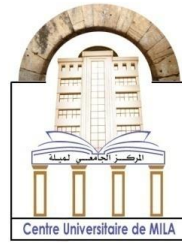


Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf, Mila
Institut des Sciences de la Nature et de la Vie
Département d'Ecologie et d'Environnement



Polycopié de cours

Structure et fonctionnement des écosystèmes

*Destiné aux étudiants de 1^{ère} année Master
Spécialité : Protection des écosystèmes*

Auteur : Dr. LAALA Ahmed

Année Universitaire : 2024/2025

Chapitre 1

Structure trophique des écosystèmes

Chapitre 1. Structure trophique des écosystèmes

Introduction

La structure trophique des écosystèmes constitue l'un des aspects fondamentaux de la dynamique écologique, offrant une vision approfondie des interactions complexes qui régissent les flux d'énergie et de matière dans les environnements naturels. Les écosystèmes, qu'ils soient terrestres, aquatiques ou marins, se caractérisent par des réseaux intriqués de relations alimentaires entre producteurs, consommateurs et décomposeurs. Ces relations, organisées en chaînes et en réseaux trophiques, déterminent non seulement la répartition des ressources mais aussi la stabilité et la résilience des systèmes écologiques face aux perturbations.

1.1. Les niveaux écologiques

Le monde vivant est structuré selon des niveaux d'organisation de complexité croissante (molécules, organites, cellules, tissus, organes, individus, populations, communautés). Les niveaux d'organisation écologiques (organisme, population, communauté, écosystème, biome et biosphère) font référence à la façon dont le monde biologique est organisé en une hiérarchie imbriquée, fournissant des cadres de référence spécifiques pour étudier l'écologie.

L'organisme est une entité vivante dotée de caractéristiques clés telles que l'ordre, la réponse aux stimuli, la croissance et le développement, la reproduction, la régulation et le traitement de l'énergie. Ce niveau englobe tous les organismes individuels depuis les êtres unicellulaires jusqu'aux arbres et aux gros mammifères (Exemple : Un cerf de barbarie individuel). A ce niveau, les études sont qualifiées d'auto-écologiques, par opposition à celles des niveaux supérieurs, qualifiées de synécologiques.

La population est un groupe d'organismes appartenant à la même espèce, vivant dans la même zone et interagissant potentiellement les uns avec les autres (Exemple : un troupeau de cerfs de Barbarie).

La communauté est un groupe de populations d'espèces différentes qui vivent dans la même zone et interagissent potentiellement les unes avec les autres. Une communauté peut être composée d'animaux, de plantes, de champignons, de bactéries, etc...(Exemple : Communauté forestière composée de cerfs de Barbarie, de chênes, de pommiers, de ténias, de loups gris et d'ours).

L'écosystème : ensemble fonctionnel comprenant les êtres vivants qui vivent dans un lieu donné (biocénose) et le milieu physico-chimique dans lequel ils vivent (biotop), ainsi que toutes les interactions existantes entre ces entités. (Exemple : L'écosystème de la forêt de feuillus).

Biome : ensembles de paysages en lien avec un climat particulier, notamment caractérisés par un type prédominant de végétation naturelle (Exemples : Toundra, forêt caducifoliée, désert... Les biomes peuvent être regroupés en zones biogéographiques ou écozones).

La biosphère : est composée de tous les écosystèmes de la Terre. Ensemble de tous les êtres vivants de la planète, et de tous les milieux qu'ils habitent.

