

Chapitre 2 : Flux énergétiques (Flux de matière, flux d'énergie et productivité des écosystèmes)

1. 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.**

L'étude bioénergétique des écosystèmes renseigne sur leur fonctionnement et complète l'aspect statique représenté par la description des niveaux trophiques. Dans cette optique, l'écosystème est considéré comme une machine biologique traversée par un double **flux de matière et d'énergie** (Schoffeniels, 1973).

2. Définition du flux de matière et d'énergie dans un écosystème

Tous les êtres vivants qui vivent dans un écosystème ont besoin de matière et d'énergie pour exécuter leurs fonctions vitales et, ainsi, développer leur cycle de vie. Les êtres vivants d'un écosystème se regroupent en **niveaux trophiques** selon la manière dont ils obtiennent de la matière et l'énergie, on distingue donc les niveaux suivants : **Producteurs, Consommateurs et Décomposeurs.**

Ainsi, **l'énergie circule** dans un écosystème car elle est captée et fixée sous forme de matière par les producteurs, elle sera transférée aux niveaux trophiques supérieurs, toujours par le biais de relations de prédation, donnant ainsi lieu à des flux de matière et d'énergie dans les écosystèmes.

3. Flux solaire

La quasi-totalité de la chaleur reçue à la surface de la terre provient du rayonnement solaire. Le flux solaire est l'unique entrant énergétique dans la biosphère. Il conditionne toute production de la matière vivante car c'est de lui que dépend toute activité photo-synthétique (productivité primaire). Ainsi, l'énergie solaire qui directement ou indirectement alimente l'écosystème en énergie est en partie *réfléchie*, en partie *interceptée* par la biocénose et, en partie *transmise* au sol. On décompose les radiations émises par le soleil en deux grands domaines : **radiations solaires et radiations thermiques.**

4. 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 réfléchie 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.

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

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

Toute l'énergie non utilisée est reprise par décomposition ; l'énergie de respiration (R_1 , R_2 , R_3) 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 : $PS_1/PB = 1\%$. Pour les carnivores, le rendement est plus fort : $PS_2 / PS_1 = 10\%$.

➤ Comment est-ce que l'énergie circule dans un écosystème ?

Le soleil est la principale source d'énergie pour la majorité des écosystèmes de notre planète. Mais, si le soleil donne l'énergie nécessaire, **comment se produit le flux d'énergie dans les écosystèmes ?** L'énergie circule de la manière suivante :

1. L'énergie solaire est absorbée et fixée en matière grâce au processus de photosynthèse réalisé par les producteurs, composants de base de la chaîne trophique : l'énergie fixée grâce à la photosynthèse représente uniquement 1% de la quantité totale d'énergie solaire qui arrive à la surface terrestre.
2. Cette énergie, au côté de la matière en forme de biomasse, est transférée dans les niveaux trophiques suivants jusqu'à arriver aux niveaux supérieurs avec une efficacité comprise entre 10 et 20% entre un niveau et un autre, donnant lieu **au flux de matière et d'énergie de l'écosystème.**

3. L'énergie au sein d'un écosystème est dissipée au fur et à mesure qu'elle se déplace dans l'écosystème, c'est-à-dire qu'elle est progressivement libérée dans l'environnement à chaque niveau trophique sous forme de chaleur par le processus de respiration cellulaire. Ces pertes d'énergie entre les différents niveaux trophiques limitent la longueur des chaînes trophiques ainsi que la biomasse qui atteindra les niveaux trophiques supérieurs. Ainsi, le flux d'énergie dans un écosystème est unidirectionnel, c'est-à-dire qu'il se déplace dans une seule direction, des producteurs aux niveaux trophiques supérieurs.
4. Au contraire, la matière qui résulte de chaque niveau trophique (cadavres d'êtres vivants, restes de ses organismes, excréments, branches, feuilles sèches...) s'accumule au sol et est ainsi à la disposition des organismes décomposeurs qui, de leur côté, libèrent aussi l'énergie sous forme de chaleur dans l'environnement.
5. Ces décomposeurs se chargent de transformer cette matière organique et de la restituer à l'environnement sous forme de matière non organique, qui sera encore une fois utilisée par les organismes autotrophes pour intégrer le réseau trophique. On peut donc distinguer un cycle de matière fermé et un flux d'énergie unidirectionnel.
6. L'une des caractéristiques les plus importantes du flux d'énergie des écosystèmes est que, d'une part, l'énergie n'est ni créée ni détruite, elle est seulement transformée et que, d'autre part, ce changement de forme entraîne une perte d'énergie sous forme de chaleur.

