

## Chapitre V : Transfert d'énergie et de matière

### Introduction

Le flux énergétique du à l'apport du rayonnement solaire à la surface de la planète est à l'origine de deux phénomènes très complémentaires.

Il permet d'abord une mise en contact des cellules végétales avec les éléments minéraux dissous dans l'eau des océans, des lacs ou des solutions salines du sol. Cela aboutit logiquement à l'assimilation cellulaire.

Il assure ensuite un apport d'énergie nécessaire à la chlorophylle pour synthétiser la matière organique, donc la matière vivante.

### V.1. La production primaire

**V.1.1. Définition :** la production primaire traduit la vitesse à laquelle se forme, par une de temps, une quantité donnée de matière organique, à partir de matière minérale et un apport d'énergie. Elle s'exprime en masse de carbone assimilé par unité de temps et a donc, au sens mathématique du terme la dimension d'un flux.

Elle est réalisée par des organismes **autotrophes** ou producteurs primaires, qui constituent le premier maillon ou **niveau trophique** de ce qui est communément dénommé la chaîne alimentaire.

Nous démontrerons ultérieurement qu'il s'agit en fait d'un réseau très complexe entre les organismes de divers niveaux trophiques, ceci étant défini à partir de la nourriture ingérée.

Les autotrophes les plus connus les végétaux qui synthétisent leur matière par photosynthèse, donc à partir des photons. Ce sont les autotrophes. Il existe toutefois des micro-organismes autotrophes tirant l'énergie leur énergie nécessaire à leur synthèse dans des réactions chimiques. Aussi les qualifie-t-on de chimio trophées.

#### V.1.2. Rendement de la photosynthèse et productivité:

La notion de rendement correspond donc au rapport entre l'énergie retenue par les végétaux pour fixer leur biomasse et l'énergie mise à leur disposition.

**V.1.2.1. Efficience énergétique de la photosynthèse :** C'est le rapport entre la quantité d'énergie stockée dans la biomasse végétale produite et la quantité d'énergie disponible du rayonnement solaire nécessaire pour la synthèse de cette biomasse.

Tous les photons qui arrivent au contact d'un végétal ne sont pas utilisables. La chlorophylle et les pigments accessoires ne captent qu'une part de l'énergie lumineuse.

C'est celle qui transmise par la partie visible du spectre lumineux (.038 à .075  $\mu\text{m}$ ). La fraction utilisable ne représente ainsi qu'environ 20% du flux radiatif total reçue à la surface de la planète.

La production primaire moyenne à la surface de la terre a été estimée à .035 g de carbone assimilé/m<sup>2</sup>/jour. Sachant que la fixation de 12 g de carbone nécessite un apport énergétique de 0.158 w/m<sup>2</sup>; le rendement de la photosynthèse est donc compris entre 0.45 et 0.9. Il s'agit ici d'une valeur moyenne calculée pour l'ensemble de la planète (calottes glaciaires et déserts compris).

#### V.1.2.2. Productivité :

La productivité est évaluée en réalité par le rapport entre la production pendant un temps donné et la biomasse présente dans le milieu.

$$\text{Productivité} = P/B$$

Elle s'exprime en unité qui est l'inverse d'un temps(t<sup>-1</sup>).

Pour le plancton par exemple ; dans un milieu aquatique où la production primaire est calculée en milligrammes de carbone assimilé en mètre cube d'eau et par heure ; la productivité est :

$$\text{Productivité} = \frac{\text{mg de C/m}^3/\text{h}}{\text{mg de C/m}^3}$$

Son inverse se traduit la vitesse de renouvellement de la biomasse ou turn over.

$$\text{Vitesse de renouvellement} = \mathbf{B/P}$$

Dans l'exemple précédent. Le taux de renouvellement pour le plancton est de :

$$\text{vitesse de renouvellement} = \frac{\text{mg de C/m}^3}{\text{mg de C/m}^3/\text{h}}$$

La productivité du phytoplancton est très élevée. Lorsque les conditions sont favorables les cellules sont susceptibles de se diviser en une journée. Leur taux de renouvellement est donc de 1/ jour.