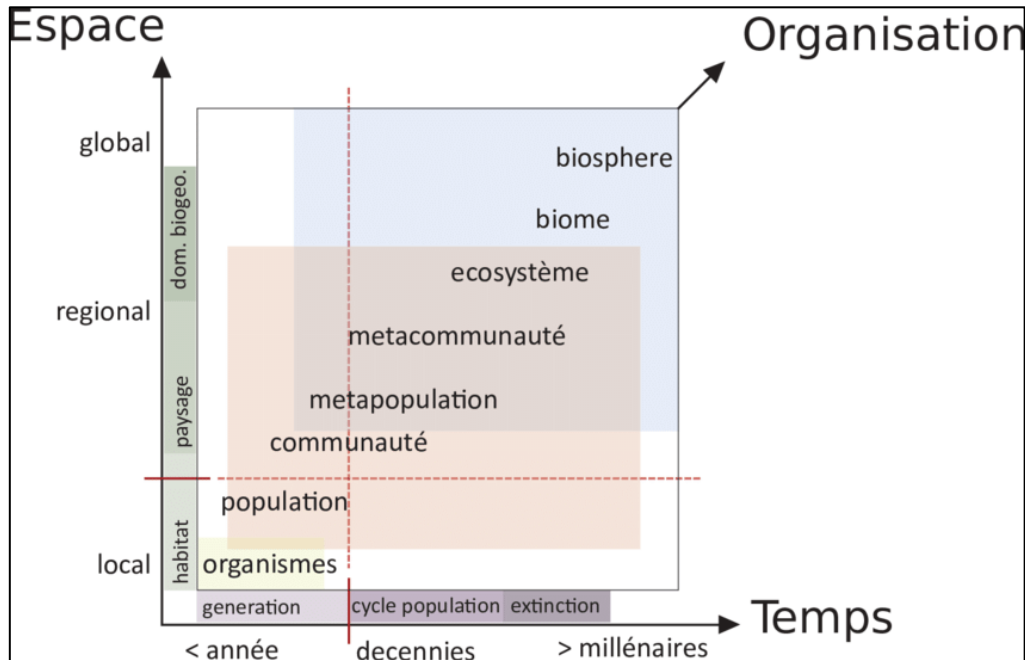


Fig.1. Schéma conceptuel des liens entre échelles en écologie

1.2. Caractérisation de la structure d'un écosystème

Pour appréhender pleinement le fonctionnement et la dynamique d'un écosystème, il est crucial de commencer par une caractérisation de sa structure. Cela inclut l'exploration de la notion de système, qui met en lumière les relations et interactions entre les différentes composantes de l'écosystème.

1.2.1. Notion de système

Un système est un ensemble d'éléments interconnectés qui interagissent entre eux selon des règles ou des principes déterminés, dans le but d'atteindre un objectif commun ou de fonctionner de manière cohérente. Les systèmes peuvent être naturels ou artificiels et peuvent varier en complexité, allant de simples systèmes à des systèmes très complexes.

Exemples : Système Économique, Système Solaire, Système Informatique, Système Social, Système Écologique.

Tab1. Composantes structurales de différents systèmes

Systèmes	Entités	Relations
Cellule	Molécules	Relations biochimiques et physiques
Tissu cellulaire	Cellules	Interactions cellulaires
Organisme	Organes	Corrélations entre organes
Écosystème	Espèces et facteurs abiotiques	Interactions écologiques
Société	Individus	Relations sociales

1.2.2. Notion de système écologique

L'objet immédiatement accessible au naturaliste est un individu. Les individus, que l'on perçoit d'abord comme isolés dans la nature, n'ont de sens, pour l'écologie, qu'au travers du système de relations qui les lie, d'une part à d'autres individus, et d'autre part à leur environnement physico-chimique (Fig.2). L'unité fondamentale, la pièce élémentaire de ces systèmes écologiques est la population, ensemble des individus de même espèce coexistant dans le milieu considéré.

