

Polycopié préparé

Par

SARRI Madani

Matière : **Fonctionnement des écosystèmes**
Master Académique : **Ecologie des zones arides et semi arides**

Année universitaire 2020 – 2021

Intitulé du Master : Ecologie **des Zones Arides et Semi-arides**

Intitulé de la matière : **Fonctionnement des écosystèmes**

UEF1 / Semestre 1 / Crédits et Coefficient :

► **Objectifs de l'enseignement de cette matière :** Compréhension des processus fonctionnels relatifs au transfert d'énergie et circulation de matière au sein des systèmes biologiques. Evaluation, bilan et diagnostic des perturbations.

► **Connaissances préalables recommandées :** Connaissances de bases en écologie générale

► **Mode d'évaluation :** Contrôle continu, EMD, Exposés

CONTENU DE LA MATIERE

Introduction : Généralités sur le fonctionnement des écosystèmes

Flux d'énergie

Aspects thermodynamiques

Notions générales, définitions des paramètres quantitatifs, méthodes de mesures en milieu forestier et herbacé.

Transfert d'énergie le long d'une chaîne trophique

Notion de bilan et de rendements énergétiques

Autre analyse des circuits trophiques : circulation de l'énergie en classes de taille

Cycle de la matière

Circulation de la matière à l'échelle de la biosphère

Les grands types de cycles biogéochimiques et leur perturbation

Circulation des éléments à l'échelle des écosystèmes ; cas des écosystèmes forestiers et des écosystèmes steppiques ; définitions des paramètres du cycle, méthodes d'évaluation, facteurs de variations, bilan

Cycle de l'eau

Circulation de la matière organique

Cycle des éléments biogènes

Phénologie : Définition, méthodes

Biodiversité et fonctionnement des écosystèmes

GENERALITES SUR LE FONCTIONNEMENT DES ECOSYSTEMES

Introduction : Un écosystème se présente comme une unité intégrée (avec ses différentes composantes abiotiques et biotiques) qui fonctionne et ce, malgré l'entrée en compétition d'un grand nombre d'organismes pour les ressources. Tout être vivant, même les plus petits (bactérie, champignons, etc.) constitue une source de nourriture pour un autre organisme vivant, ce qui constitue ce qu'on appelle la chaîne trophique ou chaîne alimentaire et consiste en un transfert de matière et d'énergie d'un niveau trophique à un autre.

Structure de l'écosystème

L'écosystème est composé de deux éléments : un biotope et une biocénose.

a – Le biotope : Le biotope est caractérisé par un certain nombre de facteurs qui sont essentiellement des facteurs abiotiques (qui ne dépendent pas des êtres vivants), parmi lesquels on distingue des facteurs physiques et d'autres chimiques :

Facteurs physiques

- **Facteurs climatiques** : Précipitations, Température, Luminosité, Vents, Humidité relative, Etc.
- Facteurs géographiques,
- Facteurs édaphiques.

Facteurs chimiques

- *Teneur en oxygène,
- *Teneur en sels minéraux,
- *PH, ...

NB : Certains de ces facteurs sont périodiques : (comme la luminosité, la température, la pluviosité), d'autres ne le sont pas (comme les orages, les cyclones, les incendies, etc.).

Facteurs abiotiques non climatiques

En milieu aquatique : l'eau va intervenir par plusieurs caractères :

- Par sa tension superficielle qui va permettre le déplacement de certains animaux.
- Par son pH près de la neutralité, mais on trouve des endroits où le pH varie de 5 à 9.
- Par ses gaz dissous : CO₂, O₂, H₂S qui peut empoisonner certaines espèces animales.
- Par les sels minéraux : dans l'eau de mer, la moyenne des sels minéraux est de 34,48 g/kg d'eau, mais cette moyenne est très variable : de 33 pour mille à 37 pour mille. La Mer Rouge en contient 41 pour mille, la Mer Baltique 12 pour mille.

La salinité est due essentiellement à NaCl pour 72% et au MgCl₂ pour 12%, les autres sels sont beaucoup moins importants.

Dans le sol: les facteurs abiotiques importants sont :

- **L'eau** : indispensable pour la faune et la flore,
- **La texture et la structure du sol** : la nature du substrat et la taille des particules interviennent dans la nutrition et l'aération des plantes,
- **La salinité** ou quantité de sels est très variable et est importante dans la détermination d'une flore caractéristique (halophytes, nitrophytes, psammophytes, etc.),
- **Le pH** dépend de la nature du sol mais aussi de l'humus (acide humique)

b– La Biocénose : Elle est composée de trois catégories d'êtres vivants : les producteurs, les consommateurs et les décomposeurs.

Circulation d'énergie

L'énergie solaire constitue la source essentielle de la matière sur Terre. Elle est estimée à 13×10^{23} calories. Environ 30% de cette énergie solaire est immédiatement réfléchi vers l'espace sous forme de lumière, 20% environ est absorbée par l'atmosphère terrestre. La plus grande partie des 50% restants est absorbée par la terre elle-même et transformée en chaleur.

Une partie de l'énergie absorbée sert à l'évaporation des eaux des océans et à la formation des nuages qui, à leur tour, donnent la pluie et la neige. L'énergie solaire, combinée à d'autres facteurs est aussi responsable des mouvements de l'air et de l'eau qui participent à l'établissement de différents types de climats sur toute la surface terrestre.

Les plantes vertes et d'autres organismes photosynthétiques captent moins de 1% d'énergie solaire. Ces êtres transforment cette énergie en énergie chimique, électrique et mécanique utilisée par ces mêmes organismes (dits autotrophes) et par tous les autres êtres vivants, dits hétérotrophes, et assurant ainsi leur nutrition et donc leur survie et leurs diverses activités. Ce flux d'énergie est l'essence de la vie.

Ainsi, pour les êtres vivants, l'énergie est la capacité d'accomplir un travail. Ce travail peut être produit au niveau de la cellule (synthèse de molécules, déplacement des organites et des chromosomes d'un endroit à un autre, transport de substances, etc.), du tissu, de l'organe, de l'individu, du peuplement, de la communauté, de l'écosystème et de la Biosphère.

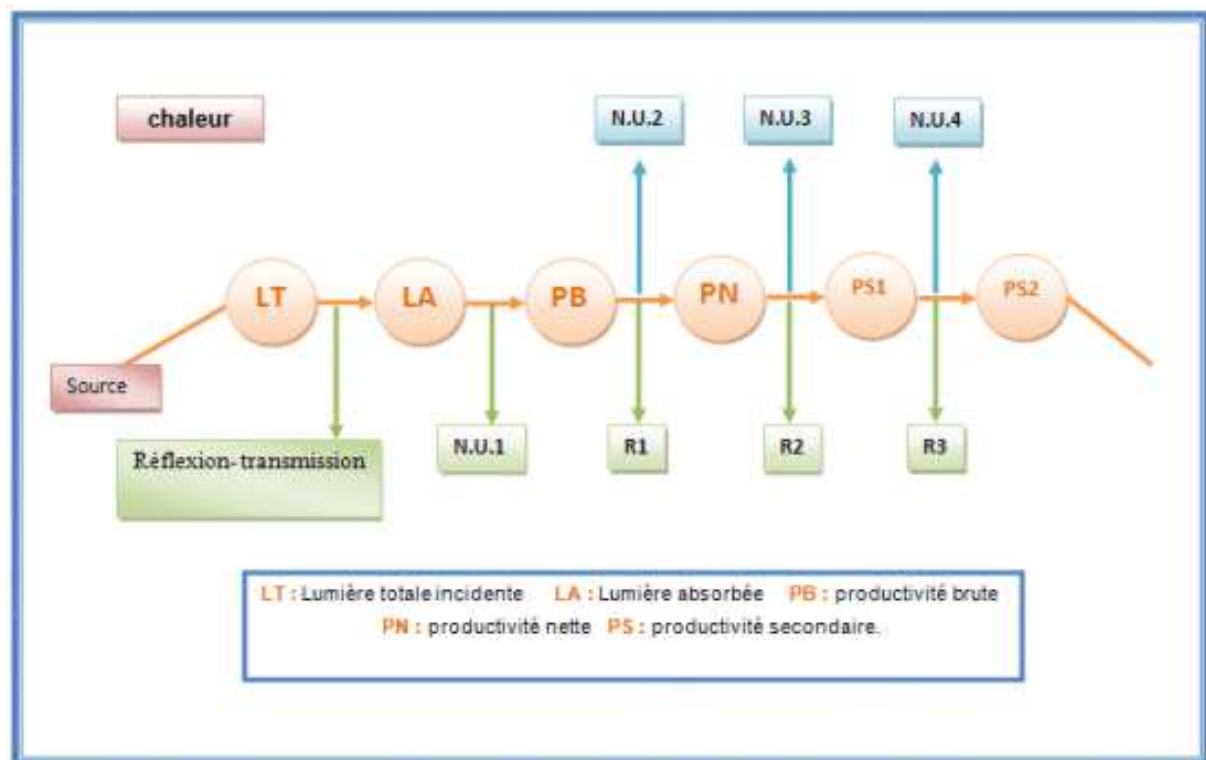
Tout être vivant doit, donc, recevoir de l'énergie parce qu'il en dépense pour différentes fonctions :

- **La maintenance** : entretien de l'organisme ou métabolisme basal et activités courantes (mouvements) ;
- **La croissance de l'organisme** (augmentation en taille, en poids et en volume).
- **La reproduction** : production de gamètes et de graines ;
- **L'accumulation de réserves glucidiques et lipidiques.** Il y a donc un flux d'énergie d'un niveau trophique à un autre.

L'énergie captée par les plantes vertes est, ainsi, transférée d'une manière très organisée à travers les différents niveaux de la chaîne trophique avant de se dissiper.

La principale source d'énergie est d'origine solaire. L'Homme, à l'heure actuelle, l'utilise peu, si ce n'est par l'intermédiaire des végétaux. Si on compare ces êtres vivants à des machines, on peut parler donc de rendement de production et de productivité. L'énergie d'origine solaire parvenant au sol est estimée en moyenne, pour les régions tempérées ou tempérées chaudes à dix milliards de kcal par hectare et par an. La production annuelle d'un champ de blé, en matière sèche, est d'environ une dizaine de tonnes par Ha, celle d'une forêt feuillue de 5 à 6 tonnes, ce qui représente approximativement 50 millions de kcal/ha/an. Cette valeur, comparée à celle plus haut (10 milliards de kcal) donne le rendement des végétaux (de l'ordre de 1%). Expérimentalement, l'Homme est arrivé à améliorer ce rendement et a pu atteindre les 5% pour certains végétaux.

La répartition de l'énergie au niveau des producteurs et des consommateurs peut être schématisée ainsi :



La répartition de l'énergie au niveau des producteurs et des consommateurs

Toute l'énergie non utilisée est reprise par décomposition ; l'énergie de respiration (R1, R2, R3) sera perdue.

La quantité d'énergie disponible diminue, donc, tout le long de la chaîne trophique.

La plante n'absorbe que de 1 à 5% de l'énergie reçue. Les herbivores utilisent en moyenne 1% de l'énergie fixée par les aliments qu'ils ont consommés : $PS1/PB = 1\%$. Pour les carnivores, le rendement est plus fort : $PS2 / PS1 = 10\%$.

Dispersion de l'énergie : L'énergie emmagasinée par les producteurs se disperse donc d'un niveau trophique à un autre. Pour donner un aperçu général de ce phénomène, prenons par exemple le niveau consommateur primaire. Tout organisme qui se nourrit d'une espèce végétale doit sélectionner sa nourriture : certains végétaux ou des parties de végétaux ne sont pas utilisés, d'où la perte d'une partie des calories emmagasinées par les plantes. Cette perte varie avec les espèces consommatrices, c'est ainsi, par exemple que les troupeaux d'Ongulés sauvages sont susceptibles d'utiliser la majeure partie des herbes qui poussent, ce qui n'est pas le cas pour le cheptel introduit par l'Homme.

D'autre part, les calories ingérées par l'herbivore ne sont pas toutes transformées en matière animale, 80 à 90% d'entre elles sont utilisées pour les phénomènes de respiration, d'évapotranspiration, d'excrétion, etc.

Exemple : dans une prairie : 1 m² fixe 1000kcal / jour, la production de cette superficie sera mangée par un herbivore qui va obtenir 10 kcal ; le carnivore mange l'herbivore et aura une masse de tissu correspondant à 1 kcal ; le carnivore II consomme le carnivore I et aura seulement 0,1 kcal.

Circulation de matière

Les relations, souvent compliquées, entre les différents organismes vivants, quelque soit leur position dans la chaîne, et entre ceux-ci et leur milieu inerte, sont à l'origine d'un cycle bien organisé d'éléments tels que l'azote, le carbone, le phosphore, etc. ces éléments suivent un circuit parmi les organismes, reviennent au sol où ils sont décomposés par les bactéries et les champignons et sont recyclés par les plantes vertes, en présence de lumière, pour reconstituer la matière organique.

Ce cycle est dit cycle de la matière qui concerne trois grands ensembles d'êtres vivants, à savoir les Producteurs, les Consommateurs et les Décomposeurs.

Les Producteurs : C'est l'ensemble des végétaux chlorophylliens qui vont fixer l'énergie de la lumière solaire (photosynthèse). Il y a en moyenne 1 à 5% de l'énergie solaire qui est captée par les plantes.

Les Consommateurs : Tous les végétaux et les animaux consomment de la matière organique des producteurs pour obtenir l'énergie nécessaire à leur métabolisme. Cette production d'énergie s'effectue essentiellement à partir de la dégradation par voie oxydative (respiration) de la matière organique (catabolisme). Ensuite, il y aura édification de la propre matière (organique) de ces consommateurs (anabolisme). On distingue plusieurs catégories de consommateurs selon le régime alimentaire :

- **Les herbivores :** ce sont les consommateurs des végétaux : par exemple : les Cétacées consomment les phytoplanctons ; les algues sont mangées par les gastéropodes, les tortues marines, etc. ; les lichens constituent la nourriture des gastéropodes terrestres, les myriapodes terrestres, etc. ; en ce qui concerne les végétaux supérieurs, tous les organes peuvent être consommés (herbes et feuilles de ligneux, par les Vertébrés et les Insectes, les fruits et les graines, par les Oiseaux et autres Vertébrés ; etc.)

- **Les saprophages :** consomment des végétaux et des animaux morts, leur rôle est en quelque sorte de recycler la matière organique avant d'être déminéralisée par les décomposeurs. Il existe plusieurs types de saprophages :

- Les détritivores : consomment les débris végétaux et animaux.
- Les coprophages : se nourrissent des excréments de divers animaux : ce sont surtout des insectes.
- Les nécrophages : se nourrissent de cadavres : ce sont des oiseaux et des insectes (charognards).

- **Les carnivores :** se nourrissent d'autres animaux dont ils vont digérer la matière organique ; on les appelle aussi les prédateurs : on en distingue trois catégories :

- Prédateurs de premier ordre : qui mangent les herbivores : (chacal, lion, etc.).
- Prédateurs de 2^o ordre qui mangent les prédateurs de 1^o ordre (serpents, etc.).
- Prédateurs de 3^o ordre : (les rapaces qui mangent les serpents, etc.).

On constate donc un transfert d'énergie d'un niveau trophique à un autre :

photosynthèse → matières organiques végétales → matière organique herbivore → matière organique carnivore I → matière organique carnivore II → matière organique carnivore III, etc.