➤ Exemples de flux de matière et d'énergie dans un écosystème

La structure des écosystèmes des niveaux trophiques et de leur flux d'énergie se produit de manière semblable dans les écosystèmes terrestres et marins, ceci à l'exception de certains organismes marins qui n'utilisent pas le soleil comme source d'énergie. Nous allons nous concentrer sur le système terrestre et, spécifiquement, **sur le réseau trophique des forêts.**

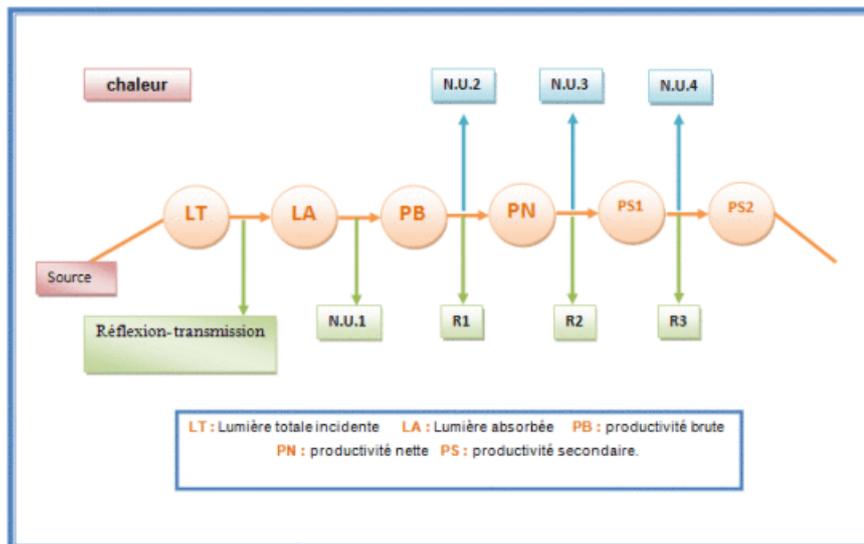
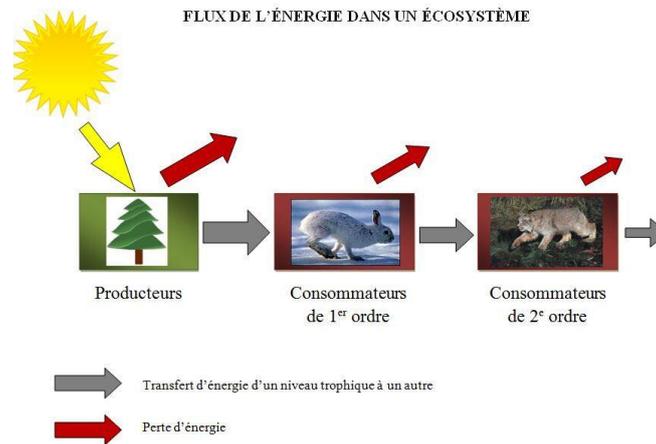
De manière générale, dans une forêt peuvent être identifiés les composants du réseau trophique suivants :

- Producteurs : arbres, arbustes et plantes.
- Consommateurs primaires : lapins, souris et écureuils.
- Consommateurs secondaires : du renard à l'épervier.
- Charognards : renards et vautours.
- Décomposeurs : insectes, champignons et bactéries, parmi d'autres micro-organismes divers.

