

Productivité, transfert de matière et d'énergie

L'énergie solaire constitue la source essentielle de la matière sur Terre. Elle est estimée à 13×10^{23} calories. Presque toute l'énergie reçue par la biosphère est utilisée pour synthétiser la biomasse et une grande partie des énergies permettant le maintien des conditions de vie et assurant les activités animales et humaines, ont pour origine le rayonnement solaire.

I. Le rayonnement solaire

Situé à environ 150 millions de kilomètres de notre planète, le Soleil nous procure de l'énergie sans laquelle aucune vie sur Terre ne serait possible. Le soleil est constitué de gaz extrêmement chauds, les éléments qui le composent sont bien connus sur notre planète : hélium, hydrogène, calcium, sodium, magnésium, fer ... en proportions différentes.

Le rayonnement solaire recouvre une gamme assez large de longueurs d'onde, depuis les ondes radio (grande longueur d'onde) jusqu'aux rayons X (petite longueur d'onde). Il présente un maximum vers 410 nm. L'œil humain n'est cependant sensible qu'à une petite partie du spectre solaire : le rayonnement visible est compris entre 400 et 800 nm (du violet au rouge).

Quelques caractéristiques :

Diamètre : environ 1,4 millions de kilomètres,

- Distance : 150 millions de km de la terre,
- Masse : 300 000 fois la masse de la Terre,
- Age : 4,5 milliards d'années,
- Température de surface : 5780 Kelvin,
- Température interne : plusieurs millions Kelvin. Q

I.1. Les différentes radiations émises par le soleil

Les longueurs d'ondes les plus courtes (rayons gamma et X) sont les plus agressives, tellement énergétiques qu'elles peuvent " ioniser " les atomes de la matière qu'elle traverse.

Ces radiations, dites ionisantes ou radioactives, sont les mêmes que celles qui sont " normalement " confinées dans les centrales et les fûts de stockage nucléaires. Elles sont heureusement stoppées par l'atmosphère terrestre car sinon aucune vie ne serait possible sur Terre.

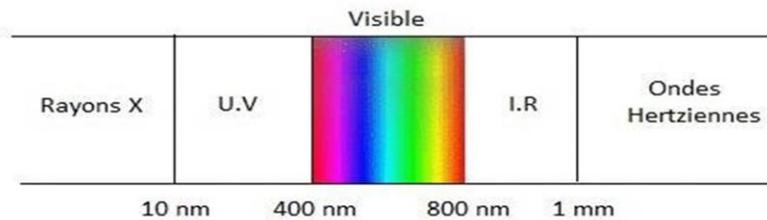


Figure 1 : Radiations émises par le soleil

Les autres radiations émises par le Soleil sont dites non ionisantes mais elles ne sont pas pour autant sans effet :

Les **Ultraviolets (UV)**, invisibles, non calorifiques sont classés en 3 catégories :

- Les **UVC** très dangereux mais totalement absorbés par la couche d'ozone.
- Les **UVB** partiellement arrêtés par la couche d'ozone, ils peuvent notamment provoquer des cancers de la peau et accélérer le vieillissement des tissus (peau, cristallin)...
- Les **UVA**, moins filtrés que les UVB, sont également cancérigènes...

La **lumière visible** constitue la majeure des rayons émis par le soleil. Elle permet aux hommes de distinguer les formes et les couleurs (du violet au rouge). Elle joue également un rôle prépondérant dans la photosynthèse des végétaux, ce phénomène complexe au cours duquel ils fabriquent des molécules organiques comme les sucres à partir d'eau et de gaz carbonique.

Les **Infrarouges (IR)**, invisibles, transportent la chaleur. C'est cette partie du rayonnement solaire avec le gaz carbonique de l'atmosphère qui est responsable de l'effet de serre, c'est à dire d'une sorte " d'emprisonnement partiel " de la chaleur qui permet d'avoir une

température moyenne de 17° environ sur Terre. Si la nuit, la température baisse, c'est que la face de la Terre à l'ombre n'est plus exposée aux Infrarouges

Les **micro-ondes** sont peu énergétiques mais ont la particularité, par un phénomène de « résonance » de mettre en mouvement les molécules d'eau et de chauffer celles-ci. Ces micro-ondes émises par le soleil ne présentent pas de danger sur terre étant donnée la faible proportion qu'elles représentent.

Les **ondes radio**, tout à fait comparables à celles émises par les émetteurs de programmes radiophoniques et télévisés, si ce n'est que le Soleil n'émet pas votre musique préférée.

I.2. Le rayonnement absorbé

Les théories actuelles présentent le rayonnement solaire comme une émission de particules. Ce flux de particules, appelées photons, atteint la terre avec différentes longueurs d'ondes à la quelle correspond une énergie spécifique décrite par la relation :

$$E [J] = hv = h \cdot c/\lambda$$

Avec,

- λ : longueur d'onde [m].
- ν : fréquence [Hz].
- c : vitesse de la lumière [m/s].

La répartition énergétique des différentes longueurs d'ondes du rayonnement électromagnétique du Soleil est appelé spectre solaire.

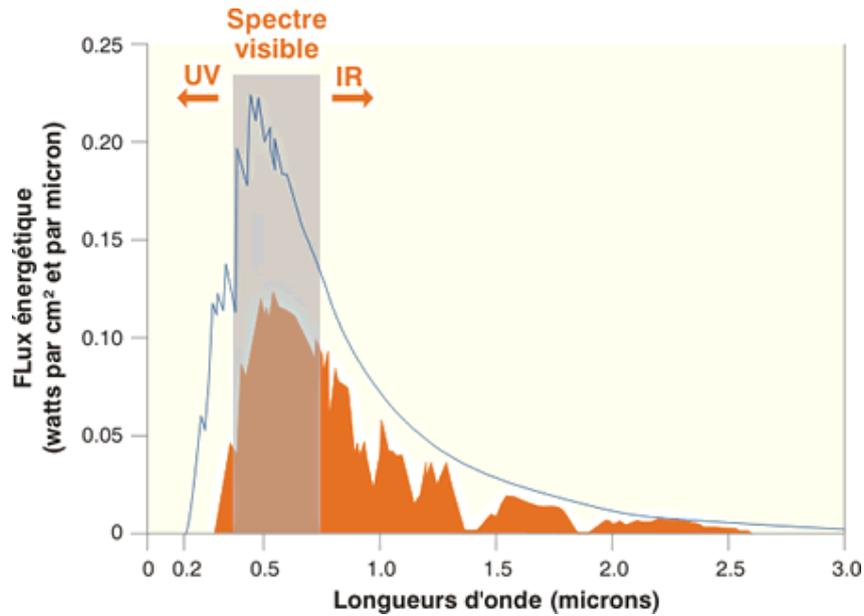
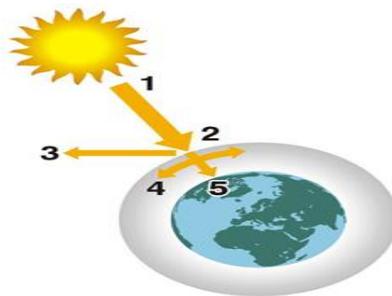


Figure 2 : Différentes longueurs d'onde

Avec sa température d'émission de 5 500°C, le soleil rayonne la plus grande partie de son énergie dans les hautes fréquences (courtes longueurs d'onde).

La lumière visible représente 46 % de l'énergie totale émise par le soleil. 49 % du rayonnement énergétique émis par le soleil se situe au-delà du rouge visible, dans l'infrarouge. C'est ce rayonnement que nous ressentons comme une onde de chaleur.

Le reste du rayonnement solaire, l'ultraviolet, représente l'ensemble des radiations de longueur d'onde inférieure à celle de l'extrémité violette du spectre visible.



1 : Puissance émise par le soleil : 63 500 kW/m². 2 : Constante solaire : 1 370 W/m².
3 : Rayonnement réfléchi, 4 : Rayonnement absorbé et diffusé, 5 : Rayonnement solaire à la surface de la Terre (max : 1 000 W/m²).

1. .

I.3. Bilan radiatif de la terre

La principale source d'énergie n'est autre que le rayonnement électromagnétique solaire (99,7 %, le reste étant produit à l'intérieur de la Terre), qui va de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le visible. Cependant, au moins 35 % du rayonnement solaire intercepté par la Terre et son atmosphère sont **réfléchis** vers l'espace, avant même de pouvoir être absorbé dans l'atmosphère, les sols ou les océans. Une partie du rayonnement qui atteint la Terre a été **diffusée** dans toutes les directions au cours de la traversée de l'atmosphère, en rencontrant des molécules d'air, des aérosols et des particules de poussière (c'est ce rayonnement diffus, appartenant notamment à la frange bleue du spectre visible qui est responsable de la couleur bleue du ciel clair).

Le reste du rayonnement solaire est donc converti en chaleur à la surface de la planète et dans l'atmosphère. Les spécialistes parlent du bilan global du rayonnement « ondes courtes », car les longueurs d'onde considérées sont comprises entre 0,4 et 0,9 μm .

D'autre part, la vapeur d'eau, le gaz carbonique et l'ozone de l'atmosphère absorbent 10 à 15 % du rayonnement solaire. Le reste du rayonnement atteint directement la surface.

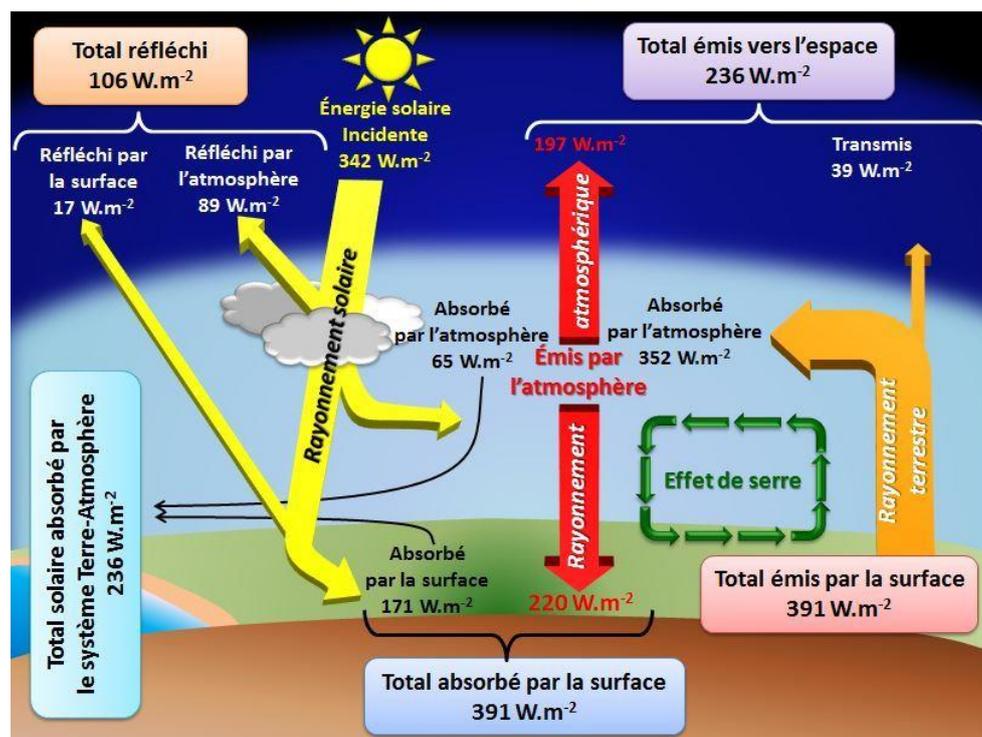


Figure 3 : Bilan radiatif global

Sans autre perte, notre planète ne cesserait de se réchauffer. Ainsi, pour maintenir un équilibre approximatif, la Terre doit évacuer l'équivalent de l'énergie d'origine solaire qu'elle a absorbée. Elle le fait en émettant vers l'espace un rayonnement thermique dans l'infrarouge moyen, dont les longueurs d'onde sont comprises entre 3 et 60 μm . Il définit le bilan global « ondes longues », qui est le pendant du bilan global du rayonnement « ondes courtes » avec une valeur opposée, dans le cas où le bilan radiatif est nul.

Ainsi, le bilan radiatif de notre planète est égal au rayonnement solaire absorbé ajouté à la production interne de chaleur, moins le rayonnement infrarouge thermique émis vers l'espace.