La chaîne trophique ne va pas s'allonger indéfiniment, en principe elle va s'arrêter au niveau du carnivore III parce qu'il y a perte d'énergie d'un niveau à un autre.

L'étude des carnivores appelle à quelques remarques :

- Il existe des êtres animaux qui sont capables de tout consommer : ils sont dits omnivores ou diversivores (Homme, Sanglier, Hérisson, etc.).
- En ce qui concerne les parasites : il existe des parasites qui sont fixés en divers points de la chaîne : exemple : l'olive a deux parasites : un parasite primaire (dacus) et un parasite secondaire (opius).

Les chaînes de parasites contiennent des éléments de tailles décroissantes tandis que les prédateurs sont, en général, de tailles croissantes.

Si on considère la chaîne trophique essentielle et qu'on veut considérer les chaînes de parasites, de saprophages, etc., on obtient un écosystème très compliqué.

Les Décomposeurs : Ce sont surtout des bactéries et des champignons. Ils se nourrissent de la matière organique morte (cadavres, litières, etc.). Leur rôle est de décomposer la matière organique ou la minéraliser (en CO_2 , NH_3 , H_2S , etc.). Ces éléments minéraux seront repris par d'autres bactéries :

Par exemple : bactéries nitrifiantes → nitrates, bactéries sulfurantes → sulfates, etc.

Les nitrates et les sulfates sont mieux assimilés par les plantes. Le processus de décomposition est aussi important que celui de production dans un écosystème donné. La quantité de matière organique qui retourne au sol dans les écosystèmes terrestres, sous forme de feuilles, de racines ou de bois mort, peut aller, chaque année, de quelques tonnes à quelques dizaines de tonnes par hectare. Un nombre important d'espèces agissent plus ou moins rapidement sur cette matière pour la recycler, en la fractionnant, la transformant, la décomposant et la minéralisant. Elle redevient disponible pour les producteurs et utilisable pour la synthèse de nouvelles molécules organiques.

En conclusion on peut dire que les décomposeurs jouent un rôle essentiel dans le cycle biogéochimique.

FLUX D'ÉNERGIE DANS LES ÉCOSYSTÈMES : LES PYRAMIDES ECOLOGIQUES

Définition : Les pyramides sont des représentations graphiques du fonctionnement d'un écosystème. Elles se construisent par superposition de rectangles de même largeur, mais dont la longueur est proportionnelle à l'importance du paramètre mesuré.

- **Ou**, Les pyramides sont des représentations visuelles du nombre d'espèces à chaque niveau trophique dans un écosystème.

Il y a trois types de pyramides écologiques :

1. La pyramide des nombres ou de densités
2. La pyramide de la biomasse
3. La pyramide d'énergie

1. La pyramide des nombres ou de densités

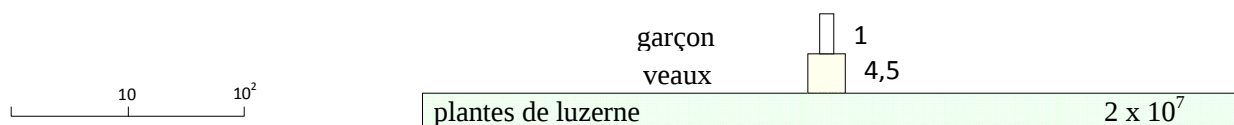
La pyramide des nombres montre le nombre d'individus à chaque niveau trophique d'un écosystème. *On constate dans chaque habitat:*

- plus de végétaux que d'animaux
- plus d'herbivores que de carnivores
- le nombre d'individus décroît lorsqu'on passe au niveau trophique suivant, tandis que la taille augmente.

Exemple: Pyramide de Nombre

- 300 cons. Tertiaires (ex: Loups, Ours)
- 9000 cons. 2e: hiboux, serpents)
- 20 000 consommateurs 1e (ex: souris, écureuils, mouffettes)
- 150 000 producteurs(ex: herbe, bleuets, graines)

Exemple 2



Exception: Pyramide de Nombre

- 1000 cons. tertiaires(ex: faucons, serpents)
- 20 000 cons. 2e (ex: grenouilles, etc.)
- 100 000 consommateurs 1e (ex: fourmis, sauterelles)
- 100 producteurs(ex: arbres)

2. La pyramide de la biomasse

La pyramide de la biomasse montre la masse totale des organismes à chaque niveau trophique d'un écosystème. Ces pyramides sont aussi d'habitude plus large en bas. *On constate que:*

- Les rectangles sont proportionnels au poids des individus.
- La pyramide des biomasses représente mieux les relations alimentaires, car elle exprime la biomasse présente à un moment donné, à chaque niveau de la chaîne.

Exemple 1

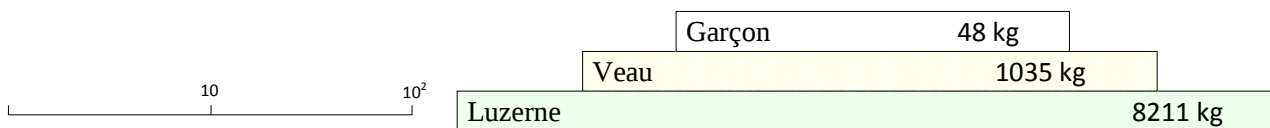


Fig. : Pyramide des biomasses

58 kg d'homme
1125 kg de veau
8925 kg de luzerne

Si un lapin mange un 1 kg de luzerne, cela ne représentera en fait pas 1 kg de viande :

- une partie sert pour le fonctionnement de l'organisme du lapin
- une partie est perdue sous forme de déchets ou de chaleur
- une partie sert de viande de lapin

NB : Les scientifiques appliquent la **règle des 10%** : ainsi 1000 kg de luzerne font vivre 100kg de lapins, qui feront vivre 10Kg de renards. Cela explique pourquoi sur un territoire les renards sont moins nombreux que les lapins, eux-mêmes moins nombreux que les végétaux.

Exemple : 16 kg de maïs permettent d'obtenir 1 kg de bœuf, dont seulement 0.75 kg seront utilisés par l'homme.

Exemple 2

Exemple: Pyramide de Biomasse

- 200 kg cons. Tertiaires (ex: Loups, Ours)
- 8000 kg cons. 2e: hiboux, serpents)
- 42 000 kg consommateurs 1e (ex: souris, écureuils, mouffettes)
- 900 000 kg producteurs(ex: herbe, bleuets, graines)

Exception pour la Pyramide de Biomasse

C'est possible d'avoir moins de masse à des niveaux trophiques plus bas si l'organisme plus bas se reproduit très rapidement. Même s'il n'y a pas beaucoup de cet organisme, la reproduction rapide produit assez de l'organisme pour nourrir les prédateurs (*exemple de la pyramide de phytoplancton et zooplancton*).

3. La pyramide d'énergie

Cette pyramide indique la quantité d'énergie accumulée par unité de temps et de surface à chaque niveau trophique. Elle correspond à la productivité nette de chaque niveau.

1320 kJ homme / jour

72000 kJ veau / jour

280000 kJ luzerne / jour

Exemple 1

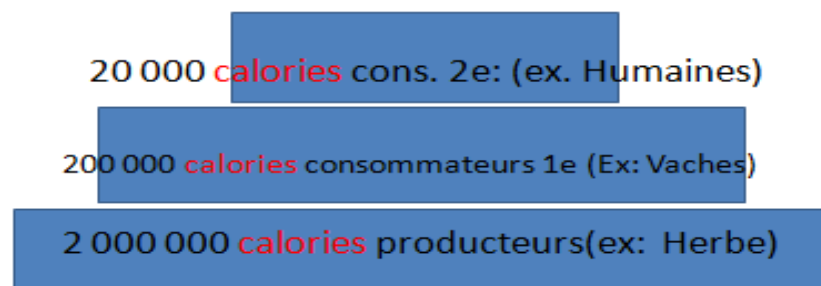
	prod. garçon	$36,7 \times 10^3$ kJ	0,7 %
	production veau	$4,97 \times 10^6$ kJ	8 %
	production luzerne	$6,23 \times 10^7$ kJ	0,24 %
	Energie solaire reçue	$26,334 \times 10^9$ kJ	

On remarque aussi :

La pyramide de l'énergie montre le montant d'énergie à chaque niveau trophique d'un écosystème. Ces pyramides sont toujours plus large en bas, puisqu'un niveau trophique ne pourrait jamais recevoir plus d'énergie que le niveau dessous lui contient.