➤ Flux d'énergie dans un réseau trophique d'une forêt

- L'eau et les sels minéraux présents dans le sol sont absorbés par les racines des arbres et des plantes. Ensuite, le tout est transporté vers les feuilles où, avec le CO₂ et l'énergie captée du soleil, la matière organique est fabriquée grâce au processus de photosynthèse.

- Ces plantes seront consommées par les consommateurs primaires.
- Ces derniers seront à leur tour consommés par leurs prédateurs, les consommateurs secondaires et tertiaires qui s'en prennent aux "niveaux inférieurs".
- De même, les feuilles qui tombent des arbres et des plantes, des branches, des fruits, etc., s'accumulent sur le sol de la forêt et les décomposeurs se chargent de transformer la matière organique en nutriments inorganiques. Ces nutriments seront à nouveau absorbés par les racines des plantes et des arbres, relançant ainsi le cycle.



FLUX DE MATIÈRE ET D'ÉNERGIE



5. 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.

➤ L'énergie qui se perd au long de la chaîne trophique, où va-t-elle ?

Les écosystèmes perdent l'énergie sous forme de chaleur, car les organismes vivants ne peuvent pas convertir la chaleur en d'autres formes d'énergie. La chaleur dérivée du processus de respiration cellulaire donne naissance à une augmentation de la température des organismes, phénomène qui est favorable pour les organismes à sang froid, ce qui leur permet d'être plus actifs. Malgré cela, et selon les lois physiques de la thermodynamique, la chaleur est transmise des corps plus froids aux corps plus chauds. De cette manière, au fil du temps, la chaleur produite par les organismes sera dissipée dans l'environnement. Cette dernière peut donc rester un certain temps dans l'écosystème, mais, au final, elle finira par se perdre.

6. Circulation de matière

Les relations, souvent compliquées, entre les différents organismes vivants, quel que 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.



7. Structure trophique des écosystèmes

Les relations alimentaires jouent un rôle très important dans le fonctionnement des écosystèmes. Les innombrables êtres vivants qui composent une biocénose sont liés par des liens de tous types dont les principaux sont de nature trophique et chorologique. Les êtres vivants d'une biocénose sont en lutte constante pour la nourriture et l'espace.

7.1. Chaînes alimentaires (trophique) et réseaux alimentaires (trophiques)

Le terme « chaîne alimentaire » est parfois utilisé métaphoriquement pour décrire des situations sociales humaines. En ce sens, les chaînes alimentaires sont considérées comme une compétition pour la survie, comme « qui mange qui ? » Quelqu'un mange et quelqu'un est mangé.

La compréhension scientifique d'une chaîne alimentaire est plus précise que celle de son utilisation quotidienne. En écologie, une chaîne alimentaire est une séquence linéaire d'organismes par laquelle passent les nutriments et l'énergie : les producteurs primaires, les consommateurs primaires et les consommateurs de niveau supérieur sont utilisés pour décrire la structure et la dynamique de l'écosystème. Il y a un seul chemin à travers la chaîne. Chaque organisme d'une chaîne alimentaire occupe ce que l'on appelle un niveau trophique. En fonction de leur rôle de producteurs ou de consommateurs, des espèces ou des groupes d'espèces peuvent être affectés à différents niveaux trophiques.

Dans de nombreux écosystèmes, le bas de la chaîne alimentaire est constitué d'organismes photosynthétiques (plantes et/ou phytoplancton), appelés producteurs primaires. Les organismes qui consomment les principaux producteurs sont des herbivores : les principaux consommateurs. Les consommateurs secondaires sont généralement des carnivores qui mangent les principaux consommateurs. Les consommateurs tertiaires sont des carnivores qui mangent d'autres carnivores. Les consommateurs de haut niveau se nourrissent des niveaux trophiques inférieurs suivants, et ainsi de suite, jusqu'aux organismes situés au sommet de la chaîne alimentaire : les consommateurs les plus élevés.