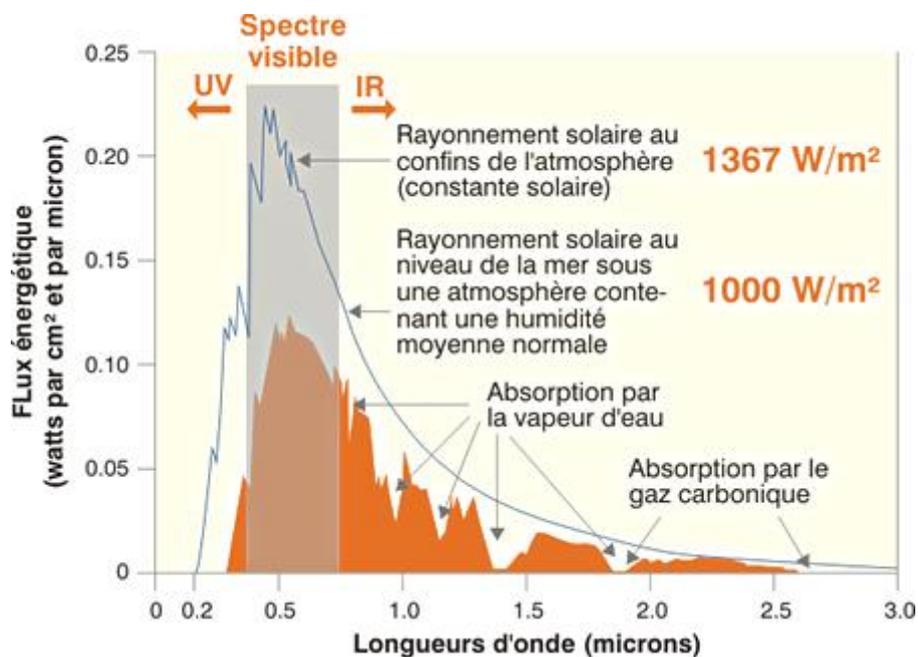


Figure 4 : Energie absorbée

Outre la composition de l'atmosphère, le facteur le plus important pour évaluer la quantité du rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre est l'épaisseur d'atmosphère que le rayonnement doit traverser.

Au milieu du jour, le Soleil est au-dessus de nos têtes, et ses rayons ont à traverser une épaisseur d'air moindre avant d'arriver sur Terre. Mais au début et à la fin de la journée, le

Soleil est bas sur l'horizon ; la traversée de l'atmosphère se fait alors plus longue. L'atmosphère absorbe et diffuse d'autant plus de particules de lumière qu'elle est plus épaisse et plus dense. Ainsi, au coucher du Soleil, les rayons sont suffisamment affaiblis pour permettre à l'œil humain de fixer le Soleil sans trop d'éblouissement. Par contre, lorsque l'altitude augmente, la couche d'atmosphère à traverser est plus réduite : dans les sites de montagnes, l'intensité du rayonnement augmente sensiblement.

Le rayonnement solaire reçu sur une surface varie donc au cours du temps en fonction de la position du Soleil et de la couverture nuageuse. La puissance solaire maximale à la surface de la Terre est d'environ $1\ 000\ \text{W/m}^2$ pour une surface perpendiculaire aux rayons.

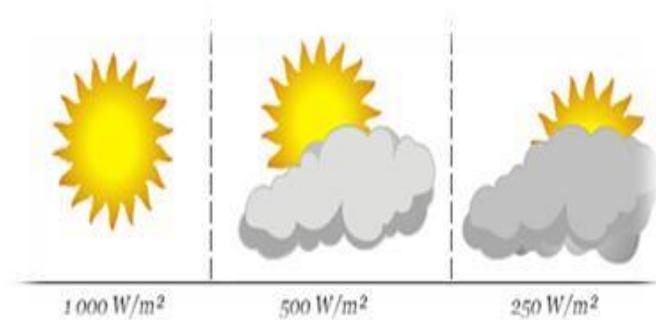


Figure 5 : Puissance solaire pour différents ciels.

II. Les Flux énergétiques

Tout être vivant doit pour fabriquer ses tissus et se reproduire avoir une source d'énergie. Qu'il s'agisse de la lumière pour les autotrophes ou de substances biochimiques (glucides par ex) pour les hétérotrophes, dans les deux cas, l'énergie solaire est de façon directe ou indirecte, l'unique source d'énergie pour les êtres vivants peuplant une biocénose. Le flux d'énergie est le transfert de l'énergie d'un niveau trophique à l'autre dans l'écosystème.

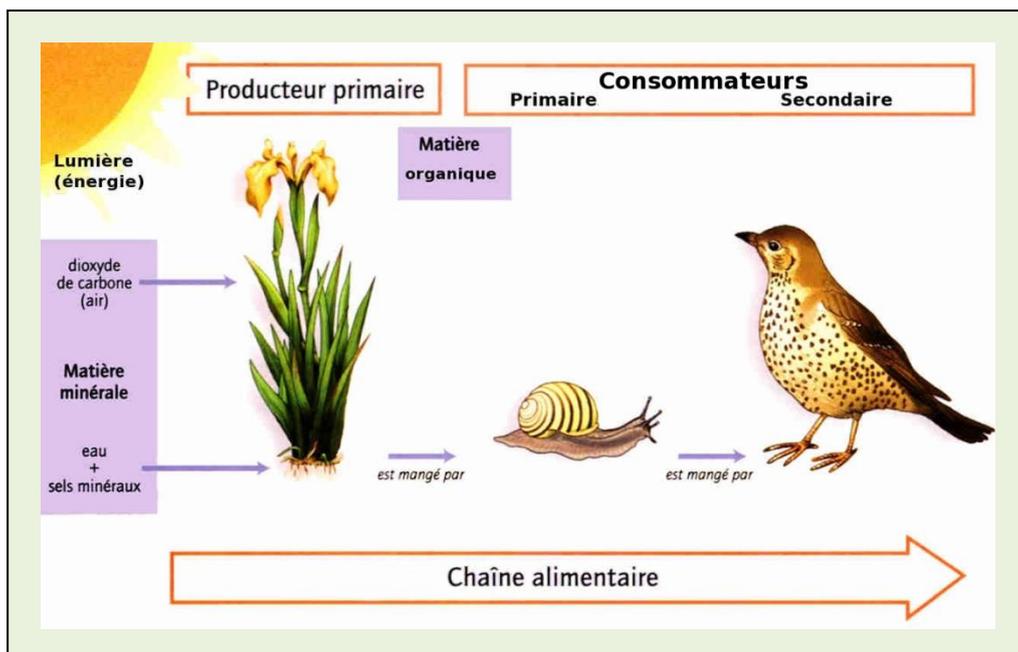


Figure 6 : Soleil, source d'énergie par la chaîne alimentaire

Le rôle de l'énergie est d'organiser la matière minérale en matière organique en fournissant l'énergie des liaisons chimiques entre les atomes. La source d'énergie des écosystèmes est généralement la lumière solaire. L'énergie lumineuse qui alimente les écosystèmes est le bleu violet et le rouge (captée par la chlorophylle des chloroplastes). Comme le vert n'est pas capté (donc réfléchi), les végétaux paraissent verts.

Rq : Une exception, les écosystèmes marins des grands fonds sont alimentés par l'énergie tirée de l'oxydation de certaines substances minérales (chimiosynthèse).

II.1. Transfert de l'énergie dans les écosystèmes

Toute l'énergie solaire n'arrive pas à la surface de la Terre :

- 30% des radiations solaires sont réfléchies dans l'espace par l'atmosphère.
- 20% des radiations solaires sont absorbées par l'atmosphère.
- 50% des radiations solaires sont absorbées par le sol, l'eau, la végétation et utilisées sous forme de chaleur.
- 1% des radiations solaires sont utilisés par la photosynthèse.
- Chaque point de la surface du globe reçoit 6 mois de lumière. La lumière n'est pas répartie de façon homogène en fonction de la latitude. L'énergie totale reçue à l'équateur est égale à 2.5 fois celle reçue aux pôles.

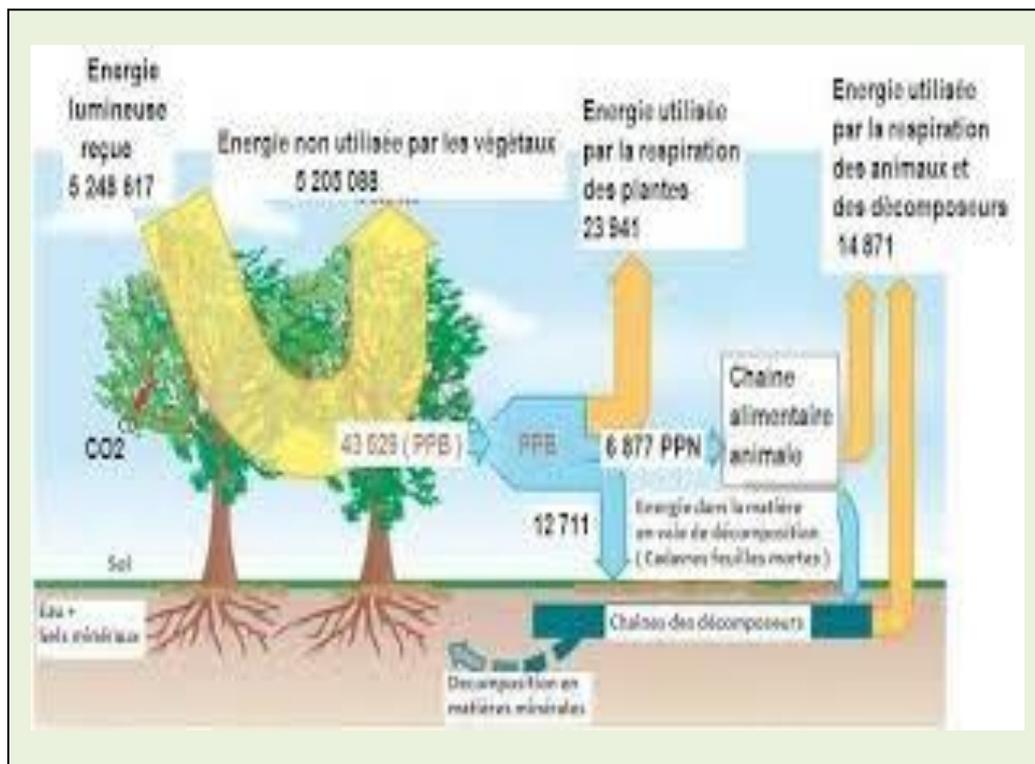


Figure 7 : Transfert d'énergie au sein d'un écosystème

II.2. Processus écologiques régissant le flux d'énergie et le transfert de matière

II.2.1. La Photosynthèse

La photosynthèse est une réaction chimique qui permet seulement la cellule végétale d'obtenir de l'énergie. Cette réaction chimique passe dans les chloroplastes (organite d'une cellule végétale). La photosynthèse est très importante, car les glucides fabriqués par les plantes sont à la base de l'alimentation de tous les autres êtres vivants.

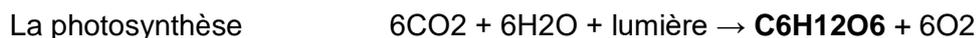
L'énergie solaire est utilisée par les plantes chlorophylliennes dans le cadre de la photosynthèse. Grâce à celle-ci, les plantes chlorophylliennes synthétisent de la matière organique à partir des substances minérales ; à savoir **l'eau, le dioxyde de carbone et les sels minéraux.**

La photosynthèse ne peut avoir lieu qu'en présence de l'énergie lumineuse. Cette énergie se transforme en énergie chimique potentielle contenue dans les molécules organiques (sucre, lipides, etc.). A travers les réseaux trophiques on assiste à un flux de matière et d'énergie dans les écosystèmes.

La plupart des plantes et des bactéries autotrophes sont photosynthétiques. La transformation globale se produisant sous l'action de la chlorophylle et comprend une centaine de réactions chimiques.



HCOH est l'élément de base des glucides. Il s'agit d'une réduction chimique endothermique absorbant 112,3 kcal/mole, c'est-à-dire 12g de C ou (44g de CO₂) absorbé et 32g de O₂ libéré.



Lorsque la cellule a utilisé les nutriments, elle produit du glucose et de l'oxygène. Le glucose (C₆H₁₂O₆) est une molécule que les plantes produisent et qui contient beaucoup d'énergie (énergie emmagasinée).

100 milliards de tonnes de matière organique est produit par année au niveau des chloroplastes des plantes avec moins de 5 % de la lumière visible est captée. En effet, Les

producteurs convertissent environ 1% de l'énergie solaire qui leur parvient en énergie chimique, par photosynthèse, pour un total de 170 milliards de tonnes de matière organique par an.

II.2.2. La respiration cellulaire

Chez les végétaux, la respiration cellulaire n'a lieu que durant la nuit en l'absence du soleil. La respiration cellulaire est le contraire de la photosynthèse où les intrants de la photosynthèse deviennent donc les extrants de respiration cellulaire et les extrants de la photosynthèse deviennent les intrants de la respiration cellulaire.

