

Chapitre III: Structure et fonctionnement des écosystèmes

Notion de chaîne alimentaire

Du Grec « *Trophê* » signifiant «Nourriture». C'est la cascade des échanges trophiques (Alimentaires) dans un milieu peuplé d'animaux et de végétaux, l'ensemble formant une biocénose. Chaque organisme est prédateur du maillon précédent et proie du maillon suivant.

La boucle du cycle se referme schématiquement entre le dernier maillon prédateur et le premier maillon végétal par la décomposition de la matière organique (Cadavres) en matière minérale : Opération assurée par les décomposeurs. En réalité, chaque maillon de la chaîne comprend une partie des organismes consommée par le maillon suivant et une partie qui meurt naturellement ou accidentellement : Pollution, maladies, ... Il y a donc à chaque étape à la fois passage à l'étape suivante et retour au monde minéral par décomposition.

L'ensemble de chaînes alimentaires reliées entre elles au sein d'un écosystème et par lesquelles l'énergie et la matière circulent est appelé **réseau trophique**. Il se définit également comme étant l'ensemble des relations trophiques existant à l'intérieur d'une biocénose entre les diverses catégories écologiques d'êtres vivants constituant cette dernière (Producteurs, consommateurs, décomposeurs).

3.1.1. Producteurs

Les **producteurs** autotrophes sont pour la plupart des végétaux chlorophylliens photosynthétiques. Ces végétaux utilisent une fraction du flux solaire qu'ils accumulent sous forme d'énergie en le transformant en matières biochimiques élaborées à partir de gaz carbonique, d'eau et de sels minéraux.

Ces végétaux assurant la photosynthèse sont des **phototrophes**. **Ex. :** Dans les mers et océans, le phytoplancton assure ce rôle.

Il existe toutefois des micro-organismes autotrophes tirant l'énergie nécessaire à leur synthèse des réactions chimiques (Chimiosynthèse), qualifiés ainsi de **chimiotrophes**.

Ex. : Dans les profondeurs abyssales où les rayons du soleil ne parviennent pas, les bactéries thermophiles sont les premiers maillons de la chaîne.

3.1.2. Consommateurs

Les consommateurs hétérotrophes ne peuvent se nourrir qu'avec des matières organiques complexes (Glucides, acides aminés, triglycérides).

Ils dépendent donc entièrement des producteurs qui représentent la seule source d'énergie utilisable par animaux, de manière directe dans le cas des herbivores (Consommateurs primaires) ou indirecte dans celui des carnivores (Consommateurs secondaires et d'ordre supérieur).

Un type particulier de consommateurs secondaires est constitué par les ectoparasites et/ou les endoparasites d'autres animaux qui vivent de façon sédentaire.

3.1.2.1. Herbivores (Consommateurs primaires) : Les herbivores sont les consommateurs primaires (C1). Comme ils consomment des végétaux, ils constituent le second niveau de la chaîne alimentaire. Leur taille est fort variable : Cela va de petits organismes brouteurs d'algues aux grands mammifères végétaliens que sont les girafes et les éléphants, en passant par la plupart des insectes et les rongeurs. Certains ont une nourriture très spécialisée ; les oiseaux granivores ne consomment que des graines ; les insectes xylophages le bois des troncs...

3.1.2.2. Carnivores (Consommateurs à plusieurs degrés) : Les carnivores capturent la plupart du temps des proies. Par définition ce sont donc des prédateurs (Tiré du mot proie). Ils transforment donc de la biomasse animale. Suivant le degré de prédation, on distingue deux types de carnivores :

a. Consommateurs d'herbivores ou consommateurs secondaires (C2). **Ex. :** Un lion lorsqu'il capture une gazelle.

b. Consommateurs de carnivores ou consommateurs tertiaires (C3). **Ex. :** La vipère qui avale une musaraigne.

Comme ils ingèrent des prédateurs, on les qualifie souvent de superprédateurs. Il est d'ailleurs possible dans l'absolu de distinguer des niveaux trophiques d'ordre 4, 5 voire 6, notamment dans le milieu marin où les chaînes sont longues. Le même animal peut appartenir à plusieurs niveaux.

Ex. : Une buse est un simple C2 lorsqu'elle se nourrit de grillons, ce qui est très courant l'été. Elle devient un C3 si elle capture une taupe ou une musaraigne. Elle est C4 lorsqu'elle attrape une vipère qui, elle aussi, consomme des insectivores.

3.1.2.3. Parasites : Ils viennent allonger ces chaînes alimentaires. Un rapace qui est un C4 peut très bien porter des tiques (Acarien parasite) qui sucent son sang. Ces arthropodes sont alors des C5.

Mais les tiques peuvent elles aussi être victimes d'un superparasitisme puisqu'elles hébergent souvent des bactéries ou des virus pathogènes (Vecteurs de maladies). Les bactéries qui sont alors des C6 peuvent à leur tour être sujettes à un parasitisme viral par des bactériophages. A ce moment-là, les virus sont des C7.

3.1.3. Détritivores et décomposeurs

Utilisant la matière organique morte pour assurer leur métabolisme, leur croissance et leur reproduction, ces organismes se comportent bien comme des consommateurs.

L'aboutissement de leur action est la minéralisation des différents éléments. Ils assurent ainsi un rôle considérable dans le recyclage de la matière, ce qui leur permet de récupérer au passage l'énergie nécessaire à leur vie. Ce rôle est d'une importance capitale dans le fonctionnement des écosystèmes puisqu'il correspond au bouclage du cycle de la matière.

Il remet ainsi à la disposition des végétaux les éléments nutritifs indispensables à la réalisation de l'activité photosynthétique. Ce recyclage s'effectue en deux étapes et met en cause deux catégories d'êtres vivants : Les détritivores et les décomposeurs.

3.1.3.1. Détritivores

Ils représentent l'ensemble des individus qui se nourrissent de débris animaux ou végétaux. Leur action essentielle qui marque la 1ère étape de la transformation de la matière organique morte se manifeste par une fragmentation des débris en éléments plus fins que d'autres transformateurs pourront trouver dans leurs excréments ou dans les boulettes fécales.

Les matières que les détritivores ingèrent sont dilacérées au cours du transit intestinal. Une partie de ce qu'ils consomment va être digérée et transformée en biomasse. Le reste rejeté dans les fèces, contient encore de la matière organique, mais beaucoup plus dégradée qu'au départ puisqu'elle a subi une hydrolyse enzymatique dans leur tube digestif.

On distingue plusieurs catégories de détritivores selon le lieu ou le type de consommation.

a. Nécrophages : Ne se nourrissant que de cadavres d'animaux. **Ex.** : Nécrophores, insectes coléoptère souvent associé au bout de quelques jours à d'autres insectes adultes ou à des asticots de mouches sur les cadavres d'oiseaux, de mammifères ou d'autres animaux.

b. Coprophages : Individus mangeant des excréments. **Ex.** : Bousier.

c. Saprophages : Désigne les êtres vivants qui mangent des éléments végétaux en décomposition. **Ex.** : Cloportes qui trouvent leur nourriture sous les écorces pourries.

d. Géophages : Ce sont les animaux du sol qui assurent un rôle primordial dans l'humification. **Ex.** : Vers de terre qui « mangent leur chemin en avançant ». Ainsi, ils digèrent les fragments de matière végétale enfouis ou tombé sur le sol.

3.1.3.2. Décomposeurs

La première étape de dégradation de la matière organique morte, assurée par les détritivores, permet à des êtres microscopiques, des bactéries, des champignons ou des protozoaires d'accomplir la seconde étape de cette transformation.

Ces micro-organismes sont les responsables de la minéralisation proprement dite. Par des processus aérobies pour certains, anaérobies pour les autres, ils déclenchent des réactions de fermentation.

Celles-ci coupent les molécules organiques encore présentes sous forme de glucides, de protides ou lipides, telles que les acides humiques, en molécules minérales beaucoup plus petites : Les sels minéraux.

3.2. Principaux types de chaînes alimentaires

On distingue souvent trois types de chaînes trophiques :

□ **Chaînes alimentaires de prédateurs (De consommateurs)** : Celles-ci partant d'un végétal, passent de petits organismes à des organismes de taille de plus en plus grande.

Ex. : Végétal (Producteur)/Mouton (Herbivore)/Homme (Carnivore).

On rencontre souvent même deux niveaux successifs de carnivores.

Ex.: Chêne (Producteur)/Chenille (Herbivore)/Mésange (Carnivore 1)/Epervier (Carnivore 2).

En milieu aquatique, les chaînes trophiques des prédateurs sont toujours plus longues que dans le milieu terrestre.

□ **Chaînes alimentaires de parasites** : Ces dernières procèdent, à l'opposé des précédentes, d'organismes de grande taille vers des organismes de petite taille. Dans certains cas, plusieurs individus appartenant à des espèces fort éloignées au point de vue zoologique peuvent ainsi évoluer chacune à l'intérieur du corps de l'autre, le premier étant l'hôte du second et ainsi de suite.

