

Chapitre III : Flux d'énergie et productivité des écosystèmes

3.1 Introduction

Les écosystèmes sont des objets bio-physico-chimiques qui peuvent être caractérisés par une organisation et une dynamique, comme les autres niveaux d'organisation (individu, population, communauté) de l'écologie. La description et la quantification des interactions alimentaires entre les organismes, supports de la circulation de la matière et de l'énergie dans les écosystèmes, sont parmi les moyens les plus souvent utilisés pour représenter les écosystèmes. L'organisation et le fonctionnement des écosystèmes déterminent, pour une part importante, la qualité de notre environnement et la disponibilité d'une partie de nos ressources, notamment biologiques. Ces services écologiques rendus par les écosystèmes qu'il faut aujourd'hui préserver, restaurer et optimiser, contribuent à dynamiser l'écologie des écosystèmes.

3.2 Élément de bio-énergétique

De nombreuses formes d'énergie sont indispensables au fonctionnement des écosystèmes et l'on sait depuis fort longtemps que la photosynthèse n'est pas le seul processus métabolique susceptible d'assurer la formation de matière organique à partir d'éléments minéraux. Toutefois, le flux radiatif solaire constitue incontestablement l'essentiel de la source du flux énergétique dans la plupart des écosystèmes. Donc, la vie est apparue et perpétue ses structures dans un flux d'énergie dont la source première est le soleil.

3.3 Notion de flux d'énergie

L'énergie solaire captée par les chloroplastes des végétaux verts est partiellement stockée sous forme d'énergie chimique. C'est la production primaire nette (PPN). L'énergie ainsi accumulée par les plantes chlorophylliennes (Producteurs primaires) est utilisable par les animaux phytophages (C1). Une fraction de l'énergie assimilée par les C1, retenue sous forme chimique (production secondaire), devient accessible à une nouvelle catégorie d'organisme. Ce flux dépend d'abord du rayonnement solaire incident. Mais aussi de l'efficacité avec laquelle les organismes qui se succèdent dans la chaîne alimentaire exploitent leurs ressources trophiques et les convertissent en biomasse.

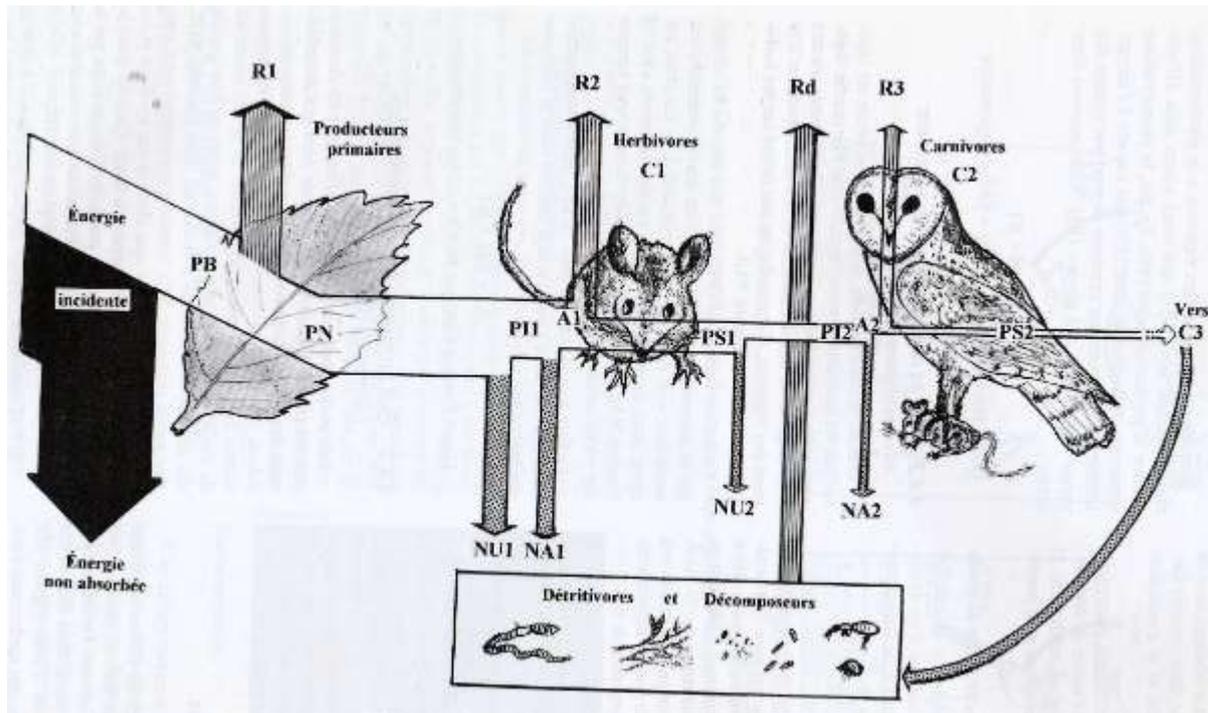


Figure 22 : Flux d'énergie à travers un réseau trophique (Fauri et al., 2012).