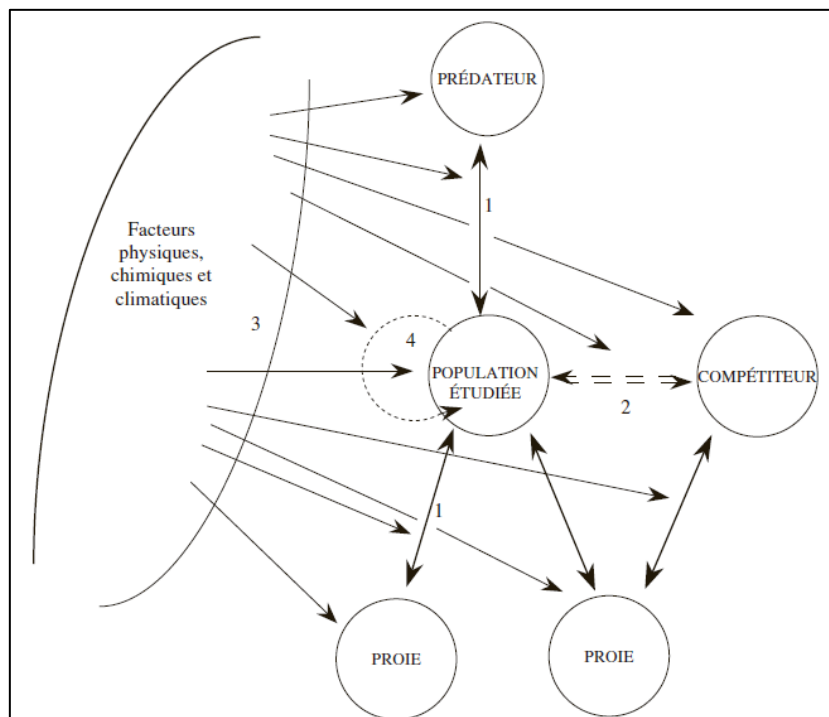


Fig.2. Représentation schématique d'un système écologique

Un système écologique ou écosystème fut défini par le botaniste anglais Arthur Tansley en 1935. C'est un système biologique formé par deux éléments indissociables, le milieu physico-chimique (le biotope) et la communauté d'êtres vivants (la biocénose), crée un réseau d'interactions

entre leurs éléments constitutifs (Fig.3). Les écosystèmes, comme de nombreux systèmes étudiés dans la nature et la société, sont des systèmes ouverts, c'est-à-dire en relation avec leur environnement. Un écosystème inclut donc :

- le biotope, facteurs physico-chimiques du milieu (par exemple les paramètres abiotiques du sol et du climat : structure physique, température, intensité lumineuse, humidité, teneur en éléments chimiques...);
- la biocénose, ensemble des êtres vivants ;
- les relations entre les êtres vivants (interactions biotiques) ;
- les relations entre les êtres vivants et leur biotope ;
- les relations entre l'écosystème et son environnement.

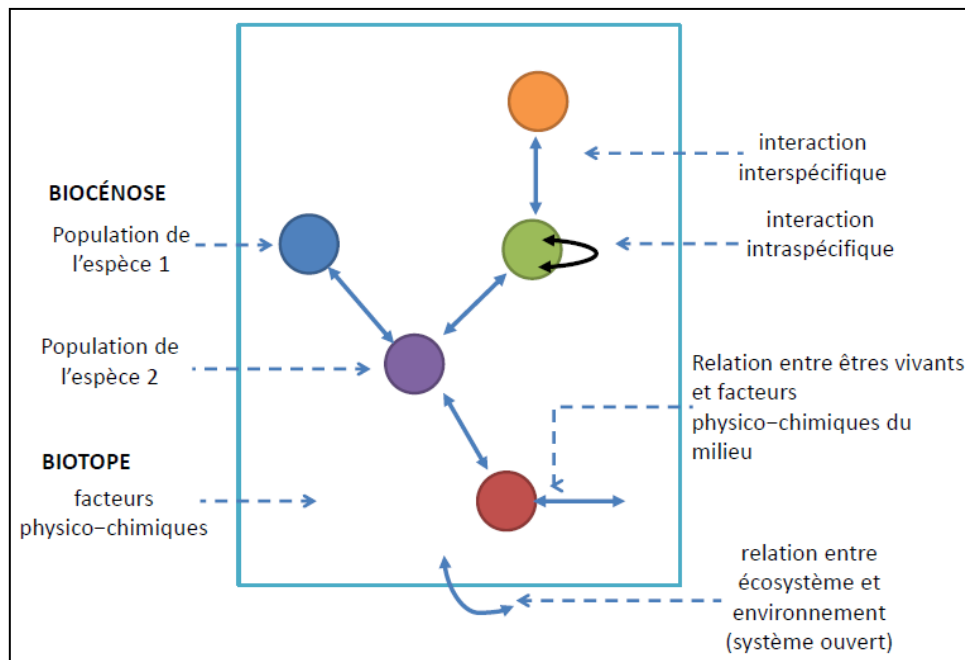


Fig.3. Interactions au sein d'un écosystème

1.2.3. Propriétés clés du fonctionnement et de l'organisation d'un écosystème

Les écosystèmes sont des systèmes complexes qui fonctionnent grâce à un ensemble de propriétés clés. Ces caractéristiques déterminent non seulement la manière dont les organismes interagissent entre eux, mais aussi leur adaptation aux changements environnementaux.