Ex.: Sapin (Producteur)/Chenille(Herbivore)/Braconide(Parasite)/Chalcidien (Hyperparasite).

□ **Chaînes alimentaires saprophytiques** : Dans ce type de chaîne, la circulation de matière est à prédominance détritique. Les organismes qui constituent de telles chaînes sont dénommés des détritivores. On distingue parmi ces derniers des saprophages qui se nourrissent de matière organique en voie de putréfaction, des coprophages qui consomment les excréments des animaux, des nécrophages qui s'alimentent de cadavres et des géophages qui consomment de la litière en voie d'humification.

Ex. : Litière (Matière organique morte)/Vers de terre (Détritivore)/Bactérie (Décomposeur).

3.3. Flux d'énergie au niveau de la biosphère

Le transfert de l'énergie à travers un réseau trophique s'effectue toujours avec d'énormes pertes lorsque l'on passe d'un niveau de production au suivant. Ainsi, dans chaque maillon le flux correspond à la quantité d'énergie assimilée par les êtres qui le composent. Il tient compte non seulement de l'énergie fixée dans la matière organique vivante, mais aussi des pertes cataboliques qui ont permis cette fixation (**Fig**).

□ Flux au niveau des producteurs primaires (P1)

-Une partie de la lumière solaire absorbée par le végétal est dissipée sous forme de chaleur.

-Le reste est utilisé pour la synthèse de substances organiques (Photosynthèse) et correspond à la **Productivité primaire Brute (PB)**.

-Une partie de (**PB**) est perdue pour la **Respiration (R1)**.

-Le reste constitue la **Productivité primaire Nette (PN)**. Nous pouvons donc écrire : **$PB=PN+R1$**

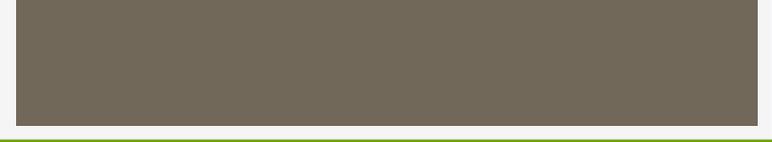
- Une partie de **(PN)** sert à l'augmentation de la biomasse végétale.
- Le reste de **(PN)** est utilisé par le niveau trophique suivant.

□ Flux au niveau des consommateurs herbivores (C1)

- Une partie seulement de la production végétale est ingérée par les herbivores qu'on appellera **Partie Ingérée (PI1)**.
- Tout le reste est mis à la disposition des détritivores et décomposeurs à la mort des végétaux. Comme il n'est pas utilisé par les herbivores nous le nommerons **(NU1)**.
- La quantité d'énergie ingérée (**Partie Ingérée**) **(PI1)** correspond à ce qui est réellement utilisé ou **Assimilé (A1)** par l'herbivore (Par digestion), plus ce qui est rejeté (**Non Assimilée**) **(NA1)** sous forme d'excréments et de déchets : **I1= A1+ NA1**
- La fraction assimilée **(A1)** sert d'une part à la **Productivité Secondaire (PS1)** et d'autre part aux dépenses **Respiratoires (R2)** : **A1=PS1+R2**

□ Flux au niveau des consommateurs carnivores (C2)

- Une partie seulement de l'énergie fixée par les consommateurs primaires sera ensuite utilisée pour le fonctionnement des organismes carnivores ou consommateurs secondaires. Nous l'appellerons **(PI2)**.
- Bon nombre de proies mourront de vieillesse et leurs cadavres seront livrés au bon vouloir des décomposeurs **(NU2)**.
- Une partie seulement de la biomasse consommée sera assimilée, soit **(A2)**.
- Tout ce qui sera éliminé par les fèces et les sécrétions diverses correspondra à **(NA2)**.
- Comme dans le niveau précédent, une bonne partie de l'énergie fixée par la digestion va servir au métabolisme des carnivores et sera éliminée sous forme de pertes respiratoires **(R3)**.
- Si **(PS2)** représente l'énergie gagnée qui s'ajoute à celle de la biomasse existante, le flux au niveau des carnivores est alors le suivant : **$A2 = PS2 + R3$** .



-Le processus se poursuit de la même manière si la chaîne trophique s'allonge à des niveaux de supracarnivores. Au vu des énormes pertes qui apparaissent à chaque niveau trophique, il est clair que les réseaux alimentaires sont toujours courts.

-Quant aux détritivores et aux décomposeurs, ils interviennent également dans le flux d'énergie qui traverse l'écosystème. Ce sont eux qui récupèrent l'énergie stockée dans tout ce qui n'est pas utilisé (NU1, NU2, NU3,...).

Ils en tirent tout ce qui est nécessaire à leur métabolisme et à l'accroissement de leur biomasse, et comme les autres consommateurs, perdent de l'énergie par le catabolisme respiratoire ou les fermentations.

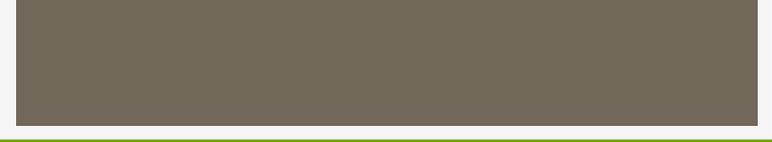
3.4. Pyramides écologiques, productivités et rendements bioénergétiques

3.4.1. Pyramides écologiques

Les réseaux trophiques présentent une structure bien définie caractérisée par la nature et le nombre d'organismes présents à chaque niveau des diverses chaînes alimentaires.

Celle-ci correspond à une valeur particulière du rapport «taille des individus/type de métabolisme» des diverses espèces constituant la communauté.

Les pyramides écologiques permettent de donner une représentation géométrique à la structure trophique d'un écosystème.



Elles se construisent par la superposition de rectangles de même hauteur, mais de longueur proportionnelle à l'importance du paramètre mesuré. Quelle que soit la biocénose dont elles représentent la structure trophique, les pyramides présentent deux caractères fondamentaux :

- La hauteur sera proportionnelle à la longueur de la chaîne alimentaire considérée, c'est-à-dire au nombre de niveaux trophiques qu'elle renferme ;
- Leur forme sera plus ou moins étalée selon l'efficacité de transferts d'énergie d'un niveau à l'autre.

Il y'a trois principaux types de pyramides :

□ **Pyramide des nombres** : Correspond au nombre d'organismes à chaque niveau trophique dans un écosystème donné, avec les plus grands nombre illustrés par une plus grande surface pour cette partie de la pyramide. Dans la plupart des pyramides des nombres, les organismes à la base de la chaîne trophique sont les plus abondants, chaque niveau successif est occupé par un nombre moindre d'organismes.

On observe aussi des pyramides des nombres inversées, dans lesquelles les plus hauts niveaux trophiques présentent plus d'organismes que les niveaux trophiques inférieurs. C'est le cas pour les décomposeurs, les parasites, les insectes herbivores vivant dans les arbres et d'autres organismes similaires.

Ex.: Un arbre peut fournir de la nourriture pour des milliers d'insectes consommateurs de feuilles.

Il est à noter que les pyramides des nombres sont d'une utilité limitée parce qu'elles ne donnent pas d'indications sur la biomasse des organismes à chaque niveau et elles n'indiquent pas la quantité d'énergie transférée d'un niveau à l'autre