3.4 Energie solaire

3.4.1 Spectre des longueurs d'onde du rayonnement solaire

Le flux solaire est le taux d'énergie de toutes longueurs d'ondes qui traverse une unité de surface et par unité de temps. Elle est évaluée à $2 \text{ cal/cm}^2/\text{m}$ dans la haute stratosphère. Cette énergie est pour plus de 99% concentrée dans une étroite bande spectrale de longueur d'onde comprise entre $0,2 \mu$ et $4 \mu\text{m}$, dont près de la moitié se situe dans le spectre visible ($0,38$ à $0,75 \mu$) et le reste est surtout compris soit dans l'ultraviolet proche, soit dans l'infrarouge.

3.4.2 Energie incidente

Mesurée au sommet de l'atmosphère, la quantité d'énergie incidente est, en moyenne, de 350 w/m^2 soit $7,2 \times 10^6 \text{ calorie/m}^2/\text{jour}$.

Le rayonnement électromagnétique est composé d'ondes se propageant à la vitesse de la lumière ($c=3 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans le vide). On peut les distinguer par leur longueur d'onde λ ou leur fréquence ν , reliées par $c = \lambda\nu$. On rencontre également le nombre d'onde $\nu = 1/\lambda$.

Le rayonnement visible occupe une bande étroite du spectre, aux longueurs d'ondes comprises entre $0,4$ et $0,76 \mu\text{m}$ (figure 1). Les longueurs d'ondes plus courtes (fréquences plus élevées) forment le rayonnement ultraviolet, puis X et γ . Les longueurs d'onde plus longues que le visible forment le rayonnement infrarouge puis micro-onde.

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 types d'organismes, du point de vue bioénergétique, par leurs aptitude à réaliser les divers transferts d'énergie de niveau trophique en un niveau trophique.

3.5 Notions de bilan et de rendements énergétiques

L'énergie qui traverse un organisme, une population ou un écosystème peut être convertie d'une forme à une autre (énergie lumineuse en énergie chimique, d'énergie chimique en travail, etc.), mais elle n'est jamais ni créée ni détruite. Il est donc possible d'établir le bilan énergétique des systèmes écologiques en quantifiant l'énergie qui y entre, celle qui en sort et celle qu'ils contiennent.

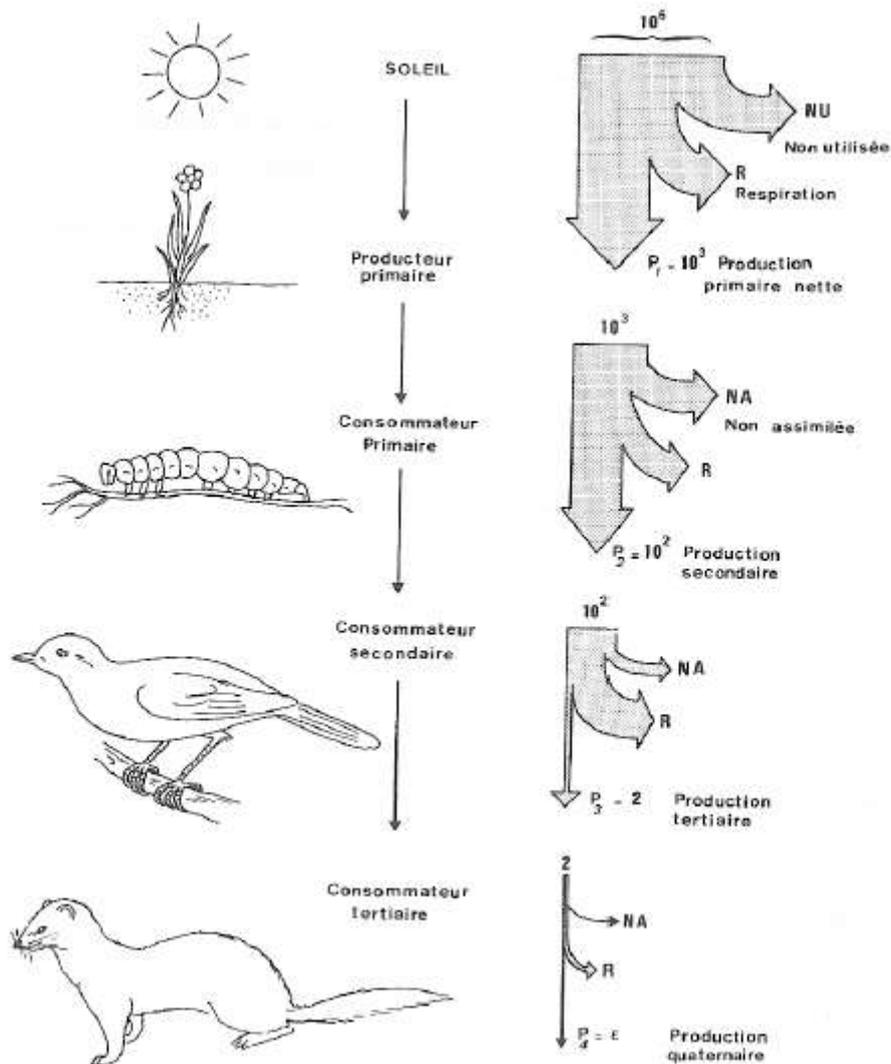


Figure 23. Exemple schématique d'une chaîne alimentaire montrant le flux d'énergie de niveau trophique en niveau trophique ((Bouline J, 1996)