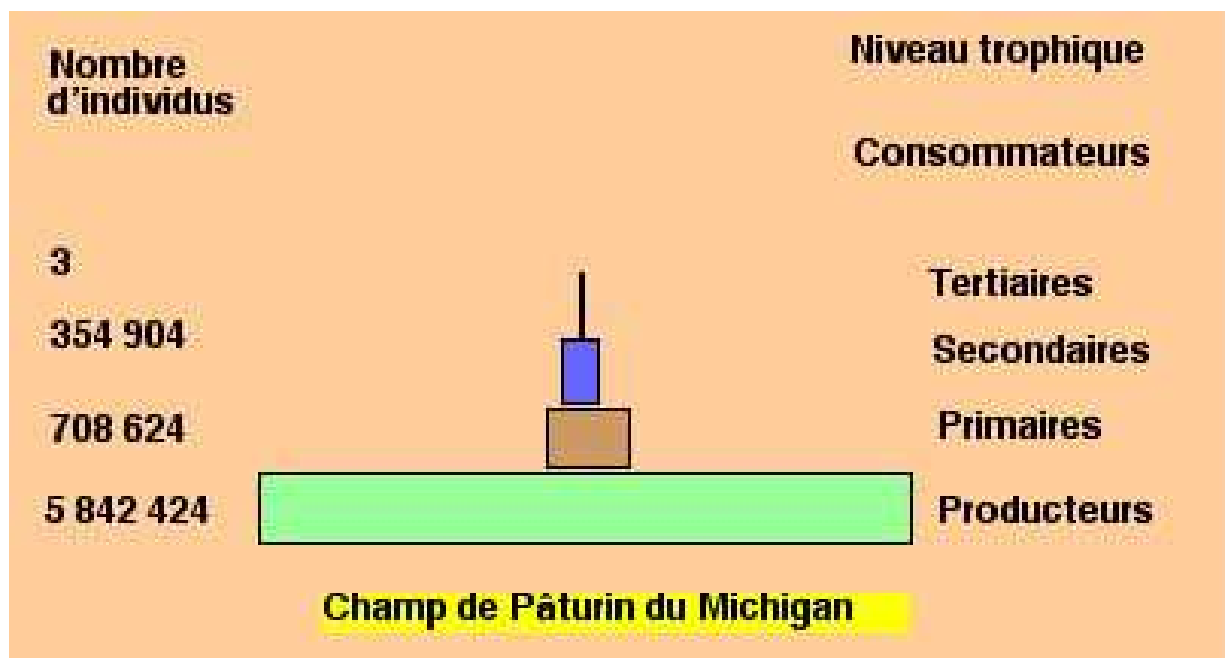
Exemple 2

Exemple: Pyramide de l'énergie

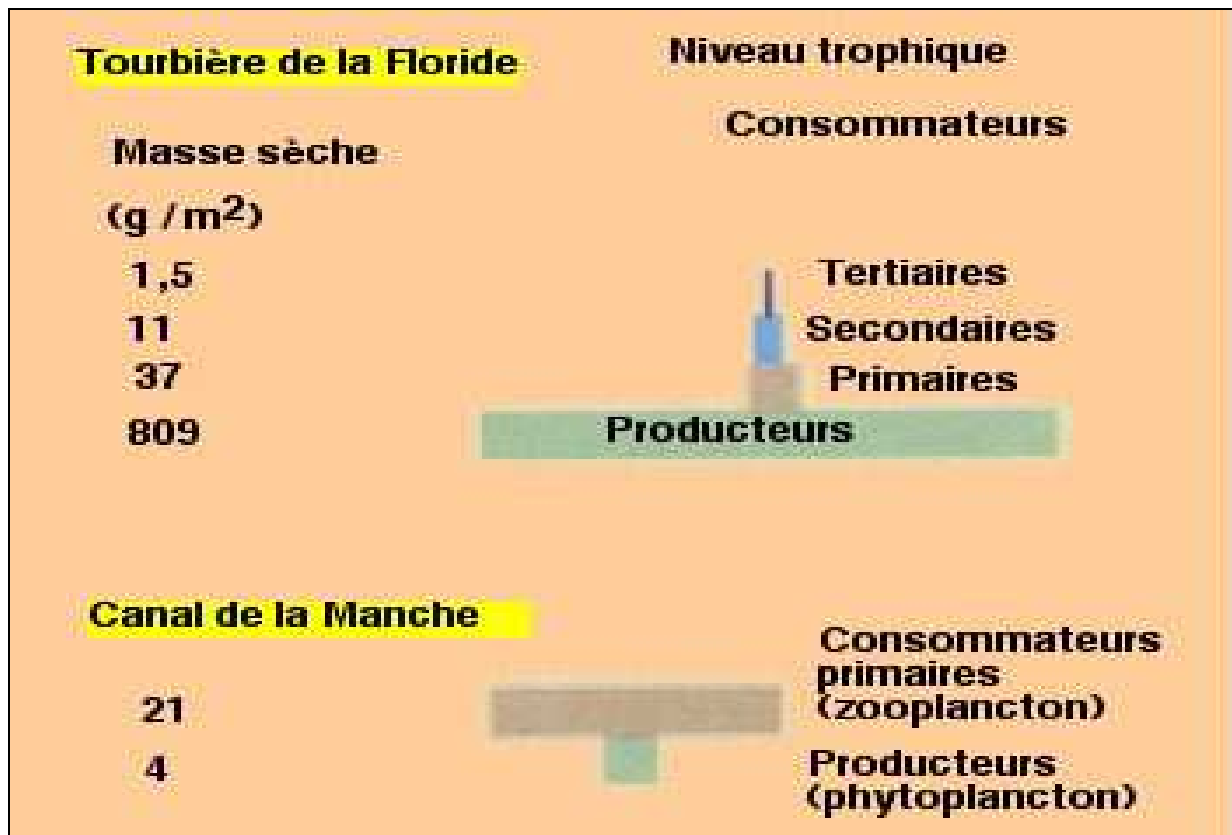


NB : Autres modèles

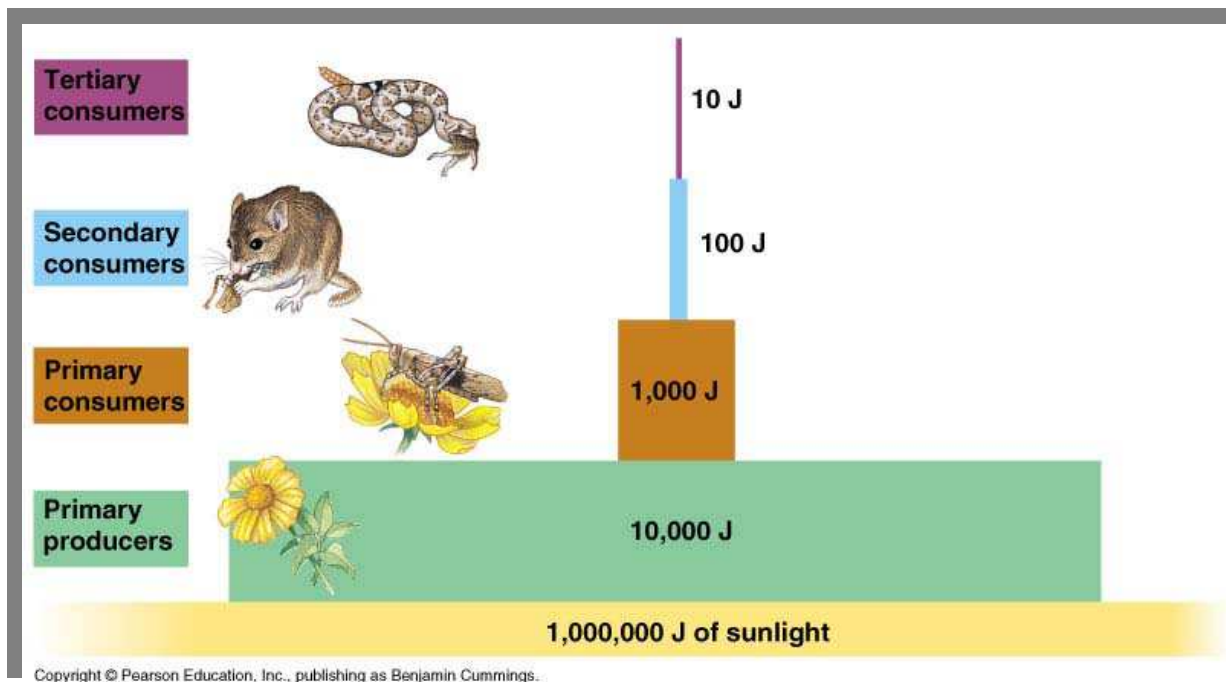
1- PYRAMIDE DE NOMBRE



2- PYRAMIDE DE BIOMASSE



3- PYRAMIDE D'ÉNERGIE



NOTION DE RESEAU TROPHIQUE ET CHAINE ALIMENTAIRE

Définitions

-1- Réseau trophique

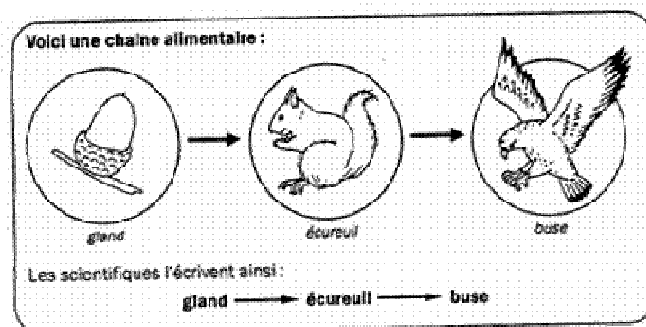
Un réseau trophique est un ensemble de chaînes alimentaires reliées entre elles au sein d'un écosystème et par lesquelles l'énergie et la biomasse circulent. Le terme trophique se rapporte à tout ce qui est relatif à la nutrition d'un tissu vivant ou d'un organe (Fig. ci-dessous)



NB : En biologie, le réseau alimentaire, ou trophique, regroupe l'ensemble des organismes inclus dans un niveau de la chaîne alimentaire pour former un réseau avec des interactions entre les proies et prédateurs, chaque organisme occupant un niveau trophique, pour former le réseau

-2- Chaîne alimentaire¹

Une chaîne alimentaire est une suite d'êtres vivants dans laquelle chacun **mange celui qui le précède** avant d'être mangé par celui qui le suit. Le premier maillon d'une chaîne est très souvent un végétal chlorophyllien (vert) et est appelé producteur primaire (Fig. ci-dessous).



-2-1- Chaîne alimentaire²

Une chaîne alimentaire est un réseau linéaire de maillons dans un réseau trophique partant des organismes producteurs et se terminant au sommet des espèces prédatrices, détritivores ou décomposeurs.

Explication de l'exemple

Une chaîne alimentaire est un ensemble d'êtres vivants (végétaux et animaux) qui se mangent les uns après les autres.

Le premier est mangé par le second, qui lui-même est mangé par le troisième, et ainsi de suite (Fig. ci-dessus).

NB : Une chaîne alimentaire comporte le plus souvent, au moins 3 maillons :

* le 1^{er} maillon est toujours un végétal : feuilles, herbe....

* le 2^{ème} maillon est toujours un végétarien qui se nourrit de végétaux : c'est le maillon des herbivores.

* le 3^{ème} maillon est toujours un animal qui se nourrit d'autres animaux (les végétariens) : c'est le maillon des carnivores ou des omnivores.

-3- Le niveau trophique

Est le rang qu'occupe un être vivant dans une chaîne alimentaire. Chaque maillon de la chaîne correspond à un niveau trophique. On retrouve les niveaux suivants : **les producteurs, les consommateurs et les décomposeurs.**

.a. Les producteurs

Ce sont les autotrophes qui sont capables de synthétiser par la photosynthèse, des molécules organiques ($C_6H_{12}O_6$) à partir de substances inorganiques (CO_2 et H_2O). Exemples: Algue, herbe, arbre, etc.

.b. Les consommateurs

Ce sont les hétérotrophes, ils dépendent des autres êtres vivants pour se nourrir. Ils ne peuvent synthétiser leur propre nourriture.

.i. Les consommateurs du 1^{er} ordre

Ce sont les herbivores qui mangent des végétaux. Ex. : Sauterelle, lapin, cerf, escargot, etc.

.ii. Les consommateurs du 2^e ordre

Ce sont les carnivores qui mangent les herbivores. Ex. : Chat, coccinelle, renard, hibou, etc.

iii. Les consommateurs du 3^e ordre

Ce sont des carnivores qui mangent les consommateurs du 2^e ordre. Ex. : Lion, ours, loup, etc.

c. Les décomposeurs

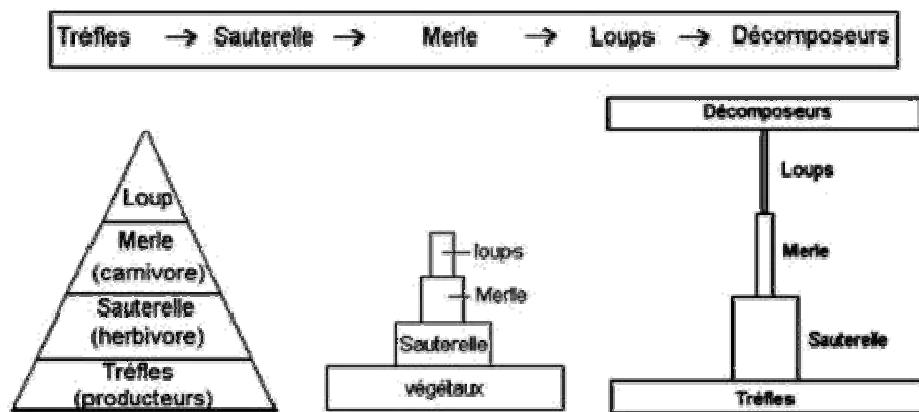
Ils décomposent la matière organique des cadavres et redonnent aux plantes les sels minéraux essentiels à la photosynthèse. Ex. : Bactéries et champignons

Exemple d'une chaîne alimentaire et des niveaux trophiques

Organismes	herbes	sauterelles	coccinelles	corneilles	champignons et bactéries
Niveaux trophiques	Producteurs	Consommateurs du 1 ^{er} ordre	Consommateurs du 2 ^e ordre	Consommateurs du 3 ^e ordre	Décomposeurs

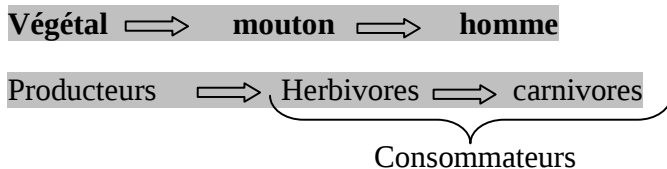
LA PRÉSENTATION D'UNE CHAÎNE ALIMENTAIRE PEUT PRENDRE DIVERSES FORMES

a- Les chaînes proies/prédateurs



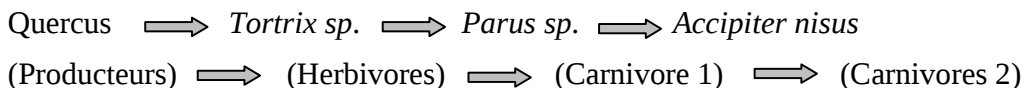
• Exemple en milieu terrestre

Les chaînes trophiques comportent en général trois ou quatre niveaux. Une des plus simples est constituée par le schéma suivant :



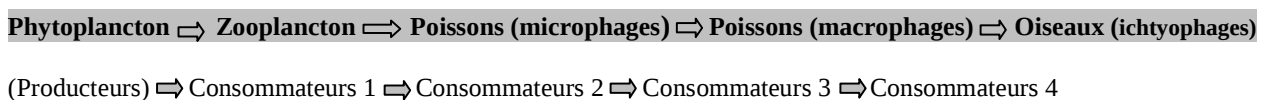
*/ On rencontre souvent même deux niveaux trophiques successifs de carnivores.

Le type ci-dessous, par exemple, est assez fréquent dans les forêts tempérées :

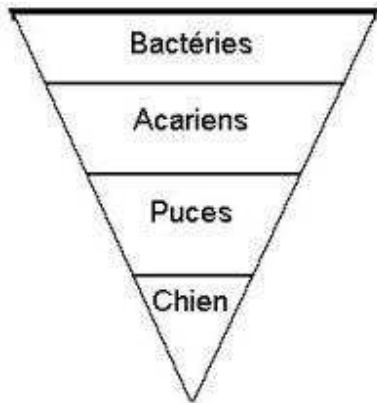


• Exemple en milieu marin

Les chaînes trophiques de prédateurs sont plus longues que dans les écosystèmes terrestres.



b- Les chaînes hôtes/parasites



Remarque : au contraire des chaînes trophiques de prédateurs, d'organismes de grande taille vers des organismes de petite taille.

Exemple : Les insectes.

Végétal → herbivore → parasite → hyperparasite

(Sapin : *Abies alba*) → (Chenille : *Choristoneura murinana*) → (Braconide : *Apanteles sp.*) → (Chalcidien).

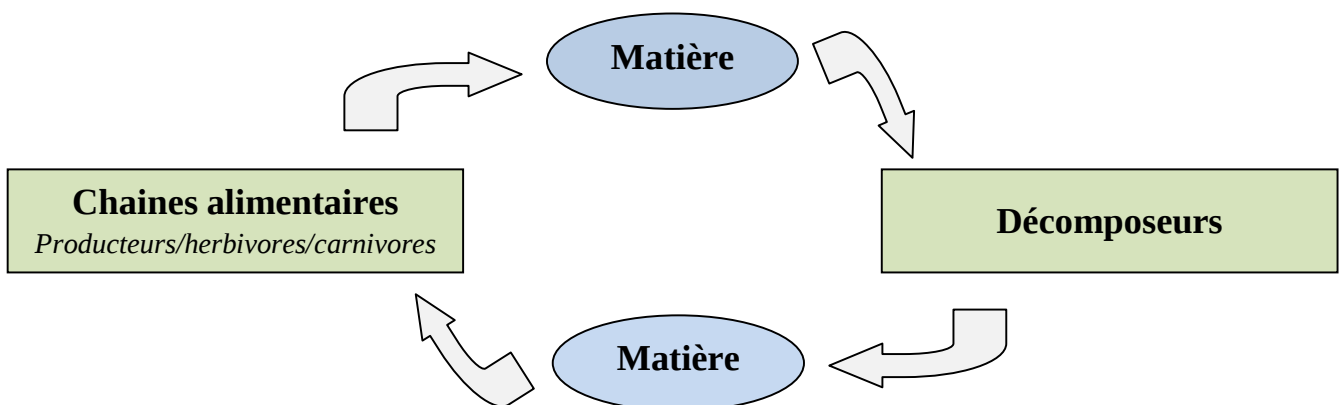
c- Les chaînes trophiques saprophytiques (dans lesquelles la circulation de matière est à prédominance)

En forêts caducifoliées (ont un rôle très important). La plus grande partie du feuillage n'est pas consommée par des herbivores mais constitue une litière de feuilles mortes. Celles-ci sont fragmentées par de nombreux animaux saprophages (insectes tels que les collemboles par exemple) puis reprises par les vers de terre qui assurent une bonne dispersion de l'humus dans les horizons superficiels du sol (formation d'un mull). Les champignons développent leur mycélium à ce niveau et, à l'extrémité de la chaîne, les microorganismes décomposeurs achèvent la minéralisation totale de la matière organique morte.

Litière ⇒ **fragmentation** ⇒ **déplacement** ⇒ **minéralisation**

(Bactéries) (Collemboles) (Vers de terre) (Champignons)

Remarque : Les chaînes alimentaires font partie d'un réseau alimentaire qui décrit le cycle de la matière (fig. ci-dessous)



PRODUCTIVITE DES ECOSYSTEMES

- LA BIOMASSE

Définitions (Biomasse)

La biomasse c'est la masse totale de la matière organique et des êtres vivants (sol + végétaux + animaux) subsistant dans une région donnée. Cette matière est entièrement recyclable. "Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme".

*/Autre définition

Biomasse

On appelle **biomasse (B)** l'abondance des organismes présents dans l'écosystème au moment de l'observation ; on peut l'exprimer en nombre d'individus (densité), en poids (de préférence poids sec), en contenu d'énergie (calories), par unité de surface.

A cette biomasse s'ajoutent des cadavres, qui, au niveau des phytocénoses terrestres, sont surtout des organes morts encore attachés aux plantes vivantes (bois mort « **sur pied** » dans les forêts, « **mulch** » de feuilles mortes dans les prairies ; on peut parler alors de **nécromasse (N)** (Kestemont, 1970). En fin, au niveau du sol de l'écosystème peut s'accumuler de la matière morte, formée de la **litière (L)** des organes morts (feuilles, écales, branches, inflorescence, etc.), qui se décompose plus ou moins fortement en une masse noire, l'**humus (H)** ; à ceci s'ajoute la litière des racines mortes dans le sol.

Pour certains auteurs, la biomasse est l'ensemble de toute la matière organique, vivante ou morte, comprise dans l'écosystème. Il est préférable alors de parler de matière organique totale de l'écosystème (**MOT**) :

$$\text{MOT} = \text{B} + \text{N} + \text{L} + \text{H}$$

Tout cet ensemble constitue la *matière organique morte* **MOM**.

La biomasse végétale (*phytomasse*) est d'une mesure plus fréquente et plus facile que la biomasse animale (*zoomasse*).

Exemple : Sur les valeurs de phytomasse et de zoomasse pour un certain nombre d'écosystèmes zonaux.

Types d'écosystèmes	Biomasse totale t/ha	Biomasse feuilles t/ha	Chute de litière de feuilles (LF) t/ha	LNF (racines et bois morts) t/ha	PN ₂ t/ha	Matière organique morte sur le sol t/ha
Forêts de Chênes (Dubrava)	400	4	4	2,5	9	15
Prairie - Steppe	25	8	8	5,7	13,7	12
Steppe moyenne	25	4,5	4,5	6,7	11,2	6,2
Steppe aride	10	1,5	1,5	2,7	4,2	1,5
Semi-désert à <i>Artemisia</i>	4,3	0,1	0,1	1	1,2	-
Semi-désert salé	1,6	0,2	0,2	0,4	0,6	-
Savane herbeuse (Inde)	26,8	2,9	2,9	4,4	7,3	-
Forêts équatoriale caducifoliée	410	12	14	7	24,5	10
Forêts équatoriale sempervirente	> 500	40	16,5	8,5	32,5	2

■ La **lande** (parfois appelée « Dorne » ou « Les dornes » dans le nord de la France) est une association de plantes qui dépassent rarement le stade d'arbustes et poussant sur des milieux pauvres, souvent acides et oligotrophes. Les arbres qui peuvent s'y trouver, notamment des pins, y ont été introduits par l'homme ou sont apparus spontanément après la disparition de grands et petits herbivores sauvages ou d'élevage.

