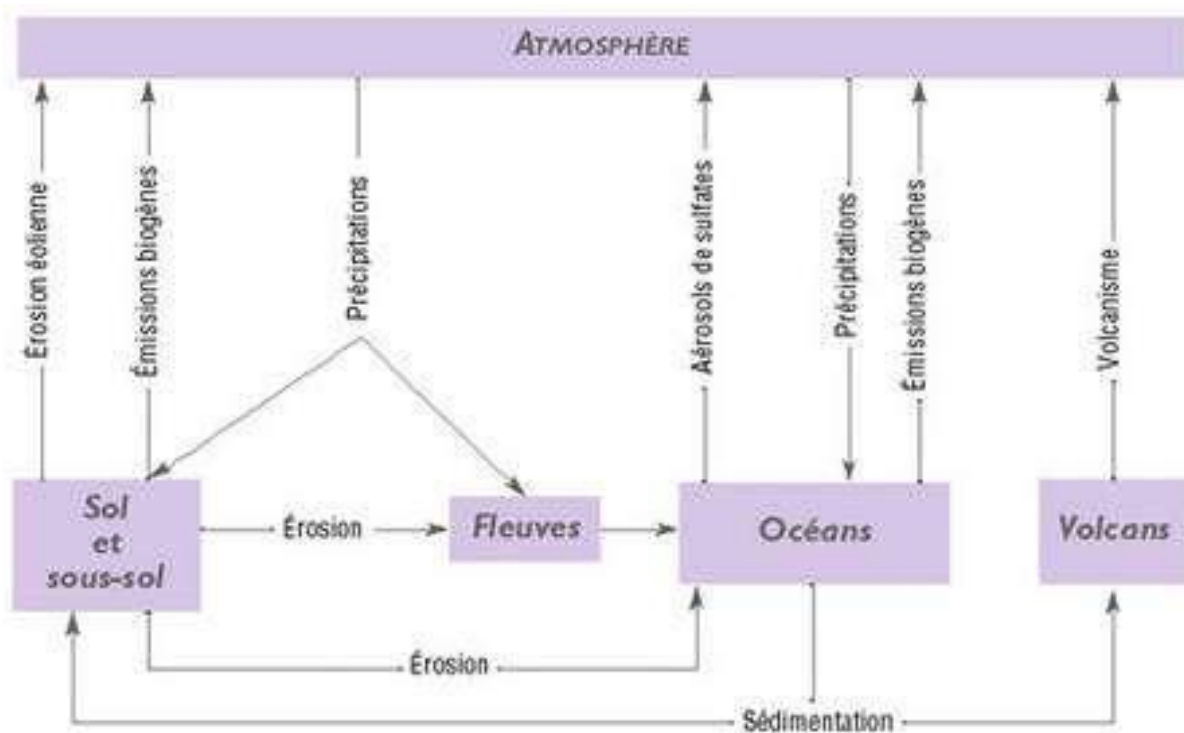


Figure 79: Cycle biogéochimique du soufre et processus généraux du cycle du soufre

- **Dans l'atmosphère**, on rencontre le soufre sous forme de gaz: dioxyde de soufre (SO_2), hydrogène sulfuré (H_2S); de soufre réduit comme dans le diméthylsulfure (DMS) dont la formule est CH_3SCH_3 et le carbonyle de soufre (COS); ainsi que dans les sulfates volatils (SO_4^{2-}). Le SO_2 et l' H_2S proviennent de la minéralisation de la matière organique selon le pH du milieu ou du métabolisme de certaines bactéries (ex: *Désulfovibrio* spp.). Les volcans participent au cycle en produisant d'énormes quantités de sulfates (SO_4) qui viennent s'ajouter aux sulfates issus du COS . La teneur en soufre atmosphérique peut influencer le climat planétaire par le biais des volcans car certains composés soufrés sont à la base des gouttes de pluies (formation des nuages) et peuvent également refléter une partie du rayonnement solaire. De plus, lorsque l'oxyde de soufre s'associe à l'humidité de l'air, se produit une libération d'acide sulfurique et d'acide nitrique qui retombent ensuite lors des précipitations: ce sont **les pluies acides**

- **Dans le sol**, le soufre se rencontre à l'état minéral, en grande quantité, dans les schistes bitumineux, charbon et hydrocarbures, ainsi que sous forme de sulfites et sulfates, indispensables à la croissance des végétaux. Les minéraux tels que la pyrite (FeS_2) sont également riches en soufre, ils se sont formés lors de phases sédimentaires et pourront être réintroduits dans le cycle par l'érosion et le volcanisme

- **Dans l'océan**, le soufre se rencontre en majorité sous forme de sulfates dissous SO_4^{2-} , qui seront assimilés par des organismes, et entreront dans la composition de molécules organiques, ou sédimenteront sur les fonds. Le COS est produit en partie par l'érosion continentale, et s'échappe dans l'atmosphère par la surface des océans

8.3. Les principales étapes du cycle du soufre sont :

- la minéralisation du soufre organique en une forme inorganique: le sulfure d'hydrogène (H_2S).
- l'oxydation du sulfure, du soufre élémentaire (S) et de ses composés connexes en sulfates (SO_4^{2-}).
- la réduction des sulfates (SO_4^{2-}) en sulfures.
- l'immobilisation microbienne des composés soufrés et leur incorporation dans une forme organique du soufre.