Pour les plantes terrestres ; ce turn over est bien plus faible et varie selon l'organe de la plante. Il est ainsi de 1.1/ans pour les feuilles et de 0.02/an pour le bois.

### V.1.3. Production nette et production brute :

**V.1.3.1.: Production brute :** Si comme nous l'avons fait jusqu'à présent, nous ne prenons en compte que l'activité photosynthétique, nous en déduisons qu'en présence d'énergie lumineuse et éléments minéraux, les végétaux produisent une certaine quantité de matière organique par unité de temps. Celle-ci est dénommée **production brute**.

Elle varie évidemment en fonction des conditions environnementales. L'énergie lumineuse, par exemple, varie avec les heures de la journée et selon les saisons. Toutes les espèces composant le peuplement végétal ne présentent pas les mêmes exigences vis-à-vis de la température de l'humidité, de la teneur en éléments nutritifs... Cela conduit à d'importantes variations spécifiques de l'activité photosynthétique.

**V.1.3.2. Production nette :** Le métabolisme des plantes ne se limite évidemment pas à la seule activité photosynthétique. Comme toutes les cellules vivantes, les cellules végétales respirent. C'est d'ailleurs grâce à ce seul processus respiratoire qu'elles couvrent leurs besoins énergétiques pendant la nuit, il apparaît, à l'échelle journalière, une perte non négligeable du potentiel de biomasse qu'est la production brute générée par *la photosynthèse réelle*.

La différence entre la production photosynthétique et ces pertes provenant de la dégradation métabolique de matière organique est dénommée production nette. Elle correspond donc à *la photosynthèse apparente*.

$$\mathbf{P\ nette = P\ brute - pertes\ métaboliques\ (respiration\ ;\ excrétion...)}$$

Au niveau du fonctionnement de l'écosystème, et principalement du développement de la biocénose, cette production nette survivra de nourriture potentielle aux herbivores, c'est-à-dire les *consommateurs primaires*, qui constituent le second niveau de la chaîne trophique.

En d'autres termes, lorsque les conditions autorisant l'activité photosynthétique sont réunies,

La production primaire brute est toujours positive. En revanche la production nette peut être soit :

\* positive lorsque la synthèse des molécules organiques est supérieur à la consommation nocturne et aux pertes métaboliques diverses (respiration ; excrétion...)

\* négative dans le cas contraire.

L'exemple des systèmes aquatiques est de ce point de vue significatif. L'énergie lumineuse est très rapidement absorbée par l'eau elle-même. On définit une profondeur, dite niveau de compensation photonique où ne parvient que 1 % de l'énergie lumineuse. A cette profondeur, la consommation de l'oxygène par la respiration compense exactement sa production par la photosynthèse. Au-dessus de ce

niveau le processus photosynthétique est dominant et la production nette positive. En dessous de ce niveau elle négative car la respiration consomme plus de matière organique que la photosynthèse n'en produit.

### V.1.3.3 .Mesure de la production

#### V. 1.3.3.1. Méthodes de mesure :

- **Pour le milieu terrestre :** Les techniciens qui essaient de quantifier une production végétale, pendant une période définie, opèrent de différentes façons. Dans la majorité des cas, ils prélèvent les parties aériennes qui ont poussé pendant une unité de temps donnée sur une surface précise, puis ils la font déshydrater dans une étuve. En général ils arrêtent la déshydratation lorsqu'il reste encore 10 % d'eau dans les tissus. En deçà de cette valeur les cellules végétales se carbonisent et l'on perd la matière organique par combustion. Il présente alors la récolte et extrapolent les résultats en tonnes de matière sèche à l'hectare.

Dans un souci d'homogénéité des prélèvements, on récoltera des échantillons à différents endroits dans le champ. Ceci permettra d'éliminer l'effet lisière par exemple. Comme les rangées de semées (plantes) à des distances précises il est possible de procéder plusieurs façons, le plus simple est de prélever trois ou quatre pieds moyens (racines comprises) et de comptabiliser le nombre des pieds à l'hectare.