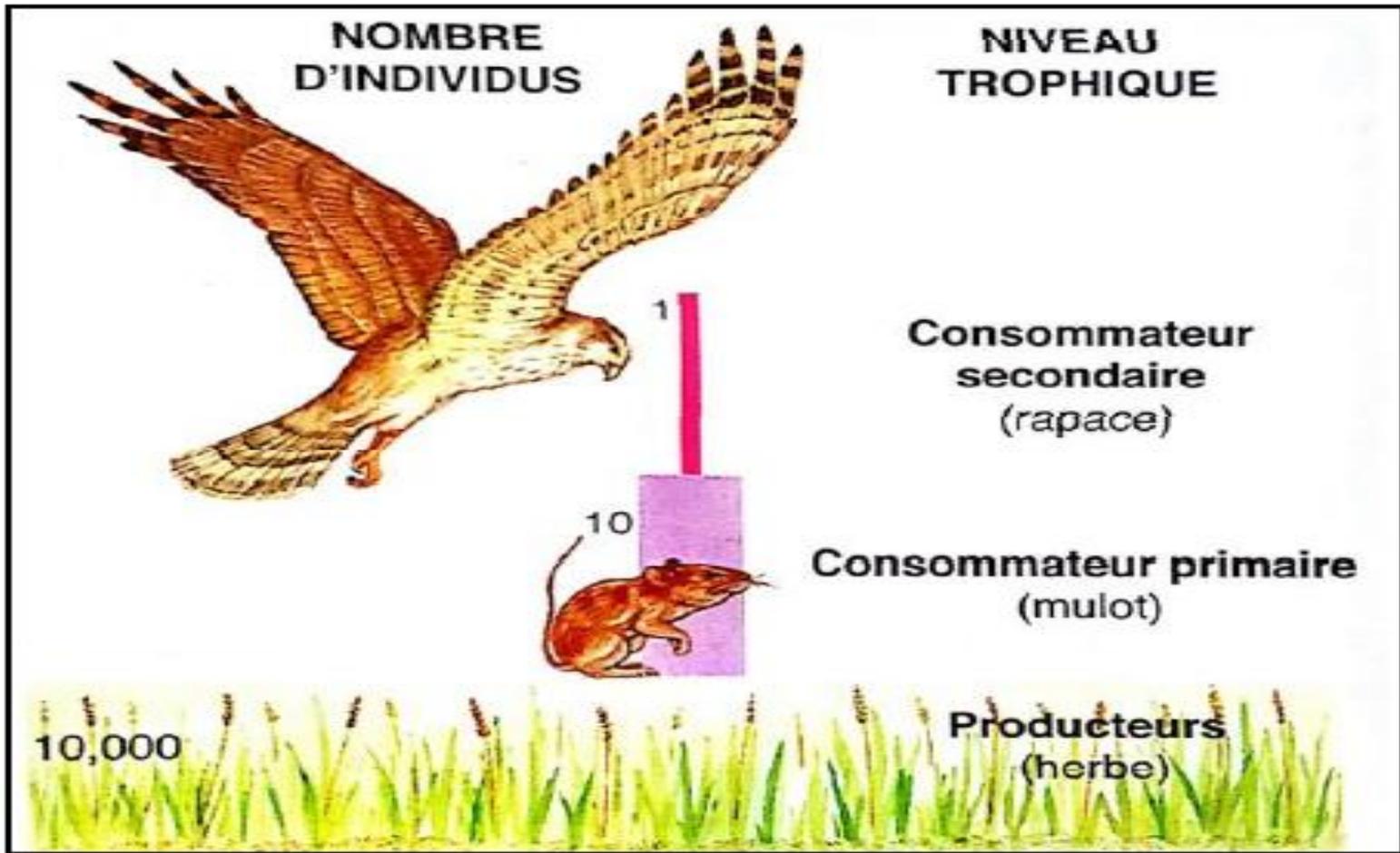


Figure 4 : Pyramide des nombres (Berg et al., 2009).

Pyramide des biomasses : Elle reflète mieux les relations trophiques dans un écosystème car elle exprime la biomasse présente à un instant donné à chaque niveau de la chaîne alimentaire.

La biomasse est une estimation quantitative de la masse totale de la matière vivante, elle indique la quantité d'énergie fixe à un moment particulier. Elle est représentée en tant que volume total, poids sec ou poids frais.

Habituellement, les pyramides de biomasse montrent une réduction progressive de biomasse dans les niveaux trophiques successifs. On estime qu'il y'a en moyenne une réduction d'environ 90% de la biomasse à chaque niveau trophique

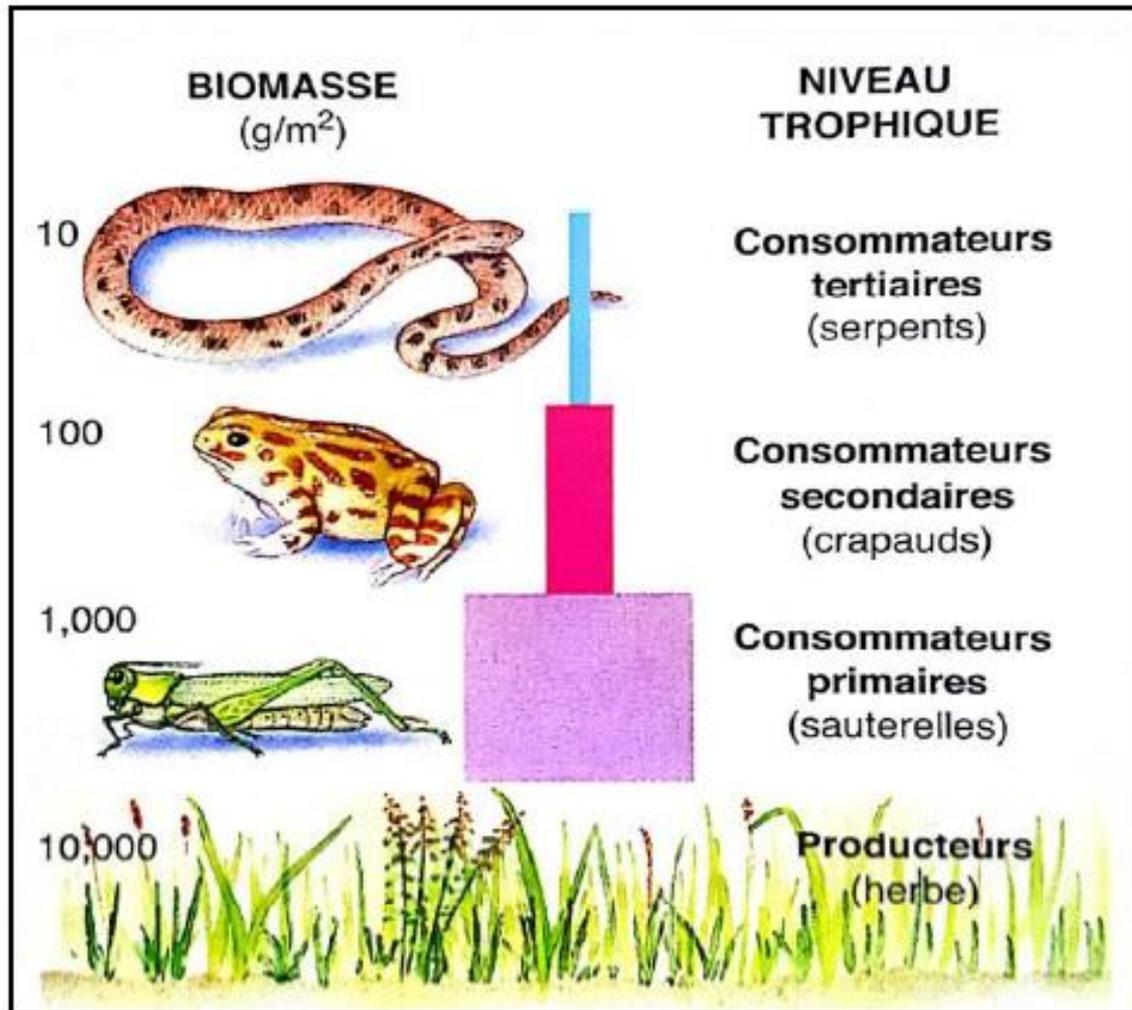
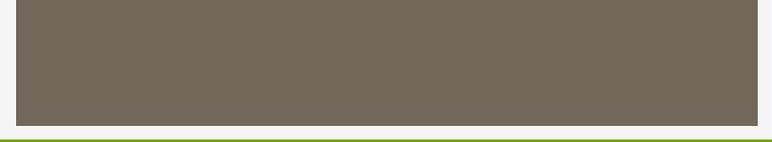


Figure 5: Pyramide des biomasses (Berg et al., 2009).



□ **Pyramide des énergies** : Illustre la quantité d'énergie souvent exprimée en kilocalories/m²/an contenue dans la biomasse de chaque niveau trophique. Ces pyramides qui ont toujours de grandes bases et deviennent progressivement plus petites à travers les niveaux trophiques successifs, montrent que la plupart de l'énergie se dissipe dans l'environnement en passant d'un niveau trophique au suivant.