La respiration cellulaire est une réaction chimique qu'on trouve dans les cellules animales et végétales. Elle transforme les glucides (la} nourriture en énergie cellulaire que la cellule utilise pour effectuer toutes ses fonctions. Les organites responsables pour la respiration cellulaire sont les mitochondries.

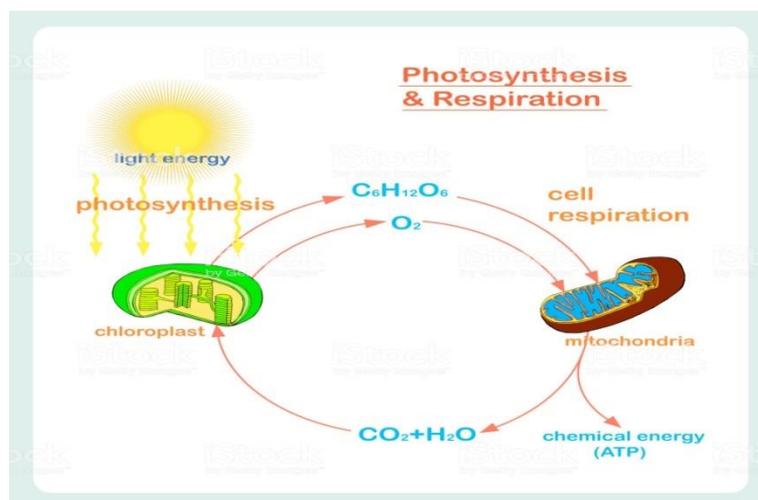


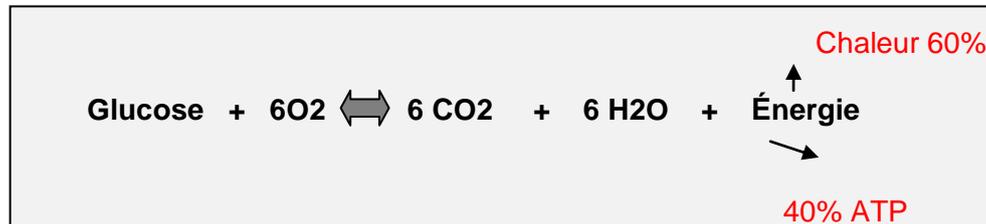
Figure 8 : Photosynthèse et respiration

La respiration utilise le glucose et l'oxygène produits par la photosynthèse pour donner du gaz carbonique, de l'eau mais surtout de l'Énergie.

II.2.1. L'efficacité relative de la respiration cellulaire :

- La respiration cellulaire ne récupère qu'environ 40% de l'énergie emmagasinée dans les liens chimiques du glucose.
- La dégradation du glucose par respiration cellulaire libère l'énergie des liens chimiques ainsi que les atomes constitutifs. Des 100% d'énergie potentielle contenue

dans les liens du glucose, 40% seulement est transféré à de l'ATP et, 60% est perdu en chaleur. Cette chaleur perdue est tout de même utile car elle contribue à maintenir la température corporelle des organismes.



- L'énergie potentielle d'une molécule de glucose est d'environ 2 870 kJ par mole de glucose.
- La respiration cellulaire produit 36 ATP (eucaryotes) ou 38 ATP (procaryotes) à partir d'une mole de glucose.
- Dans la cellule, la phosphorylation de l'ADP (en ATP) emprisonne 30,5 kJ/mol.
- Le rendement de la respiration cellulaire chez les cellules eucaryotes est de :

$$\left[\frac{36 \text{ ATP} \times 30,5 \text{ kJ/mol}}{2\,870 \text{ kJ/mol}} \right] \times 100 = \pm 40 \%$$

II.2.3. Energie auxiliaire :

A cette d'énergie libérée par la respiration, s'en ajoute une autre qualifiée en écologie d'"auxiliaire" : l'énergie nécessaire à la mise en contact d'éléments complémentaires du milieu. Ainsi, pour grandir, une plante a besoin de sels nutritifs, initialement présents en solution dans le sol, au niveau de ses feuilles. Cet apport minéral est effectué par une "succion" de l'eau du sol à partir des feuilles grâce à l'évaporation (aussi appelée transpiration végétale,) de l'eau au niveau de ces dernières. L'énergie autorisant le déplacement d'eau du sol vers les feuilles est une énergie auxiliaire : elle permet la mise en contact de deux composantes de l'écosystème - les sels minéraux du sol d'une part, les cellules chlorophylliennes des feuilles de l'autre. Grâce à cette mise en interaction la plante peut grandir et participer au bon fonctionnement de l'écosystème.

II.3. Niveaux trophiques de l'écosystème

C'est le rang qu'occupe un être vivant dans une chaîne alimentaire. Chaque maillon de la chaîne correspond à un niveau trophique. En d'autres termes, un niveau trophique est l'ensemble des organismes qui obtiennent leur énergie à partir du même étage alimentaire.

On retrouve les niveaux suivants : **les producteurs, les consommateurs et les décomposeurs.**

- **Les producteurs (autotrophes)** pour la plupart des végétaux chlorophylliens qui utilisent une fraction du flux solaire pour élaborer des matières biochimiques à partir du gaz carbonique. En ce sens, ils constituent le premier maillon de la chaîne alimentaire.
- **Les consommateurs (hétérotrophes)** ne peuvent se nourrir qu'à partir de matières organiques complexes (glucides, protides, lipides). Ils dépendent donc entièrement des producteurs qui représentent la seule source d'énergie utilisable par les animaux, soit directement dans le cas des phytophages (consommateurs primaires) soit indirectement dans le cas des carnivores (consommateurs secondaires). Un type particulier de consommateurs secondaires est constitué par les parasites.
- **Les décomposeurs saprophytes** : champignons, bactéries, levures et autres microorganismes hétérotrophes utilisent la matière organique morte (détritus végétaux, excréta et cadavres d'animaux) dont ils assurent une minéralisation progressive et totale.

À chaque maillon de la chaîne alimentaire, il y a des déchets de matière inorganique qui s'accumulent dans le milieu. Les décomposeurs vont donc rendre disponibles les nutriments essentiels présents dans la matière organique afin que les producteurs puissent les utiliser. Le recyclage chimique est étroitement lié à plusieurs **cycles biogéochimiques** comme celui du carbone, de l'azote et du phosphore.

Remarques :

- En milieu terrestre, les chaînes trophiques de prédateurs comportent en général trois ou quatre niveaux parfois, un cinquième niveau trophique s'ajoute : les consommateurs quaternaires.

- En milieu marin, les chaînes trophiques de prédateurs sont toujours plus longues que dans les écosystèmes terrestres.
- Les Omnivores, les «mangeurs» de viande et de plantes, font partie de divers niveaux trophiques car ils se nourrissent de divers étages alimentaires.
- Les Détritivores, les mangeurs des détritux végétaux et animaux, font partie de tous les niveaux trophiques (lombrics, bactéries, mycètes, scarabées...).

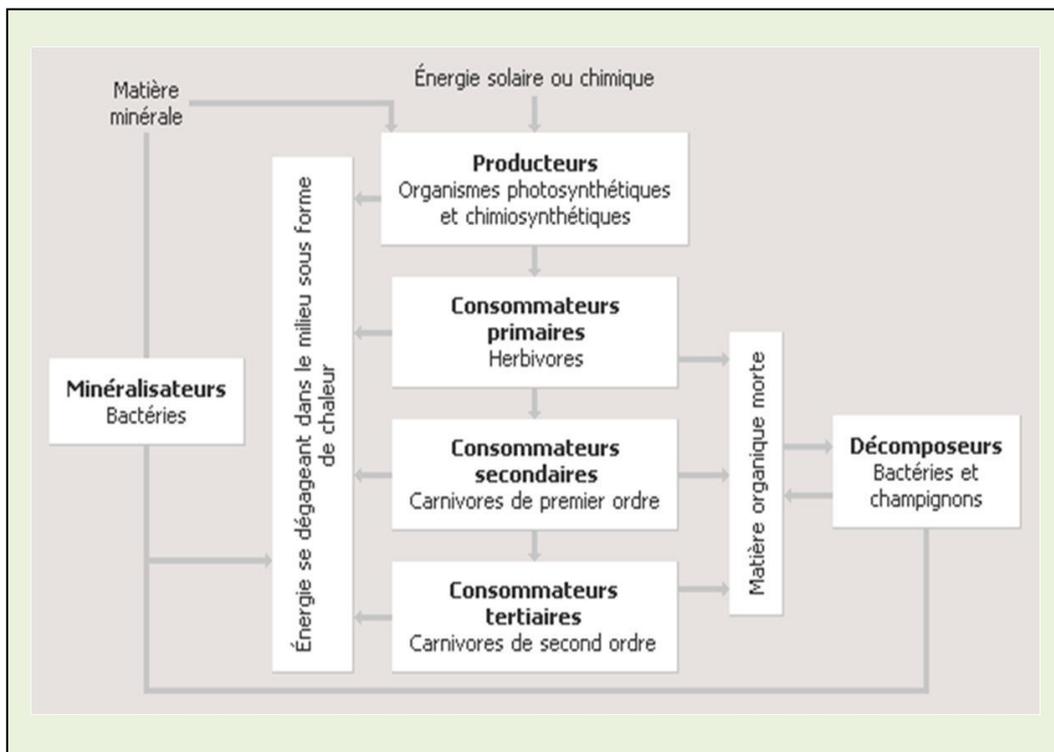


Figure 9 : Différents niveaux trophiques

L'énergie perdue est continuellement renouvelée car le soleil continue d'éclairer la Terre. La quantité d'énergie qui entre dans un écosystème détermine le nombre maximal de niveaux trophiques qu'il contient. Quand il n'y a plus assez d'énergie pour maintenir un niveau trophique supérieur, la chaîne alimentaire s'arrête. Pour cette raison, il y a rarement plus de 4 niveaux trophiques. Chaque chaîne alimentaire correspond à un seul circuit au sein du flux énergétique.

II.4. Chaîne alimentaire

Dans un écosystème, les interactions entre les organismes, forment ce qu'on appelle des chaînes alimentaires. Une chaîne alimentaire est donc une succession d'organismes dont chacun vit au dépend afin d'avoir de l'énergie pour survivre. C'est l'ensemble des êtres vivants qui se nourrissent «directement» les uns des autres.

Dans une chaîne alimentaire, il existe un transfert «en ligne droite» de l'énergie et des nutriments d'un niveau trophique à l'autre, depuis les producteurs jusqu'aux détritivores, en passant par les consommateurs.

Le flux de l'énergie est unidirectionnel. 1 % donc de l'énergie lumineuse pénètre dans les écosystèmes et y maintient les niveaux trophiques.

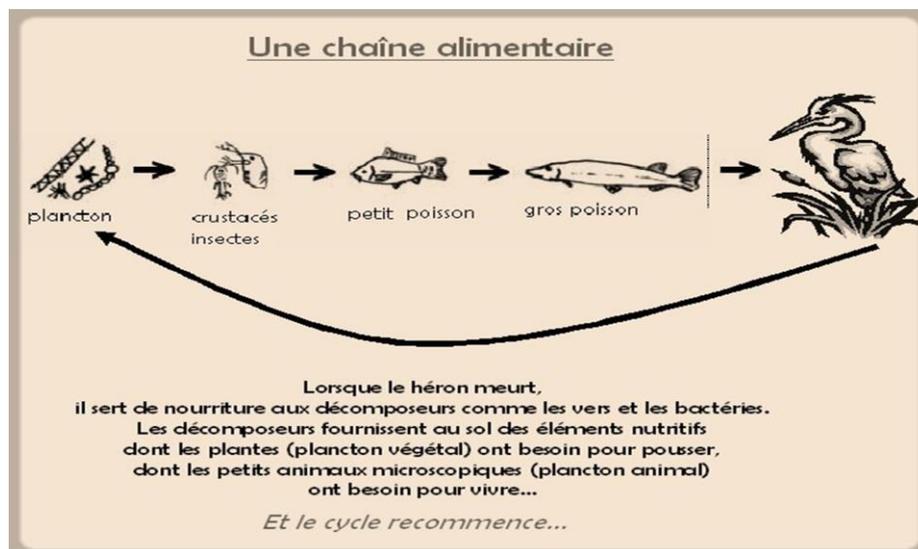


Figure : Chaîne alimentaire simple

Il existe 3 types de chaînes alimentaires :

-Les chaînes alimentaires de prédateurs : Le nombre d'individus diminue d'un niveau trophique à l'autre mais leurs tailles augmentent. (Règle d'Elton énoncée en 1921).