- Utilisation de l'indice foliaire :

Lorsqu'on veut connaître la production annuelle des feuilles d'un gros arbre, il est possible de l'évaluer approximativement par la mesure de son indice foliaire. Le principe est simple. Il suffit de connaître le nombre des feuilles fabriquées par l'arbre et le poids moyen d'une feuille.

Pour cela on récolte à l'automne la totalité des feuilles tombées sous un arbre sur un m<sup>2</sup> de sol. Après dessiccation des quelques feuilles, on évalue le poids sec moyen d'une feuille. Il faut évidemment mesurer la projection orthogonale de la partie aérienne de l'arbre (ombre portée à midi solaire) que l'on calcule en m<sup>2</sup>, connaissant la masse des feuilles tombée par m<sup>2</sup> on a aussi la production pour l'ensemble de l'arbre. Dans une forêt homogène on peut ainsi avoir une idée de la production à l'hectare lorsque on connaît la surface projetée d'un arbre.

La technique est la même mais au lieu de peser les feuilles on évalue la surface moyenne d'une feuille. On comptabiliser le nombre des feuilles au m<sup>2</sup> et en multipliant cette valeur par la surface moyenne d'une feuille il est facile de savoir quelle surface des feuilles présente l'arbre par m<sup>2</sup> de sa projection au sol.

- **Pour le milieu aquatique :**

Pour mesurer la production primaire en milieu aquatique on a deux solutions :

- Mesure de dégagement d'oxygène
- Intégration de carbone.

Dans les deux cas, les processus expérimentaux sont les mêmes. C'est ce que l'on appelle la méthode des flacons sombres et clairs. La technique consiste à prélever de l'eau à différentes profondeurs à la répartir dans trois types de flacons qui subiront une incubation particulière.

Mesure de dégagement d'oxygène :

Dans le type de **flacon 1** on dose la quantité d'oxygène présente au temps t<sub>0</sub>, moment de prélèvement soit Q<sub>0</sub>O<sub>2</sub>.

De l'eau est introduite dans les flacons 2 et 3. Le type de **flacon 2** est totalement obscurci avec un ruban adhésif noir, et le type de **flacon 3** est en pyrex transparent à la lumière. On réimmerge ces

flacons à la profondeur d'origine et on les laisse **6h** en place en incubation. On remonte alors les flacons et l'on dose à nouveau la quantité d'oxygène contenue dans chacun d'eux.

Dans le flacon opaque la lumière n'a pas pu pénétrer :

Il n'y a donc eu que des processus respiratoires. La quantité d'oxygène que l'on y mesure est alors égale à :

$$Q_1O_2 = Q_0 - O_R$$

Dans le flacon clair les deux processus se sont manifestés, à savoir, la photosynthèse (QP) et la respiration (QR). La quantité d'oxygène mesurée est alors égale à :

$$Q_2O_2 = Q_0 + O_P + Q_R$$

La différence de concentration en oxygène entre le flacon clair et le flacon sombre traduit la production d'oxygène par la photosynthèse

$$Q_P = Q_2O_2 - Q_1O_2$$

Le dosage se fait par la méthode de Winkler.

Intégration de carbone (Méthode au  $C^{14}$ )

Le dispositif expérimental est le même. Le type de flacon 1 sert à mesurer la quantité de carbone bio disponible dans l'eau soit  $Q_0 C^{12}$ . Dans le flacon de type 2 (opaque) et de type 3 (clair) on injecte une certaine quantité de  $C^{14}$ . Puis on réimmerge les flacons à la profondeur d'origine de l'eau. On laisse incuber 3h et on filtre l'eau sur une membrane filtrante de type millipore (0,45  $\mu m$  de porosité), ces filtres sont ensuite passés au compteur qui mesure la radioactivité.