(quelques phanérogames et algues) ou encore marines (algues microscopiques du plancton ou algues macroscopiques du littoral).

7.2.2. Consommateurs

Hétérotrophes qui se nourrissent de matières organiques déjà élaborées ; Ainsi on distingue :

a-Consommateurs de la matière organique fraîche

- Consommateurs primaires (C1) :

Ils se nourrissent directement de producteurs (plantes vertes). Des herbivores qui dévorent des plantes (ex. Lapin, Gazelle, etc.). Ce sont également des parasites animaux ou végétaux exploitant un hôte végétal.

-Consommateurs secondaires (C2)

Ils se nourrissent aux dépens de consommateurs primaires. Des carnivores mangeurs d'herbivores (ex. lion mangeant une gazelle).

Un type particulier de consommateurs est constitué de parasites d'autres animaux qui vivent de façon sédentaire soit à la surface du corps de leur hôte (Ectoparasites), soit dans les viscères de ce dernier (Endoparasites). Leur mode de vie s'oppose à celui des prédateurs, lesquels capturent leurs proies alors que le parasite ne tue pas obligatoirement son hôte.

-Consommateurs tertiaires (C3)

-Ils mangent les consommateurs secondaires et capturent leur proie à l'affût (chat), au vol (faucon), à la nage (loutre) ou à la course (tigre). On leur attribue souvent le terme de Super-carnivores ou super-prédateurs dans le cas où la proie représenterait déjà un prédateur. Ex. : le Loup qui attrape un Renard ou encore le Grand Duc qui capture un Geai, etc.

b-Consommateurs de la matière organique morte

Dans cette catégorie, on distingue :

1-Récupérateurs

Animaux consommateurs de cadavres frais ou peu décomposés. Ils activent le travail des carnivores. On les appelle des charognards ou nécrophages. Ex. : hyène, vautour, chacal, etc..

2.Détritivores

Ils se nourrissent de cadavres ou d'excréments et les réduisent en molécules plus ou moins simples. Parmi ceux-ci, on distingue :

a-**Saprophage** : des consommateurs de plantes ou d'animaux plus ou moins décomposés. Ex. : Vers de terre.

b-Coprophage : consommateurs qui se nourrissent d'excréments. Ex. : bousier.

3.Transformateurs

Ils transforment une partie de la matière organique des détritiques en humus (matière formée de débris végétaux décomposés).

4-minéralisateurs

Ils sont considérés comme transformateurs. Sinon, ils constituent avec les transformateurs le niveau de saprophytes décomposeurs. Ils décomposent la matière organique en matière minérale (Bactéries ou champignons).

7.3. Principaux types de chaînes trophiques

7.3.1- Chaîne des prédateurs

Elle mène des producteurs aux herbivores qui sont à leur tour mangés par des carnivores de petite taille, ces derniers étant mangés par des carnivores plus gros et ainsi de suite. En général, plus on avance, le long d'une chaîne de prédateurs, plus les individus deviennent gros et d moins en moins nombreux.

Ex. : Pin sylvestre →→ **Puceron** →→ **Coccinelle** →→ **Araignée** →→ **Geai** →→ **Hibou**

4.3.2- Chaîne des parasites

Elle mène vers des organismes de taille de plus en plus petits et de plus en plus nombreux.

Ex. : Herbe →→ **Lapin** →→→→ **Puce** →→→→ **Leptomonas**

(*Ectoparasite*) (*Endoparasite*)

7.3.3- Chaîne des détritiques

Elle mène de la matière organique morte vers d'autres organismes de plus en plus microscopiques. Ex. : une forêt caducifoliée ; où la plus grande partie du feuillage n'est pas consommé par des herbivores mais constitue une litière de feuilles mortes. Ces feuilles seront fragmentées par de nombreux saprophages (Collembolés) puis reprises par les vers de terre qui assurent une bonne dispersion de l'humus dans les horizons superficiels du sol, puis les microorganismes décomposeurs achèvent la minéralisation totale de la matière organique morte.