-Ex. : (100) Carottes + (5) Lièvres + (3) Loups.

-Les chaînes trophiques de parasites : procèdent au contraire des précédentes, d'organismes de grande taille vers des organismes de petite taille mais de plus en plus

nombreux (Règle d'Elton n'est pas vérifiée). Des espèces éloignées peuvent évoluer chacune à l'intérieur du corps de l'autre (hôte/parasite).

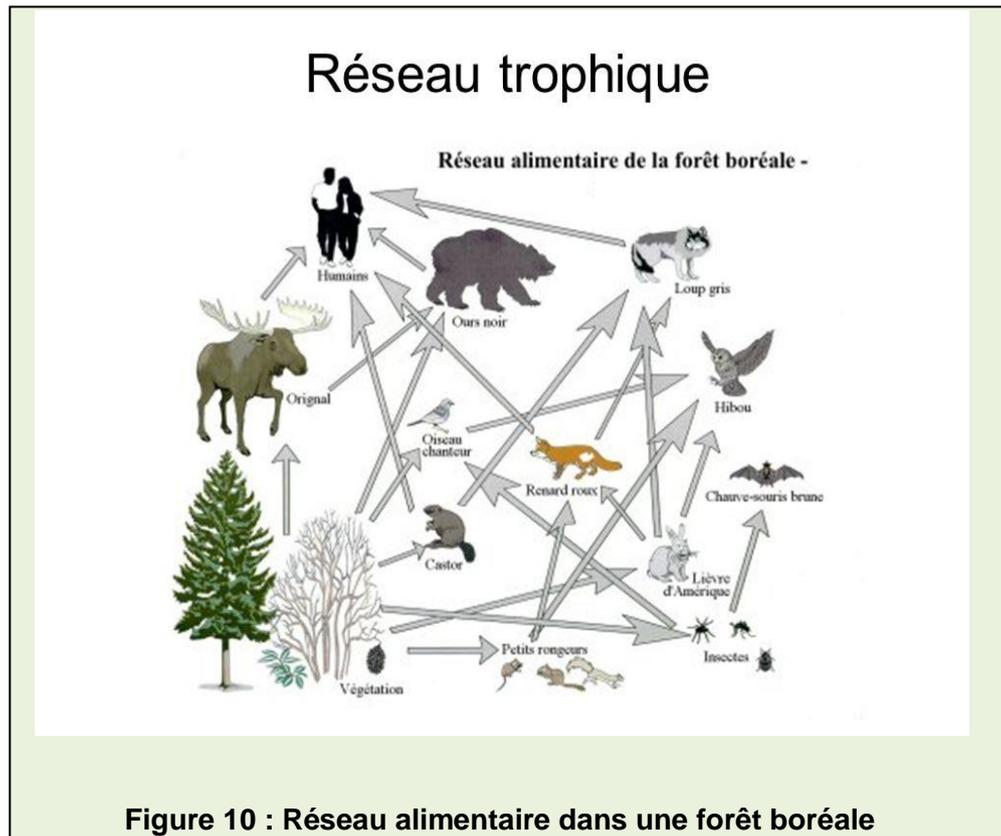
-Ex.: (1) Sapin (Producteur) (10) Chenille (Herbivore) (40) Braconides (Parasite)
(80) Chalcidiens (Hyperparasites).

-Les chaînes saprophytiques : jouent un rôle important dans les forêts caducifoliées où la plus grande partie du feuillage n'est pas consommée mais constitue une litière. La circulation de la matière est à prédominance détritique. Ça va de la matière organique morte vers des organismes de plus en plus petits (microscopiques) et nombreux (Règle d'Elton n'est pas vérifiée).

-Ex. : (1) Cadavre (renard) + (80) Nématodes + (250) Bactéries.

En réalité, les trois types de chaînes coexistent dans un écosystème et sont interconnectées pour constituer un réseau trophique. Ils sont représentés par les végétaux photosynthétiques. Ces producteurs produisent des substances organiques simples à partir du dioxyde de carbone et de l'eau en dégageant du dioxygène. Les sels minéraux à base d'azote permettent d'obtenir les protides, ceux à base de phosphore permettent d'obtenir les acides nucléiques. L'énergie est stockée sous forme de liaisons chimiques. Ce sont des producteurs primaires. Ils respirent aussi pour fonctionner et se développer et produisent donc du dioxyde de carbone et de l'eau.

Un réseau trophique est constitué de multiples chaînes alimentaires reliées les unes aux autres de diverses façons. Il se définit comme un ensemble de chaînes alimentaires reliées entre elles au sein d'un écosystème et par lesquelles l'énergie et la matière circulent.



II.5. Notion de pyramide écologique

A partir de la chaîne alimentaire il est possible de construire 3 types de pyramides écologiques où chaque niveau trophique est représenté par un rectangle. Tous les rectangles y ont la même hauteur, mais leur longueur est proportionnelle au nombre d'organismes qui les constituent ou à leur biomasse. Étant donné que les organismes de chaque maillon perdent 90 % de la matière et de l'énergie du maillon précédent, la longueur des rectangles successifs est de plus en plus réduite.

- **La Pyramide des nombres** ou Pyramide Eltonienne (D'après Charles Elton) : La pyramide des nombres renseigne seulement sur le nombre d'organismes compris dans un niveau trophique.

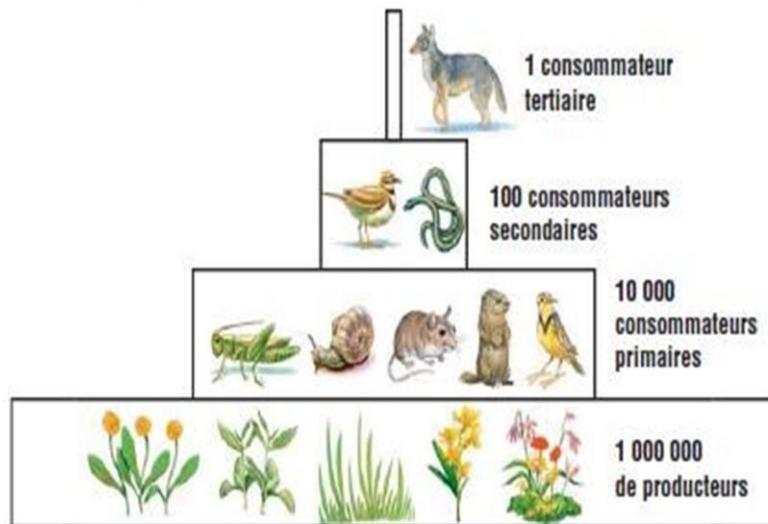


Figure 11 : Pyramide des nombres en milieu terrestre

- **La Pyramide des biomasses:** La pyramide des biomasses fournit davantage de renseignements car on se base sur la masse des organismes.

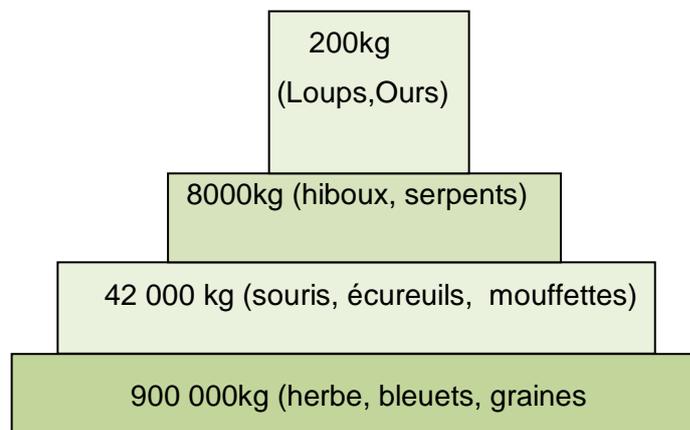


Figure 12 : Pyramide des biomasses en milieu terrestre

Dans quelques écosystèmes aquatiques où les producteurs sont des algues à courte durée de vie et à vitesse de renouvellement élevée, la pyramide est inversée. Par conséquent, la base de la pyramide (biomasse de phytoplancton) est plus petite que le sommet (biomasse du zooplancton).

-**La Pyramide d'énergie** montre le transfert d'énergie entre les niveaux trophiques. Une pyramide d'énergie donne la meilleure image globale de la structure de la communauté parce qu'elle est basée sur la production.

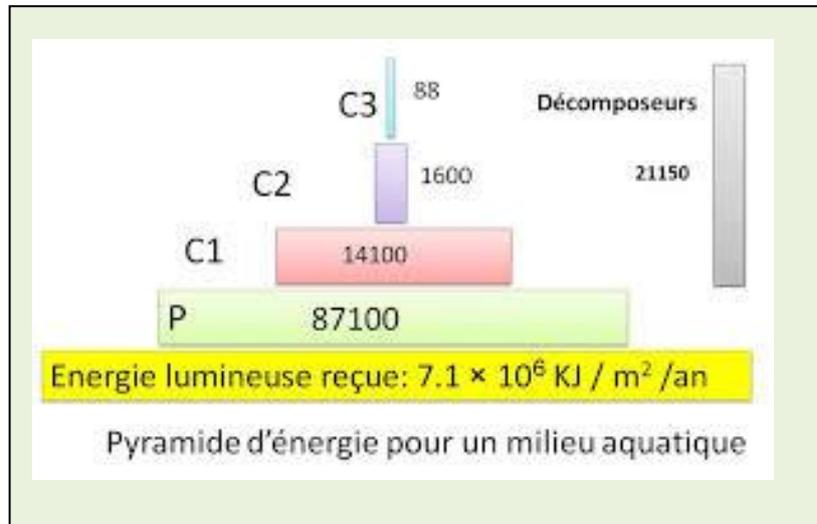


Figure 13 : Pyramide des énergies

Environ 10% de l'énergie contenue dans un niveau trophique s'incorpore à la biomasse (masse biologique des organismes) du niveau suivant. La différence de 90% est perdue de multiples façons.

Les causes des pertes d'énergie de l'écosystème

-Ce qui est ingéré : Seule, une fraction de la proie végétale ou animale est effectivement prélevée et dévorée par le niveau supérieur. Des parties de l'organisme peuvent ne pas être mangées, ou bien régurgitées (exemple : les hiboux vomissent les os).

- Ce qui est assimilé : Seule une partie des aliments ingérés est digérée puis absorbée vers le sang (assimilée). Ce qui n'est pas digéré sort du tube digestif à l'état de déchets. Des organismes ne sont pas mangés – leur énergie n'est pas transférée.

- Une grande partie de l'énergie est utilisée pour la respiration cellulaire

- La perte de chaleur arrive aussi pendant ce processus.

III. Notion de Biomasse

Selon RAMADE, la *biomasse* est la masse totale des substances vivantes présentes sur une unité de surface donnée. Elle peut être exprimée en poids sec ou en poids frais par mètre carré ou par hectare. On peut distinguer la biomasse végétale et la biomasse animale. La notion de biomasse permet ainsi de comparer des Organismes différents par la taille ou très éloignés sur le plan systématique.

En ce qui concerne l'évaluation de la biomasse végétale dans une prairie par exemple, on coupe l'herbe à la cisaille au niveau du collet dans le carré de 50 cm de côté. Les racines sont également récoltées et lavées. La récolte est ensuite séchée dans l'étuve à 105° C jusqu'à ce que son poids ne change plus. La masse totale de la matière ainsi séchée (m.s) est alors ramenée à l'unité de surface. Pour les petits animaux comme les Arthropodes le procédé est pratiquement le même. Concernant les grands Animaux on ne le capture pas mais après inventaire on prend la masse moyenne.

En milieu Forestier la biomasse des arbres est déterminée à partir du *D.B.H* (DiameterBreastHeight) ou diamètre du tronc de l'arbre à la hauteur de la poitrine (à environ 1,3 m du sol) il existe une relation entre la biomasse de l'arbre et son *D.B.H*.

$$D.B.H. = c / \delta$$

Dans cette formule, *c* est la circonférence de l'arbre à la hauteur de la poitrine. Connaissant la hauteur de l'arbre c'est à dire la distance comprise entre la base et le sommet de cet arbre on peut estimer son volume par la formule :

$$V = \delta / 40000 d^2 h$$

V étant le volume de l'arbre, *d* ou *D.B.H.* le diamètre de l'arbre à 1.3 m du sol et *h*, la hauteur. La hauteur *h* est calculée aussi par l'égalité : $h = n + a + e$

La lettre *n* indique une valeur lue sur le dendromètre, *a* la hauteur de l'observateur et *e* l'erreur de 2m car on prend la hauteur à une distance d'environ 15m de l'arbre.