En réalité, une fraction seulement du flux d'énergie entrant dans un écosystème est fixée dans les organismes de chaque niveau trophique et stockée dans la biomasse, le reste est dépensé pour assurer les besoins métaboliques des êtres vivants : Entretien, croissance, reproduction

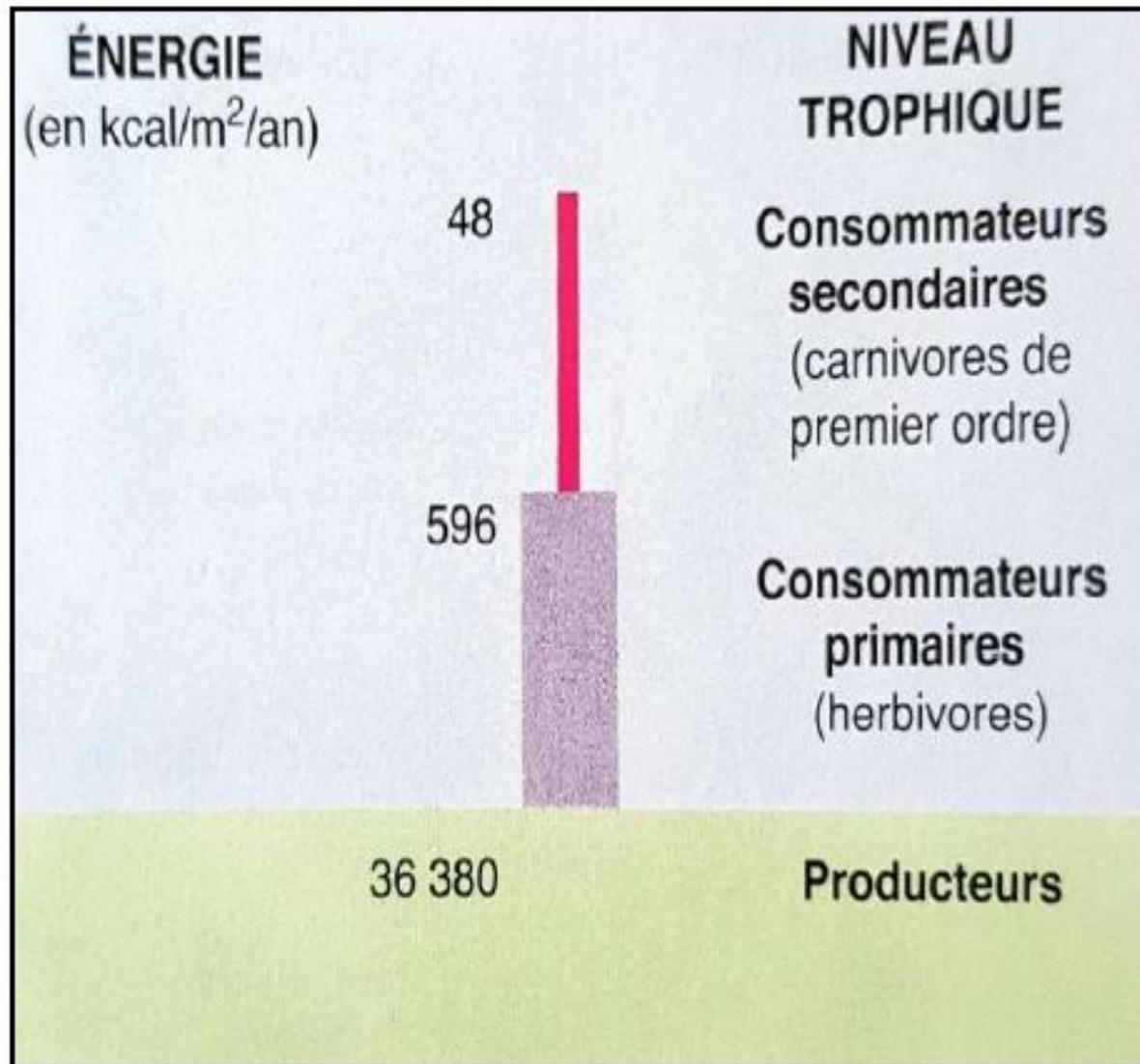


Figure 6 : Pyramide d'énergie (Berg et al., 2009).

3.4.2. Productivité

Dans chaque écosystème, une partie du flux d'énergie qui pénètre dans le réseau trophique n'est pas dissipée mais stockée sous forme de substances organiques.

Cette production ininterrompue de matière vivante (Biomasse) constitue un des processus fondamentaux de la biosphère, dont l'importance décroît d'ailleurs au fur et à mesure que l'Homme exerce une pression de plus en plus grande sur les ressources naturelles.

C'est en effet cette productivité des écosystèmes qui assure le renouvellement de ces ressources (Production primaire et secondaire).

3.4.2.1. Productivité primaire

La productivité primaire brute (PB) correspond à la quantité totale de carbone fixée sous forme de matière organique par les autotrophes exprimée par unité de surface et par unité de temps. C'est aussi l'équivalent de la fraction du flux solaire utilisée par les organismes photosynthétiques.

Elle est exprimée en règle générale en tonnes de carbone/hectare/an ou en gramme de carbone/m²/jour. On l'estime à 1% de la quantité totale d'énergie annuellement reçue par la végétation terrestre, laquelle est de l'ordre de 5.10²⁰ kcal.an⁻¹. Nous savons qu'une partie des matières organiques ainsi élaborées est utilisée par les végétaux pour leurs propres besoins métaboliques.

Si l'on tient compte de ces pertes, on en vient à dégager la notion de **production primaire nette (PN)** qui traduit la productivité des végétaux dans les écosystèmes continentaux et du phytoplancton dans l'océan (**PN = PB -R**).

3.4.2.2. Productivité secondaire

Désigne le taux d'accumulation de matière vivante (Donc d'énergie) au niveau des hétérotrophes : Consommateurs et décomposeurs. Il n'existe qu'un seul type de productivité secondaire.

En effet, quel que soit le niveau trophique dans lequel on se place, celle-ci consiste toujours en la conversion de la productivité primaire nette en différents tissus des multiples organismes hétérotrophes, grâce à un processus unique et général puisque les animaux et les micro-organismes décomposeurs ne font que transformer des matières organiques déjà produites.

Ce processus s'effectue avec un rendement assez faible, une bonne partie de l'énergie absorbée étant dissipée au cours des diverses phases de la respiration cellulaire et autres phénomènes métaboliques.

3.4.3. Rendements bioénergétiques

Le rendement énergétique (Ou efficience) est défini pour un niveau trophique comme le rapport entre le flux énergétique retenu et le flux entrant, c'est-à-dire le rapport « énergie fixée/ énergie reçue ».

On peut donc caractériser les divers organismes du point de vue bioénergétique par leur aptitude à diminuer ces pertes d'énergie. Cette aptitude est évaluée par les calculs de rendements :

□ **Rendement écologique** : De loin le plus intéressant car c'est le seul rendement qui mette en évidence les pertes énergétiques quand on passe d'un niveau alimentaire à un autre. C'est le rapport de la production nette du consommateur à la production nette du niveau trophique consommé.

□ **Rendement de consommation** : C'est le rapport entre l'énergie ingérée par un consommateur et celle qui est contenue dans la nourriture dont il dispose. Pour un prédateur ce sera la part de l'énergie contenue dans une proie qui sera effectivement ingérée. Toute la production nette mise à la disposition du consommateur n'est pas exploitée.

Un herbivore n'exploitera pas toute la production nette d'un végétal. Il délaissera par exemple les racines ou les parties ligneuses et préférera les pousses tendres. Un carnivore abandonnera les os et les phanères, qui contiennent pourtant de l'énergie.

□ **Rendement d'assimilation** : Lorsque les aliments sont ingérés par un consommateur, ils sont soumis au cours du transit dans le tractus digestif à des processus mécaniques et chimiques de digestion.

Une partie seulement traversera la muqueuse intestinale pour passer dans le sang, ce sont les nutriments. Le reste ne sera pas assimilé et sera éliminé avec les fèces. Le rendement d'assimilation est donc le rapport entre l'énergie assimilée des nutriments et l'énergie ingérée des aliments.

□ **Rendement de production nette** : Ce rendement intéresse les éleveurs, car il exprime la possibilité pour une espèce de former la plus grande quantité possible de viande à partir d'une quantité donnée d'aliments, vu que tout ce qui est assimilé ne participe pas à l'élaboration de la biomasse du consommateur.

Une part importante de la biomasse de l'énergie assimilée ne sera pas fixée car elle est mise à profit pour couvrir les besoins métaboliques qu'exigent la respiration, l'excrétion ou l'homéothermie... Ce rendement est le rapport de la production nette à l'énergie assimilée.

3.5. Circulation de la matière dans les écosystèmes et principaux cycles biogéochimiques

L'interaction continue qui s'exerce entre facteurs abiotiques et organismes vivants d'un écosystème, s'accompagne d'une circulation ininterrompue de matière entre biotope et biocénose sous forme de substances alternativement minérales et organiques.

Les diverses espèces (Autotrophes et/ou hétérotrophes) cherchent et absorbent sans relâche les substances indispensables à leur croissance, leur entretien, leur reproduction et rejettent dans le milieu des déchets minéraux et organiques plus ou moins complexes provenant de leur métabolisme. De la sorte, carbone, hydrogène, oxygène, azote, phosphore, soufre, potassium, chlor, calcium, magnésium, fer et une trentaine d'autre corps simples indispensables à l'édification de la cellule vivante sont sans cesse transformés en matières biochimiques (Glucides, lipides, acides aminés,...), ou absorbés sous forme d'ions inorganiques par les végétaux autotrophes, puis utilisés par les hétérotrophes : Animaux puis micro-organismes dégradeurs. Ceux-ci décomposent en dernier lieu les excréta, détritux végétaux et cadavres, en éléments minéraux hydrosolubles ou en composés gazeux qui retournent dans le sol, les eaux et l'atmosphère

. Ainsi les divers éléments biogènes circulent sans cesse par dissolution dans les eaux continentales superficielles, qui les amènent dans les océans, ou entre les continents ou les mers et l'atmosphère, entre lesquels s'effectuent d'incessants échanges gazeux.