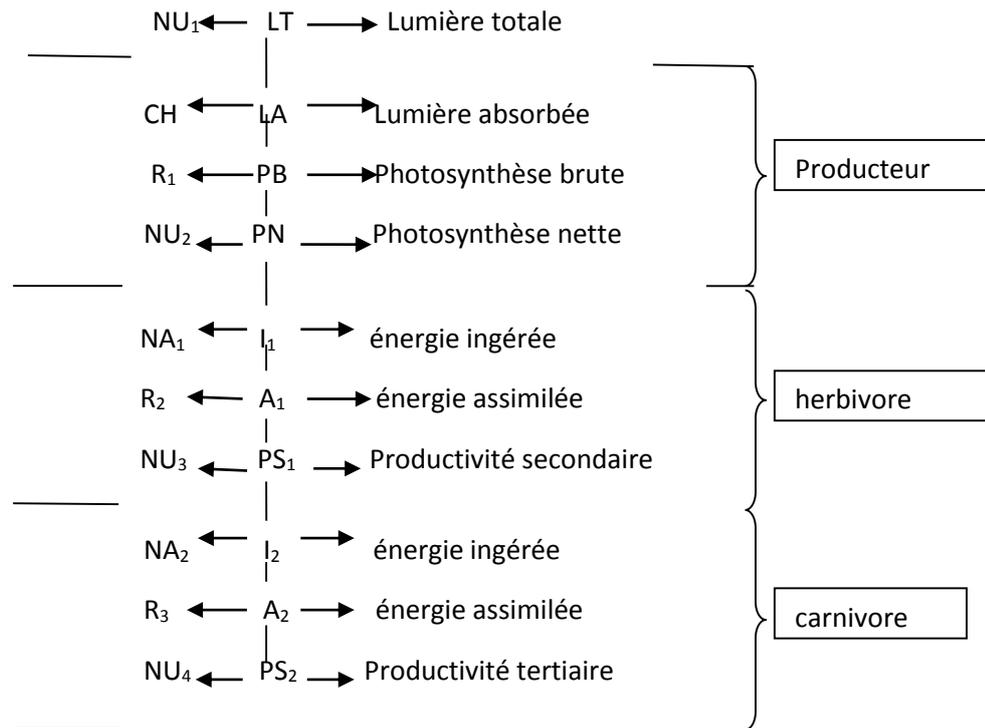


Figure 24 .Transferts d'énergie dans le cas de trois niveaux trophiques : un producteur (végétal autotrophe), un consommateur herbivore et un carnivore (**Boulaine J, 1996**).

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 types d'organismes, du point de vue bioénergétique, par leurs aptitude à réaliser les divers transferts d'énergie de niveau trophique en un niveau trophique.

Ceci permet de définir un certain nombre de rendements (fig25) :

- **Le rendement écologique (R_{ec})**, correspond au rapport entre productivité au niveau $n+1$ et la productivité au niveau n , ce rendement est égal à $(PS_1 / PN) \times 100$;
- **Le rendement d'exploitation (R_{ex})**, est le rapport de l'énergie ingérée à l'énergie disponible (production nette de la proie), ce rendement est égal à $(I_1 / PN) \times 100$;
- **Le rendement d'assimilation (R_a)**, rapport de l'énergie assimilée (A) à l'énergie ingérée (I), ce rendement est égal à $(A_1 / I_1) \times 100$;
- **Le rendement de production nette (R_p)**, correspond au rapport de la production (P) à l'assimilation (A), ce rendement est égal à $(PS_1 / A_1) \times 100$.

Donc, nous remarquons que $Rec = Rex \times Ra \times Rp$.

On calcule parfois le rendement de croissance qui est le rapport entre la productivité et l'énergie soit $(PS/I) \times 100$.