Pour certains auteurs, la biomasse représente toute la matière vivante ou morte dans la biosphère. Elle correspond à la matière organique totale et comprend la masse des êtres vivants et morts ainsi que celle de la litière et de l'humus.

IV. Notion de productivité

Dans les écosystèmes, une partie du flux lumineux (1 à 3% du flux solaire) pénètre dans les réseaux trophiques et elle y est stockée sous forme d'énergie chimique. Cette production ininterrompue des matières organiques constitue un des processus fondamentaux de la biosphère. La productivité est la vitesse de la production de la matière vivante par unités de temps et de surface, c'est la capacité de produire de la biomasse. On distingue la productivité primaire et la productivité secondaire.

IV.1. Productivité primaire : C'est la vitesse avec laquelle l'énergie est emmagasinée par l'activité photosynthétique des producteurs (plantes) sous forme des matières organiques utilisables comme aliments par les consommateurs (animaux). Cette productivité se définit aussi comme le taux global d'assimilation photosynthétique des producteurs d'un écosystème. La productivité primaire est calculée parfois en tonnes des matières organiques sèches synthétisées par hectare et par an. Une meilleure évaluation consiste à calculer la quantité d'énergie contenue dans ces matières. On sait, par exemple, qu'un gramme des feuilles vivantes correspond à 4,7 kilocalories.

De la sorte, la productivité primaire sera exprimée en $\text{kcal/m}^2/\text{an}$. Ce qui permettra de comparer la productivité de plusieurs écosystèmes. Elle est calculée grâce au taux de production primaire. On peut distinguer deux sous-ensembles de production primaire :

. **La productivité primaire brute (PPB)** correspond à la quantité de carbone fixée dans la végétation par photosynthèse (énergie totale assimilée par les plantes). Toute cette matière ne s'accumule pas en biomasse végétale. La moitié environ est métabolisée au cours de la respiration cellulaire de la plante elle même.

. **La productivité primaire nette (PPN)** correspond à la croissance végétale annuelle — exprimée en quantité d'énergie ($\text{J} / \text{m}^2 / \text{an}$) ou en quantité de matière sèche ($\text{g} / \text{m}^2 / \text{an}$). Elle se manifeste dans le temps comme un accroissement de taille de la plante et représente la nourriture disponible pour les hétérotrophes (croissance et reproduction). La productivité primaire nette par an pour l'ensemble de la biosphère est d'environ 170 milliards de tonnes (en poids sec) de matière organique.

La productivité primaire peut être vue à l'échelle d'une plante (ex: un arbre) ou à celle d'un écosystème. Dans le cas de l'écosystème, on parle de production primaire nette de

l'écosystème. Cette valeur est utile pour les écologistes dans le sens où elle permet de déterminer la quantité d'énergie disponible pour les autres organismes (détritivores, herbivores et autres maillons de la chaîne alimentaire).

IV.1.1. La production brute (PB) :

C'est la production de la photosynthèse totale du système photosynthétique c'est à dire des feuilles (assimilation totale) y compris les matières brûlées dans la respiration du système (*RMF* : Respiration de Maintenance des Feuilles). La quantité des matières organiques assimilées, n'est pas toute utilisée. Une partie est exportée vers les systèmes non photosynthétiques de la plante (tiges, racines, tubercules) et correspond à la Production du Surplus (*PS*).

$$\mathbf{PB - RMF = PS}$$

PS assure la maintenance des organes existants, la construction des organes nouveaux l'élaboration et le stockage des matières de réserve (amidon).

IV.1.2. La Production nette (PN)

On l'appelle aussi photosynthèse apparente. Elle correspond à la production de la matière organique formée moins celle qui est perdue par la respiration.

$$\mathbf{PN = PB - RA}$$

PN étant la production nette, **PB** la production brute, **RA** l'ensemble des pertes par respiration de la phytocénose.

La production nette peut être obtenue en mesurant la biomasse à deux époques successives t_1 et t_2 . Si pendant cette période, la masse initiale est **B1** et la masse au temps t_2 est **B2**, on a :

$$\mathbf{PN = \frac{B2 - B1}{T2 - T1} = \frac{\Delta B}{\Delta T}}$$

IV.2. Productivité secondaire

Elle consiste à la conversion de la productivité primaire nette en différents tissus des hétérotrophes. Ce processus s'effectue avec un rendement assez faible car une bonne partie de l'énergie absorbée par les animaux est dissipée au cours des phénomènes métaboliques.

Il faut, par exemple, 80 kg d'herbes pour produire 1 kg des muscles de boeuf. Le reste est perdu sous forme d'excréta (déjection) et par la respiration. Les excréta gagnent le sol ou les sédiments. Ils se transforment en minéraux ou en hydrocarbures par l'action des décomposeurs.

IV.3. Productivité des écosystèmes

La productivité nette totale de la biosphère est, selon LIETH (1975), d'environ 170×10^9 tonnes de matière sèche par année, ce qui correspond à $6,9 \times 10^{17}$ kcal /an. Par rapport à l'énergie solaire parvenant à la surface de la terre, le rendement est de 0,24% sur les continents et de 0,06% dans les océans.

Les animaux consomment environ 1% de la production primaire dans les zones cultivées, 2 à 3% dans les déserts et la toundra, 4 à 7% dans les forêts et 10 à 15% dans les prairies.

La production des 14 millions de km^2 de terres cultivables est de 9×10^8 t/an. L'homme consomme $1,2 \times 10^9$ t/an des céréales et $0,57 \times 10^9$ t/an d'autres produits en poids frais. En plus il consomme $0,072 \times 10^9$ t/an de nourriture d'origine animale produite en milieu terrestre et $0,0165 \times 10^9$ t/an prélevé en milieu aquatique.

La productivité primaire varie beaucoup avec les écosystèmes. Ainsi la productivité des déserts et des zones pélagiques des océans est particulièrement faible, inférieure à 200 g de matière sèche pour les eaux bleues superficielles des mers tropicales, pauvres en éléments nutritifs produisent à peine 15 g/m^2 /an de matière sèche. Les océans bien qu'ils recouvrent 7/10 de la surface totale du globe ne participent que pour 40% à la production primaire nette totale.

Les forêts, par contre, qui ne se trouvent que sur 1/10 de la superficie terrestre a une productivité comprise entre 1000 à 3000 g/m^2 /an soit plus de 400 g de carbone/ m^2 /an. Les terres cultivées (10% de la superficie émergée) ont une forte productivité primaire évaluée en moyenne de 1000 à 3000 g m.s. / m^2 /an.

Pour les autres terres émergées (steppes, pâturages) la productivité primaire nette est beaucoup plus faible. De nombreux facteurs écologiques limitent la productivité primaire il s'agit de l'ensoleillement, le taux du CO₂, la température, l'humidité, l'azote, le phosphore et d'autres éléments biogènes.

Concernant la productivité secondaire elle présente beaucoup de fluctuations et varie d'un écosystème à l'autre. Dans les écosystèmes naturels, la productivité secondaire est souvent inférieure à celle obtenue dans les agroécosystèmes. Les grandes surfaces d'eaux continentales ou océaniques présentent aussi une petite productivité par rapport aux milieux restreints mais qui bénéficient d'une abondante fertilisation naturelle ou artificielle (les étangs piscicoles).

La productivité secondaire moyenne des biomes continentaux est de 61 kg/ha/an et celle de l'océan excède 75 kg/ha/an. Curieusement la biomasse totale des écosystèmes continentaux est supérieure à celle que renferme l'océan mondial.

VI.4. Les facteurs qui influencent la productivité primaire

Plusieurs facteurs peuvent faire varier la productivité primaire d'un écosystème. Les facteurs qui favoriseront le développement des producteurs (végétaux, phytoplancton, etc.) permettront d'obtenir un écosystème beaucoup plus productif, car la productivité primaire dépend directement de ceux-ci.

-La quantité de lumière est un facteur qui influence beaucoup la productivité primaire, car c'est l'énergie rayonnante du Soleil qui permet la photosynthèse. Dans l'océan ou dans un lac, la zone éclairée n'est pas très grande. La zone où la photosynthèse peut avoir lieu est donc une couche d'eau près de la surface qui est relativement mince que l'on nomme zone photique (ou zone euphotique). Cette zone correspond à la profondeur à laquelle la lumière atteint 1% de sa valeur en surface.

-La quantité d'eau disponible influence la productivité primaire. L'eau est nécessaire à la photosynthèse. Ainsi, un écosystème désertique sera beaucoup moins productif qu'un écosystème forestier. L'eau y étant beaucoup moins présente, les végétaux ne s'y développent pas aussi facilement.

-L'accès aux nutriments essentiels pour les producteurs est un autre facteur influençant la productivité primaire d'un écosystème. Le carbone, l'azote, le fer, le phosphore, le silicium, le

potassium sont nécessaires pour la croissance et la photosynthèse des producteurs. Plus ces nutriments seront disponibles, plus la productivité primaire pourra augmenter.

Finalement la **température** est un facteur qui favorise la productivité primaire, car certaines conditions climatiques sont favorables à la croissance des producteurs. Les producteurs (végétaux) se développent plus facilement dans un écosystème forestier que dans un écosystème polaire.

V. Bilans et rendements énergétiques

V.I. Notion de bilan énergétique

Du point de vue énergétique, les systèmes biologiques (cellules, organismes, écosystèmes, ...) obéissent aux lois générales de la thermodynamique.

Ainsi, conformément au principe de conservation de l'énergie, l'énergie qui traverse un organisme, une population ou un écosystème peut être convertie d'une forme en une autre (énergie lumineuse en énergie chimique, en travail, ...) mais elle n'est ni créée, ni détruite.

Un organisme peut être présenté comme un système d'acquisition, de transformation et d'allocation d'énergie. Ex : Bilan énergétique dans un milieu

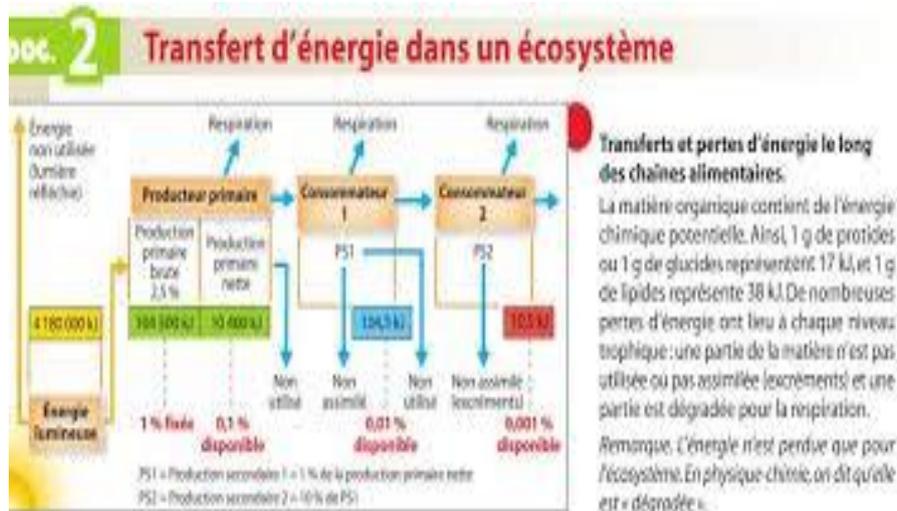


Figure 14 : Transfert d'énergie au sein d'un écosystème

Il y a donc des pertes importantes de matière et d'énergie à chaque fois que l'on passe d'un niveau trophique à un autre. Toute l'énergie produite par l'écosystème est réutilisée par ce

même écosystème. On a un équilibre entre énergie produite et énergie consommée. Le rendement est très faible.

Partant de l'énergie consommée C (contenue dans les aliments), on distingue l'énergie assimilée $A = (C - F)$, F étant l'énergie contenue dans les fèces, l'énergie métabolisable ($A - U$) et l'énergie effectivement investie dans la croissance et la production P.

$$C = A + F,$$

$$A = P + U + R$$

$$C = F + U + R + P.$$

V.2. Les rendements énergétiques: A chaque étape du flux énergétique qui traverse un organisme, une chaîne trophique ou un écosystème, de l'énergie est perdue, il est donc possible de calculer des rendements énergétiques :

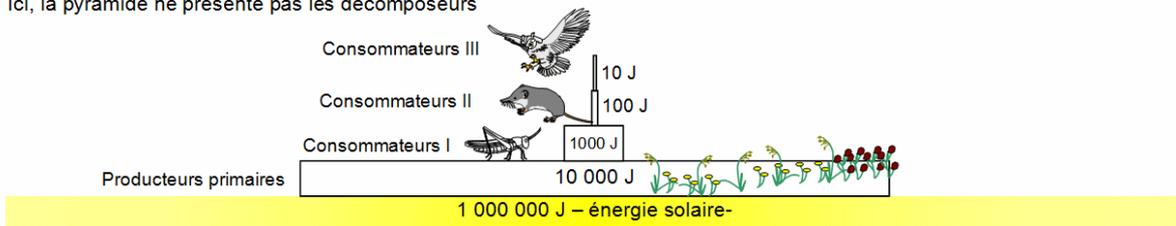
- Le rendement d'exploitation : rapport entre l'énergie ingérée C et l'énergie disponible dans la nourriture
- Le rendement d'assimilation : rapport entre l'énergie assimilée A et l'énergie ingérée C
- Le rendement de production nette : rapport entre l'énergie de production P et l'énergie assimilée A
- Le rendement de production brute : rapport entre l'énergie de production P et l'énergie ingérée C.