L'hypothèse est que, après incubation, le rapport du  $C^{14} / C^{12}$  de l'eau est identique au rapport du  $C^{14} / C^{12}$  de l'Algue. On met très peu de  $C^{14}$ . Le carbone incorporé dans les Algues par photosynthèse est calculé par le rapport suivant :

$$C^{12}(\text{Algue}) = \frac{C^{14} \text{ Algue (enregistré)} \times C^{12} \text{ eau (dosage)}}{C^{14} \text{ eau (injecté au départ)}}$$

## V. 2. La production secondaire :

**V.2.1 .Définition :** Le terme production secondaire s'applique à toute biomasse produite par unité de temps par des organismes dénommés **consommateurs**. Ces derniers ne réalisent en fait qu'une transformation de la matière organique synthétisée à la base de la chaîne alimentaires par les autotrophes par les producteurs primaires. Les consommateurs sont donc des organismes hétérotrophes.

### V.2.2. Les consommateurs

Ce sont les organismes qui transforment la matière organique consommée vivante pour assurer la constitution et le fonctionnement de leurs propres organes. Ils sont classiquement rangés en trois grandes catégories, les herbivores, les carnivores et les parasites.

**V.2.2.1.Les herbivores- consommateurs primaires :** Les herbivores sont les consommateurs primaires (C1). Comme ils consomment les végétaux, ils constituent le second niveau de chaîne alimentaire. Leur taille est fort variable. Cela va des petits organismes brouteurs d'Algues aux grands mammifères végétaliens qui sont les Girafes ou les Eléphants, en passant par la plus part des insectes et les rongeurs. Certains ont une nourriture très spécialisée ; les oiseaux granivores ne consomment que des graines ; les insectes xylophages le bois des troncs.

**V.2.2.2. Les carnivores- consommateurs à plusieurs degrés :** Les carnivores capturent la plupart du temps des proies. Par définition ce sont des prédateurs. Ils transforment donc la biomasse animale. Suivant le degré de prédation, il est classique de distinguer deux types de carnivores :

- Les consommateurs d'herbivores, ou consommateurs secondaires(C2), par exemple, un Lion lorsque il capture une Gazelle.
- Les consommateurs de carnivores ou consommateurs tertiaires(C3), par exemple une Vipère qui avale une Musaraigne (animal insectivores). Le même animal peut appartenir à plusieurs niveaux. Une Buse est un simple C2 lorsqu'elle se nourrit d'un Lapin. Elle devient un C3 si elle capture une taupe, elle est C4 lorsque elle attrape une Vipère qui, elle est consommée des insectivores.

**V.2.2.3. Les parasites :** Ils viennent allonger encore ces chaînes alimentaires. Un Rapace qui est un C4 peut être très bien porter des Tiques (Acariens parasites) qui sucent son sang. Ces Arthropodes sont alors des C5. Mais les Tiques peuvent elles aussi être victime d'un super parasitisme puisque elles hébergent souvent des Bactéries ou des Virus pathogènes.

### **V.2.3. Les détritivores et les décomposeurs- consommateurs particuliers**

On ne sait pas toujours dans quelle catégorie ranger les organismes qui assurent la décomposition plus au moins lente des cadavres et des déchets végétaux. Comme ils utilisent la matière organique morte pour assurer leur métabolisme leur croissance et leur reproduction, ils se comportent donc bien comme des consommateurs. L'aboutissement de leur action est la minéralisation de différents éléments. Ils assurent ainsi un rôle considérable dans le recyclage de la matière, ce qui leur permet de récupérer au passage l'énergie nécessaire à leur vie. Ce recyclage s'effectue en deux étapes et met en cause deux catégories d'êtres vivants :

- Les détritivores qui pour se nourrir utilisent les restes des organismes tombés au sol après leur mort ;
- Les décomposeurs qui achèvent la transformation amorcée par les détritivores dans le processus de minéralisation qui conduit de la matière organique à la matière minérale.