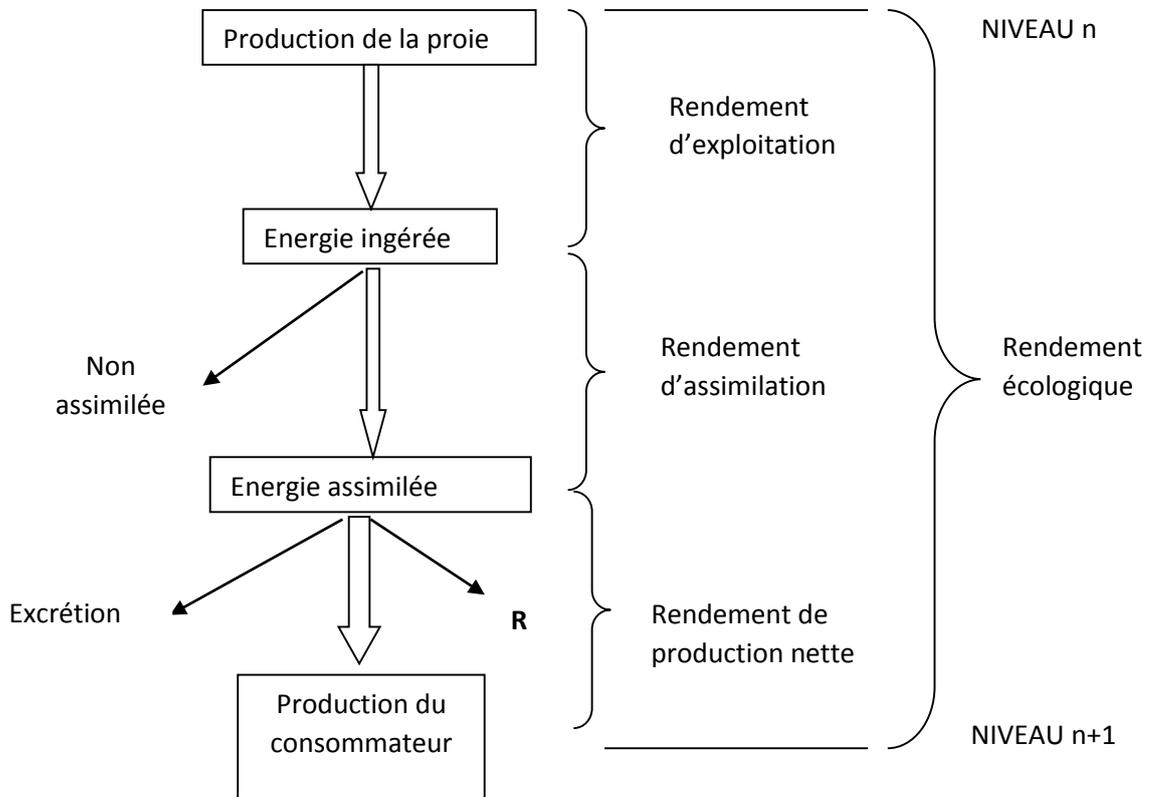


Figure 25 : Définition des principaux types de rendements ou d'efficacité énergétique utilisés en écologie (Boulaine J, 1996).

En effet les systèmes obéissent au principe de la conservation de l'énergie (thermodynamique) comme à dit l'Avoisier : "Rien ne se perd rien ne se crée tout se transforme" : Donc l'énergie qui traverse un organisme, une population, une biocénose est convertie d'une forme à une autre : de l'énergie lumineuse en énergie chimique après en travail... Il est donc possible de quantifier l'énergie qui y entre, celle qui en sort, et celle qui contiennent.

3.5.1 La biomasse

Est le poids ou le nombre d'individu au moment de l'observation, donc la biomasse est l'ensemble de la matière organique vivante ou matière organique morte comprise dans l'écosystème, on parlant donc de la matière organique totale de l'écosystème dans une unité de surface et de temps.

MOT = B (matière organique vivante) + (N+L+H) matière organique morte.

B : biomasse, N : nécromasse (matière organique morte mais encore attachée à l'organisme),
L : litière (matière organique morte non décomposé), **H : humus** (matière organique morte décomposée).

La biomasse est exprimée en poids sec peut être transformé en kcal par l'utilisation de coefficient déterminée (tableau1, coefficient de conversion).

Tableau 2 : Coefficients de conversion

| Éléments en g | Energie kcal | Éléments en g | Energie kcal |
|-----------------|--------------|-------------------------------|--------------|
| 1g glucide | 4 | 1g bois de tronc | 4,5 |
| 1g protide | 4 | 1 g feuilles sèche de poicées | 4,2 |
| 1g lipide | 9 | 1g d'algue | 4,5 |
| 1g d'insecte | 5,4 | 1g vertébrés | 5,6 |
| 1g d'invertébré | 5,4 | | |

3.5.2 La phytomasse

Est une mesure plus pratique et plus facile que le zoomasse. Ainsi la mesure de la phytomasse aérienne se fait par une simple récolte de la végétation sur une surface déterminée (m²) le poids frais et sec. Concernant le poids sec par dessiccation à 85C° ou 105C°, le poids sec est ramené à l'unité de surface.

Pour la végétation basse (strate herbacées), la technique est facile « fauchage » exp : prairie. Alors que pour la strate arbustive ou forestière, on utilise une méthode de dimension dont le paramètre de base est le D.B.H (diameter at breast height, diamètre à la hauteur de poitrine), diamètre à la hauteur de 1,30 m de hauteur. En effet toute les valeurs importante de biomasse (tronc, branche, feuille) sont pour chaque arbre d'une forêt proportionnelle pour DBH. La biomasse d'une une forêt peut être lue sur des abaqes qui donnent la masse des arbres. Il a été constaté que pour une région déterminée non seulement la courbe d'une espèce déterminée est valable pour les différents écosystèmes où on la trouve mais aussi il existe un abaque valable à la fois à toutes les essences ligneuses.