Rendement énergétique chaîne alimentaire

D'après compilations diverses - **avantage Word: dissociable, modifiable, recolorisable,.. en quelques clics-**

	Soleil	1%	Producteurs	0,1%	Herbivores	10%	Carnivores	10%	Décomposeurs
Energie KJ	10 000000	=>	100 000	=>	100	=>	10	=>	1

Ici, la pyramide ne présente pas les décomposeurs



Les rendements énergétiques présentent des variations en fonction de plusieurs facteurs tels que le régime alimentaire ou la physiologie propre à chaque animal ou groupe taxonomique ou encore le comportement social de l'espèce. Exemples : - Le rendement d'assimilation est essentiellement déterminé par la nature et la qualité de la nourriture ingérée, chez les herbivores, l'efficacité d'assimilation dépend du type de végétal ou de l'organe consommé.

En général, les aliments d'origine animale sont mieux assimilés que les substances végétales, riches en cellulose et en lignine, difficilement digestes.

- Les homéothermes ont des rendements d'assimilation plus élevés que les poïkilothermes, en revanche leurs rendements de production nette sont nettement inférieurs, à cause de la thermorégulation, qui implique un besoin énergétique considérable pour maintenir une température corporelle constante.

- Chez les insectes sociaux et les poissons, l'importance des dépenses d'activité diminue le rendement de production nette

V.3. Le rendement écologique : Les systèmes écologiques obéissent à la deuxième loi de la thermodynamique ou principe de dégradation de l'énergie dont une partie est dissipée sous forme de chaleur après métabolisme. Chaque organisme est caractérisé par son aptitude à réaliser les divers transferts d'énergie de niveau trophique en niveau trophique ; et à chaque étape du flux, de l'organisme mangé à l'organisme mangeur, et à l'intérieur de chacun d'eux de l'énergie est perdue. On appelle rendement écologique, le rapport de la production de la population de rang n à la production de la population de rang n-1.

VI. La circulation de la matière dans l'écosystème

VI.1. Les paramètres du flux de la matière dans l'écosystème

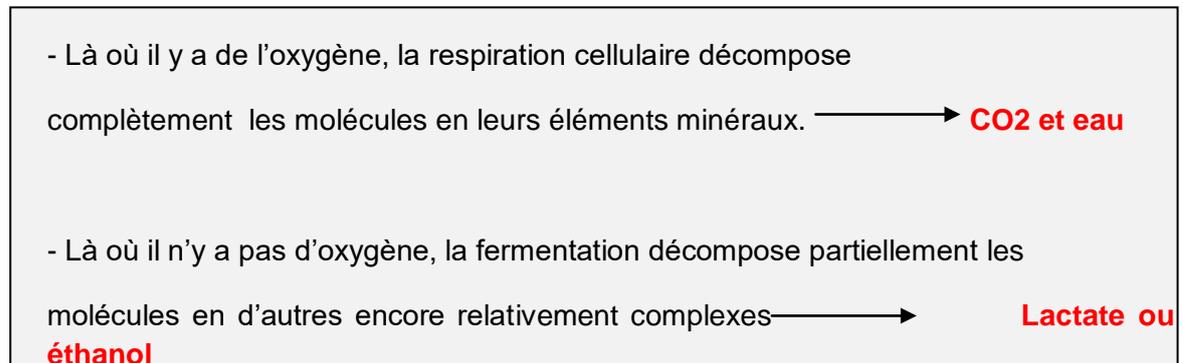
Le flux de matière est le mouvement des éléments au travers du réservoir biotique des organismes, sous forme de matière organique et des réservoirs abiotiques de l'environnement sous forme de matière minérale.

• La matière circule alternativement entre les mondes biotique et abiotique d'où l'expression cycle biogéochimique. Il y a deux types de cycles biogéochimiques :

- **Les cycles mondiaux ont une composante atmosphérique** : carbone, azote, oxygène, eau, soufre...
- **Les cycles locaux n'ont pas de composante atmosphérique** : phosphore, potassium, calcium...

La terre contient un stock de matière en quantité «finie». Les éléments chimiques ont été créés au début des temps et il n'y a plus d'apparition de matière actuellement sur la Terre (mise à part les poussières cosmiques). **La matière est donc « non renouvelable » contrairement à l'énergie.**

- Les éléments de la matière se combinent sous différents aspects : organiques gazeux, ions solubles dans l'hydrosphère, sels cristallisés dans les sédiments...
- Une quantité considérable de matière minérale pénètre dans les écosystèmes par le biais des producteurs qui la transforme en matière organique. Celle-ci circule des producteurs aux détritivores puis retourne dans les réservoirs abiotiques, sous forme minérale. **La décomposition est complète dans les sols bien aérés mais incomplète dans les milieux peu ou non oxygénés comme les boues et les eaux stagnantes.**



Les résidus incomplètement brûlés s'accumulent dans le milieu en lui conférant des odeurs comme au voisinage des marécages. La matière organique de ces sols très riches est peu à peu incorporée aux sédiments en formant l'humus, la tourbe, le charbon, le gaz naturel ou le pétrole.



Photo : zone marécageuse (dégagement d'odeur forte)

- Plus les conditions abiotiques sont favorables plus la décomposition est rapide. C'est pourquoi le sol des forêts tropicales contient peu d'humus car la matière organique y est rapidement dégradée et réinjectée dans la chaîne alimentaire. Les éléments minéraux quittant la phase organique peuvent être directement réinjectés dans la chaîne alimentaire (disponibles) ou s'incorporer aux sédiments. Dans ce cas, ils ne sont plus disponibles aux producteurs mais peuvent le redevenir lorsqu'ils sont libérés par l'érosion des roches puis solubilisés dans l'eau de ruissellement.

VI.2. Les cycles biogéochimiques

VI.2.1. le cycle de l'eau :

L'eau atmosphérique est très inégalement répartie, ce qui explique les fortes variations de pluviométrie observées selon les régions de la biosphère. Les 7/9 de leur volume total retombent à la surface des océans, et les 2/9 seulement sur les continents.

Notre planète contient un volume d'eau total d'environ 1,4 milliard de km³. Cette quantité d'eau demeure la même depuis son apparition sur Terre. Ces 1,4 milliard de km³ se composent de 97,17 % d'eau salée et de 2,83 % d'eau douce. L'eau salée couvre 2/3 de la surface de la Terre et se trouve dans les mers, les océans et les banquises. Le sel qu'elle contient provient des roches et des minéraux qui sont entrés en contact avec elle. L'eau douce provient essentiellement des précipitations.

On la trouve à différents niveaux :

- à 76 % dans les glaciers

- à 22,5 % sous la terre : nappes phréatiques et nappes profondes et captives
- à 1,26 % sur la terre : eaux de surface (lacs, rivières, étangs...)
- à 0,04 % dans l'air : nuages, pluies, brouillard, brume

La principale source d'eau douce de la planète provient de la fonte des glaces de la calotte glaciaire et des glaciers. La majeure partie du cycle de l'eau s'effectue donc entre océan et atmosphère.

Le soleil réchauffe l'eau des océans; celle-ci s'évapore dans l'air. Les courants d'air ascendants entraînent la vapeur dans l'atmosphère, où les températures plus basses provoquent la condensation de celle-ci en nuages. Les courants d'air entraînent les nuages autour de la Terre, leurs particules se heurtent, s'amoncellent et retombent en tant que précipitations. Certaines retombent sous forme de neige et peuvent s'accumuler en tant que calottes glaciales et glaciers, lorsque les températures augmentent, la neige fond et l'eau ruisselle.

Une grande partie des précipitations retournent aux océans ou s'infiltrent dans le sol. L'eau s'écoule aussi en surface. Certains écoulements retournent à la rivière et donc vers les océans. L'écoulement de surface et le suintement souterrain s'accumulent en tant qu'eau douce dans les lacs et rivières mais tous les ruissellements ne s'écoulent pas vers les rivières. Une grande partie s'infiltré dans le sol et une partie reste près de la surface du sol et peut retourner vers les masses d'eau de surface (et l'océan) comme résurgence d'eau souterraine.

Certaines nappes souterraines trouvent une ouverture dans le sol et émergent comme des sources d'eau douce. L'eau souterraine peu profonde est absorbée par les racines des plantes et rejetée dans l'atmosphère via la transpiration des feuilles. Une quantité des eaux infiltrées descend encore plus profondément et réalimente les aquifères (roche souterraine saturée), qui stockent d'énormes quantités d'eau douce pour de longues périodes. Bien entendu, cette eau continue à bouger et une partie retourne à l'océan où le cycle de l'eau "se termine" ... et "recommence".

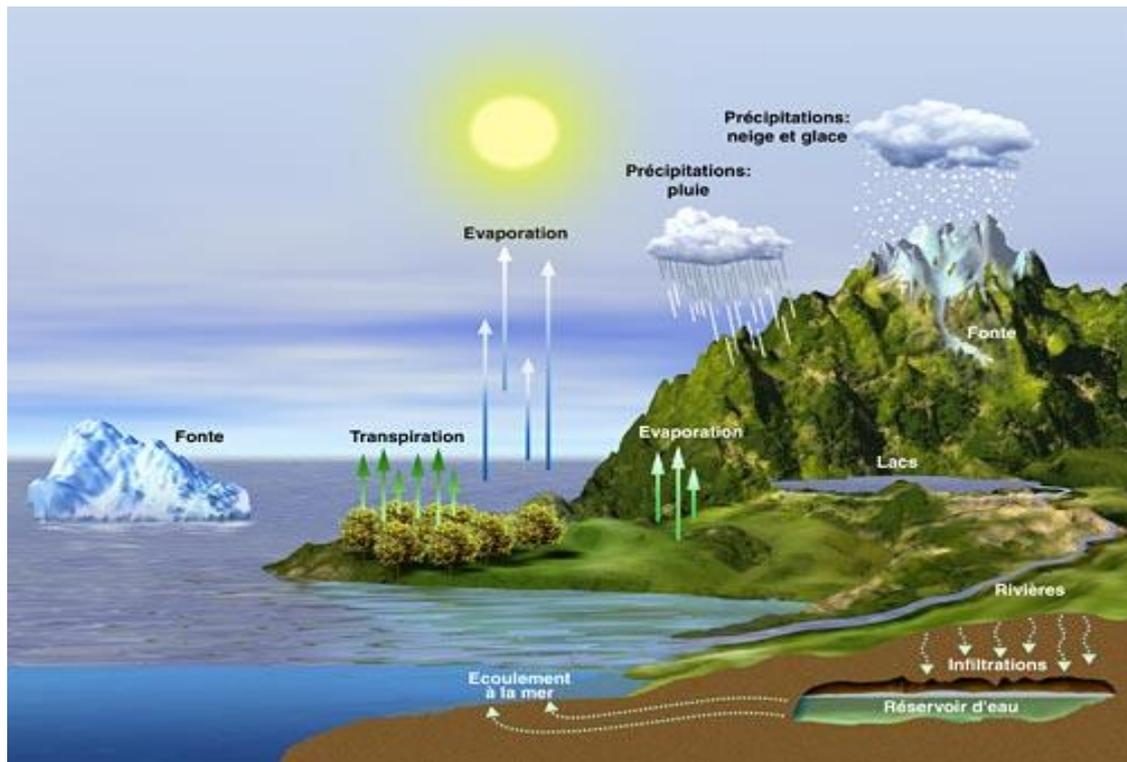


Figure 15 : Cycle de l'eau

(source : google.fr)

Les eaux parvenues à la surface des continents suivent généralement 3 voies différentes (Fig.) :

- La percolation ou infiltration,
- L'évaporation (très exactement l'évapotranspiration),
- Le ruissellement.