La **mesure de la phytomasse aérienne** se fait par simple récolte de la végétation sur une surface déterminée ; le poids frais est transformé en poids sec par dessiccation à 85°C (ou 105°C) ; le poids ramené à l'unité de surface. La technique est particulièrement facile (**fauchage**) pour des végétations basses (prairies, landes, végétations cryptogamiques).

Pour des végétations arbustives ou forestières, la récolte intégrale est souvent trop consommatrice de temps pour être réalisable. On utilise une méthode d'analyse de dimensions dont les principes sont appliqués depuis longtemps par les forestiers lors du cubage des peuplements forestiers équiennes (tables de production : normes).

■ *Peuplements forestiers équiennes se dit d'un peuplement forestier composé d'arbres de même âge.*

Le paramètre de base, véritable providence des écologistes, est le **DBH**, diamètre du tronc à 1,30 m de hauteur (**diameter breast heigh : diamètre à hauteur de poitrine**) ; toutes les valeurs importantes de biomasse (tronc, branches, feuilles, etc.) sont, pour chaque arbre d'une forêt, proportionnelles à son DBH.

Il suffit de mesurer et de peser (en découpant en catégories de diamètres déterminés, si on désire étudier les cycles des éléments minéraux) une quinzaine d'individus choisis dans toute l'amplitude de variation de la population étudiée, pour obtenir des courbes (fig. 4,7) où l'on peut lire ensuite la caractéristique recherchée de chaque individu de la population (biomasse totale, biomasse des troncs, des branches, des feuilles, etc.) pour autant que l'on connaisse son DBH.

Il suffit donc de faire l'inventaire de la population étudiée en ce qui concerne le DBH de tous les individus qui la composent.

Il a été constaté que pour une région déterminée, non seulement la courbe d'une espèce déterminée est valable pour les divers écosystèmes où on la trouve, mais encore il existe une abaque unique valable à la fois pour de nombreuses essences ligneuses.

La phytomasse des strates ligneuses est naturellement la somme de toutes les phytomasses individuelles.

Définitions (Productivité)

Productivité brute (PB): Quantité de matière vivante produite pendant une unité de temps, par un niveau trophique donné.

Productivité nette (PN): Productivité brute moins la quantité de matière vivante dégradée par la respiration. **PN = PB - R**

Productivité primaire : Productivité nette des autotrophes chlorophylliens

Productivité secondaire : Productivité nette des herbivores, des carnivores et des décomposeurs.

/ Transfert d'énergie (autre modèle)

Les relations trophiques qui existent entre les niveaux d'une chaîne trophique se traduisent par des transferts d'énergie d'un niveau à l'autre.

- 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)**.
- Une partie de (**PN**) sert à l'augmentation de la biomasse végétale avant d'être la proie des bactéries et des autres décomposeurs.
- Le reste de (**PN**), sert d'aliment aux herbivores qui absorbent ainsi une quantité d'énergie **Ingérée (I1)**.
- La quantité d'énergie ingérée (**I1**) correspond à ce qui réellement utilisé ou **Assimilé (A1)** par l'herbivore, plus ce qui est rejeté (**Non Assimilée (NA1)**) sous la 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)**.
- On peut continuer le même raisonnement pour les carnivores.

Ainsi, du soleil aux consommateurs (1^{er}, 2^{ème} ou 3^{ème} ordre), l'énergie s'écoule de niveau trophique en niveau trophique, diminuant à chaque transfert d'un chaînon à un autre. On parle donc de flux d'énergie. Le flux d'énergie qui traverse un niveau trophique donné correspond à la totalité de l'énergie assimilée à ce niveau, c'est-à-dire à la somme de la productivité nette et des substances perdues par la respiration. Dans le cas des producteurs primaires, ce flux est : **$PB = PN + R1$** .

Le flux d'énergie qui traverse le niveau trophique des herbivores est : **$A1 = PS1 + R2$** .

Plus on s'éloigne du producteur primaire, plus la production de matière vivante est faible (Fig. ci-dessous).

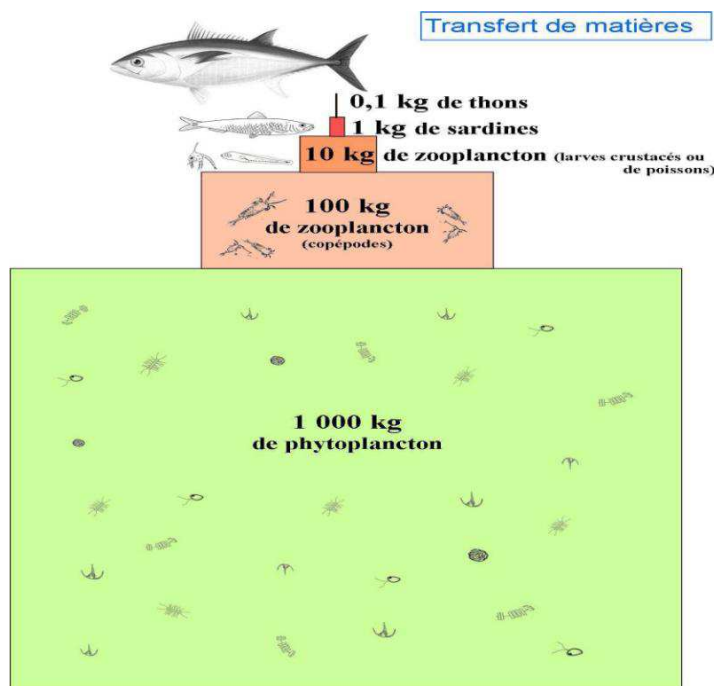


Fig. : Biomasse des différents niveaux d'une chaîne alimentaire : le passage d'un niveau alimentaire à un autre entraîne une perte de matière considérable.

***//* Les rendements**

A 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 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** : C'est le rapport de la production nette du niveau trophique de rang (n) à la production nette du niveau trophique de rang (n-1) : **(PS1/PN x 100)** ou **(PS2/PS1 x 100)**.
- **Rendement d'exploitation** : C'est le rapport de l'énergie ingérée (**I**) à l'énergie disponible. C'est la production nette de la proie : **(I1/PN x 100)** ou **(I2/PS1x 100)**.
- **Rendement de production nette** : Qui est le rapport de la production nette à l'énergie assimilée : **(PS2/A2x100)** ou **(PS1/A1x100)**. 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.

***//* 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 (éléments nutritifs), ou **contrôle bottom-up** (du bas vers le haut).

Exemple : La relation existante entre la teneur en phosphates des océans + la quantité des planctons + taille des poissons qui s'en nourrissent.

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.**

Exemple : Effet régulateur d'une population de carnivores (loups) sur une population de proies (lièvres). 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.

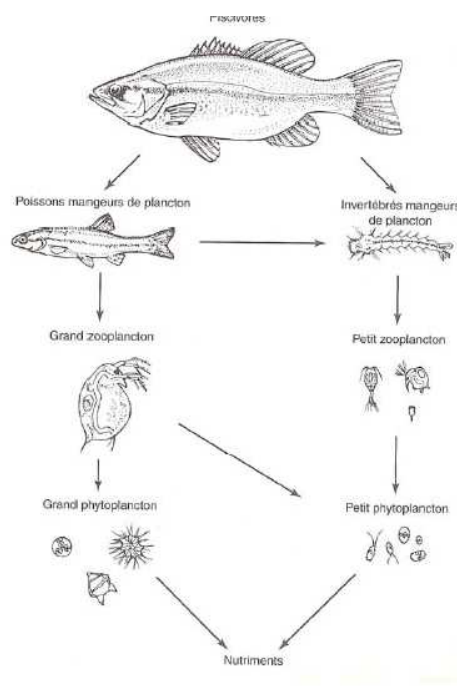
Exemples :

- Augmentation des ressources en éléments nutritifs (**amplification du contrôle bottom-up**). Cas de la pollution organique des eaux ou eutrophisation.
- Diminution d'abondance d'un prédateur de haut niveau (**amplification du contrôle top-down**). Cas de la chasse ou de la pêche.

Exemple de contrôle : Bottom-up et top-down (Fig. ci-dessous)

- **Contrôle « bottom-up » ou régulation ascendante** : les ressources disponibles contrôlent les chaînes trophiques depuis les producteurs jusqu'aux prédateurs
- **Contrôle « top-down » ou régulation descendante** : les interactions trophiques régulent les niveaux trophiques inférieurs en **cascade** le long des chaînes trophiques

✓ **Interaction des mécanismes de régulation**



Exemple : cas de la productivité primaire nette (écosystème steppique)

► Production primaire nette (Ecosystème steppique : en Algérie selon Aidoud, 1989)

La production nette aérienne est basée sur des mesures de la phytomasse tout au long de la saison de croissance végétale. La production est évaluée par la différence entre un minimum et un maximum de phytomasse. Le suivi saisonnier de la phytomasse permet de minimiser les erreurs liées à la différence de cycle phénologique entre les espèces. Par ailleurs, la communauté doit être suffisamment homogène car une hétérogénéité spatiale importante peut masquer les variations saisonnières. Les résultats de 11 ans de mesures sont résumés dans le tableau 4.

Steppe	Productivité (Kg de matière sèche / ha/an)				
	totale	espèces pérennes (Pr)	autres espèces	Phytomasse maximale (B)	Efficacité biotique (%)
à alfa	480 (41)	410 (40)	80 (85)	1030	40
à armoise	470 (47)	340 (41)	140 (90)	1200	37
à sparte	420 (73)	260 (64)	160 (140)	310	84

Entre parenthèses sont donnés les coefficients de variation en %. L'efficacité biotique exprimée par le rapport Pr/B pour lequel la phytomasse maximale est une moyenne sur 11 ans. Dans le rapport Pr/B de l'armoïse, la phytomasse B inclut la partie ligneuse évaluée à 100 kgMS/ha/an.

/ **Productivité primaire dans un écosystème**

La productivité primaire d'un écosystème correspond à la production de biomasse que l'ensemble des organismes photosynthétiques de cet écosystème fabriquent par unité de surface et par unité de temps.

Cette valeur peut être exprimée en tonnes de matière sèche, par hectare et par an ou encore en kilocalories par mètre carré et par an, etc.

MO sèche synthétisé par tonne/ha/an ou bien Kcal/m²/an

Exemples

- Estuaires : 10- 25 g/m²/j
- Agriculture intense : 10-20
- Agriculture permanente : 2- 8
- Plateau continental : 0,5-3
- Lacs profonds : 1-2
- Toundras : 0,2-0,5
- Sub-déserts : 0,3-1
- Marais : 10-25
- lacs peu profonds : 5-10
- Steppes : 0,3-2

Remarque: La productivité primaire des écosystèmes **n'est pas uniforme, mais varie**, au contraire, dans des proportions importantes selon leur nature ou leur localisation, sans qu'il soit toujours évident de s'en rendre compte. Ainsi on peut comprendre que les déserts peuvent avoir une productivité faible ou nulle puisqu'ils sont très largement dépourvus de plantes.

*/ **Productivité secondaire dans un écosystème**

L'accumulation de la matière vivante au niveau des consommateurs et décomposeurs dans les écosystèmes naturels elle est souvent inférieure à celle des agro écosystèmes (technologie).

- **Bourrelière (1973)** a montré que la production secondaire des savanes d'Afrique centrale est supérieure à celle des bovins que l'Homme tend à substituer à ces derniers sous les mêmes latitudes souvent équivalentes à différentes études (tableau ci-dessous).

Tableau : Production des grands biomes dans le monde (Etude comparative)

	Surface 10 ⁶ km ²	Biomasse (t/ha)	Production (t/ha/an)
Forêts tropicales	20	450	20
Tempérées	18	300	13
Boréales	12	200	8
Clares	7	60	6
	Total : 57	-	-
Savanes	15	40	7
Prairies temporaires	9	15	5
Cultures	14	10	6,5
Marais	2	120	20
	Total : 40	-	-
Eaux	2	0,2	5
Océans et mers	375	0,09	1,5

La productivité secondaire nette peut être assez élevée dans certains écosystèmes aquatiques par la suite de la haute efficacité de certains vertébrés poïkilothermes (*des animaux ayant une température corporelle qui varie avec celle de leur milieu*) dans la conversion d'énergie : différence biomasse productivité et la production fait intervenir le facteur temps.

Lamotte (1969) a proposé de modifier la représentation des pyramides écologiques en intégrant le facteur temps.

INTERACTIONS BIOTIQUES

Cette partie est simplifiée à quelques interactions seulement.

Interactions (ou coactions) entre deux espèces (Tableau de synthèse Odum 1959 in Ramade 1984)

Nature du facteur biotique	Populations isolées		Populations réunies	
	Espèce A	Espèce B	Espèce A	Espèce B
- indifférence, neutralisme	0	0	0	0
- antagonisme, amensalisme, antibiose (A désavantagée)	0	0	-	0
- compétition interspécifique (A et B sont mutuellement affectés)	0	0	-	-
- prédation (A prédateur B)	-	0	+	-
- parasitisme (A parasite B)	-	0	+	-
- commensalisme (B hôte de A)	-	0	+	0
- coopération	+/-	+/-	+	+
- mutualisme ou symbiose de A avec B	-	-	+	+

0 : indifférente ; + : Effet positif ; - : Effet négatif ; +/- : effet d'importance variable

1- Antagonisme : lutte, opposition entre des personnes, des groupes sociaux, en médecine, opposition fonctionnelle entre deux systèmes, deux organes, deux substances biochimiques).

2- Amensalisme : inhibition du développement d'une plante par une autre plante.

3- Antibiose : empêchement de la croissance.

Exemple d'antagonisme, amensalisme et antibiose :

Cette interaction est due essentiellement aux : émissions de molécules organiques actives sur les plantes, aux enzymes lytiques et aux antibiotiques.

- **a/ d'émission de molécules actives** : on a depuis longtemps constaté que sous les noyers des cultures de tomates, de pomme de terres ou même de luzerne périssent, ceci est dû à un composé phénolique :

La Juglone de <i>Juglans regia</i>	—————→	Asie
<i>Juglans nigra</i>	—————→	Amérique

qui est présent dans toutes les parties de la plante. Si cette substance n'est pas exsorbée par les racines, elle tombe sur les sols parmi les pluviolésivats.

- **b/ enzymes lytiques** : elles sont exsorbées (secrétées) dans le milieu où elles détruisent d'autres organismes (champignons ou bactéries). Ces microorganismes produisent des exo-enzymes hydrolytiques qui attaquent la paroi mycélienne. Le produit de cette hydrolyse est utilisé par ces microorganismes producteurs d'enzymes lytiques.

- **c/ enzymes lytiques** : Certains champignons tels que le *Penicillium* ou bactéries *Bacillus subtilis* secrètent des substances qui inhibent la croissance ou exclus d'autres organismes. Ils exercent ainsi une action indiscutable à l'échelle microscopique.