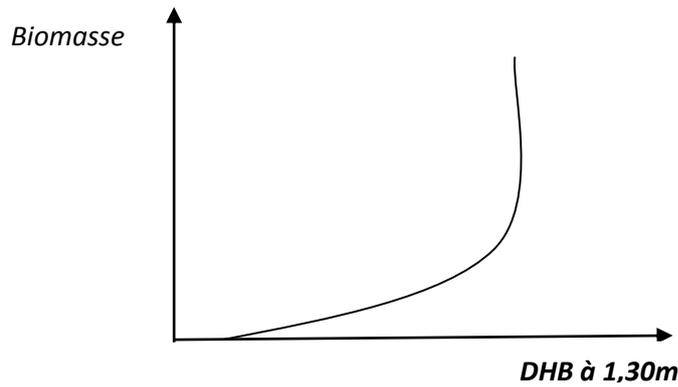


Figure 26 : Abaques permettant évolution de diamètre en fonction de la biomasse (Boulaine J, 1996).

3.6 La productivité

La productivité est la vitesse de production de la biomasse. Ainsi la productivité primaire est la vitesse avec laquelle l'énergie est emmagasinée par l'activité photosynthétique des producteurs (autotrophes) sous forme de matière organique. Cette productivité primaire est limitée par l'importance du rayonnement solaire reçu et par les pertes respiratoires qui peuvent être plus au moins importantes (fig27).

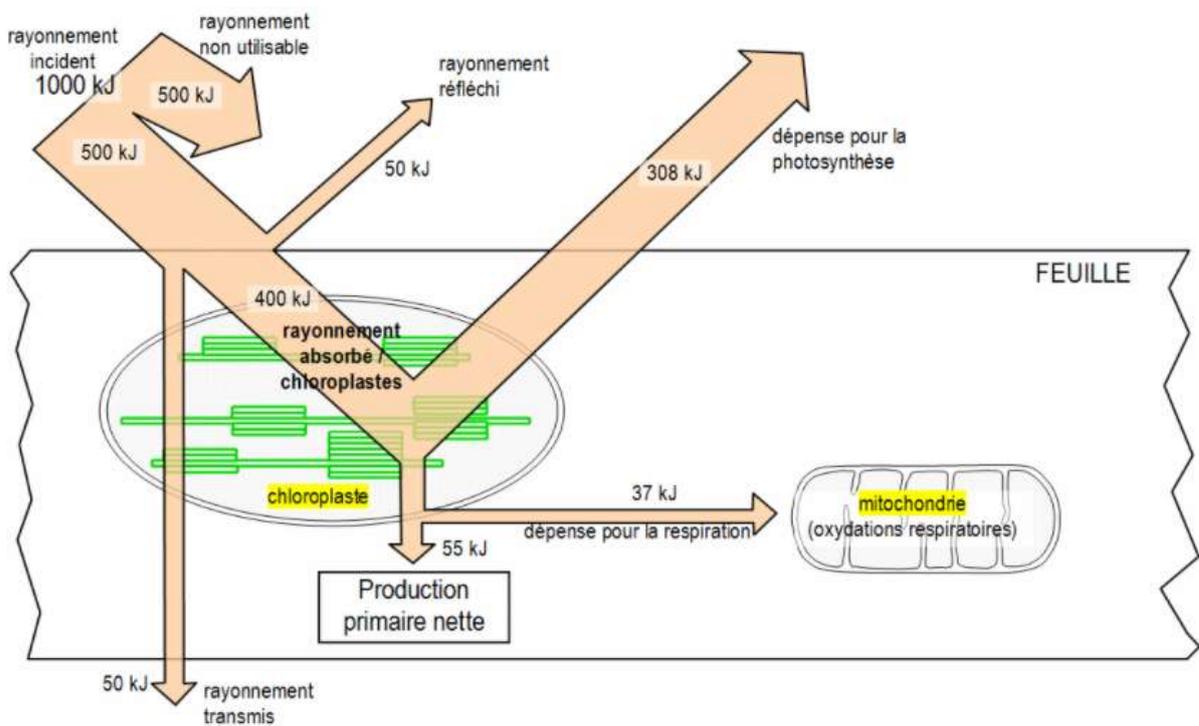


Figure 27 : Bilan énergétique d'un végétal chlorophyllien cultivé isolément (Modifié s'après Hall, 1979 repris par manuel SVT 1S, Bordas, 1993 et http://svt.ac-dijon.fr/schemassvt/article.php3?id_article=45) Données pour 1000Kj.