La percolation joue un rôle essentiel dans les écosystèmes terrestres puisqu'elle assure la **réhydratation des sols** qui **emmagasinent l'eau**. **L'infiltration** assure aussi **l'alimentation des nappes phréatiques et des rivières souterraines**.

L'évapotranspiration, somme de la quantité d'eau transpirée par les plantes et évaporée par les sols, joue **un rôle essentiel dans le cycle de l'eau sur les continents**. L'évapotranspiration constitue le phénomène opposé de l'infiltration. **Les végétaux** accélèrent beaucoup le processus de l'évapotranspiration en **transpirant des masses considérables d'eau par l'intermédiaire de leur système foliaire**.

Le ruissellement est favorisé par la destruction du couvert végétal et représente l'agent principal de **l'érosion des sols**.

VI.2.2. Cycle du carbone

Le cycle du carbone est un système de recyclage très complexe où les processus physiques, chimiques et biologiques sont intimement liés.

Le cycle du carbone semble équilibré sur l'échelle des temps géologiques. Cependant, les activités humaines participent au cycle du carbone, en modifiant les quantités et les flux de carbone de façon assez conséquente entre différents réservoirs. Cela a des implications climatiques majeures.

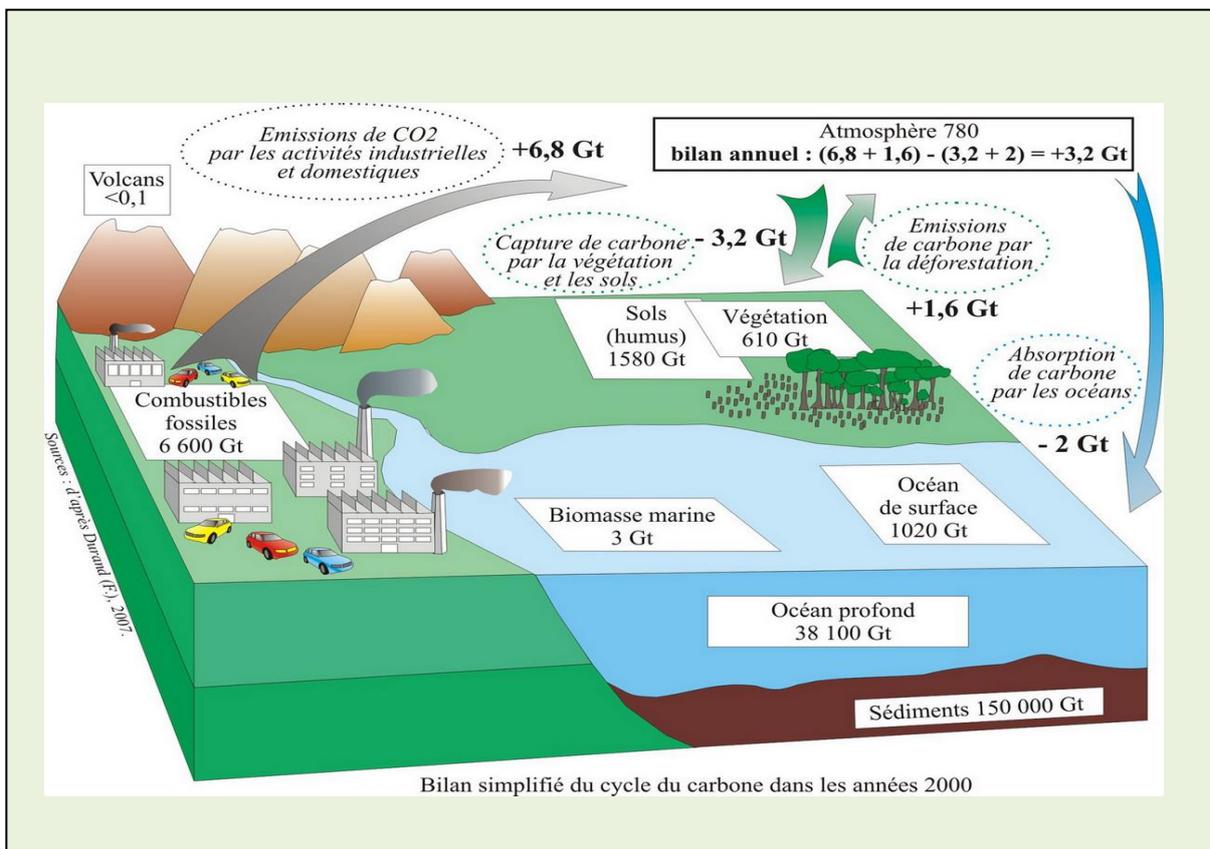


Figure 16 : Cycle du carbone simplifié

(source : google.fr)

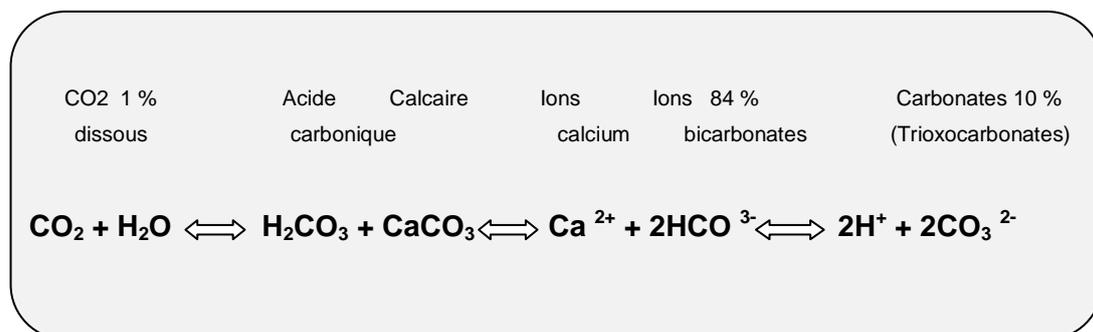
Il existe quatre réservoirs de carbone : l'hydrosphère, la lithosphère, la biosphère et l'atmosphère. La plus grande partie du carbone terrestre est piégée dans des composés qui participent peu au cycle : roches sous forme de carbonates et océan profond. L'essentiel du

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. Les échanges de carbone s'expriment en milliards de tonnes (gigatonnes) par an (Gt/an).

Le CO₂ atmosphérique est un réservoir mineur de carbone. Le réservoir aquatique du carbone contient 50 fois plus de carbone que l'atmosphère, il renferme un réservoir de 39 000 Gtc constitué par les masses d'eaux océaniques superficielles et profondes. Le principal réservoir de carbone est le CO₂ de la lithosphère (roches calcaires et combustibles fossiles) avec une quantité supérieure à 50 millions de Gtc. Il existe plusieurs réservoirs de petite taille, c'est-à-dire inférieure à 2000Gtc comprenant : l'atmosphère, la biosphère (plantes, sols, animaux).

-Les producteurs terrestres absorbent le carbone sous forme de CO₂ atmosphérique et les producteurs aquatiques l'absorbent sous forme d'ions bicarbonates HCO₃⁻ (aussi du CO₂ dissous et des ions carbonates CO₃²⁻).

-Les roches calcaires et les combustibles fossiles sont les principaux réservoirs du carbone. L'eau de pluie réagit avec le CO₂ de l'atmosphère en formant de l'acide carbonique (H₂CO₃), un acide faible. Ces pluies, légèrement acides, dissolvent les roches calcaires du continent en formant des ions calcium et bicarbonates transportés vers le compartiment aquatique par l'eau de ruissellement.



Une petite part d'ions calcium et bicarbonates précipite en roche calcaire au fond de l'océan. (Le calcaire est insoluble.) alors que la plus grande part est utilisée par les organismes

marins pour sécréter leur squelette et ou leur coquille. À leur mort, ils sédimentent en roches calcaires.

VI.2.3. Cycle de l'Azote

Les atomes d'azote sont nécessaires à l'élaboration des protéines et des acides nucléiques. Les producteurs absorbent l'azote sous forme d'ions ammonium NH_4^+ (milieu acide) et de nitrates NO_3^- (milieu basique). Le principal réservoir de l'azote est l'atmosphère.

L'azote est introduit par les bactéries fixatrices d'azote des nodules des légumineuses et du sol, les cyanobactéries des lacs, les dépôts atmosphériques, la fixation par les orages électriques et les engrais.

La majeure partie de l'azote de l'écosystème provient de la circulation locale (décomposition des déchets organiques puis réintroduction au niveau des racines des producteurs).

L'azote quitte l'écosystème via la vaporisation, la dénitrification et le lessivage des sols vers les cours d'eau (contribue à leur eutrophisation ou enrichissement en éléments minéraux).

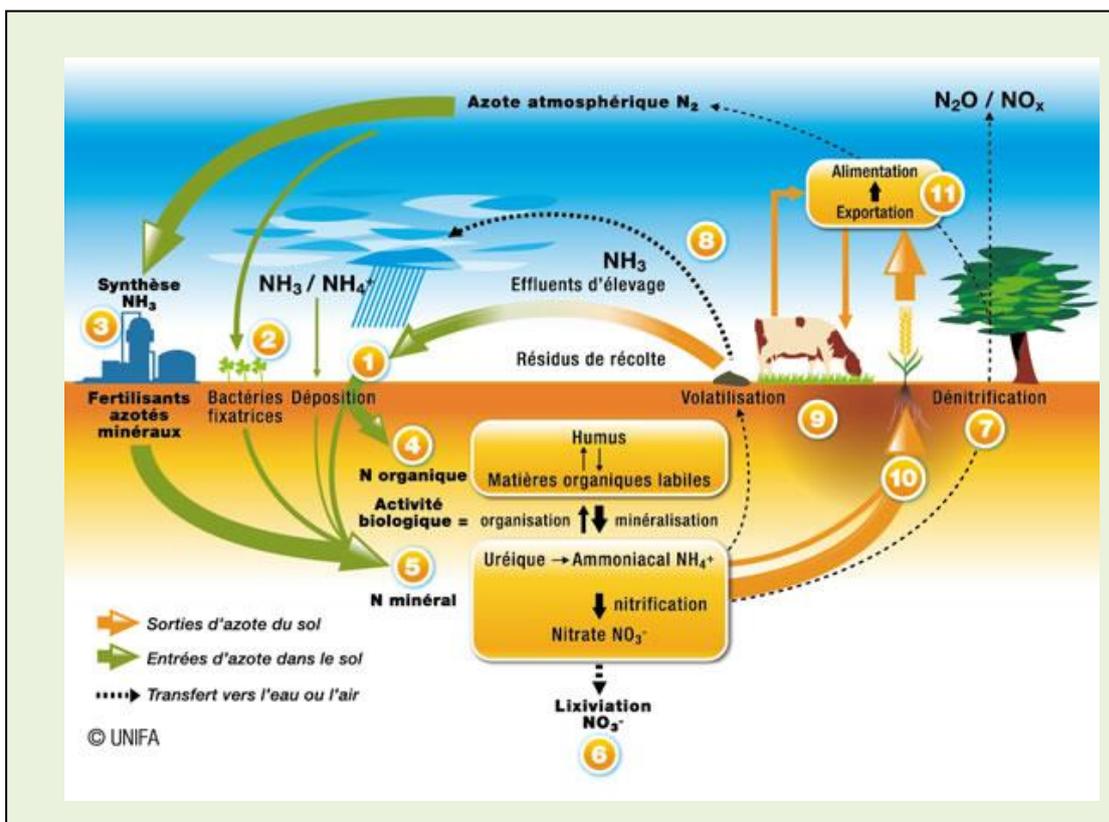


Figure 17 : Cycle de l'azote simplifié

(source : google.fr)

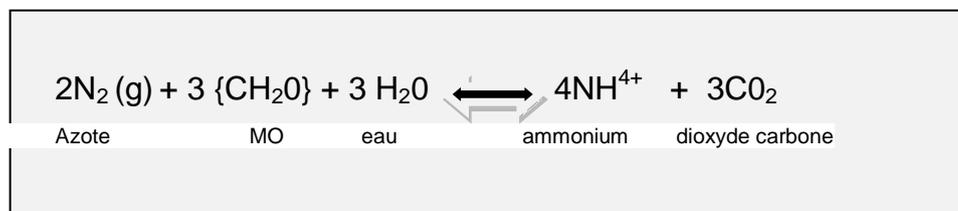
L'azote (N) est le premier gaz en importance dans l'atmosphère terrestre (78%). Il s'y trouve sous sa forme moléculaire normale diatomique N_2 , un gaz relativement inerte (peu réactif).

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^- .

Trois processus de base sont impliqués dans le recyclage de l'azote: la **fixation de l'azote** diatomique N_2 , la **nitrification** et la **dénitrification**.