A l'échelle de la biosphère, on désigne sous le terme de cycles biogéochimiques ce passage alternatif des éléments entre milieu inorganique et matières vivantes, et dont les diverses phases se déroulent au sein des écosystèmes. L'existence de tels cycles confère à la biosphère un pouvoir considérable d'autorégulation, lequel assure la pérennité des écosystèmes et se traduit par une remarquable constance du taux des divers éléments présents dans chaque milieu.

On peut distinguer trois types majeurs de cycles biogéochimiques : Cycle de l'eau, cycle des éléments à phase gazeuse prédominante et cycle des éléments à phase sédimentaire prédominante.

3.5.1. Cycle de l'eau

L'eau représente le constituant inorganique le plus abondant dans la matière vivante. Chez l'Homme adulte, elle constitue 63% du poids corporel. Près des 3/4 de la surface terrestre sont recouverts par l'hydrosphère (Soit 363 millions de km² sur un total

de 510 millions de km²). Les océans représentent à eux seuls 96,5% de la masse totale d'eau présente dans la biosphère. Il existe deux cycles de l'eau : Un cycle lent dans les océans et les nappes souterraines, et un cycle court sur la surface de la Terre et dans l'air. Si l'eau des cellules est remplacée après quelques heures, le cycle de l'eau dans les rivières dure en moyenne 16 jours. L'eau des lacs et des grandes mers intérieures connaît un cycle qui varie de 10 à 1 000 ans tandis que le cycle des eaux souterraines est d'environ 1 500 ans. L'eau des océans se renouvelle quant à elle tout les 2 500 à 3 500 ans. Le cycle le plus lent se situe dans les glaciers qui peuvent retenir l'eau pendant une période de 9 500 à 15 000 ans.

Le cycle de l'eau consiste en un échange d'eau entre les différents compartiments de la Terre : L'hydrosphère, l'atmosphère et la lithosphère (**Fig.7**).

Sous l'effet du flux solaire, l'eau des nappes liquides superficielles (Mers, fleuves, lacs,...) s'évapore. L'eau transpirée par les végétaux (Evapotranspiration) s'évapore également. Les masses d'air chargées de vapeur d'eau se déplacent tandis que celle-ci condense en nuages. Leur refroidissement ramène cette eau à la surface du sol ou des mers sous forme de précipitations (Pluie, neige, grêle ou plus rarement par condensation sur des corps froids « rosée »). Le 7/9 de leur volume total retombe à la surface des océans et le 2/9 seulement sur les continents. La majeure partie du cycle de l'eau s'effectue donc entre océan et atmosphère. La circulation de l'eau dans la lithosphère emprunte trois voies :

□ **Percolation (Infiltration) :** Phénomène de migration de l'eau à travers les sols (Perméables). Joue un rôle essentiel dans les écosystèmes terrestres puisqu'il assure la réhydratation des sols qui emmagasinent l'eau, en particulier dans les couches superficielles. L'infiltration assure aussi l'alimentation des nappes phréatiques.

□ **Evaporation et évapotranspiration :** Constitue le phénomène opposé de l'infiltration. Certes, l'évaporation à la surface d'un sol joue un rôle important dans le régime hydrique, mais les végétaux accélèrent beaucoup ce processus en transpirant des masses considérables d'eau par l'intermédiaire de leur système foliaire et/ou racinaire. Cette transpiration du couvert végétal vaporise chaque année des quantités d'eau considérables. L'évapotranspiration, somme de la quantité d'eau transpirée par les plantes et évaporée par les sols, joue donc un rôle essentiel dans le cycle de l'eau sur les continents. Il s'évapore en effet jusqu'à 50 tonnes d'eau chaque année d'un hectare de forêt feuillue.

Ruissellement : Phénomène d'écoulement des eaux à la surface des sols. Favorisé par la destruction du couvert végétal, il représente l'agent principal de l'érosion des sols. Ruissellement superficiel et résurgence des nappes souterraines assurent l'alimentation des cours d'eau qui restituent en dernier lieu ce volume d'eau à l'océan mondial.

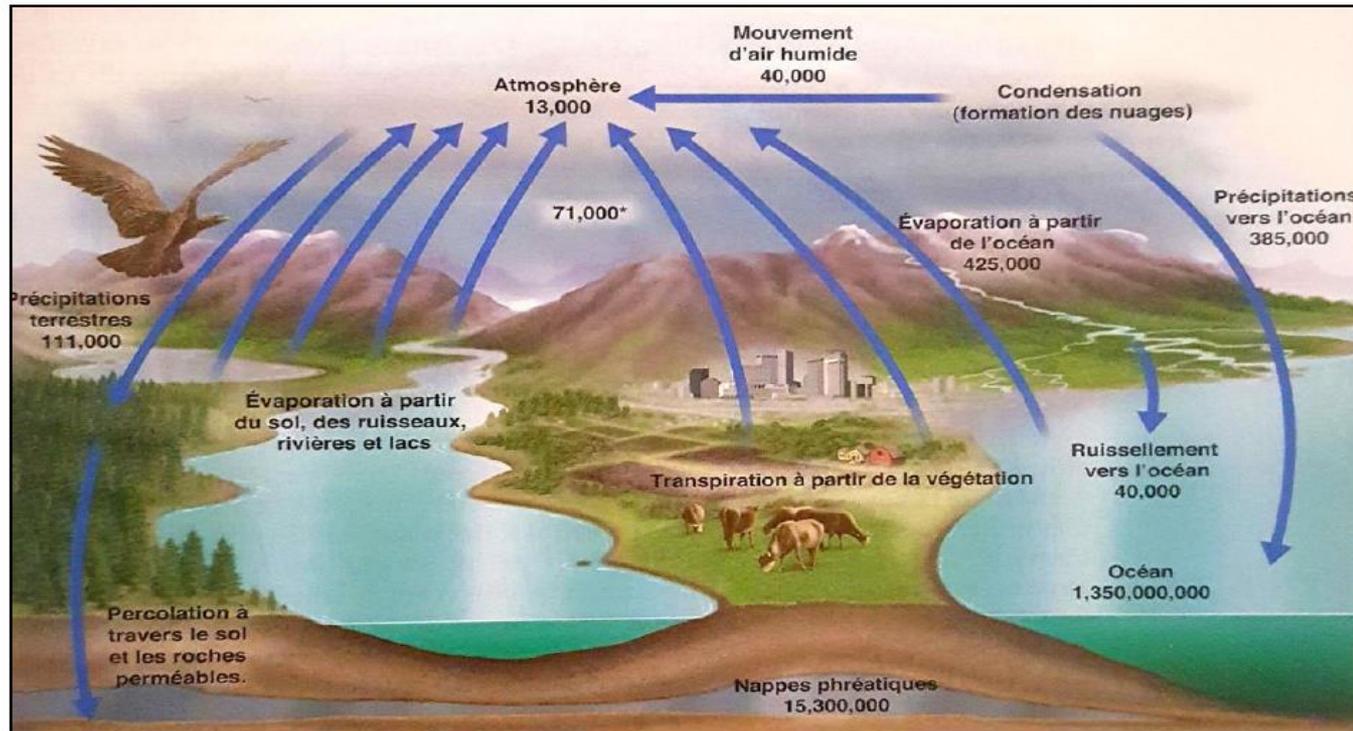


Figure 7 : Cycle de l'eau (Berg et al., 2009).

3.5.2. Cycles biogéochimiques à phase gazeuse

3.5.2.1. Cycle du carbone

Le carbone est le plus important des éléments chimiques caractérisant le monde vivant. A l'échelle de la planète, il existe trois réservoirs de carbone : L'atmosphère, les océans et la biosphère continentale. Les échanges entre l'atmosphère et la biosphère sont essentiellement liés à l'activité des êtres vivants. Lors de la photosynthèse, les producteurs autotrophes fixent le carbone pour assurer leurs constituants organiques. Les consommateurs permettent par ailleurs le transfert de ces constituants dans les divers réseaux trophiques. A l'opposé, d'autres échanges biochimiques vont équilibrer ces prélèvements en rejetant dans l'atmosphère un flux identique de carbone : 100 Gt (Gigatonnes) issu de la respiration cellulaire et la fermentation (Décomposition de la matière organique). De même, les éruptions volcaniques, les industries et les véhicules de transports, rejettent du (CO₂) dans l'atmosphère.