- **Complet**

Un écosystème est dit complet lorsqu'il inclut toutes les composantes nécessaires à son fonctionnement : producteurs, consommateurs et décomposeurs. Cette complétude assure des cycles de nutriments efficaces et un équilibre durable.

Exemple : Une forêt tropicale. Elle inclut une diversité d'espèces végétales (arbres, arbustes, plantes herbacées), d'animaux (oiseaux, mammifères, insectes) et de décomposeurs (champignons, bactéries), assurant un cycle de nutriments complet et une résilience élevée.

- **Homogène**

La notion d'homogénéité dans un écosystème se réfère à une uniformité dans les conditions environnementales (climat, sol, etc.) ou la composition des espèces. Un écosystème homogène peut avoir une biodiversité moins riche, ce qui peut réduire sa résilience face aux perturbations.

Exemple : Une prairie monoculture. Dans une prairie où une seule espèce de plante est cultivée (comme le blé), les conditions environnementales sont souvent uniformes, ce qui peut limiter la biodiversité et la capacité du système à s'adapter aux changements.

- **Système ouvert**

Un écosystème est un système ouvert, car il échange de l'énergie et des matières avec son environnement. Cela inclut l'importation d'énergie solaire, le flux de nutriments et l'interaction avec d'autres écosystèmes. Ces échanges sont essentiels pour le maintien de la vie.

Exemple : Un lac. Un lac échange de l'eau, des nutriments et des organismes avec son environnement. Par exemple, l'eau s'évapore, des pluies y apportent des nutriments, et des poissons migrent, illustrant la nature ouverte du système.

- **Organisation hiérarchique**

Les écosystèmes présentent une organisation hiérarchique où les éléments sont classés par niveaux d'organisation : individus, populations, communautés et écosystèmes. Cette structure permet de mieux comprendre les interactions et les relations entre les différentes composantes.

Exemple : Un récif corallien. Dans un récif, on peut observer des niveaux d'organisation, allant des coraux individuels (individus), aux colonies de coraux (populations), puis à l'ensemble du récif (communauté) qui abrite une variété d'espèces marines.

- **Auto-organisation**

L'auto-organisation fait référence à la capacité d'un écosystème à se structurer et à s'adapter de manière autonome en réponse à des perturbations ou à des changements environnementaux. Ce phénomène est crucial pour la résilience et l'évolution des écosystèmes, leur permettant de se rétablir après des perturbations.

Exemple : Une savane après un incendie. Après un incendie, la savane peut rapidement se régénérer grâce à des mécanismes d'auto-organisation, où les espèces résistantes à la chaleur

repoussent et rétablissent l'écosystème sans intervention extérieure. Pour la forêt, lorsqu'un incendie se produit, il détruit une partie de la végétation, ainsi que certains animaux et micro-organismes. Cependant, il libère également des nutriments dans le sol. De nombreuses espèces de plantes, comme certaines conifères (par exemple, les pins) ont évolué pour prospérer après un incendie. Elles peuvent produire des graines qui nécessitent la chaleur du feu pour germer. Ce phénomène favorise une régénération rapide de la végétation. L'incendie crée des espaces ouverts, permettant à des espèces de plantes et d'animaux d'entrer et de s'établir. Cela peut enrichir la biodiversité et renforcer la résilience de l'écosystème. Au fil du temps, la forêt se régénère, et les populations d'espèces végétales et animales se stabilisent à nouveau, rétablissant ainsi l'équilibre de l'écosystème.

- **Autorégulation**

Un écosystème autorégulé peut maintenir son équilibre interne grâce à des mécanismes tels que la rétroaction. Ces mécanismes sont essentiels pour assurer la durabilité de l'écosystème face aux variations et aux pressions extérieures.