**V.2.3.1. Les détritivores :** Ils représentent l'ensemble des individus qui se nourrissent, comme leur nom laisse suggérer, de débris animaux et végétaux. Leur action essentielle qui marque la 1<sup>re</sup> étape de la transformation de la matière organique morte se manifeste par une fragmentation des débris en éléments plus fins que d'autres transformateurs.

Les matières que les détritivores ingèrent sont dilacérées au cours de transit intestinal. Une partie de ce qu'ils consomment va être digérer et transformée en biomasse. Le reste rejeté dans les fèces, contient encore la matière organique, mais beaucoup plus dégradée que au départ.

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

➤ Les nécrophages :

Cette catégorie de détritivores ne se nourrit que de cadavres d'animaux. C'est le cas des nécrophages. Insectes Coléoptères souvent associés au bout de quelques jours à d'autres insectes adultes sur les cadavres des oiseaux, des mammifères ou d'autres animaux.

➤ Les coprophages :

Ce sont les individus qui mangent des excréments. L'exemple des Bousiers (Insectes Coléoptères) est bien connu.

➤ Les saprophages :

Ce terme désigne les êtres qui mangent des éléments végétaux en décomposition.

➤ Les géophages :

Ce sont les animaux du sol qui assurent un rôle primordial dans l'humification. Les plus connus sont les vers de terre « qui mangent leur chemin en avançant »

**V.2.3.2. Les décomposeurs :** La 1<sup>re</sup> étape de la dégradation de la matière organique morte, assurée par les détritivores, permet à des êtres microscopiques, des Bactéries, des Champignons ou des protozoaires d'accomplir la seconde étape de cette transformation. Ces micro-organismes sont les responsables de la minéralisation proprement dite. Par des processus aérobies pour certains, anaérobies par les autres.

### **V.2.3.3. Rôle des détritivores et des décomposeurs dans le fonctionnement des écosystèmes :**

L'activité métabolique hétérotrophe conjuguée des détritivores et des décomposeurs conduit par étapes successives à la reminéralisation de la matière organique, initialement élaborée par les producteurs et transitant par tous les niveaux trophiques de la chaîne alimentaires.

Ce rôle est d'une importance capitale dans le fonctionnement des écosystèmes puisque il correspond au bouclage du cycle de la matière. Il remet ainsi à la disposition des végétaux les éléments nutritifs indispensables à l'activité photosynthétique.

Enfin, le recyclage qu'ils accomplissent est essentiel pour la fertilité des sols.

## **V.3. Les rendements énergétiques**

### **V.3.1. Productivité (production / biomasse)**

Comme nous l'avons fait pour les autotrophes, nous pouvons calculer pour les producteurs secondaires le rapport **P/B** ainsi que son inverse ou turn over **B/P**.

Exemple : Les Crustacés planctoniques lacustres produisent journallement de 0,03 à 0,13 fois leurs poids par jour (soit un turn over B/P de 8 à 30 jours) alors que les Eléphants ne produisent en un an que le vingtième de leur poids (soit un turn over de 20 ans).

**V.3.2. Efficience ou rendements énergétiques :** L'efficience énergétique est définie, pour un niveau trophique, comme le rapport entre le flux énergétique sortant et le flux entrant, c'est-à-dire le rapport énergie fixée / énergie reçue.

Lorsque un tel calcul est réalisé, il est indispensable d'apporter quelques précisions. On doit connaître si ce sont des flux de biomasse, de production nette, d'énergie... qui sont pris en considération. Il faut également préciser si l'efficience est mesurée pour un couple prédateur-proie déterminé, ou entre deux niveaux trophiques successifs, ou globalement sur un ensemble sur un ensemble de niveaux.

**V.3.2.1. Efficience de consommation :** C'est le rapport entre l'énergie ingérée par un consommateur et celle qui est contenue dans une proie qui sera effectivement ingérée. Toute la production nette mise à la disposition du consommateur n'est pas exploitée. Un herbivore n'exploitera pas toute la production nette d'un végétal. Un carnivore abandonnera les os et les phanères, qui pourtant contiennent de l'énergie.