4- La compétition

La compétition désigne une situation dans laquelle une ressource (nourriture, un nid, un terrier, lumière...) n'est pas disponible en quantité suffisante soit pour deux individus de la même espèce (il s'agit alors de compétition intraspécifique) soit pour deux populations d'espèces différentes (compétition interspécifique).

Exemples

- L'accès à la lumière ou l'eau chez les végétaux
- la recherche de la nourriture, d'un gîte ou l'espèce nécessaire à la nidification chez les animaux.

NB : Toutes les plantes et les animaux sont en compétition permanente.

5- La prédation

Tous êtres vivant doit assurer sa survie par l'absorption de molécules organiques. Si un organisme vivant prélève ces molécules organiques d'un autre organisme en le tuant  proie, ou en le mutilant cas des végétaux macroscopiques ou entièrement consommé dans le cas de microorganisme on dit que cet organisme est prédateur. La prédation est ainsi la consommation d'un être vivant par un autre être vivant.

Exemples :

- les lions se nourrissent de gazelles
- les hérons se nourrissent de poissons
- les herbivores se nourrissent de végétaux
- les plantes carnivores se nourrissent d'insectes qu'elles piègent.

6- Le parasitisme

C'est une relation asymétrique bénéfique pour l'un et inconvenient pour l'autre. Le parasite se nourrit aux dépens de son hôte. Souvent le parasite est beaucoup plus petit que son hôte.

Exemples : **Ectoparasite** : tiques, poux / **Endoparasite** : ténia

NB : La chenille processionnaire du Pin *Thaumetopoea pityocompa* est un parasite du Pin d'Alep mais elle est à son tour parasitée par une bactérie : *Bacillus thuringiensis*, on dit que c'est un hyper parasitisme.

7- Le commensalisme et la coopération

Les interactions favorables ou nécessaires pour l'un des organismes en présence (commensalisme) ou pour les deux (coopération) sont des liens répandus dans les biocénoses.

- Commensalisme** : certains végétaux type épiphytes tels que les lichens qui se fixent sur les végétaux ligneux ou les mousses au niveau des troncs.
- Coopération** : de nombreux organismes vivants peuvent s'associer entre eux et en tirer un bénéfice réciproque même s'ils peuvent se développer indépendamment dans des conditions normales.

* Au niveau de la rhizosphère il ya développement de certaines microorganismes édaphiques qui assure une certaine minéralisation et une protection indirecte des racines (par certains antibiotiques) des plantes contre les organismes pathogènes.

* Ongulés de différentes espèces dans les savanes : surveillent les prédateurs.

8- Le mutualisme ou symbiose

La relation constitue la forme la plus évoluée des associations entre espèces. Elle présente un caractère obligatoire pour les organismes qui la pratiquent et se traduit par un bénéfice réciproque.

* La symbiose est une relation entre deux êtres vivants avec bénéfices réciproques souvent au point que chacun d'eux ne pourrait vivre sans l'autre.

***/* Autres informations sur les symbioses**

1- Les symbioses entre autotrophes et hétérotrophes

Les symbioses entre êtres autotrophes et hétérotrophes sont caractérisées par l'association d'un végétal chlorophyllien avec un animal ou un champignon, organismes sans chlorophylle. Le caractère biochimique, trophique, de ces symbioses est évident. Les végétaux chlorophylliens sont phototrophes, tandis que les animaux et les champignons, incapables de ces synthèses, sont hétérotrophes, c'est-à-dire doivent prélever la totalité de leurs aliments chez des phototrophes. Toutes les symbioses, très nombreuses, entre plantes vertes et animaux ou champignons sont la conséquence de cette inégalité fondamentale dans les pouvoirs de synthèse.

• Les symbioses dans la rhizosphère

Les sols sont peuplés de micro-organismes hétérotrophes, mais aussi de racines constamment approvisionnées en matières organiques provenant des substances synthétisées dans les feuilles. Une partie de ces matières (sucres et acides organiques, mucilages, aminoacides, vitamines, enzymes) est exsudée par les extrémités jeunes, non encore lignifiées, de l'appareil racinaire, et diffuse dans le sol. C'est pourquoi les micro-organismes pullulent dans tous les espaces soumis à cette influence (*rhizosphère*). Or, certains de ces micro-organismes contractent avec les parties non lignifiées des racines des associations de caractère nettement symbiotique. Mais la plupart d'entre eux en sont incapables.

- Les mycorhizes

Les mycéliums de nombreuses espèces de champignons supérieurs (Ascomycètes et Basidiomycètes) se développent avec prédilection en liaison intime avec des racines. On donne le nom de mycorhizes (« champignons des racines ») à ces associations, réalisées dans tous les groupements végétaux, sous tous les climats, et dont le rôle est particulièrement important dans les milieux forestiers : tous les arbres de nos forêts (chênes, hêtres, ...).

2- Les symbioses entre hétérotrophes

Les partenaires sont deux animaux ou un animal et un micro-organisme hétérotrophe (bactérie, champignon, protiste...).

- Les associations entre animaux

Les associations entre animaux n'impliquent pas une liaison organique étroite entre les partenaires ; elles dépendent de comportements complémentaires et ont souvent un caractère de [commensalisme](#).

BIODIVERSITE ET FONCTIONNEMENT DES ECOSYSTEMES

Le maintien du fonctionnement des écosystèmes et des services qu'ils rendent à l'humanité fait partie des arguments principaux en faveur de la protection de la biodiversité (Figure 1). Le terme « fonctionnement » réfère aux propriétés et/ou processus biologiques et physiques au sein des écosystèmes, comme par exemple le recyclage ou la production de biomasse. Les « services » représentent tous les bénéfices que les populations humaines obtiennent des écosystèmes, notamment la production de nourriture, la régulation du ruissellement, la pollinisation, *etc.* (Mouquet *et al.*, sd).

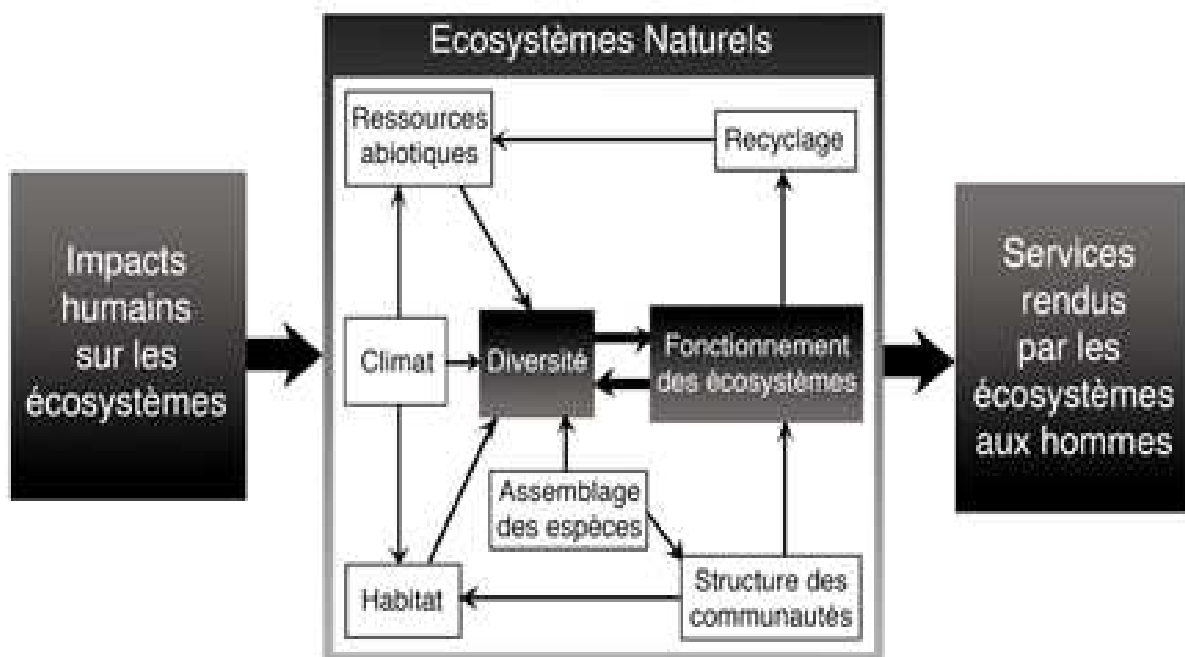


Figure 1. Fonctionnement des écosystèmes et interaction avec les sociétés humaines.

Le fonctionnement des écosystèmes naturels est affecté par l'action de l'homme, qui impacte notamment la diversité des communautés. **Ceci de façon directe** (extinctions par surexploitation ou perte d'habitat par exemple); **mais aussi indirecte**, en agissant sur les facteurs écologiques qui la détermine, aussi bien les facteurs physiques (climat, pollutions, *etc.*) que biologiques (introduction de nouvelles espèces, pêche commerciale, *etc.*). Le fonctionnement de l'écosystème affecte en retour toute une gamme de services dont l'Homme bénéficie. Figure adaptée de Chapin *et al.* (2000). *Nature*, 405, 234-242.

Transcendant les questions éthiques associées à l'impact de l'homme sur la nature, notre société a trouvé dans cette notion de « service » une rationalisation quasi économique du concept de diversité biologique. Au delà des limites et des dérives d'une simple approche comptable de la diversité (et qui

seront discutées dans un autre regard), il y a un vrai raisonnement liant diversité et fonctionnement des écosystèmes. Raisonnement souvent méconnu voir inconnu de ceux-là même qui en défendent l'importance pour notre société ! Ce regard donc, pour, indépendamment du débat sur l'économie de la biodiversité, mieux expliquer les mécanismes biologiques qui lient la diversité des espèces (ou diversité spécifique) au fonctionnement des écosystèmes.

Deux décennies de recherche accompagnés d'une synthèse entre plusieurs sous-disciplines de l'écologie, essentiellement l'écologie des communautés et celle des écosystèmes[1], ont permis d'explorer ces mécanismes (cf. Figure 2). De cette synthèse, on sait maintenant que les facteurs abiotiques (physico-chimiques) et les interactions biologiques déterminent la diversité en espèces que peut contenir une communauté, et que la composition de cette communauté affecte en retour le fonctionnement de l'écosystème. La vaste quantité d'expériences réalisées depuis le début des années 1990 a permis aux chercheurs de confirmer un effet généralement positif de la diversité des espèces sur le fonctionnement des écosystèmes.

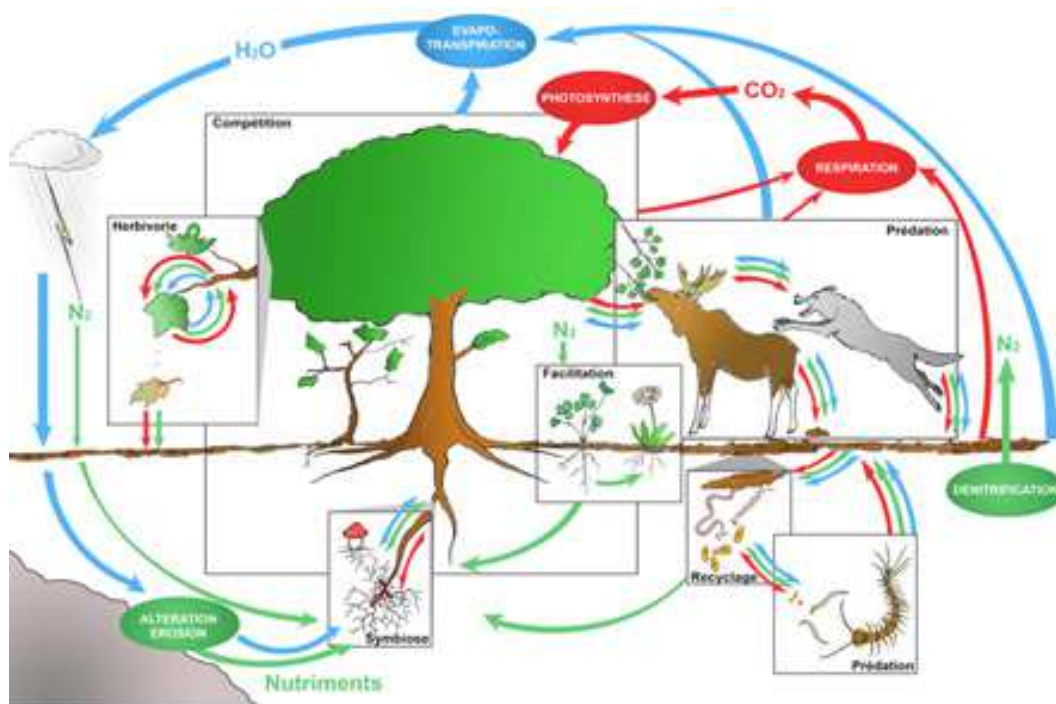


Figure 2 : Représentation schématique des interactions et flux dans les écosystèmes.

Les écosystèmes abritent des communautés d'espèces qui interagissent entre elles de différentes façons. On représente ici les principaux types d'interactions soit négatives (prédation, parasitisme, herbivorie, compétition), soit positives (facilitation, symbiose). Les écologues des communautés s'intéressent aux interactions entre organismes (boîtes : effets de la compétition/prédation, mécanismes de coexistence des espèces, etc.) et supposent que les propriétés des écosystèmes découlent de ces interactions. Les écologues des écosystèmes intègrent d'une façon plus globale les flux de matière et d'énergie dans les écosystèmes (flèches entre les boîtes : stockage du carbone dans les forêts, recyclage de l'azote, etc.) et considèrent quant à eux que c'est les caractéristiques physico/chimique de l'environnement qui

structure les écosystèmes et régulent leur fonctionnement. Les communautés d'espèces constituent donc un nœud de couplage des différents cycles biogéochimiques. Les écologues ont aussi étudié comment la diversité influençait la stabilité des communautés écologiques. Des études théoriques ont ainsi montré que la diversité des espèces pouvait jouer le rôle d'une « assurance » face aux perturbations environnementales (par exemples les aléas climatiques ou la fragmentation des habitats). On compare cet effet à celui de la diversité des investissements en finances et au vieil adage qui suggère de ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier ! Ces résultats sont fondamentaux car ils soulignent un effet de la biodiversité qui ne pouvait pas être détecté dans les approches classiques qui se plaçaient à un endroit et un moment donnés. Peu d'études ont essayé de mesurer in situ cette relation entre diversité biologique et stabilité du fonctionnement des écosystèmes mais les quelques données disponibles (notamment les expériences effectuées sur les prairies dans le Minnesota Figure 3b) suggèrent un fort effet tampon de la diversité face à une perturbation environnementale (ici la sécheresse).

Trois mécanismes ont été proposés pour expliquer cette relation positive. D'abord, l'*effet d'échantillonnage* qui est purement « statistique ». Les écosystèmes riches en espèces seraient plus productifs, c'est-à-dire que leur biomasse augmente rapidement, simplement parce qu'ils ont plus de chance d'abriter une espèce très productive. Ensuite, la *complémentarité* des espèces qui est le résultat d'un agencement favorable des traits écologiques présents au sein des communautés. Dans ce cas, en augmentant la diversité, on augmente le nombre fonctions réalisées par les espèces, car plus de niches écologiques sont utilisées au sein de l'écosystème et les ressources sont mieux exploitées. Par exemple deux espèces de plantes équipées l'une de racines de surface, l'autre de racines profondes, utiliseront mieux qu'une seule les ressources d'un sol, accroissant la productivité locale, car elles ont des traits écologiques complémentaires. Enfin, la *facilitation* est définie comme une interaction positive entre deux espèces. Par exemple, en les abritant du rayonnement direct du soleil, les ronciers créent en plein milieu d'une prairie un habitat favorable pour des espèces végétales telles que certains arums qui ne fréquentent que des milieux sombres et humides. Ces espèces « favorisés » permettant à leur tour de mieux utiliser les ressources disponibles localement et donc augmentant la productivité.