Les mesures de la productivité primaire nette (PN_1) se fait en pesant les récoltes. La productivité brute ou photosynthétique brute se mesure par des méthodes physiologiques.

$$PN_1 = PB - R_1 \text{ (Productivité primaire nette)}$$

La productivité secondaire (PS) est la biomasse produite par les consommateurs par unité de surface et de temps. L'étude de la productivité secondaire est délicate car elle nécessite la mesure de nombreux paramètres dont les principaux sont le flux d'énergie (A) qui traverse une population ou un niveau trophique ; la valeur énergétique (I) de la nourriture ingérée ; la quantité d'excréta (non assimilée) NA ; la productivité (PN) ; la respiration (R). Ces diverses valeurs ne sont pas indépendantes. Le flux(A) peut être obtenu en calculant soit : $A = I - NA$, soit $A = PN + R$

Les valeurs de A obtenues par ces deux méthodes peuvent parfois différer largement. Dans le cas d'une population de chenilles de *Diurnea fagella* qui se nourrissent des feuilles du chêne, l'estimation de A est de $14,9 \cdot 10^3$ kcal/ha /an si on utilise la relation $A = PN + R$ et de $25,7 \cdot 10^3$ kcal si on utilise la relation $A = I - NA$.

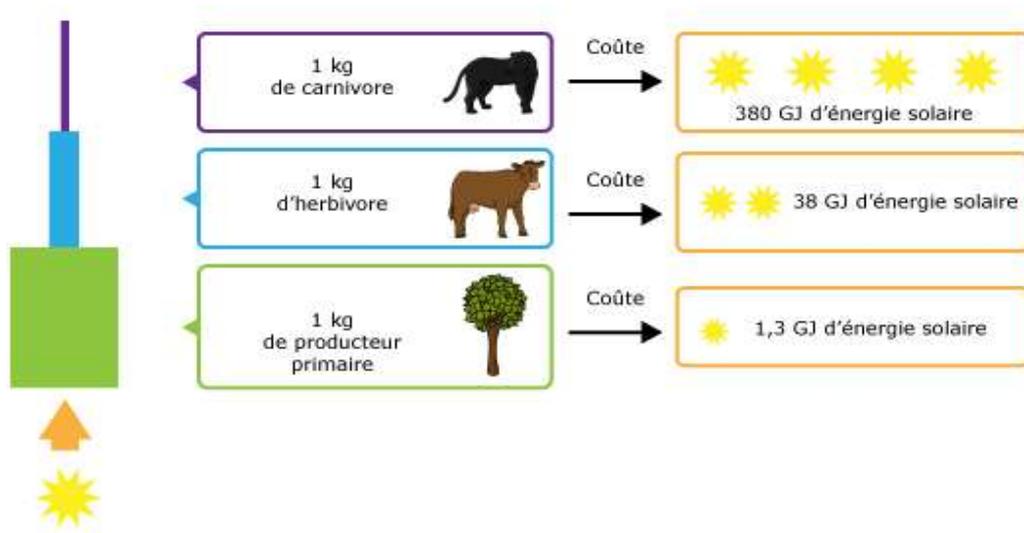


Figure 28 : Estimation de la quantité d'énergie de production de la matière organique dans une chaîne trophique (<https://www.maxicours.com>)

Selon la figure 28, le coût en énergie de la production de matière organique par un être vivant dépend donc de sa place dans la pyramide de productivité.