7.4. Réseau trophique

En réalité, ces trois types de chaînes alimentaires coexistent toujours dans un écosystème, de sorte que les diverses espèces de la communauté sont interconnectées par de multiples liens de nature alimentaire dont l'ensemble constitue le réseau trophique de la biocénose. Ainsi, l'herbe peut servir à un lapin mais aussi à d'autres herbivores ; Le lapin peut-être dévoré par un renard mais aussi par un aigle, etc. Les chaînes alimentaires sont rarement linéaires, elles présentent des bifurcations et s'engrènent entre-elles formant un véritable réseau. Cet état des choses assure une grande stabilité à l'écosystème.

7.5. Pyramides écologiques

La circulation de la matière dans une biocénose n'est qu'un reflet des incessants transferts d'énergie

sous forme biochimique qui se font dans le sens :

Producteurs autotrophes →→ Consommateurs hétérotrophes

Les pyramides écologiques donnent une représentation géométrique à la structure trophique d'un écosystème. Cette dernière peut-être décrite en termes d'individus (Nombre), de biomasse ou d'énergie.

-Les pyramides écologiques Une pyramide écologique est un modèle graphique qui représente les relations entre les différents éléments d'un réseau alimentaire, en y ajoutant une quantification

7.5.1. Pyramide des nombres "densité" :

Elle est obtenue en superposant des rectangles de mêmes hauteurs et de longueurs proportionnelles au nombre d'individus de chaque niveau trophique. Dans chaque habitat, en règle générale, existe plus de plantes que d'animaux, plus d'herbivores que de carnivores, plus d'insectes que d'oiseaux. En effet, dans chaque communauté, les animaux de petite taille sont plus nombreux et se reproduisent plus rapidement.. Par ailleurs, il existe pour chaque espèce de carnivores une dimension optimale de la proie. En effet, pour des raisons physiologiques évidentes, le travail (ou l'énergie) nécessaire pour capturer une masse suffisante de proie de petite taille n'est pas rentable, à l'opposé, les aléas de capture d'une proie trop grande dissuade le carnivore.

De ce fait, la chaîne des prédateurs, le nombre d'individus présents décroît lorsqu'on passe d'un niveau trophique à un autre (au suivant), tandis que la taille augmente.

En regroupant les organismes ayant dans l'écosystème la même fonction (même niveau trophique) et qu'en les superposant dans l'ordre qu'ils occupent dans une chaîne alimentaire, on obtient une pyramide car leurs nombres diminuent.

Ex. : une prairie naturelle, on dénombre :

- 5842424 plantes / ha
- 708624 insectes phytophages
- 354904 insectes prédateurs et araignées
- 3 oiseaux

Schématiquement, on aura :

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)

Pyramide des nombres de la prairie naturelle (chaîne des prédateurs)

Autre chose, concernant la pyramide de la chaîne des parasites, elle présente une forme inversée. En effet, en général, les animaux de petite taille sont plus nombreux et se reproduisent plus vite que les animaux de grande taille. Ainsi, un chien porte des milliers de puces et ces dernières hébergent encore des milliers et des milliers de flagellés (*Leptomonas*).

7.5.2. Pyramides des biomasses

Elle reflète mieux les relations trophiques dans un écosystème car elle exprime la biomasse (matière sèche) présente à un moment donné à chaque niveau de la chaîne alimentaire.