Ces différents mécanismes peuvent s'exprimer localement mais aussi sur des échelles spatiales et temporelles plus larges, depuis l'assemblage des espèces de bactéries et de champignons du morceau de fromage au fond du frigo, jusqu'aux forêts tropicales et aux océans. La plupart des nombreuses expériences qui ont testé ces hypothèses ont par contre utilisé des communautés végétales, surtout pour des raisons pratiques. Deux d'entre elles ont particulièrement marqué la communauté scientifique : l'expérience paneuropéenne Biodepth et celles menées à Cedar Creek au Minnesota. Ces expériences ont montré un effet positif de la diversité sur l'accumulation de biomasse dans les communautés (Figure 3).

Si le rôle de la diversité horizontale (au sein d'un même niveau trophique) sur le fonctionnement des écosystèmes semble prédictible, il en va tout autrement du rôle de la diversité au sein de plusieurs niveaux trophiques (diversité verticale). Un point de départ pour comprendre les interactions entre un prédateur et sa proie est ce que les écologues appellent l'effet « top-down ». Cette expression réfère au contrôle de l'abondance d'une proie par son prédateur. Dans les réseaux trophiques plus diversifiés, l'effet top-down entraîne une cascade d'effets trophiques. Si un herbivore va réduire la biomasse de

plantes dans un écosystème, il sera lui-même contraint par la présence d'un carnivore. Cette cascade se répercutera du prédateur jusqu'au bas de la chaîne, de sorte que le carnivore « libère » la plante de son herbivore et par conséquent augmente sa productivité. Dans certains cas également, la présence des consommateurs supérieurs peut accélérer le recyclage des nutriments et par conséquent la productivité des écosystèmes. Ainsi, la structure et la diversité des réseaux trophiques auraient un effet majeur sur la productivité. Sachant que les grands prédateurs sont souvent les organismes les plus exploités et les plus sensibles aux activités humaines, on comprend bien les conséquences que cela peut entraîner sur le fonctionnement des écosystèmes ! »

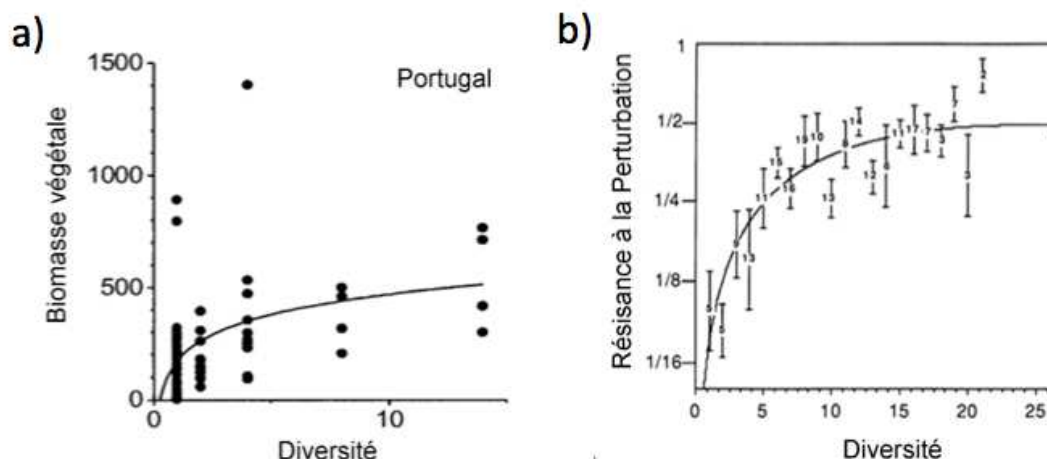


Figure 3 : Relation entre la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes.

a) Résultats empiriques démontrant une relation positive entre la diversité et la production de biomasse. Les résultats proviennent de l'expérience Biodepth (pour le site du Portugal) qui a manipulé expérimentalement la diversité des plantes dans des prairies situées sur plusieurs sites dans toute l'Europe. (Source : Hector, A., et al. 1999 Science 286, 1123-1126.).

b) Résultats empiriques démontrant une relation positive entre la diversité et la stabilité de la production de biomasse après une perturbation. Ces résultats proviennent d'une expérience où l'on compare la résistance à une perturbation (sécheresse) de parcelles présentant différents niveaux de diversité (Source : Tilman, D. 1996. Ecology 77, 350-363). Un problème avec la plupart des expériences effectuées, sont qu'elles négligent souvent les interactions de consommation entre espèces au sein d'une même communauté (prédation et parasitisme). Pourtant, les écosystèmes sont des réseaux d'interactions très complexes, hautement organisés et à haute diversité trophique [3]

En définitive les écologues ont élucidé d'une part les facteurs écologiques qui modulaient la biodiversité et d'autre part comment la diversité modulait à son tour la biomasse produite. Il reste encore à intégrer ces connaissances pour mieux comprendre si la diversité peut favoriser... la diversité ! A ce sujet, les premiers écologues des écosystèmes ont proposé dans les années 60 l'idée que des processus de rétroaction positive contribuaient à l'organisation des écosystèmes. Par exemple la théorie Gaïa lancée par le britannique Lovelock a durant une nombreuse année alimentée la controverse. Selon cette hypothèse, la Terre serait analogue à un système physiologique dynamique qui maintient

l'environnement de la planète dans des conditions favorables au développement de la vie. L'ensemble des organismes vivants seraient les composantes d'un vaste organisme, comme le sont les cellules d'un corps humain, assurant la régulation de l'environnement pour maximiser son fonctionnement. Un exemple souvent cité pour illustrer la théorie Gaïa est la stabilisation de la composition de l'atmosphère, laquelle contrôle à la fois le climat, la production primaire (dépendante du gaz carbonique) et la production secondaire (dépendante de l'oxygène). Cette théorie pêche sans doute par ses hypothèses trop fortes, et par un certain anthropocentrisme de sa notion centrale d'harmonie. Néanmoins, on peut considérer des effets de rétroaction aux échelles des écosystèmes à la lumière des mécanismes reliant diversité biologique et fonctionnement des écosystèmes, que nous avons détaillés dans ce regard. Dans le contexte actuel des changements globaux, l'influence de l'homme sur les cycles écologiques pourrait court-circuiter cette auto-régulation et faire basculer la dynamique d'un grand nombre d'écosystèmes vers des états moins fonctionnels et/ou moins stables et donc moins favorables à notre espèce. Cette idée fait actuellement son chemin, à l'aube d'une théorie intégrée de la biodiversité à l'interface entre l'écologie des communautés et des écosystèmes.

CYCLES BIOGEOCHIMIQUES

Ce sont des cycles qui participent dans la vie, la géologie et en chimie (H_2O , C, O, N, S, P). Notez bien qu'il existe des cycles ouverts et des cycles fermés.

Définition¹ : Un **cycle biogéochimique** correspond à un ensemble de processus grâce auxquels un élément passe d'un milieu à un autre, puis retourne dans son milieu original, en suivant une boucle de recyclage infinie.

Définition² : En écologie et plus généralement en sciences de la Terre, un **cycle biogéochimique** est le processus de transport et de transformation cyclique d'un élément ou composé chimique entre les grands réservoirs que sont la géosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère, dans lesquels se retrouve la biosphère.

Un tel cycle induit souvent des passages de l'état organique à l'état minéral au sein de la biosphère. Les divers cycles en interaction confèrent à la biosphère une capacité de régulation, appelée homéostasie. Celle-ci est à la base de la pérennité des écosystèmes, grâce à la grande stabilité qu'elle assure, tout du moins en dehors des interventions humaines et phénomènes géoclimatiques exceptionnels.

Les organismes vivants, pour assurer leur subsistance, ont besoin de l'apport constant de certains éléments essentiels, notamment le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le phosphore et le soufre. Ces éléments se retrouvent dans le sol, dans l'atmosphère, dans l'eau ainsi que dans les tissus vivants. Les éléments circulent continuellement d'un milieu à l'autre, d'une forme à une autre. C'est cette circulation continue que l'on nomme cycle biogéochimique.

Tous les cycles biogéochimiques, peu importe l'élément considéré, regroupent à la fois des processus biologiques, des processus chimiques et des processus géologiques. Les **processus biologiques**, comme la respiration ou la digestion, ainsi que les **processus chimiques**, comme la combustion ou les réactions de synthèses, se déroulent sur une courte période de temps. Les éléments circulent donc rapidement dans cette portion d'un cycle, en quelques heures ou en quelques jours. De l'autre côté, les **processus géologiques**, comme l'érosion ou la sédimentation, se déroulent sur une échelle de temps beaucoup plus importante, en terme de mois et même de plusieurs années.

La circulation de chacun des éléments mentionnés précédemment peut être expliquée à l'aide d'un cycle biogéochimique. Les liens suivants décrivent trois de ces cycles :

- Le cycle du carbone
- Le cycle de l'azote
- Le cycle du phosphore

NB : Les cycles les plus importants sont : le cycle de l'azote ;

- le cycle du carbone ;
- le cycle de l'eau ;
- le cycle de l'hydrogène ;
- le cycle de l'oxygène ;
- le cycle du phosphore ;
- le cycle du soufre ;
- les cycles des métaux.

NB : Les grands cycles biogéochimiques sont reliés à la tectonique des plaques et à l'océan. Les fonds marins jouent un rôle majeur dans ces cycles.

LE CYCLE DU CARBONE

Définition : Le **cycle du carbone** est un cycle biogéochimique qui correspond à l'ensemble des échanges de carbone sur la planète.

Élément essentiel à toute forme de vie, on retrouve deux types de carbone dans la nature. D'abord, il est à la base des molécules complexes (protéines, lipides, glucides) qui servent à la construction des tissus des organismes vivants. On parle dans ce cas de carbone organique. On retrouve aussi le carbone inorganique lorsqu'il n'est pas lié aux organismes vivants. C'est entre autre le cas du dioxyde de carbone (CO_2) et du méthane (CH_4), deux gaz à effet de serre qui ont un impact majeur sur le climat de la planète.

Il existe un échange constant de carbone entre l'hydrosphère, la lithosphère, la biosphère et l'atmosphère. Toutefois, l'essentiel du cycle à court terme se déroule entre l'atmosphère, les couches superficielles du sol et des océans, et la biosphère. Il existe deux grands réservoirs de carbone qui piègent celui-ci pour une longue période: la lithosphère et l'hydrosphère grâce aux sédiments, aux roches et aux océans.

Le recyclage chimique du carbone est un élément critique pour le maintien de l'équilibre notre planète. En effet, ce cycle influence directement la productivité biologique et le climat. Parmi les processus qui permettent le recyclage chimique du carbone, certains sont très rapides (processus biochimiques) alors que d'autres se déroulent sur plusieurs centaines d'années (processus géochimiques).

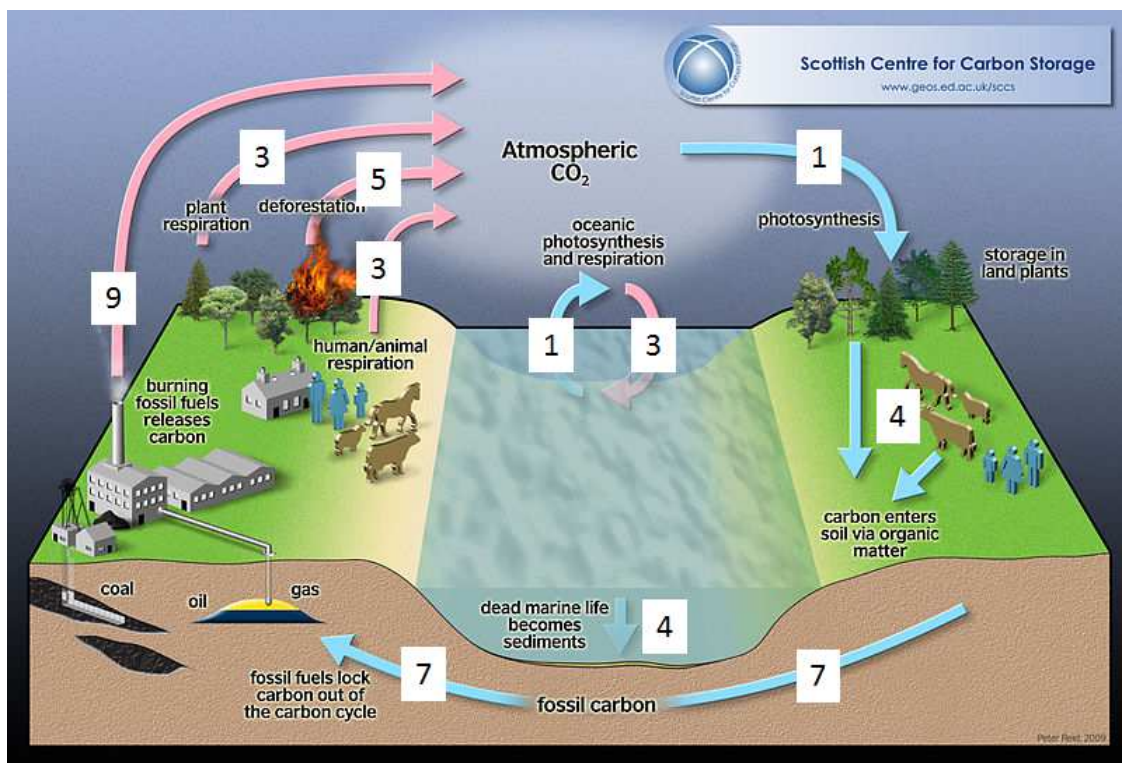
* **Les principaux processus biochimiques** se déroulant lors du cycle du carbone sont:

1. La photosynthèse
2. La consommation
3. La respiration
4. La décomposition et la fermentation
5. La déforestation et les feux de forêts

** **Les principaux processus géochimiques** se déroulant lors du cycle du carbone sont:

6. La dissolution et la fixation en carbonate de calcium
7. La sédimentation et la fossilisation
8. Le volcanisme
9. La combustion de combustibles fossiles

De plus, certains facteurs, principalement d'origines anthropiques, peuvent modifier le cycle du carbone.



Source

Les processus biochimiques du cycle du carbone

1. La photosynthèse

La photosynthèse se déroule autant en milieu terrestre qu'en milieu aquatique. Par ce processus, les végétaux emmagasinent du carbone d'origine atmosphérique ou dissous dans l'eau. Ils utilisent l'énergie solaire pour transformer le dioxyde de carbone (CO₂) en glucose en produisant du dioxygène. Le glucose servira ainsi de matière organique servant à la fabrication des tissus végétaux.

2. La consommation

La consommation se déroule autant en milieu terrestre qu'en milieu aquatique. Les animaux herbivores obtiennent le carbone nécessaire à leur croissance en consommant des végétaux. Les animaux carnivores, quant à eux, absorbent le carbone contenu dans les animaux dont ils se nourrissent. Le carbone est ainsi transféré d'un échelon à l'autre le long d'une chaîne alimentaire.