Exemple : Un étang. Dans un étang, si la population de poissons augmente de manière excessive, cela peut entraîner une diminution des algues, ce qui réduit les ressources alimentaires. Ce mécanisme de rétroaction aide à stabiliser la population de poissons et à maintenir l'équilibre de l'écosystème. Par exemple, si une population de prédateurs augmente, cela peut entraîner une diminution des proies, stabilisant ainsi le système. L'autorégulation est essentielle pour la durabilité de l'écosystème.

1.2.4. Caractéristiques générales des écosystèmes

Les écosystèmes peuvent être décrits, au niveau de leur trame biologique (la biocénose), par la simple énumération de leur composition spécifique. Un tel inventaire, qui doit théoriquement inclure toutes les espèces présentes (micro-organismes, plantes, animaux...), se heurte à de sérieuses difficultés (repérage et détermination de ces espèces). Dans le cas des écosystèmes terrestres une première description intégrée est généralement donnée à partir de l'analyse de la végétation qui permet de définir la structure spatiale de l'écosystème. Dans le cas des écosystèmes aquatiques la structure spatiale est plus aisément définie à partir des variables physiques du milieu.

1.2.4.1. Le cadre physico-chimique

L'écosystème n'est pas réductible à sa biocénose. Il comporte aussi un milieu physique et chimique qui intervient non seulement dans la biologie de chaque espèce mais aussi dans la structure et la dynamique de la biocénose toute entière. À l'inverse, le fonctionnement et la transformation de la composition et de la structure des biocénoses peuvent modifier les caractères du milieu. Par

exemple, dans les zones humides, l'enchevêtrement des racines des plantes aquatiques et les activités des micro-organismes du sol modifient la composition chimique des sédiments, augmentant leur capacité à retenir l'eau et à filtrer les nutriments. Cette transformation influence à son tour la qualité de l'eau et la biodiversité des espèces aquatiques.

Un autre exemple est observé dans les forêts tropicales, où les interactions entre les arbres, les lianes, et les plantes épiphytes modifient la structure de l'habitat et les régimes de lumière et d'humidité au sol. Les lianes, en particulier, peuvent affecter la croissance des arbres en limitant leur accès à la lumière et en modifiant la structure de la canopée. Cette interaction influence la régulation de l'humidité et la composition du sol, contribuant à une dynamique écologique complexe qui favorise certaines espèces tout en excluant d'autres.

De plus, dans les prairies, les herbivores comme les bisons ou les chevaux jouent un rôle crucial dans la structuration de la végétation. Leur pâturage peut transformer les communautés végétales en favorisant certaines espèces herbacées tout en limitant les arbustes et les arbres. Ce processus modifie la structure du sol, l'hydrologie de la région, et la disponibilité des nutriments, impactant ainsi les autres espèces animales et végétales.

1.2.4.2. La biocénose

Le second élément de l'écosystème comprend l'ensemble des êtres vivants, végétaux, animaux et micro-organismes, qui trouvent dans le milieu des conditions leur permettant de vivre et de se reproduire. L'ensemble de ces êtres vivants constitue une biocénose. La biocénose est un ensemble plus ou moins riche en espèces entre lesquelles existent des liens d'interdépendance qui se manifestent par les relations trophiques.

1.2.4.3. Structure spatiale

Les écosystèmes ne s'étalent pas, uniformes et homogènes, dans l'espace : ils possèdent une certaine structure, définissable horizontalement et verticalement.

Il est clair que la distribution des organismes et le fonctionnement des écosystèmes dépendent étroitement de ces structures spatiales et de leurs variations temporelles ; de même, à l'inverse, celles-là peuvent dépendre de l'activité biologique qui se développe dans l'écosystème. Dans le cas des écosystèmes terrestres, il est également possible de définir des structures spatiales sur la base de critères physiques ou chimiques (température, humidité, pH, concentration du sol en tel ou tel élément, etc.). Cependant, l'importance de la végétation pour tout le fonctionnement de l'écosystème, sa visibilité immédiate, son immobilité, ses relations étroites avec les facteurs physico-chimiques du milieu en font un système de choix pour une définition « intégrée » des milieux et de leurs structures.

Pour les écologistes terrestres, la structure de la végétation est devenue la structure par excellence des écosystèmes.