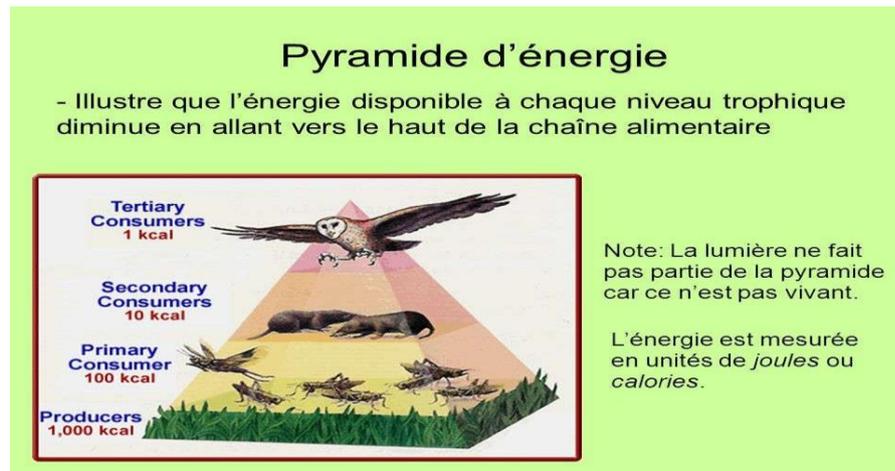
- Désigne une pyramide écologique qui représente la répartition de la biomasse entre les différents niveaux trophiques. Elle exprime les niveaux trophiques en fonction de la masse des espèces qui compose chacun des niveaux.

Dans une chaîne de prédateurs, la pyramide de biomasse à la pointe dirigée vers le haut mais, il y a des exceptions que l'on rencontre dans les écosystèmes aquatiques où le phytoplancton a une biomasse inférieure à celle du zooplancton (Cf. Figure suivante).



7.5.3. Pyramide des énergies

C'est la plus satisfaisante des représentations car chaque niveau trophique est représenté par un rectangle dont la longueur est proportionnelle à la quantité d'énergie (Kcal) accumulée par unité de surface et de temps ou de volume et de temps (productivité). Cette pyramide a toujours la pointe en haut en raison des pertes qui ont lieu d'un niveau trophique au suivant. Ces pyramides représentent le taux auquel s'effectuent les transferts d'énergie et/ou la productivité dans les chaînes alimentaires.



Il est à remarquer sur le graphique l'importance des pertes. En effet, une fraction seulement de ce flux est fixée dans les organismes de chaque niveau trophique et il est stockée dans la biomasse, le reste est dépensé pour assurer les besoins métaboliques des êtres vivants : entretien, maintien, et reproduction ; de plus, les animaux dépensent des quantités importantes pour produire un travail musculaire.



8. Transfert d'énergie et rendements

8.1. Energie solaire

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

- 30% des radiations solaires sont réfléchies dans l'espace par l'atmosphère ;
- 20% des radiations solaires sont absorbées par l'atmosphère ;
- 49% des radiations solaires sont absorbées par le sol, l'eau, la végétation et, sont utilisées sous forme de chaleur ;
- 1% des radiations solaires sont utilisés par la photosynthèse.

Chaque point de la surface du globe reçoit 6 mois de lumière. La lumière n'est pas répartie de façon homogène en fonction de la latitude. L'énergie totale reçue à l'équateur est égale à 2.5 fois celle reçue aux pôles.

8.2. Définitions importantes

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.

8.2.1. Transfert énergétique

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**.