3. La respiration

La respiration se déroule autant en milieu terrestre qu'en milieu aquatique. Le carbone est retourné à l'atmosphère par le processus de respiration. Tous les êtres vivants, qu'ils soient végétal ou animal, respirent. Ils rejettent donc dans l'atmosphère ou dans l'hydrosphère, sous forme de dioxyde de carbone, une partie de la quantité de carbone qu'ils avaient ingéré au départ.

4. La décomposition et la fermentation

La portion du carbone qui n'est pas relâchée par la respiration s'élimine dans les déchets végétaux et animaux (urine, selles, organismes morts, etc.). Dans les sols et les sédiments des lacs et des océans, ces déchets sont décomposés par des microorganismes. Selon la présence ou l'absence de dioxygène,

les décomposeurs effectueront la décomposition ou la fermentation de la matière organique. Ces processus libèrent du dioxyde de carbone (CO_2) et du méthane (CH_4) tout en permettant de transformer la matière organique en matière inorganique.

5. La déforestation et les feux de forêt

Sous l'action de la combustion, le carbone contenu dans les troncs et les feuilles des arbres se transforme en dioxyde de carbone (CO_2). La déforestation, quant à elle, diminue le nombre d'arbres en présence pouvant effectuer la photosynthèse. Habituellement, en l'absence de ces deux phénomènes, la quantité de carbone fixée à l'échelle planétaire par les organismes qui réalisent la photosynthèse s'équilibre avec celle qui est libérée par la respiration et la décomposition des autres organismes. Toutefois, en présence de ces deux phénomènes, davantage de dioxyde de carbone sera relâché dans l'atmosphère.

Les processus géochimiques du cycle du carbone

6. La dissolution et la fixation en carbonate de calcium

La dissolution du carbone se déroule dans l'hydrosphère. Une grande partie du dioxyde de carbone atmosphérique est dissous dans les océans. En effet, les océans sont des puits à carbone, car ils prélèvent globalement plus de carbone à l'atmosphère qu'ils ne lui en redonnent. Une partie du dioxyde de carbone dissous dans l'eau réagit avec les molécules d'eau, puis avec du calcium pour devenir du carbonate de calcium (CaCO_3). On retrouve le carbonate de calcium dans la composition des coquilles et squelettes des organismes marins.

7. La sédimentation et la fossilisation

La sédimentation se déroule principalement dans l'hydrosphère. Les coquilles et les squelettes des organismes marins morts s'accumulent au fond de l'océan. Le carbonate de calcium s'accumule donc dans les sédiments et donne naissance à des roches carbonatées. Ces roches suivent le mouvement des plaques tectoniques. Elles plongent sous le manteau de la terre lors du processus de subduction et peuvent éventuellement être ramenées à la surface. Elles peuvent aussi être enfouies dans la croûte terrestre et y être piégées pour de nombreuses années.

8. Le volcanisme

Les éruptions volcaniques peuvent être en surface de la Terre ou sous-marine. Dans les deux cas, au contact du magma, le carbone contenu dans les roches carbonatées peut se libérer et retourner dans l'atmosphère. Les volcans et les geysers laissent échapper du dioxyde de carbone et du méthane dans l'atmosphère.

9. La combustion de combustibles fossiles

Les organismes morts qui tombent au fond de l'océan forment une couche de sédiments. Ils peuvent parfois se transformer en combustibles fossiles comme le charbon ou le pétrole s'ils demeurent enfouies dans les sédiments pendant des centaines de millions d'années. L'Homme effectue la combustion de ces combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel) pour répondre à ses besoins en énergie. Par ce fait, il augmente la quantité de dioxyde de carbone relâché dans l'atmosphère et dérègle le cycle du carbone.

Les facteurs qui peuvent modifier le cycle du carbone

Comme on peut le constater, les phases géologiques du carbone, comme la subduction et la formation de combustibles fossiles, se déroulent sur une période de millions d'années tandis que les phases biologiques du cycle du carbone, comme la photosynthèse, la respiration, la décomposition, peuvent se produire sur une période allant de quelques jours à des milliers d'années.

Avant l'avènement de l'ère industrielle, à la fin du 19^e siècle, le cycle du carbone ne faisait intervenir que l'atmosphère, les océans et la biomasse terrestre. Les combustibles fossiles ne faisaient pas, à ce moment-là, partis du cycle et le cycle du carbone était équilibré. Mais l'homme, en détruisant la végétation et en utilisant les combustibles fossiles, est responsable du déséquilibre du cycle global du carbone. On utilise les combustibles fossiles à une trop grande vitesse. Ils n'ont pas le temps de se régénérer. La combustion des matières fossiles fait en sorte qu'il y a un surplus de carbone qui rejoint l'atmosphère et les océans.

On estime que la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère terrestre a augmenté de près de 30% depuis le milieu du 19^e siècle. Les activités humaines libèrent maintenant plus de carbone que les océans et les forêts ne peuvent en absorber et déséquilibrent le cycle naturel du carbone. Ce déséquilibre peut provoquer des changements climatiques importants. Par exemple, il représente la première cause du renforcement de l'effet de serre.

LE CYCLE DE L'AZOTE

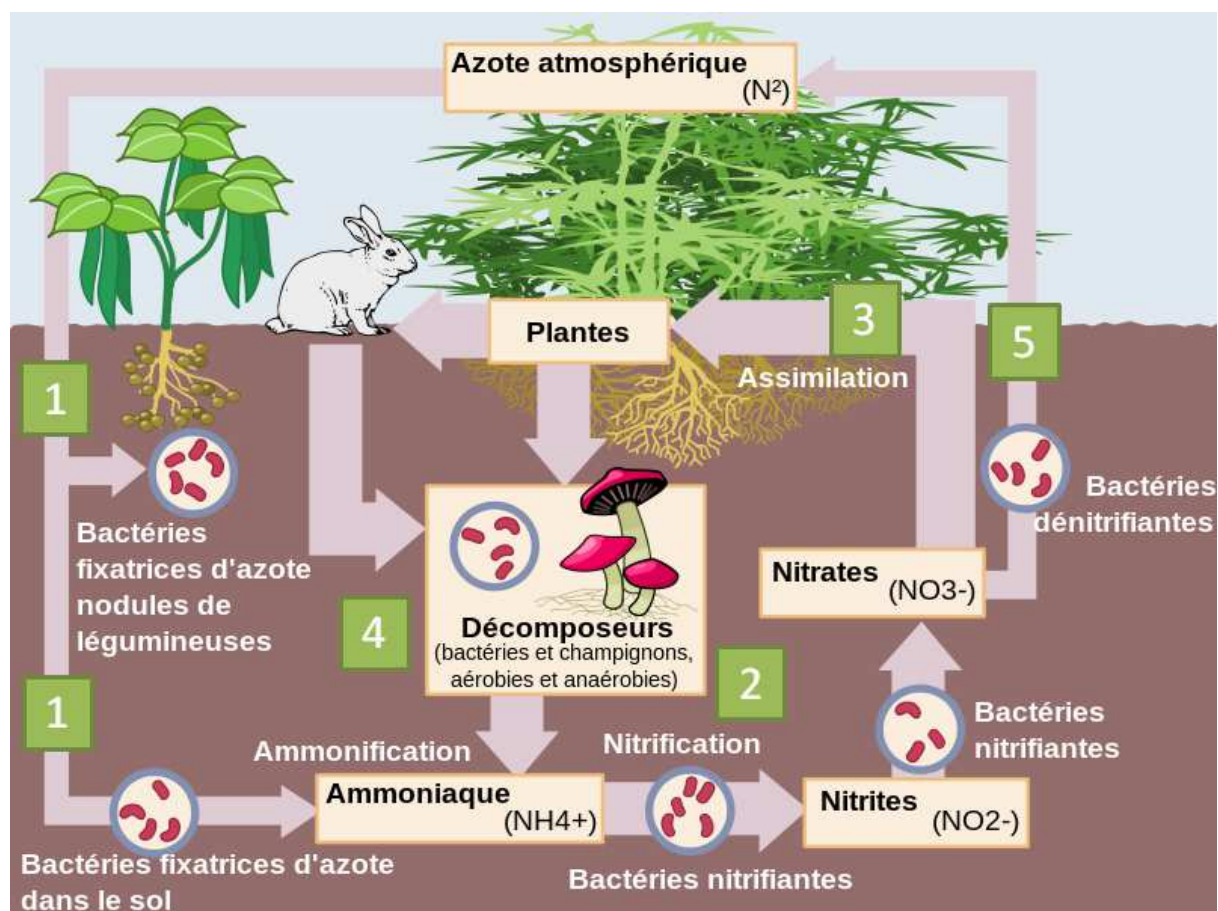
Définition : Le **cycle de l'azote** est un cycle biogéochimique qui correspond à l'ensemble des échanges d'azote sur la planète.

Le diazote est le plus abondant des gaz atmosphériques (l'air contient 78% de ce gaz). L'azote est essentiel au fonctionnement des êtres vivants. Il sert notamment à fabriquer des protéines et à produire les bases azotées présentes dans l'ADN. Il ne peut toutefois pas être assimilé directement sous cette forme par la majorité des vivants. Ce sont des bactéries qui transforment l'azote de l'atmosphère en une forme assimilable par les autres organismes vivants. C'est grâce à son cycle biogéochimique que l'azote peut passer d'une forme à une autre.

Remarque importante : Il est à noter que les processus du cycle de l'azote se déroulent autant dans la **lithosphère** que dans l'**hydrosphère**.

Les principaux processus qui se déroulent lors du cycle de l'azote sont les suivants:

1. La fixation de l'azote
2. La nitrification
3. L'absorption d'azote par les végétaux et les animaux
4. La décomposition des déchets
5. La dénitrification



1. La fixation de l'azote

Certaines bactéries, vivant dans le sol ou dans l'eau, captent l'azote atmosphérique et le transforment en azote utilisable par les plantes et les animaux, soit en ammoniac (NH_3). Une portion de l'ammoniac est utilisée par les végétaux et les animaux, alors qu'une autre portion réagit avec de l'hydrogène pour former de l'ammonium (NH_4^+). Parmi les bactéries capables de réaliser la fixation de l'azote, on retrouve des cyanobactéries et certaines bactéries, comme celles du genre *Rhizobium*, vivant en symbiose avec des plantes (entre autres des légumineuses).

2. La nitrification

Des bactéries oxydent l'ammonium (NH_4^+) pour former des nitrites (NO_2^-) et d'autres bactéries oxydent les nitrites (NO_2^-) pour former des nitrates (NO_3^-). Ce sont deux réactions d'oxydation.

3. L'absorption d'azote par les végétaux et les animaux

Les végétaux sont capables, grâce à leurs racines, d'absorber le nitrate et l'ammonium présent dans le sol ou dans l'eau. Les végétaux représentent la seule source primaire d'azote disponible pour les animaux herbivores. C'est en mangeant les végétaux que les animaux herbivores ingèrent leur azote. L'azote suit ensuite la chaîne alimentaire. Les carnivores ingèrent leur azote en se nourrissant des animaux herbivores ou d'autres animaux.

4. La décomposition des déchets

On retrouve de l'azote dans les déchets végétaux et animaux (urine, selles, organismes morts, etc.). Certains champignons et bactéries décomposent ces substances et produisent alors de l'ammoniac. Cet ammoniac va pouvoir se dissoudre pour former de l'ammonium.

5. La dénitrification

Les bactéries dites dénitrifiantes transforment les nitrates en diazote. Le diazote retourne alors dans l'atmosphère. Cette réaction chimique produit aussi du dioxyde de carbone (CO_2) et de l'oxyde d'azote (N_2O).

Les facteurs qui peuvent modifier le cycle de l'azote

Parmi les facteurs naturels qui peuvent modifier le cycle de l'azote, on retrouve, entre autres, la température, le taux d'humidité et le pH. Cependant, avec les explications données ci-dessus, on comprendra que l'activité humaine est malheureusement le facteur qui a le plus d'impact sur la modification du cycle de l'azote. Les engrais que l'on étend sont riches en ammoniac (NH_3), en ammonium (NH_4^+) et en nitrates (NO_3^-). Par le lessivage, ce surplus de composés azotés se retrouve dans les cours d'eau.

L'utilisation des combustibles fossiles dans les moteurs et les centrales thermiques transforment l'azote en oxyde d'azote. La dénitrification est alors augmentée. Or, la dénitrification émet aussi dans l'atmosphère une faible quantité d'oxyde d'azote (N_2O). L'oxyde d'azote est un gaz à effet de serre qui contribue à détruire la couche d'ozone dans la stratosphère. 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.

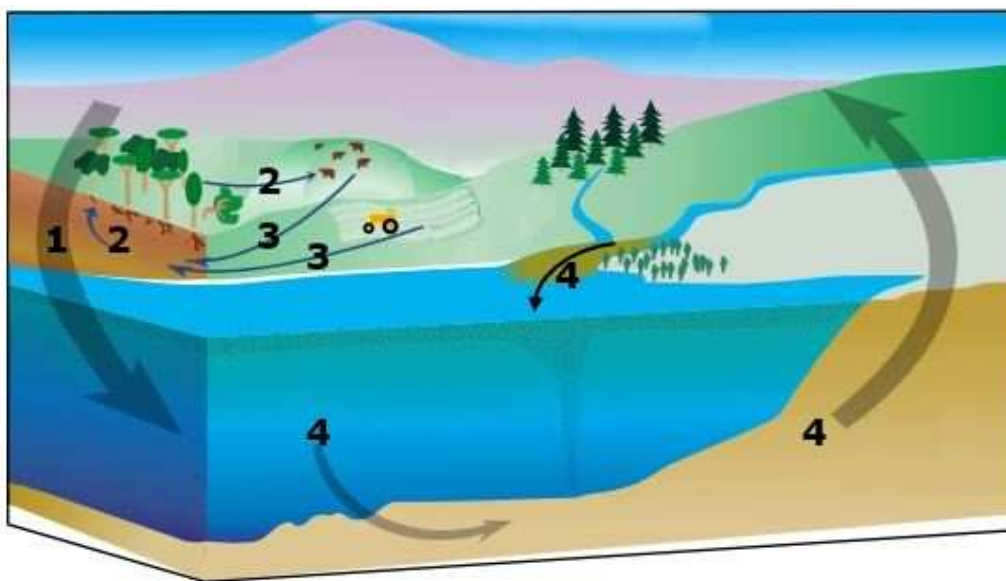
Le cycle du phosphore

Définition : Le **cycle du phosphore** est un cycle biogéochimique qui correspond à l'ensemble des échanges de phosphore sur la planète.

Le phosphore est un élément essentiel à la vie puisqu'il sert, notamment, de matériau de base à l'ADN, aux dents, aux os et aux coquilles. Le phosphore est constamment échangé entre la lithosphère, l'hydrosphère et les organismes vivants. Toutefois, contrairement aux cycles du carbone et de l'azote, il s'agit d'un cycle sédimentaire, c'est-à-dire qu'il ne possède pratiquement pas de composantes gazeuses et qu'il n'implique donc pas de processus atmosphériques. L'essentiel du phosphore provient de l'érosion des roches sédimentaires qui en libère de petites quantités, sous la forme dissoute de phosphates directement assimilables par les végétaux.

Les principaux processus qui se déroulent lors du cycle du phosphore sont les suivants:

1. L'érosion
2. L'absorption par les êtres vivants
3. La décomposition des déchets
4. La prolifération du plancton et la sédimentation



1. L'érosion

Dans la nature, le phosphore se trouve surtout dans les roches de la lithosphère. Sous l'action de la pluie et du vent, une petite quantité de phosphore s'échappe des roches, généralement sous forme de phosphates.