Le cycle du soufre est pour de nombreux aspects comparables à celui de l'azote, excepté les entrées venant de la lithosphère par l'activité volcanique, et l'absence d'un processus biologique de fixation du soufre de l'atmosphère dans les terres et les eaux. La principale perturbation humaine du cycle global du soufre est la libération de SO_x (SO_2 plus une petite quantité de SO_3) résultant de la combustion d'huiles et de charbon et la fonte de minerais de sulphite. Les gaz SO_x endommagent la respiration humaine à fortes concentrations, mais ils sont faiblement toxiques pour les plantes. D'autres gaz soufrés comme H_2S et les mercaptans sont faiblement toxiques, mais ils sont fortement désagréables pour l'olfaction humaine, même à faibles concentrations. En conséquence, les gaz contenant du soufre sont émis par de très hautes cheminées, pour être largement dilués une fois arrivés au niveau du sol. Ceci a largement contribué à créer le problème des dépôts acides au cours du XXe siècle.

Les dommages aux écosystèmes ne proviennent pas tant des effets de l'acide, SO_x ou SO_4^{2-} , sur les plantes (le sulfure à faible dose est même un fertilisant), mais par l'effet indirect résultant de l'extraction de Ca^{++} , Mg^{++} et K^+ du sol qui mettent Al^{3+} et H^+ en solution. Al^{3+} limite l'extraction des nutriments par les racines de toutes les plantes sauf un petit nombre d'espèces spécialisées. Il est aussi très nocif pour les organismes et les écosystèmes aquatiques. Les remédiassions de l'acidification des sols, des rivières et des lacs est très difficile.

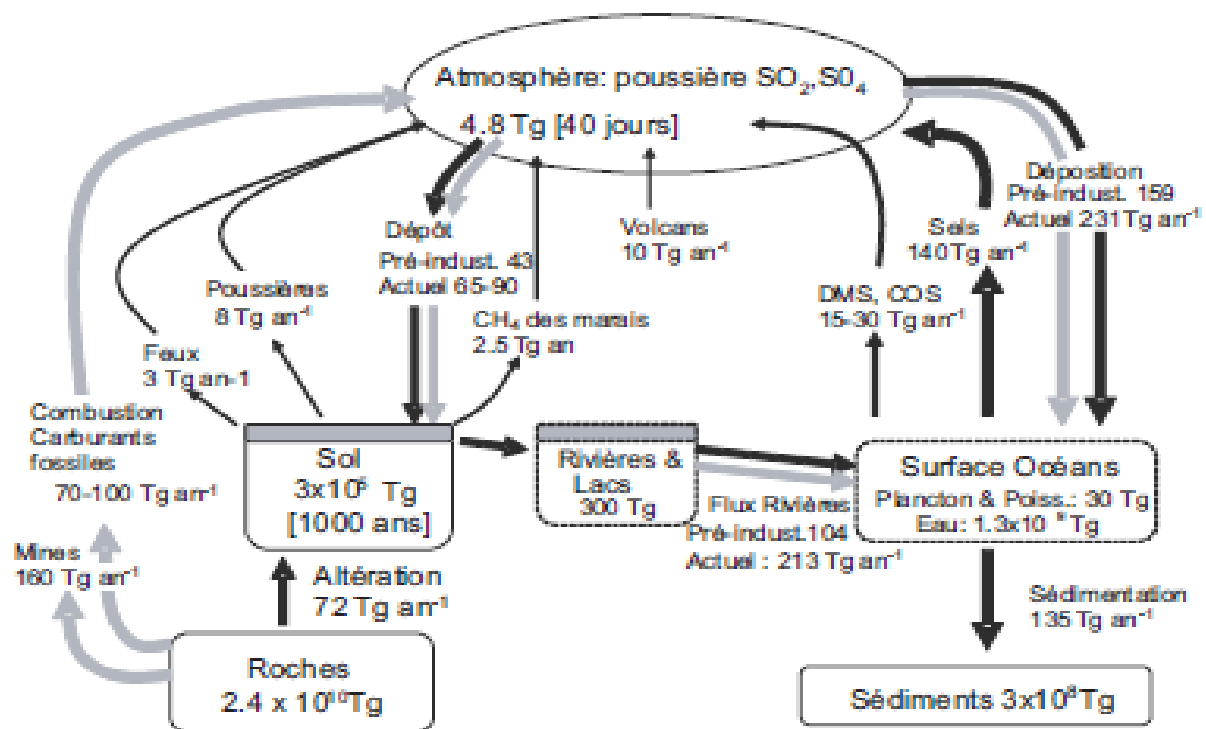


Figure 80 : Principaux compartiments et flux du cycle global du soufre.