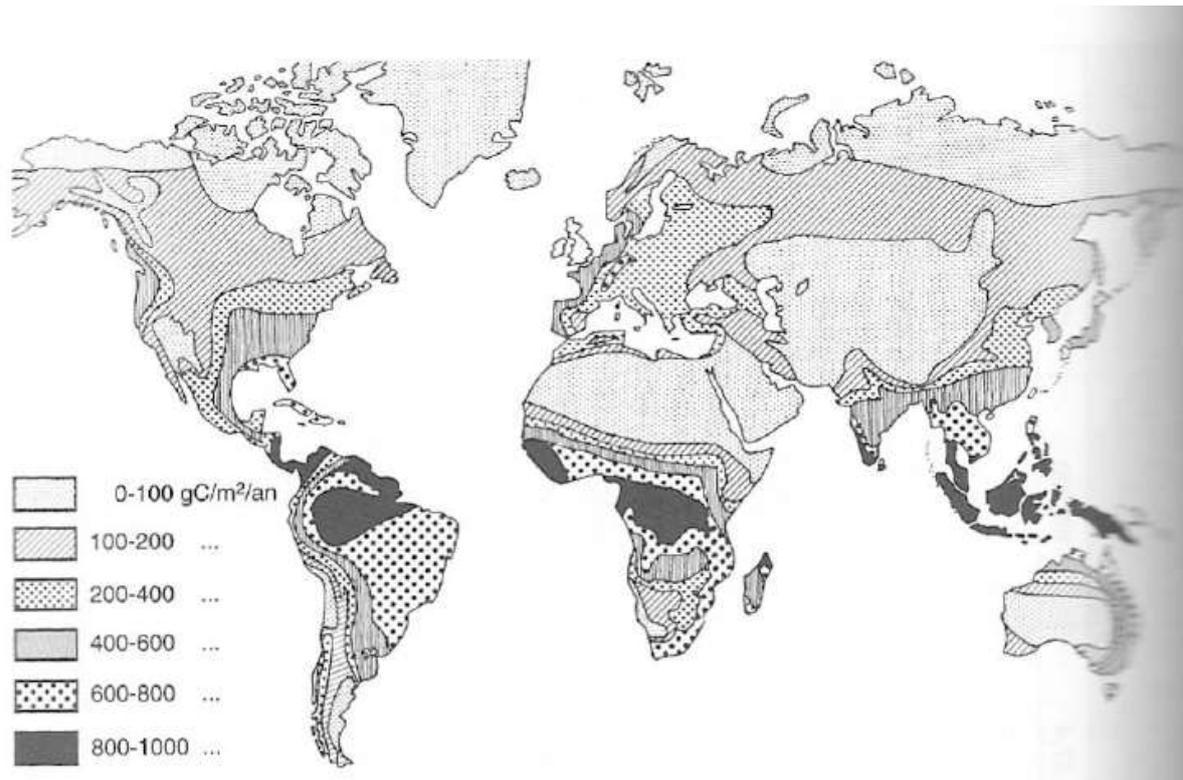


Figure 29 : Production des écosystèmes continentaux (Georges, 2007)

Tableau 4 : Des exemples de production primaire selon les écosystèmes, comparée à deux agrosystèmes :

| | | Productivité |
|--|--|----------------------------------|
| Quelques résultats obtenus pour des écosystèmes naturels | Tourbière à sphaignes | 2 à 10 t matière sèche/ha/an |
| | Forêt de Pin sylvestres | 6,5 t matière sèche/ha/an |
| | Forêt de hêtres | 8 à 13 t matière sèche/ha/an |
| | Forêt d'épicéas | 8 à 32 t matière sèche/ha/an |
| | Marais à roseaux | Jusqu'à 52 t matière sèche/ha/an |
| A titre de comparaison | Prairie artificielle à fétuque | 15 t matière sèche/ha/an |
| | Prairie artificielle à trèfle coupée trois fois par an | 2 à 10 t matière sèche/ha/an |
| | | 22,4 t matière sèche/ha/an |

3.7 Le bilan énergétique

Déterminer les régimes alimentaires et la qualité nutritionnelle des apports énergétiques des individus renseigne le chercheur sur l'écologie de ces espèces et sur les besoins en nutriments des individus en fonction des saisons, de leur état reproducteur, de leur âge et de leur statut social.

Plusieurs méthodes, associant des observations de terrain, des mesures de disponibilités alimentaires et des analyses nutritionnelles, permettent d'appréhender l'écologie nutritionnelle des populations étudiées (Laurent Tarnaud et *al.*, 2010).

3.7.1 À l'échelle des écosystèmes

Les êtres vivants échangent de la matière et de l'énergie avec leur environnement (milieu, autres organismes). Les organismes pluricellulaires hétérotrophes reçoivent des molécules organiques d'autres êtres vivants en les consommant ou en établissant des relations de type symbiotique (Figure 30).