2. L'absorption par les êtres vivants

Les phosphates entrent dans les chaînes alimentaires par les végétaux. Étant nécessaires à leur croissance, les phosphates sont absorbés par ceux-ci. Les herbivores ingèrent ensuite les phosphates en mangeant des végétaux. La chaîne alimentaire se termine lorsque les carnivores consomment des herbivores ou d'autres animaux.

3. La décomposition des déchets

Les phosphates ingérés par les animaux retournent dans le sol sous forme de matière fécale et d'urine. En outre, la dégradation des animaux et des végétaux morts par les décomposeurs libère aussi des phosphates. Ainsi, les phosphates retournent dans le sol et le cycle peut alors recommencer.

4. La prolifération du plancton et la sédimentation

Le cycle du phosphate se déroule aussi dans l'hydrosphère. Des phosphates provenant des roches ou excrétés par les animaux et les décomposeurs rejoignent les océans. Une partie favorise la prolifération du plancton, alors que l'autre partie tombe au fond des plans d'eau et se mélange aux sédiments. Très lentement, sur des millions d'années, ces sédiments forment des roches et le phosphore retrouve sa forme d'origine (la flèche à droite de l'image ci-dessus).

Les facteurs qui peuvent modifier le cycle du phosphore

Le cycle naturel du phosphore est destabilisé par les activités humaines, principalement en raison d'apports supplémentaires en phosphore. Les activités humaines telles que l'épandage de grandes

quantités d'engrais riches en phosphates sur les terres agricoles, le rejet de résidus de savons phosphatés dans les eaux usées des résidences et des industries entraînent un déséquilibre dans le cycle biogéochimique du phosphore. Un excès de phosphore dans les rivières, les lacs et les eaux marines côtières accélère la croissance des algues, ce qui favorise le processus d'eutrophisation des milieux aquatiques.

CYCLE DE L'EAU

L'eau présente sur Terre est la même depuis la création de la Terre il y a 4 milliards d'années. En suivant un cycle naturel, l'eau se renouvelle perpétuellement tout en permettant aux êtres vivants d'exister et de vivre. Le cycle de l'eau (ou cycle hydrologique) est un modèle représentant les flux entre les grands réservoirs d'eau liquide, solide ou gazeuse, sur Terre : les océans, l'atmosphère, les lacs, les cours d'eau, les nappes souterraines, les glaciers. Le soleil est le moteur de l'ensemble du cycle. C'est l'énergie solaire qui entraîne les changements d'état de l'eau : la formation et la fonte des glaces ou encore l'évaporation, qui entraîne tous les échanges et les étapes suivantes du cycle.

*/ Le cycle de l'eau est un facteur essentiel pour que l'eau puisse rester une ressource disponible pour l'ensemble des êtres vivants. Ce cycle, entre le ciel et la Terre, suit son cours selon **4 étapes : évaporation, condensation, précipitations, et ruissellement.**

1 – L'évaporation et la transpiration des végétaux :

Les rayons du soleil réchauffent l'eau des rivières, des fleuves, des lacs, des mers et des océans et le fait passer de l'état liquide à l'état de vapeur d'eau (gazeux) : c'est l'évaporation. Les plantes et les autres espèces végétales puisent l'eau dans le sol et la rejettent sous la forme de vapeur d'eau. Environ 10% des précipitations tombant sur la Terre proviennent de la transpiration des végétaux, le reste est en conséquence dû à l'évaporation. La transpiration des plantes et l'évaporation due à l'humidité dans le sol libèrent de la vapeur d'eau qui s'élève dans l'atmosphère sous la forme de nuages.

L'action du vent déplace les nuages au-dessus des terres. Cela va donner lieu aux étapes suivantes :

2 – La condensation :

Au contact de l'atmosphère, la vapeur d'eau se refroidit et se transforme en petites gouttelettes qui sont à l'origine de la formation des nuages – cette étape se nomme la condensation – qui, sous l'action des vents, vont se diriger vers l'intérieur des terres.

3 – Les précipitations :

Elles sont transportées par la circulation atmosphérique, les nuages se déplacent et l'effet de la gravité aidant, l'eau retombe sur le sol sous forme de pluie, de neige ou de grêle (état liquide ou solide), qu'on appelle généralement « précipitations ».

4 – Le ruissellement ou l'infiltration :

L'eau qui n'est pas absorbée par le sol, ruisselle le long des pentes jusqu'à se déverser dans les rivières, les fleuves et les lacs. Elle sera ensuite transportée jusqu'aux mers et océans, ce sont les «

cours d'eau de drainage ». L'eau de pluie s'écoule lorsqu'elle rencontre un sol imperméable et pénètre dans les sols perméables. En s'infiltrant dans un sol perméable, l'eau peut parfois remplir une poche souterraine (grotte) et former un véritable réservoir d'eau. L'eau contenue dans ce réservoir (nappe d'eau ou nappe phréatique) trouve parfois un chemin naturel vers l'extérieur.

L'endroit où jaillit l'eau hors du sol s'appelle la source. Certaines nappes d'eau souterraines, une fois découvertes, peuvent aussi être exploitées par l'homme comme réserves d'eau potable.

A noter : Un peu moins de la moitié des précipitations recharge les nappes phréatiques, le reste part en évaporation.

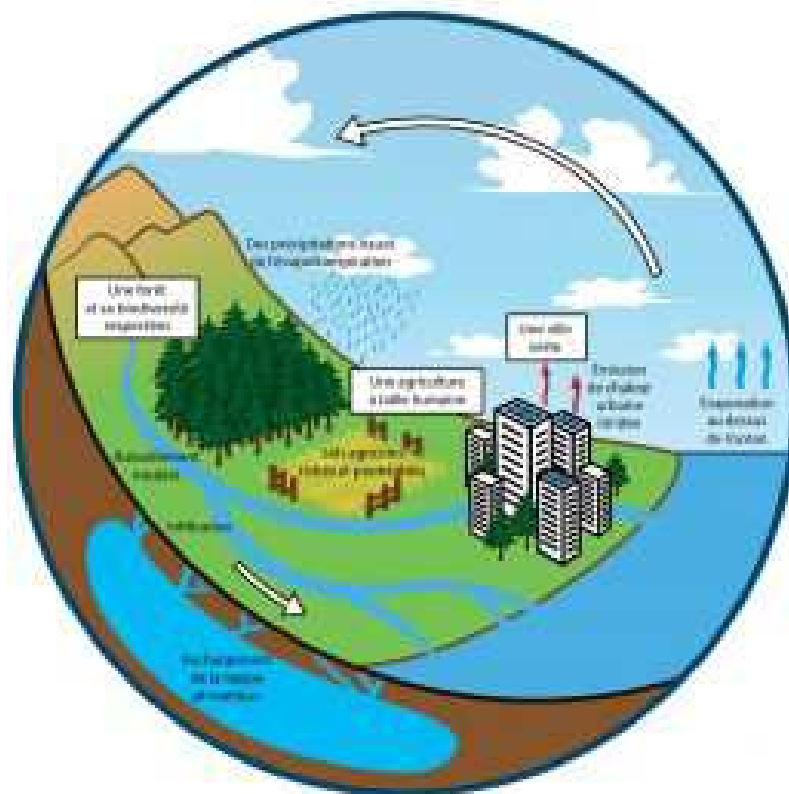


Figure : Cycle de l'eau

PHENOLOGIE (DEFINITIONS ET METHODES D'ETUDES)

1. Observations de phénologie végétale dans les écoles

La phénologie végétale traite de la chronologie saisonnière des phénomènes périodiques de croissance et de développement des plantes. Elle consiste à observer ce qu'on appelle les phases phénologiques, ou phénophases, telles que la frondaison, la floraison, la maturation des fruits et la chute des feuilles.

2. Définitions : Phénologie

Qu'est-ce que la phénologie?

De nombreux événements naturels sont causés, au moins en partie, par le temps et le climat. **La phénologie étudie les cycles biologiques et leurs liens avec les conditions climatiques.** Les déplacements des oiseaux migrateurs, l'éclosion des insectes et le frai des saumons sont des exemples d'événements phénologiques. Ces événements se produisent chaque année à la même époque, mais leur date exacte varie d'année en année. *C'est un exemple de variation annuelle.*

Def : La phénologie (dont l'origine étymologique est phénoménologie) désigne, au sens large, l'ensemble des particularités morphologiques du cycle de développement d'un végétal, avec mention des époques de l'année correspondantes.

Def : Au sens strict, c'est l'étude des relations entre les phénomènes climatiques et les caractères morphologiques externes du développement des végétaux (Delpech *et al.* 1985). Par développement, on entend toute modification qualitative dans la forme de la plante (Durand 1967).

Def : La phénologie est l'étude des variations de phénomènes périodiques en relation avec les variations saisonnières du climat.

Def : La phénologie végétale est l'étude scientifique des variations saisonnières, de la croissance et du développement des plantes (Fritz Schnelle 1955).

Exemples : Ces phénomènes concernent principalement les êtres vivants mais on parle aussi de la phénologie d'un glacier par exemple qui progresse et régresse au cours de l'année en fonction de la saison et des conditions climatiques.

Les stades phénologiques les plus observés sont **la floraison**, par exemple du lilas, du robinier-faux acacia, du cerisier, de l'anémone ; **le débourrement (ou feuillaison)** et la **coloration des feuilles**, par exemple du hêtre, du chêne, du bouleau ; mais aussi **la fructification** ; l'arrivée des oiseaux migrateurs ; l'apparition des papillons.

NB : La phénologie est un marqueur du climat mais aussi un élément clé de l'adaptation des êtres vivants aux variations climatiques.

3. La phénologie végétale en tant qu'étude scientifique

La phénologie végétale souhaite comprendre quelles relations existent entre les variations cycliques annuelles du climat et de la végétation.

- Comment réagissent les plantes aux changements climatiques, aux printemps chauds, aux étés secs...? Les enseignements tirés des enquêtes phénologiques peuvent être utilisés de diverses manières:

- Pronostics de phénophases
- Pronostics de pollinisation
- Avis de gel
- Production intégrée
- Phénocartes
- Informations
- Identification des dégâts causés à la biosphère
- Identification des effets sur la végétation d'une éventuelle modification climatique

- Suivi de l'environnement

Outre par la longueur des journées, l'apparition des phénomènes phénologiques est fortement influencée par la température de l'air, de sorte que les données phénologiques constituent de bons indicateurs des effets sur la végétation d'un éventuel changement climatique.

- Quels facteurs influencent l'évolution phénologiques des plantes?

«Avez-vous déjà remarqué que le feuillage des arbres apparaît dans votre région à différentes périodes du printemps, ou que les plantes situées sur les pentes exposées au sud adoptent un autre rythme que celles tournées vers le nord, et que cela change avec les années?

-Le bourgeonnement dépend de facteurs internes et externes.

■ **Les facteurs internes** sont par exemple la prédisposition génétique ou encore l'état de santé,

■ **Les facteurs extérieurs** sont constitués des intempéries, c'est-à-dire des températures locales diurnes et nocturnes, des précipitations, de la longueur des journées (**photopériodisme**), mais aussi des conditions de croissance de l'année précédente ou des conditions météorologiques des derniers mois.

Les plantes peuvent s'adapter dans une certaine mesure à leur environnement et à ses modifications. Cette adaptation revêt généralement la forme d'un compromis entre les différents besoins de la plante. Ainsi, au cours des générations, les arbres de nos latitudes se sont adaptés aux conditions climatiques locales afin, par exemple, de minimiser le risque de dommages causés aux jeunes feuilles par le gel tout en utilisant au maximum la période de végétation. La capacité d'adaptation varie selon les espèces» (Brügger 1998, Defila 1991, Kramer 1996).

Ainsi, de nombreuses plantes des régions tropicales, où il fait toujours chaud mais où existe une saison sèche, n'entament leur croissance que lorsque l'humidité est suffisante. Dans ces régions, le moment de la croissance est donc déterminé par le rythme des précipitations (facteur limitatif) et non par la température.

Si nous devons observer à la fois une tendance persistante au réchauffement, durant plusieurs années, et un début de croissance toujours plus précoce au printemps, nous aurions un signe clair de l'allongement de la période de croissance. Si nous observons tant la phénologie que le climat, nous pouvons vérifier cette hypothèse et tenter de comprendre les relations en présence.

► **Réseaux nationaux et internationaux**

Exemples

Réseau européen de phénologie (EPN) et des deux programmes d'observation phénologique fonctionnant au niveau européen; les «Jardins phénologiques internationaux» (**Internationalen Phänologischen Gärten, IPG**)

et le programme ICP Forests (**International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests**) dirigé par la **Commission économique pour l'Europe des Nations Unies (CEE-ONU)**.

Afin de permettre des comparaisons entre les différents stades d'observation des réseaux phénologiques entre eux, l'EPN et **le GPM (Global Phenological Monitoring)**

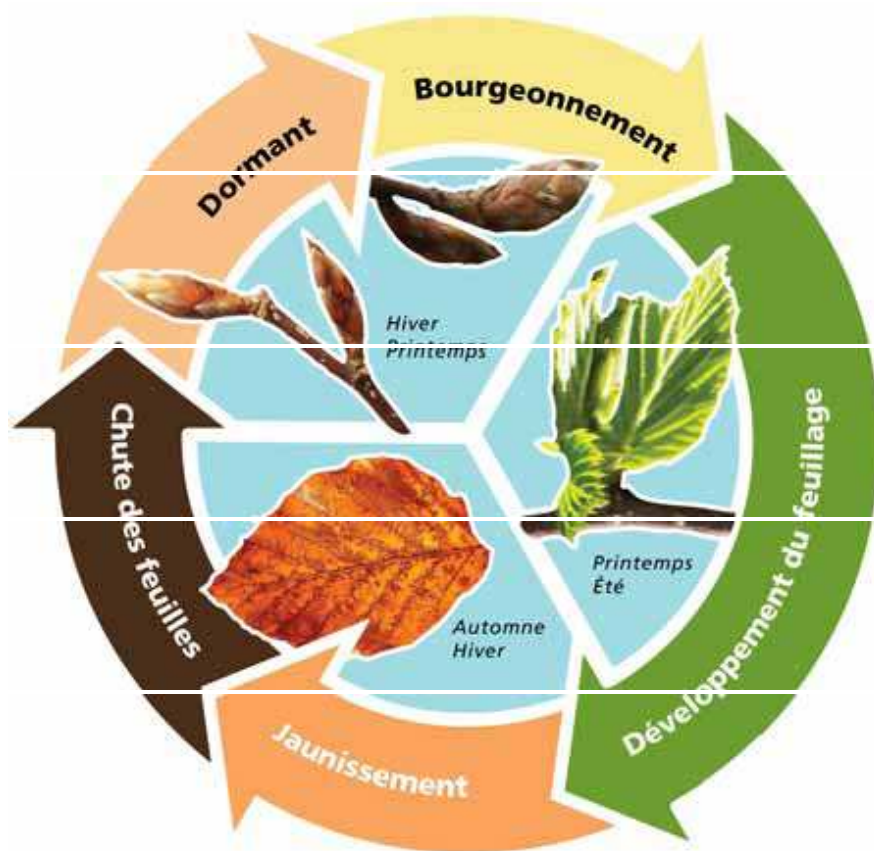


Figure : observation d'un exemple

Exemple d'étude : La phénologie: premier indicateur biologique du changement climatique