La valeur de ce rapport varie considérablement selon les écosystèmes. Ainsi il existe une différence notable entre la consommation des végétaux terrestres et celle du phytoplancton. En moyenne, ce sont 2% de la production nette des parties aériennes qui sont consommées par les insectes. Dans les systèmes aquatiques, ce rapport atteint 80 à 100%, la quasi-totalité de la production nette phytoplanctonique pouvant être journallement consommée par le zooplancton herbivore.

**V.3.2.2. Efficience d'assimilation :** Lorsque des aliments sont ingérés par un consommateur, ils sont soumis au cours du transit dans le tractus digestif à des processus mécaniques et chimiques de digestion. Une partie seulement transverra al muqueuse intestinale pour passer dans le sang, ce sont les nutriments. Le reste ne sera pas assimilé et sera éliminé par les fèces.

L'efficience d'assimilation est donc le rapport entre l'énergie assimilée (A) des nutriments et l'énergie ingérée (I) des aliments.

$$E \text{ (assimilation)} = A / I$$

Cette efficience varie considérablement selon la nature des organismes consommateurs. Une large part du matériel ingéré est libérée sous forme de fèces.

Remarque :

Tout ce qui est assimilé ne participe pas à l'élaboration de la biomasse de consommateur. Une part importante de l'énergie assimilée ne sera pas fixée car elle est mise à profit pour couvrir les besoins métaboliques qui exigent la respiration, l'excrétion ou l'homéothermie... De ce fait on peut définir une autre forme de rendement, l'efficience de production nette, qui correspond au rapport de l'énergie fixée, c'est-à-dire l'énergie nette(N) sur l'énergie assimilée.

$$E \text{ (Production nette)} = N/A$$

### V.3.2.3. Efficience écologique

C'est par exemple le rapport entre la production nette d'un prédateur et la production nette de la proie capturée. Il s'agit bien de rapport entre des valeurs énergétiques et non entre des poids de matière. En effet, la teneur en eau varie fortement d'un aliment à l'autre et de la nourriture à la biomasse fixée. De tels calculs ne peuvent donc être établis qu'en laboratoire, car les teneurs énergétiques des productions nettes consommées et fixées sont déterminées la bombe calorimétrique. Sachant que 1 calorie (1Kcal)= 4.18KJ, les normes sont les suivantes :

-1g de glucides correspond à 4 Kcal ou 17 KJ

-1g de protides correspond à 4 Kcal ou 17 KJ

-1g de lipides correspond à 9 Kcal ou 38 KJ

Cette efficacité alimentaire est en moyenne de l'ordre de 10% à partir de des C1. Elle varie toutefois assez fortement selon le régime des animaux, leur physiologie (homéothermie ou poïkilothermie), leur âge et leur capacité de transformation. Les métabolismes des animaux homéothermes consomme jusqu'à 20 fois plus d'énergie que celui des poïkilothermes pour production nette équivalente. Pour entretenir une température corporelle constante, les mécanismes physiologiques requièrent des besoins énergétiques considérables, particulièrement sous des conditions climatiques extrêmes. Le paramètre qui varie le plus est la respiration cellulaire.

A partir d'un certain âge, la croissance du bétail s'arrête. Sa production nette devient alors nulle, la consommation couvre plus alors que les dépenses énergétiques d'entretien et de reproduction.

### Flux d'énergie à travers un réseau trophique

Le transfert de l'énergie à travers un réseau trophique s'effectue toujours avec d'énormes pertes, lorsque l'on passe d'un niveau de production au suivant. On définit par ailleurs un flux pour l'énergie qui transite dans chacun des niveaux élémentaires composant un réseau.

Ainsi, dans chaque maillon (P1, C2, C3, C4, Décomposeurs) le flux correspond à la quantité d'énergie assimilée par les êtres qui le composent. Il tient compte non seulement de l'énergie fixée

Dans la matière organique vivante, mais aussi des pertes métaboliques qui ont permis cette fixation.