Quant aux flux du carbone entre l'air et l'eau des océans, ils sont équilibrés et du même ordre. Les échanges physicochimiques aux interfaces des deux éléments font apparaître un rejet de 100 Gt de (CO₂) dans l'atmosphère et une absorption identique de 100 Gt de ce gaz par l'eau. La quantité de dioxyde de carbone dissous dans les océans est environ 50 fois plus grande que celle qui est présente dans l'atmosphère. Dans les sols, il se produit souvent un ralentissement du cycle du carbone : Les matières organiques ne sont pas entièrement minéralisées mais transformées en un ensemble de composés organiques acides qui s'accumule dans diverses formations sédimentaires (Acides humiques). Il se produit une stagnation et même un blocage du cycle du carbone. C'est le cas de la constitution de grands dépôts de pétrole et d'autres hydrocarbures fossiles, lesquels malgré leur forte teneur en carbone, n'interfèrent pas dans les conditions naturelles avec le cycle du carbone (**Fig.8**).

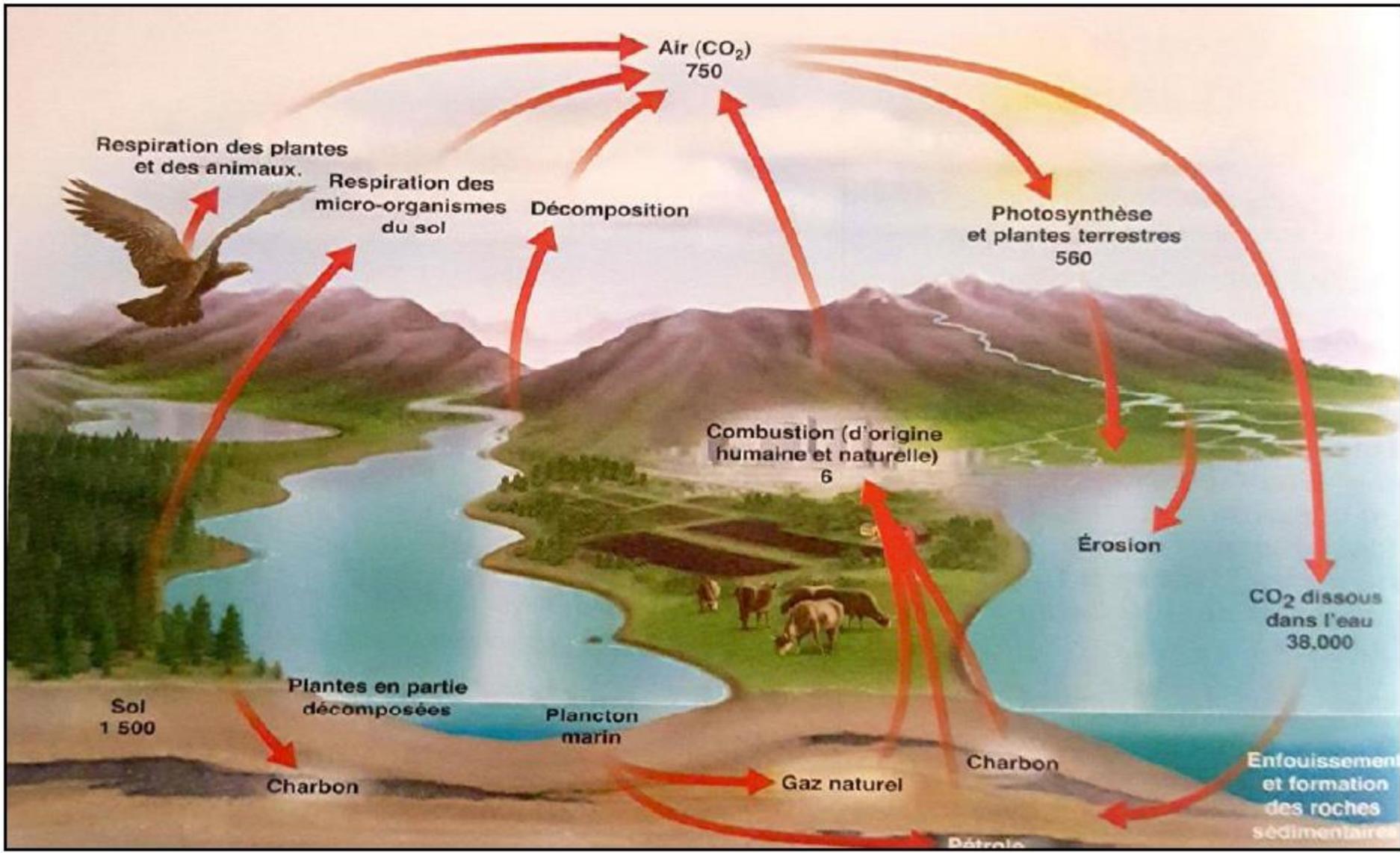


Figure 8 : Cycle du Carbone (Berg et al., 2009).

3.5.2.2. Cycle de l'azote

L'azote minéral est présent à profusion sur notre planète puisque sa forme gazeuse (N_2) (Azote atmosphérique) représente la plus grande partie de l'air que nous respirons (78 % du volume). En revanche, les ions nitrates (NO_3^-) constituent la seule forme d'azote minéral assimilable par les plantes avec les ions ammonium. Cet élément se retrouve entre autres dans les acides aminés constituant les protéines et dans les bases azotées de l'ADN.

La plupart des êtres vivants ne peuvent utiliser la molécule (N_2). De ce fait, ils ont besoin de ce qu'on nomme **l'azote fixé** 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). Des processus sont nécessaires pour transformer l'azote atmosphérique (N_2) en une forme assimilable par les organismes : La fixation de l'azote diatomique (N_2), la nitrification et la dénitrification.

□ **La fixation** : 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 (Ex. : Légumineuses), qui ont la faculté de produire de l'ammoniac (NH_3) à partir de l'azote et de l'hydrogène atmosphérique grâce à une enzyme : La Nitrogénase. L'ammoniac peut aussi provenir de la décomposition d'organismes morts (Action des bactéries saprophytes) sous forme d'ions ammonium (NH_4^+). Dans les sols où le pH est élevé, l'ammonium se transforme en ammoniac gazeux.

□ **La nitrification** : Transforme les produits de la fixation (NH_4^+ , les ions nitrates NH_3) en (NO_x) (Soient NO_2^- et NO_3^-), des nitrites et nitrates. Les végétaux absorbent grâce à leurs racines les (NO_3^-) et, dans une moindre mesure, l'ammoniac présent dans le sol, et les incorporent dans les acides aminés et les protéines. Les végétaux constituent ainsi la source primaire d'azote assimilable par les animaux.

□ **La dénitrification** : Grâce aux bactéries dites dénitrifiantes (Transformant la matière organique), l'azote retourne à l'atmosphère sous sa forme moléculaire (N_2), avec comme produit secondaire du CO_2 et de l'oxyde d'azote (N_2O) (Gaz à effet de serre). 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^-) (Fig.9).