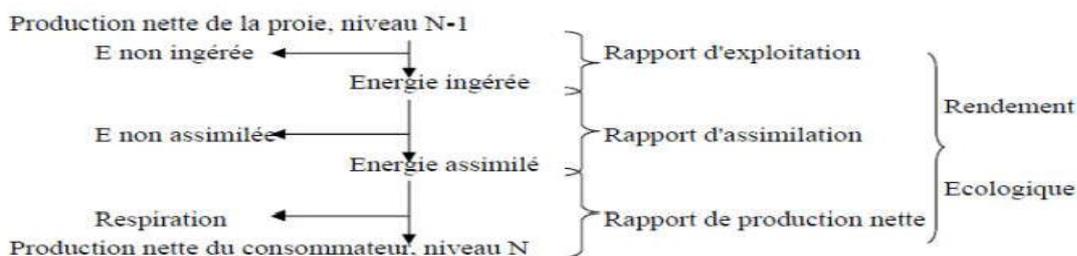
8.2.2. Bilans & Rendements énergétiques

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 d'assimilation** : Qui est le rapport de l'énergie assimilée à l'énergie ingérée : **(A/Cx100)**.
- **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.

Ex: Des rendements peuvent être adaptés pour un niveau de consommateur :

- **Rendement écologique**: production consommateur / Production proie.
- **Rendement d'exploitation**: énergie ingérée / énergie disponible.
- **Rendement d'assimilation**: énergie assimilée / énergie ingérée.
- **Rendement production nette**: énergie liée à la production du consommateur / énergie assimilée.



Bibliographie

- Alderleaf Wilderness Collage. (2006-2020). Forest Food Web: Knowledge for Designing Edible Forest Gardens. United States. Consulté sur : <https://www.wildernesscollege.com/forest-food-web.html>
- Trends Ecol Evol, 33(3): 186–197. doi:10.1016/j.tree.2017.12.007.
- Estudios Superiores Presenciales y On Line. (2014-2019). Flujo de energía en los ecosistemas. Barcelona. Consulté sur : https://www.iusc.es/recursos/ecologia/documentos/c4_fluj_ener.htm
- SCRIBD Inc. (2020). Cadena alimenticia del bosque. Consulté sur : <https://es.scribd.com/doc/131194288/CADENA-ALIMENTICIA-DEL-BOSQUE-docx>
- Barnes, A. D., Jochum, M., Lefcheck, J. S., Eisenhauer, N., Scherber, C., O'Connor, M., I., Ruiter, P., and Brose, U. (2018). *Energy flux: The link between multitrophic biodiversity and ecosystem functioning*.

Aidoud, A., 1988, Les écosystèmes à armoise blanche (*Artemisia herba alba*).I :caractères, généraux . Biocénoses, 3(1-2 ? 1-15).

Aidoud, F., 1984, Contribution à la connaissance des groupements à sparte (*Lygeum spartum* L.) des hauts plateaux sud –oranais. Etude phytoécologique et syntaxonomique.thèse doct.3ème cycle, univ, Sci. Technol. H boumediéne, Alger, 256 p.+ ann.

Aidoud, A., 1989. - Contribution à l'étude des écosystèmes pâturés (Hautes Plaines Algéro-Oranaises, Algérie). Thèse Doct. Etat, Univ. Sci. Technol. H. Boumediene, Alger, 240 p.

Aidoud, A., 1992. - Les parcours à alfa (*Stipa tenacissima* L.) des Hautes Plaines algériennes

: Va- riations inter-annuelles et productivité. In : Gaston, A., Kernick, M. & Le Houérou., H.N. (eds), Actes du 4ème Congrès International des Terres de Parcours, Montpellier, France, 22-26 avril 1991, pp. 198-199. CIRAD, Montpellier

Aidoud, A., 1994. - Pâturage et désertification des steppes arides en Algérie. Cas de la steppe d'alfa (*Stipa tenacissima* L.). Paralelo 37° 16 : 33-42.

Barbault R., 1981. Ecologie des populations et des peuplements. Ed. Masson. Paris, 200 p.

Barbault R., 1990. Ecologie générale, Structure et fonctionnement de la biosphère. Paris. Masson. 2nde édition. 269 p.

Berner, R.A., 1994. GEOCARB II: a revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time. *American Journal of Science*. V. 294. Pp : 56-91.