La fixation de l'azote correspond à la conversion de l'azote atmosphérique en azote utilisable par les plantes et les animaux. Elle se fait par **certaines bactéries qui vivent dans les sols ou dans l'eau** et qui réussissent à assimiler l'azote diatomique N_2 . Il s'agit en particulier des **cyanobactéries et de certaines bactéries vivant en symbiose avec des plantes (entre autres, des légumineuses)**. La réaction chimique type est:

1



Dans les sols où le pH est élevé, l'ammonium se transforme en ammoniac gazeux:

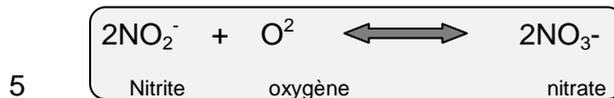
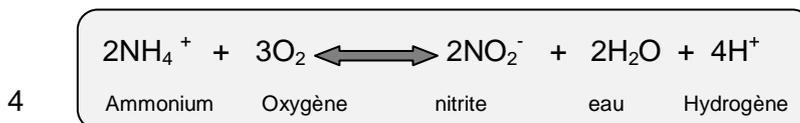
2



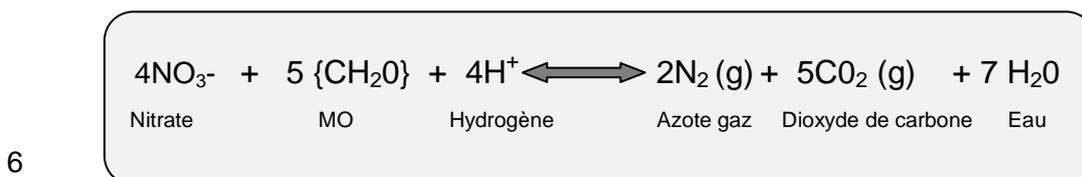
La réaction nécessite un apport d'énergie de la photosynthèse (cyanobactéries et symbiotes de légumineuses). Cette fixation tend à produire des composés ammoniaqués tels l'ammonium NH_4^+ et son acide conjugué l'ammoniac NH_3 . Il s'agit ici d'une réaction de réduction qui se fait par l'intermédiaire de substances organiques notées $\{CH_2O\}$ dans l'équation 1.

La **nitrification** transforme les produits de la fixation (NH_4^+ , NH_3) en NO_x (soient NO_2^- et NO_3^-), des nitrites et nitrates. C'est une réaction d'oxydation qui se fait par catalyse enzymatique reliée à des bactéries dans les sols et dans l'eau. La réaction en chaîne est de type:

La **nitrification** transforme les produits de la fixation (NH_4^+ , NH_3) en NO_x (soient NO_2^- et NO_3^-), des nitrites et nitrates. C'est une réaction d'oxydation qui se fait par catalyse enzymatique reliée à des bactéries dans les sols et dans l'eau. La réaction en chaîne est de type:



La **dénitrification** retourne l'azote à l'atmosphère sous sa forme moléculaire N_2 , avec comme produit secondaire du CO_2 et de l'oxyde d'azote N_2O , un gaz à effet de serre qui contribue à détruire la couche d'ozone dans la stratosphère. Il s'agit d'une réaction de réduction de NO_3^- par l'intermédiaire de bactéries transformant la matière organique. La réaction est de type :



L'activité humaine contribue à l'augmentation de la dénitrification, entre autres, par l'utilisation des engrais qui ajoutent aux sols des composés ammoniacés (NH_4^+ , NH_3) et des nitrates (NO_3^-).

L'utilisation des combustibles fossiles dans les moteurs ou les centrales thermiques transforme l'azote en oxyde d'azote NO_2^- . Avec N_2 et CO_2 , la dénitrification émet dans l'atmosphère une faible quantité d'oxyde d'azote N_2O . La concentration de ce gaz est faible, 300 ppb (parties par milliard). Cependant, il faut savoir qu'une molécule de N_2O est 200 fois plus efficace qu'une molécule de CO_2 pour créer un effet de serre.

On évalue aujourd'hui que la concentration en N_2O atmosphérique augmente annuellement de 0.3% et que cette augmentation est pratiquement reliée entièrement aux émissions dues à la dénitrification des sols.

Les études des carottes glaciaires de l'Antarctique ont montré que la concentration en N_2O atmosphérique était de 270 ppb à la fin du dernier âge glaciaire (il y a 10 000 ans) et que cette concentration s'est maintenue à ce niveau jusqu'à l'ère industrielle où elle a fait un bond pour atteindre son niveau actuel de 300 ppb; une augmentation de 11%.

VI.2.4. Cycle du Phosphore :

Les organismes ont besoin de phosphore pour fabriquer leur matériel génétique, leurs membranes cellulaires, leurs os et leurs dents.

Les producteurs absorbent le phosphore sous forme d'ions phosphates (PO_4^{3-}). Les roches sont le principal réservoir de phosphates. L'introduction du phosphore se fait par érosion des roches contenant du phosphate. La majeure partie du phosphore de l'écosystème provient de la circulation locale (décomposition des déchets organiques puis réintroduction au niveau des racines des producteurs). Le phosphore quitte l'écosystème via le lessivage des sols vers les cours d'eau (contribue à leur eutrophisation ou enrichissement en éléments minéraux) et via la sédimentation des phosphates dissous dans les cours d'eaux.

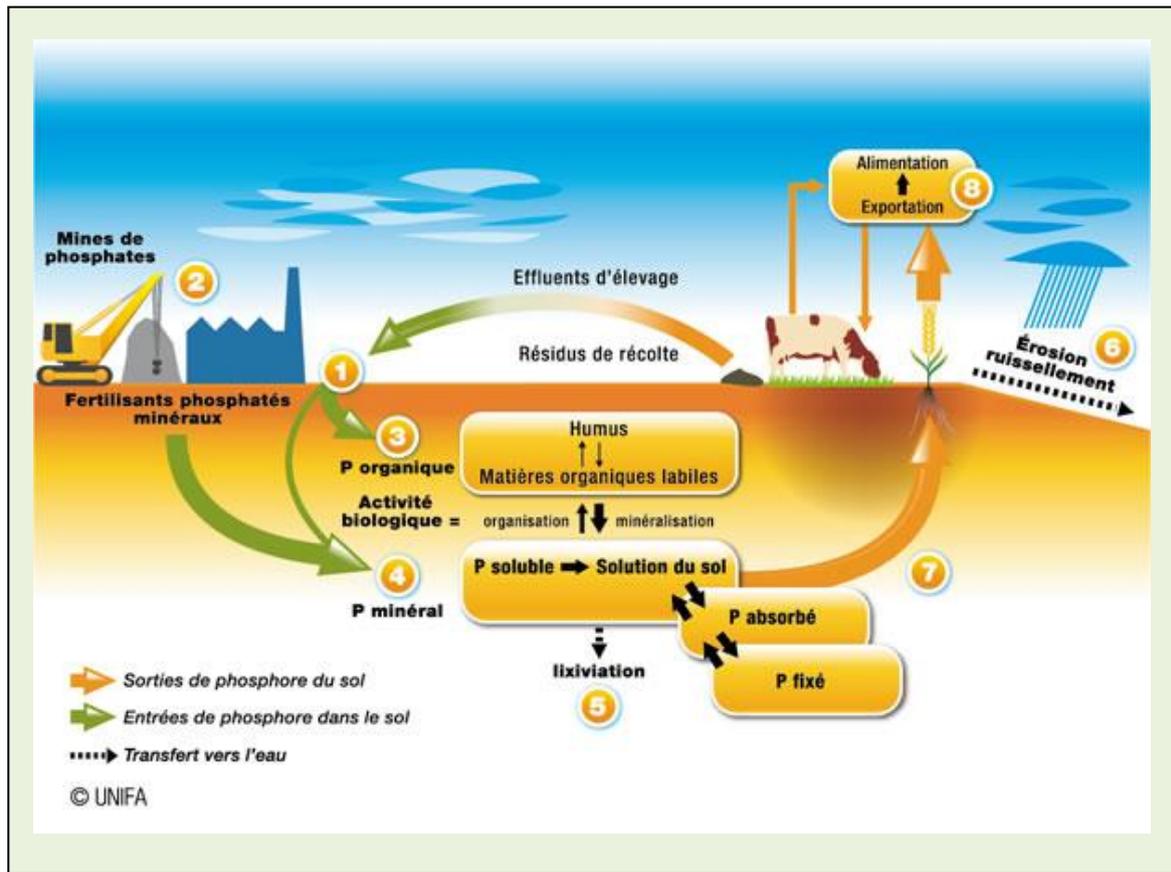


Figure 18 : Cycle du phosphore simplifié
(source : google.fr)

Comme dans le cas de l'azote (N), le phosphore (P) est important pour la Vie puisqu'il est essentiel à la fabrication des acides nucléiques ARN et ADN. On le retrouve aussi dans le squelette des organismes sous forme de PO_4 . Dans la Terre primitive, tout le phosphore se trouvait dans les roches ignées. C'est par l'altération superficielle de ces dernières sur les continents que le phosphore a été progressivement transféré vers les océans. On a calculé qu'il a fallu plus de 3 Ga (milliards d'années) pour saturer les océans par rapport au minéral apatite $[Ca_5(PO_4)_3OH]$, un phosphate. Le cycle du phosphore est unique parmi les cycles biogéochimiques majeurs: il ne possède pas de composante gazeuse, du moins en quantité significative, et par conséquent n'affecte pratiquement pas l'atmosphère. Il se distingue aussi des autres cycles par le fait que le transfert de phosphore (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.

Pratiquement tout le phosphore 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 phosphore, une petite partie seulement est accessible aux organismes vivants. Ce phosphore est absorbé par les plantes et transféré aux animaux par leur alimentation. Une partie est retournée aux sols à partir des excréments des animaux et de la matière organique morte. Une autre partie est transportée vers les océans où une fraction est utilisée par les organismes benthiques et ceux du plancton pour secréter leur squelette; l'autre fraction se dépose au fond de l'océan sous forme d'organismes morts ou de particules et est intégrée aux sédiments. Ces derniers sont transformés progressivement en roches sédimentaires par l'enfouissement; beaucoup plus tard, les roches sont ramenées à la surface par les mouvements tectoniques et le cycle recommence.

En milieu aquatique, le phosphate est présent sous forme d'ions phosphate selon la formule :



Le cycle biologique du phosphore est lié à la chaîne alimentaire et commence avec le plancton. Par des phénomènes de remontées d'eau (« upwellings ») et à partir du phosphore terrigène apporté par le ruissellement, une partie du phosphore est assimilée par le phytoplancton. Ce phytoplancton est ensuite assimilé par le zooplancton, les poissons ou des mollusques. Ces mêmes poissons peuvent être mangés par des oiseaux marins qui permettent au phosphore de revenir en partie sur la terre ferme à travers leurs excréments et leurs cadavres. La faune joue de manière générale un rôle important et longtemps sous estimé dans le cycle du phosphore. De même la remontée des saumons (qui meurent après la ponte dans le haut des bassins versants) permet de ramener de petites quantités phosphore à la terre, en quantités faibles à l'échelle des continents mais localement très significatives. La pêche contribue aussi à réintroduire du phosphore à terre.

Les sédiments marins sont un piège à phosphore. La concentration du phosphate dans le sédiment est de 0,02 à 0,1 mg/cm³. Le phosphore dans le sédiment se fossilise pour devenir de l'apatite

Conclusion :

La population humaine perturbe les cycles biogéochimiques de toute la biosphère. La déforestation met les sols à nus : leurs minéraux sont alors «lessivés» par la pluie puis

entraînés par le ruissellement vers les écosystèmes aquatiques en causant leur eutrophisation (enrichissement en minéraux).

- L'enrichissement en nutriments, des pelouses et des terres agricoles, finit par contaminer les écosystèmes aquatiques et y accélère leur eutrophisation "L'eutrophisation est un processus naturel (en centaines ou milliers d'années) qui transforme lentement les lacs en marais, puis en prairie et finalement en forêt. Elle est causée par le ruissellement des territoires avoisinants qui entraîne des minéraux et d'autres déchets organiques dans le lac.

- Les précipitations acides acidifient les sols et détruisent les végétaux : La combustion du bois, du charbon et d'autres combustibles fossiles libère des oxydes de soufre et des oxydes d'azote qui réagissent avec l'eau de l'atmosphère pour donner respectivement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique. Les écosystèmes qui ont un faible pouvoir tampon sont vulnérables. C'est le cas de la plupart des lacs car ils contiennent, en général, peu de carbonates dans leurs sols.

- Des produits toxiques, peu concentrés dans l'environnement, peuvent se concentrer fortement dans les organismes du fait de leur solubilité dans les graisses (bioaccumulation)