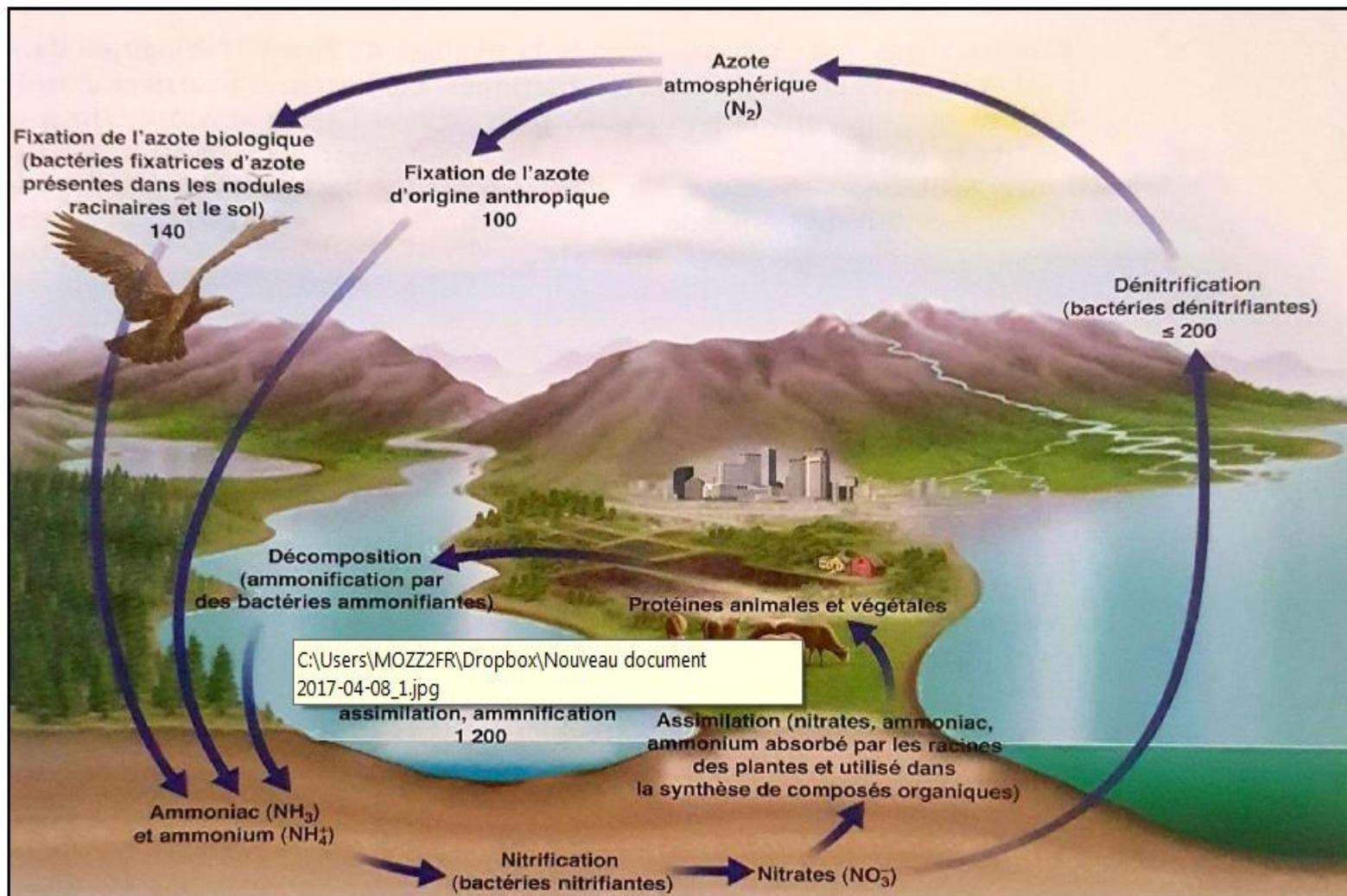


Figure 9 : Cycle de l'azote (Berg et al., 2009).

L'industrie, en mettant à la disposition des agriculteurs de nombreux fertilisants de synthèse, intervient pour une certaine part dans le cycle de l'azote. Beaucoup d'engrais azotés sont en effet synthétisés par réduction de l'azote de l'air. Comme ils doivent libérer soit des ions (NO_3^-), soit des ions (NH_4^+), leur obtention met en jeu des réactions chimiques utilisant de l'acide sulfurique ou de l'acide nitrique. Ces deux engrais, avec le nitrate de calcium ainsi obtenus chimiquement, sont les plus usités. Ceux qui apportent directement des nitrates ont une action très rapide, mais sont une source importante de pollution parce qu'ils sont très solubles.

3.5.3. Cycles biogéochimiques à phase sédimentaire

3.5.3.1. Cycle du phosphore

En dépit de la rareté du phosphore minéral dans la biosphère, cet élément reste important pour la matière vivante (Constituant de l'ADN, de l'ARN et de l'ATP). Il possède un cycle qui passe par deux phases : L'une qui se déroule dans les écosystèmes terrestres, l'autre dans les écosystèmes aquatiques. Son réservoir principal est constitué par diverses roches qui cèdent peu à peu leurs phosphates aux écosystèmes.

Dans le milieu terrestre, la concentration en phosphore assimilable est souvent faible et joue le rôle de facteur limitant. Ce phosphore est mis en circulation par lessivage (Ou érosion) et dissolution et introduit ainsi dans les écosystèmes terrestres où il est absorbé par les végétaux. Ceux-ci l'incorporent dans diverses substances organiques et le font ainsi passer dans les réseaux trophiques. Les phosphates organiques sont restitués au sol avec les cadavres, déchets et excréta produits par les êtres vivants, attaqués par les microorganismes et retransformés en orthophosphates minéraux, à nouveau disponibles pour les plantes vertes et autres autotrophes.

Le phosphore introduit dans les écosystèmes aquatiques par les eaux de ruissellement, rejoint les océans, permettant ainsi le développement du phytoplancton et des animaux des divers maillons de la chaîne trophique. Un retour partiel des phosphates des océans vers les terres émergées s'effectue grâce à la pratique de la pêche ou par les excréments des oiseaux marins piscivores.

Cependant, dans les océans, le cycle du phosphore se fait avec des pertes, puisqu'une partie importante des phosphates entraînée en mer se retrouve immobilisée dans les sédiments profonds (Fragments de cadavres de poissons non consommés par les détritivores et les décomposeurs). Lorsqu'il n'existe pas de courants ascendants permettant la remontée des eaux en surface, la pénurie de phosphore devient un facteur limitant. Le cycle du phosphore est donc incomplet et ouvert. Du fait de sa rareté et en raison de ces pertes pour le cycle, le phosphore constitue donc le principal facteur limitant qui contrôle la majeure partie de la production primaire (**Fig.10**).

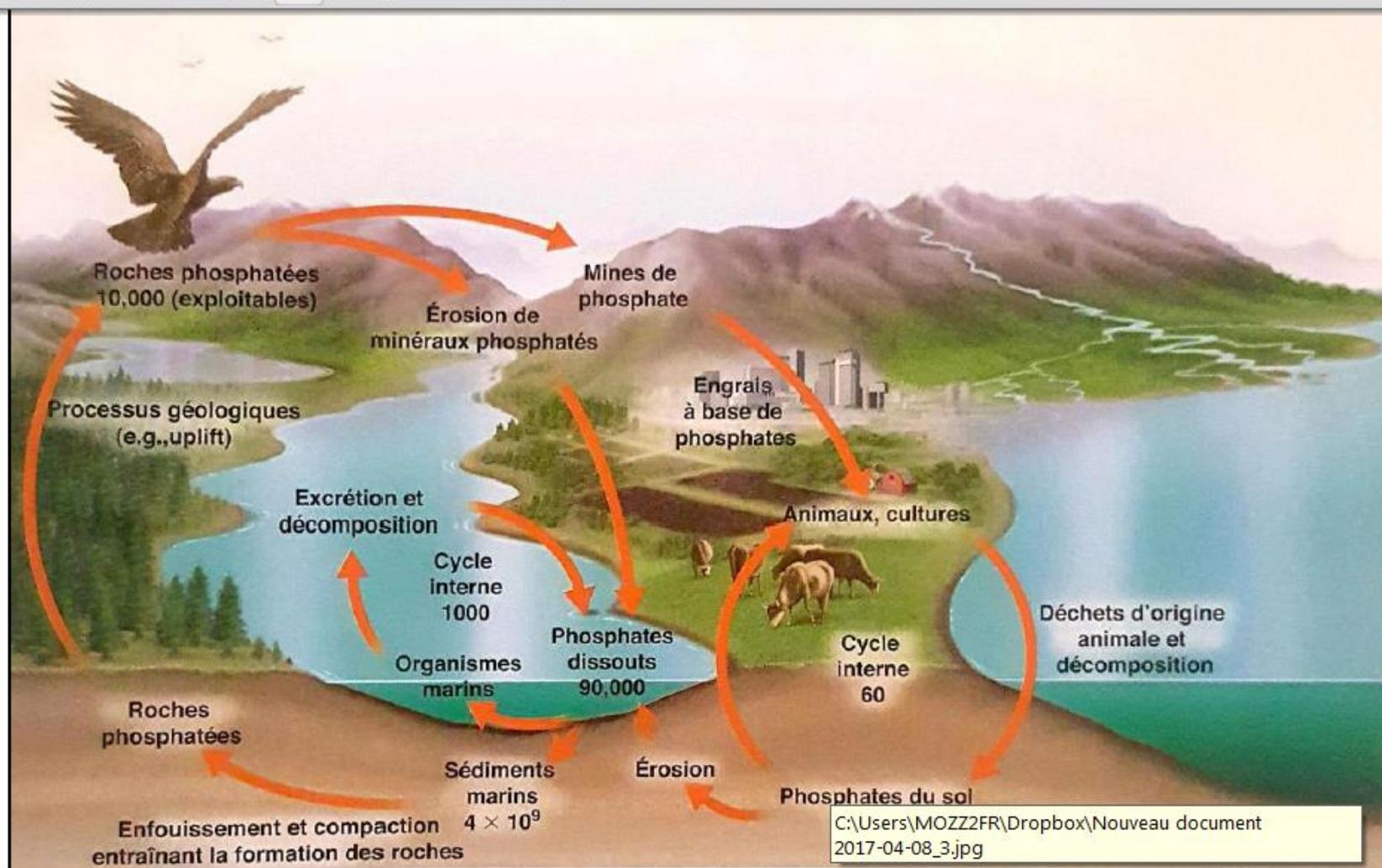


Figure 10 : Cycle du phosphore (Berg et al., 2009).

3.6. Stabilité des écosystèmes

Les ressources disponibles, régulées par les facteurs physico-chimiques du milieu, contrôlent les chaînes trophiques depuis les producteurs jusqu'aux prédateurs. C'est la théorie du contrôle des communautés par les ressources (Eléments nutritifs), ou **contrôle Bottom-up** (Du bas vers le haut). **Ex.** : Teneur en phosphates des océans/Quantité des planctons/Taille des poissons.