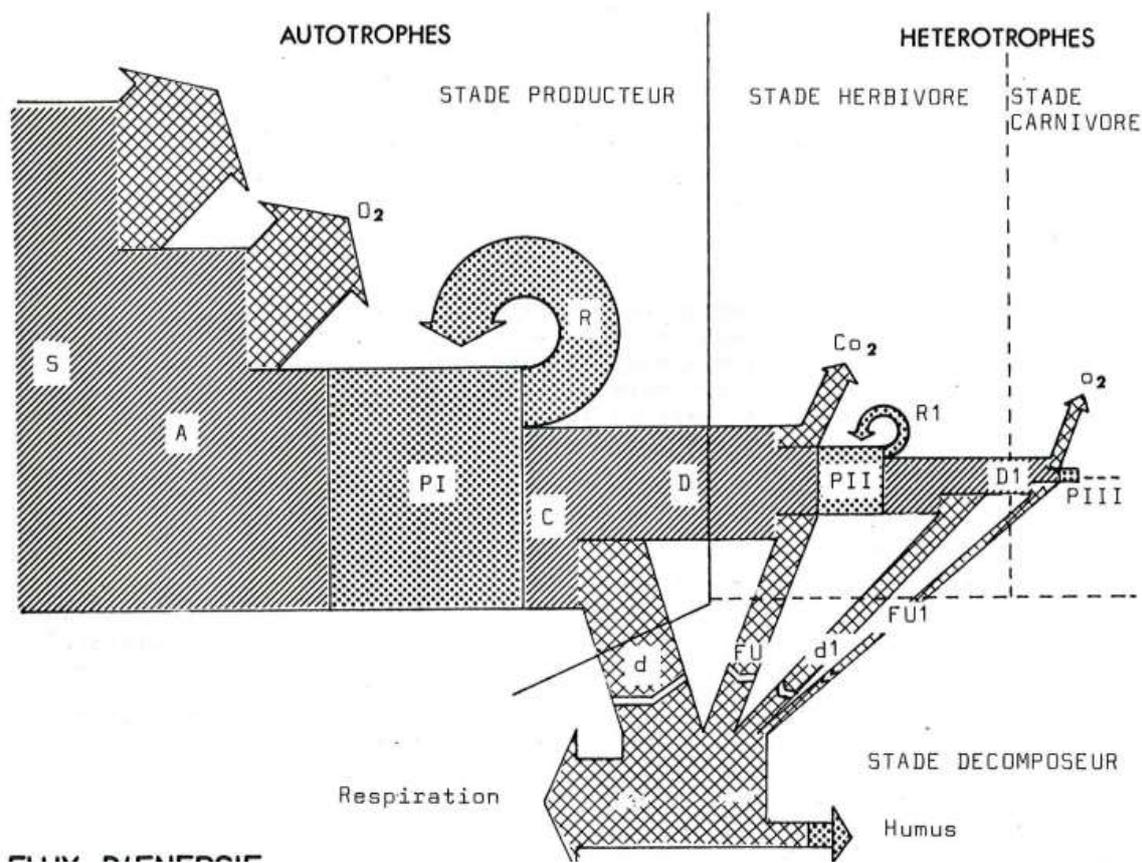


Figure 30 : Transfert du flux d'énergie entre quatre niveaux trophiques (d'après Duvigneaud P, cité par Georges, 2007)

- | | |
|---|---|
| S : Energie disponible du soleil | A : Energie lumineuse absorbée par les tissus chlorophylliens |
| PI : Productivité primaire | Fu : Urine |
| R : Tissus persistants en fin de production | PII : Productivité secondaire |
| C : Support à hétérotrophe | R1 : Constitution de nouveau tissu |
| d : Déchets- gaspillage | DI : Ingérée par carnivores |
| D : Energie ingérée par les herbivores | PIII : Productivité tertiaire |

La figure 30, schématise le passage du flux d'énergie à travers les 4 niveau d'un écosystème idéalisé dont la biocénose serait réduite à une chaîne trophique simple composée d'une communauté végétale productrice et une population d'un consommateurs de premier ordre (herbivore=lapin) d'un consommateur de second classe (carnivore=renard) et d'un décomposeur(bactérie).

On suppose que chaque consommateur se nourrit entièrement du seul aliment qui lui est donné par cette chaîne simplifiée. En effet celui-ci ira en décroissant rapidement car dans la nature l'efficacité de production (rendement écologique) d'un niveau trophique successif soit $E = P_N/P_{N-1} \times 100$ est mauvaise souvent plus proche de 1% que de 10% que l'on considère souvent une valeur moyenne.

3.7.2 À l'échelle d'un organisme pluricellulaire photosynthétique

Les flux de matière et d'énergie existent entre les organes, les tissus, les cellules. Par exemple, il y a des transferts de molécules organiques (énergétiques) ou minérales par l'intermédiaire de structures spécialisées comme les vaisseaux conducteurs de sève.

Tout animal, ou végétal, doit ingérer une certaine quantité de nourriture pour vivre. Établir le bilan énergétique d'un individu relève de l'autoécologie (ou écophysiologie) et passe par le calcul de deux paramètres essentiels : le rendement écologique de croissance et le rendement d'assimilation de l'individu en question.

3.7.2.1 Le rendement écologique de croissance

On évalue la fraction d'énergie utilisée pendant la croissance du sujet étudié pour assurer ses fonctions biologiques (fabriquer de nouveaux tissus, se reproduire et émettre des sécrétions). Ce rendement dépend de l'âge de l'individu et peut même s'annuler à un certain âge chez les mammifères et les oiseaux. Chez les poissons il ne s'annule pas, bien que diminuant significativement. Comme il a été fait remarquer plus haut, le rendement de croissance est meilleur chez les animaux à sang froid que celui des animaux à sang chaud. On comprend très bien qu'une part de l'énergie consommée par un mammifère sert à maintenir une température corporelle stable (homéostasie thermique).

3.7.2.2 Le rendement d'assimilation

Tient compte du rapport entre l'énergie réellement utilisée (assimilée) pour assurer les fonctions biologiques de l'individu et de l'énergie totale consommée lors d'un repas, dont il y aura des pertes. De fait, certains consommateurs sont économes quand d'autres sont gaspilleurs – mais tous tiennent un rôle au sein de l'écosystème... Ce rendement est donc variable :

- 80% chez les carnivores,
- de 15 à 75% chez les herbivores,
- 5 à 10% chez les détritivores (pseudo-scorpions, mille-pattes...) et les géophages (lombrics...).

D'autre part, les petits mammifères sont relativement plus dépensiers en énergie que les gros. Ainsi, une musaraigne dépense 70 fois plus qu'un éléphant (3474 J/g/jour contre 50 J/g/j).

3.8 Conclusion

La productivité ou l'assimilation d'un niveau trophique peu s'exprimé pendant une unité de temps. D'autre part les différents matériaux biologiques n'ont pas nécessairement la même valeur énergétique, ainsi pour exprimer l'énergie parcourant l'écosystème en recourt à une unité commune la calorie. D'autre part les êtres vivants sont de très mauvais transformateurs d'énergie en effet le flux d'énergie diminue fortement le long d'une chaîne trophique à chaque changement de niveau donc nous pouvons conclure que le fonctionnement de l'écosystème se fait d'une mauvaise efficacité.