Bouazza, M., 1995, Etude phyto-écologique des steppes à *Stipa tenacissima* L. et *Lygeum spartum* L. au Sud de Sebdou (Oranie, Algérie). Thèse de Doctorat ès Sciences. Université de Tlemcen, Algérie.

Boyce, M. S. & Haney, A. 1997. *Ecosystem management: applications for sustainable forest and wildlife resources*. New Haven, Conn., Yale Univ. Press. 361 pp.

Cornet, A., 2002, La désertification à la croisée de l'environnement et du développement : un problème qui nous concerne, 35 p.

Dajoz R., 1974. Dynamique des populations. Paris. Masson. 301 p. **Dajoz**

R., 1996. Précis d'écologie. Paris. Dunod. 6ème édition. 551p.**Dajoz R.**,

2006. Précis d'écologie. Paris. Dunod. 8ème édition. 631p.

D'Eon, R.G., Johnson, J. & Alex Ferguson, E. eds. 2000. *Ecosystem management offorested landscapes: Directions and implementation*. Vancouver, UBC Press. 432 pp.

Djebaili, S., 1978, Recherche phytosociologique et écologique sur la végétation des hautes

plaines steppiques et de l'Atlas saharien algérien. Thèse doct., univ. Sci. Tech. Languedoc, montpellier, 299p. + annexes.

Duquet M., 1993. Glossaire d'écologie fondamentale. Ed. Fernand Nathan. 127 p.

Duvigneaud P., 1984. L'écosystème forêt. Nancy. ENGREF. 160 p.

Fournier A., 1991. Phénologie, croissance et production végétales dans quelques savanes d'Afrique de l'Ouest. Variations selon un gradient climatique. Paris, Orstom, 312 p.

Franklin, J. F. 1997. Ecosystem management: an overview. In M. S. Boyce, and A. Haney, eds. *Ecosystem management: applications for sustainable forest and wildlife resources*. pp 21-53. New Haven, Conn., Yale Univ. Press. 361 pp.

Franklin, J. F., Berg, D. R., Thornberg, D. A. & Tappeiner. J. 1997. Alternative silviculture approaches to timber harvesting: variable retention harvesting systems. In K. A. Kohm, and J. F. Franklin, eds. *Creating a forestry for the 21st century: The science of ecosystem management*, pp 11-139. Washington, D.C., Island Press. 475 pp.

Franklin, J.F. Spies, T.A., Van Pelt, R., Carey, A.B., Thornburgh, D.A., Berg, D. R., Lindenmayer, D. B., Harmon, M E., Keeton, W. S. , Shaw, D. C. , Bible, K., and Chen, J. 2002. Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example. *For. Ecol. Manage.* 155: 399-423.

Frontier S., 1983. Stratégies d'échantillonnage en écologie. Masson, Paris. Les Presses del'Universite Laval, Quebec. 494 p.

Frontier S. et Pichod-Viale D., 1993. Ecosystèmes, Structure-fonctionnement- évolution, Paris. Masson. 2nde édition. 2^{ème} tirage. 447 p.

Gaudin S., 1997. Quelques éléments d'écologie utiles au forestier. BTSA Gestion Forestière. Module D41. V.1.1. 88p.

Guyot G., 1999. Climatologie de l'environnement. 2^{ème} édition. Dunod. Paris. 525P. **Léveque**

C., 2000. Ecologie de l'écosystème à la biosphère. Edition. Dunod. Paris. 502P.

Mackenzie, F.T., 1998. Our Changing Planet - An introduction to Earth Science and global environmental change. Prentice-Hall. Upper Saddle River. 2^{ème} édition. 486p.

Ramade F., 1982. Élément d'écologie: écologie appliquée. 3^{ème} Edition. Ed. McGraw-Hill. Paris, 452p.

Ramade F., 2003. Élément d'écologie: écologie fondamentale (3^{ed}). Ed. Dunod. Paris, 690p.

<https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/les-relations-trophiques-et-le-flux-de-matiere-s1027>