Les compartiments sont en Tg S, les flux en Tg S par an et les temps de renouvellement (entre crochets) en années. Les flèches solides représentent le cycle préindustriel, les pointillées, les additions humaines vers l'an 2000. L'émission accidentelle de S à partir des carburants fossiles et des fonderies de minerais sont les principales causes de dépôts de soufre. Il s'accumule dans les sols qu'il acidifie, ainsi que les eaux faiblement tamponnées qui s'en écoulent.

8.4. Conclusion

- Le soufre existe dans la biosphère sous plusieurs états d'oxydation (oxydé et réduit)
- Il existe près de 2000 minéraux soufrés inorganiques
- Le soufre est principalement présent dans les sols sous forme organique
- Le cycle du soufre est comparable à celui de l'azote, excepté les entrées venant de la lithosphère par l'activité volcanique et l'absence d'un processus biologique de fixation du soufre de l'atmosphère dans les terres et les eaux
- Le sulfate se dissout dans la pluie, formant de l'acide sulfurique dilué qui se dépose à la surface de la terre sous des formes sèches et humides (pluie acide),

‘Not only is the science incomplete, but the [eco]system itself is a moving target, evolving because of the impact of management and the progressive expansion of the scale of human influences on the planet’
Holling C.S. (1995)

Principales références

- Aminot, A., Chaussepied, M. 1983. Manuel des analyses chimiques en milieu marin (No. 551.464 AMI).
- Aminot, A., Kérouel, R. 2007. Dosage automatique des nutriments dans les eaux marines: méthodes en flux continu. Editions Quae.
- Benblidia, M. 2011, L’efficacité d’utilisation de l’eau et approche économique, Etude nationale, Algérie, Version finale Plan Bleu, Centre d’Activités Régionales PNUE/PAM.
- Frontier, S. Pichod-Viale, D. 1992. *Écosystèmes : structure, fonctionnement, évolution*. In: *Annales de Géographie*, t. 101, n°565.
- Lelong, F., Roose, E. 1986. Cycles biogéochimiques comparés de quelques éléments chimiques (Ca, Mg, K, Na, Si, Cl, S) dans divers écosystèmes à végétation naturelle d’Afrique occidentale. In: *Sciences Géologiques. Bulletin*, tome 39, n°2, Cycles hydrogéochimiques de bassins versants. pp. 173-193.
DOI : <https://doi.org/10.3406/sgeol.1986.1724>
- Likens, G. E., Bormann, F. H., Pierce, R. S., Eaton, J. S., Johnson, N. M., 1977. *Biochemistry of a forested ecosystem*. Springer Verlag, New York, 146p.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA), 2003. *Ecosystems and Human Well-Being. A Framework For Assessment*, Washington D.C., Island Press.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA), 2005. *Current state and trends assessment*, Washington D.C., [Island Press](#).
- Odum, E. P. 1959. *Fundamentals of Ecology*. 2nd ed. W. B. Saunders Co, Philadelphia, P. A., 546p.
- Pédro., G., 2007. Cycles biogéochimiques et écosystèmes continentaux. Académie des sciences. Rapport sur la science et la technologie No 27.
- Ramade, F., 1982. *Éléments d’écologie : Écologie appliquée*. Paris, Ed : Mc Graw-Hill.
- Veyssy, E. ,1998. Transferts de carbone organique, d’azote et de phosphore des bassins versants aux estuaires de la Gironde et de l’Adour (Sud-Ouest de la France) (Doctoral dissertation, Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Bordeaux I, France).
- Ziouch, O.R., 2014. Nutrient distribution in the Bay of Annaba under the influence of the Seybouse and the Mafragh estuaries inputs (South-Western Mediterranean). In: Doctoral Thesis: Coastal Environment. University of Badji Mokhtar (Annaba), Algeria. <http://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2014/09/ZIOUCHOmar-Ramzi.pdf>.
- Ziouch, O. R., Laskri, H., Chenaker, H., Ledjedel, N. E., Daifallah, T., Ounissi, M. 2020. Transport of nutrients from the Seybouse River to Annaba Bay (Algeria, SW Mediterranean). *Marine Pollution Bulletin*, 156, 111231. [doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111231](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111231)
- En plus de la webographie, c’est des documents de sites internet téléchargeables à partir de google. Composer des mots clés tels que: Nutrient cycling, Ecosystem energy flow, biogeochemistry, Millennium Ecosystem Assessment, etc.