A l'inverse, le fonctionnement d'un écosystème dépend de la prédation exercée par les niveaux trophiques supérieurs sur les niveaux trophiques inférieurs : C'est le **contrôle Top-down (Du haut vers le bas)**. **Ex.** : Effet régulateur d'une population de loups (Carnivores) sur une population de lièvres (Proies).

Les deux contrôles interviennent simultanément dans les écosystèmes et peuvent être complémentaires. Les modifications par l'Homme d'un niveau trophique peuvent amplifier l'un ou l'autre des deux contrôles et entraîner une instabilité de l'écosystème. **Ex. 1:** Augmentation des ressources en éléments nutritifs (Amplification du contrôle Bottom-up) : Cas de la pollution organique des eaux (Eutrophisation). **Ex.2** : Diminution d'abondance d'un prédateur de haut niveau (Amplification du contrôle Top-down) : Cas de la chasse ou de la pêche.

3.7. Perturbation des cycles biogéochimiques

Etymologiquement, polluer signifie : Profaner, salir. Le terme de pollution désigne non seulement l'ensemble des rejets des composés toxiques que l'Homme libère dans la biosphère, mais aussi les substances qui, sans être vraiment dangereuses pour les organismes, exercent une influence perturbatrice sur l'environnement. Cette définition englobe aussi bien les polluants produits par l'activité humaine ainsi que les substances naturelles qui accroissent la pollution d'origine anthropique. **Ex.** : Gaz et poussière émis par les éruptions volcaniques, les incendies de forêts...

3.7.1. Pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique est due au rejet intempestif de substances diverses dans l'atmosphère. Elle a accompagné la civilisation industrielle et s'est accrue au cours des dernières décennies dans l'ensemble des pays développés. On considère qu'il y'a trois grandes sources de polluants : Industrie (Cimenteries, raffineries, usines chimiques, sidérurgies, papeteries...), voitures et poids lourds (Moteur à essence et surtout moteurs Diesel) et chauffage (Chaudières domestiques, industrielles, centrales thermiques).

A ces trois grandes sources, viennent s'ajouter des substances rejetées dans l'atmosphère et les océans (Par les volcans), des composés chimiques tels que les chlorofluorocarbones (CFC), la maîtrise non complète de mise en oeuvre de certaines techniques accompagnant les réactions nucléaires, l'agriculture intensive...

Généralement, les polluants atmosphériques ne séjournent pas indéfiniment dans l'atmosphère : Si la pollution est faible et s'il n'y a pas de vent, la dispersion est dite normale et les gaz se dispersent en altitude. En revanche, les polluants retombent en panache si la pollution est forte (Sous l'action du vent). Sous l'action de la lumière et en présence d'air humide, les oxydes d'azote et de soufre favorisent la formation de pluies acides. Grâce au jeu du lessivage et de l'érosion hydrique, les polluants sont transférés des sols vers l'hydrosphère. En définitive, les phénomènes géochimiques vont avoir pour conséquence d'amener la masse des polluants, tôt ou tard dans l'océan mondial qui constitue le dernier réceptacle des agents toxiques.

3.7.2. Pluies acides

Les canadiens et les scandinaves ont été les premiers à observer l'acidification croissante de leurs lacs et la mort des arbres engendrées par les pluies acides. L'acidification provient des masses d'air qui se sont chargées de gaz polluants, présents surtout au-dessus de zones industrielles. Les gaz incriminés se combinent aux gouttelettes d'eau de l'atmosphère et finissent par former des précipitations ou des brouillards acides. Il s'agit notamment de dioxyde de soufre (SO₂) (Activités humaines : Industrie, transport, chauffage, volcanisme,...) ; oxyde d'azote (NO, NO₂-, NO₃) (Combustions industrielles, domestiques, automobiles) ; ammoniac (NH₃⁺) (Elevage) ; chlore (Cl⁻) (Combustion des PVC) ; ozone (Photolyse du dioxyde d'azote) ;...

3.7.3. Eutrophisation

L'eutrophisation naturelle est un processus qui s'échelonne sur des milliers d'années. Sa durée dépend de la profondeur initiale des plans d'eau. Cette évolution peut être considérablement accélérée par les activités anthropiques. Il s'agit là d'un des impacts les plus graves de l'Homme sur les écosystèmes aquatiques.

Si le carbone, l'oxygène et l'hydrogène sont toujours disponibles au sein des eaux en quantités suffisantes pour l'activité métabolique du phytoplancton, il n'en est pas de même pour l'azote et le phosphore, issus du lessivage des sols. Dans les conditions naturelles, les

flux d'entrée de ces deux éléments demeurent faibles et sont surtout réduits en période estivale (Due à la faible pluviométrie). Qu'elles soient agricoles (Elevage intensif, épandage d'engrais, irrigation), industrielles ou domestiques (Lessive riche en phosphates,...), les activités humaines ont profondément modifié l'importance, la périodicité et la composition quantitative des apports en azote et en phosphates aux écosystèmes lacustres. Le maintien de flux importants en été, en raison des rejets liés à l'activité humaine, alors que l'intensité lumineuse est maximale, conduit à une stimulation de l'activité photosynthétique, donc de la croissance exubérante du phytoplancton. Les eaux superficielles sont alors fortement colorées (Phénomène de fleur d'eau ou « bloom »). Le développement anarchique de ces organismes s'accompagne d'une situation catastrophique pour le fonctionnement de l'écosystème et le zooplancton n'est plus en mesure d'assurer sa fonction naturelle de régulation de la biomasse des producteurs primaires. Ceux-ci se développant très rapidement, présentent fréquemment des structures coloniales non ingérables par les crustacés filtreurs. De plus, ils excrètent des substances répulsives, voire toxiques. Seuls quelques poissons de vase peuvent subsister.

3.7.4. Trou dans la couche d'ozone

L'ozone stratosphérique se forme spontanément à partir d'atomes d'oxygène libérés par la molécule de dioxygène. Elle forme une couche d'environ 3mm d'épaisseur entre 15 et 25km d'altitude, absorbant la quasi-totalité des ultraviolets (U.V.) à faible longueur d'onde émis par le soleil. Sous l'action des U.V., l'ozone se brise et donne une molécule de dioxygène et un atome d'oxygène qui se recombinent naturellement. L'énergie des U.V. incidents est ainsi fractionnée par la rupture et la recombinaison des molécules d'ozone. Sans la couche d'ozone, les U.V. à haute énergie risqueraient d'atteindre les êtres vivants dont les molécules organiques seraient altérées, compromettant gravement la survie des êtres vivants. Sa réduction est à l'origine d'une augmentation notable des cancers de la peau et diverses autres pathologies, notamment oculaires.

La découverte du trou de la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique a fait prendre conscience des dégâts irréparables causés à l'atmosphère par les activités industrielles. Dès les années 1970, des scientifiques ont montré les dangers d'une utilisation massive des composés chlorofluorocarbonés considérés comme les principaux responsables de l'agression de la couche d'ozone. Ces gaz lorsqu'ils parviennent dans la stratosphère sont

soumis à l'action de photons très énergétiques qui peuvent leur arracher un atome de chlore. Ce composé va former avec les atomes d'oxygène libérés lors du cycle de l'ozone une molécule d'oxygène et un atome de chlore qui s'attaquera à une autre molécule d'ozone.

3.7.5. Effet de serre

L'azote et l'oxygène gazeux qui constituent la majeure partie de l'atmosphère n'absorbent pas et n'émettent pas de radiations thermiques. C'est la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et quelques autres gaz présents dans l'atmosphère en quantités bien moindres (Méthane, protoxyde d'azote) qui absorbent une partie des radiations thermiques qui quittent la surface. Ils font donc office de « couvercle » imparfait vis-à-vis de ces radiations, ce qui génère la différence de 20 à 30°C entre la température moyenne réelle de la surface terrestre qui avoisine les 15°C et la température que l'on observerait en l'absence de gaz à effet de serre. On appelle cet effet « couvercle » l'effet de serre naturel et les gaz sont logiquement connus en tant que gaz à effet de serre.

Quant au renforcement de l'effet de serre, incriminé dans le réchauffement global il est causé par les gaz présents dans l'atmosphère à cause des activités humaines comme l'agriculture intensive, l'exploitation minière, la combustion des combustibles fossiles (Charbon, pétrole, gaz) associée à une déforestation importante, et dont les conséquences sur la vie sur Terre sont catastrophiques (Fonte des calottes glaciaires, augmentation du niveau des mers provoquant des inondations, tempêtes, sécheresse...). Des quantités de plus en plus importantes de dioxyde de carbone ont été émises dans l'atmosphère au cours des 200 dernières années et ces émissions se sont accrues au cours des 50 dernières années. Chaque année, les nouvelles émissions continuent à s'ajouter au carbone présent dans l'atmosphère à hauteur de 8 000 millions de tonnes et qui est susceptible d'y rester pour plus d'un siècle.