La répartition dans le plan vertical correspond à la stratification, plus ou moins marquée selon les écosystèmes. Elle est bien visible dans la forêt, où il est possible de reconnaître une strate cryptogamique au niveau du sol, de quelques centimètres au maximum, constituée par des cryptogames, mousses et lichens ; une strate herbacée formée d'herbes pouvant atteindre parfois 1 m de hauteur ; une strate arbustive jusqu'à 8 m de hauteur ; une strate arborescente comprenant les arbres les plus hauts (plus de 50 m dans certaines forêts). À cette stratification se superpose une stratification des animaux qui peuvent vivre au sol ou, comme les oiseaux ou les insectes, s'installer dans les diverses strates du sous-bois. La stratification existe aussi dans le sol où elle est marquée par un étagement des racines des diverses plantes à divers niveaux (fig.4).

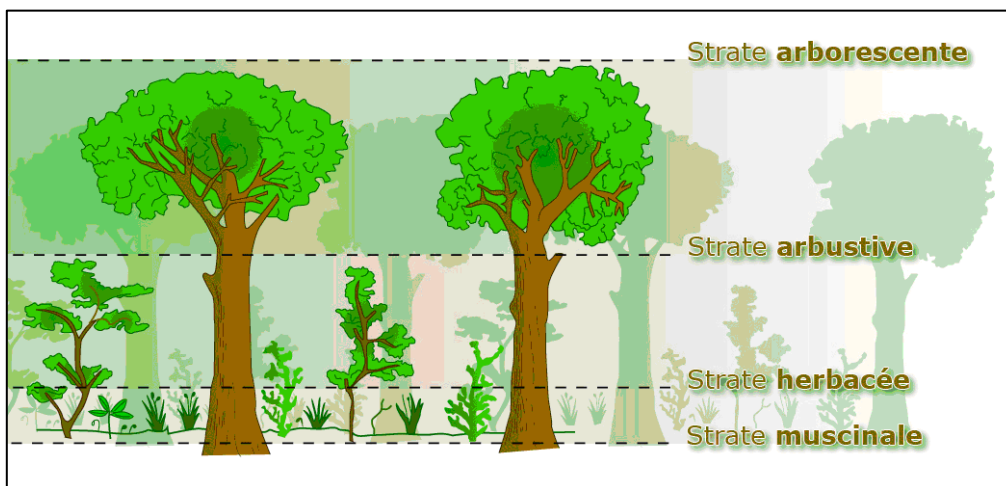


Fig.4. Stratification verticale de la forêt

Dans le plan horizontal, la structure des écosystèmes se manifeste, en forêt, par une hétérogénéité de la végétation, la présence de clairières ou d'arbres d'âges et de hauteurs différentes.

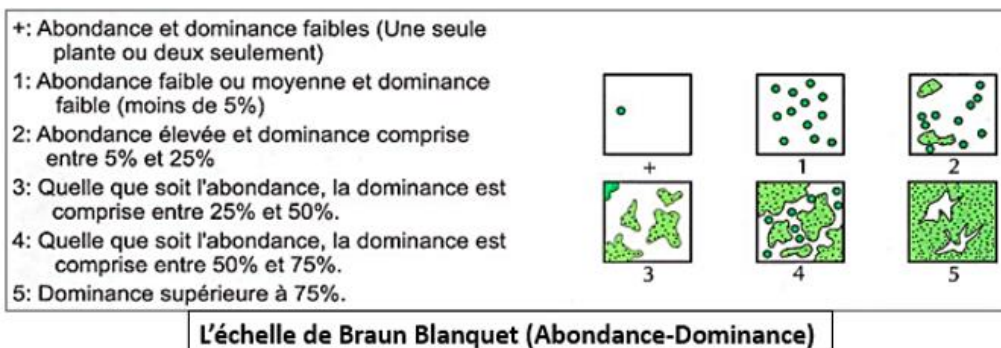


Fig.5. Echelle de Braun-Blanquet, qui mesure l'abondance et la dominance des espèces dans un écosystème, est un bon exemple de structure horizontale

1.2.4.4. Structure trophique (fonctionnelle)

Les divers compartiments du système biosphère sont liés par des transferts de matière et d'énergie. Trois processus fondamentaux en résument le fonctionnement :

- le processus de consommation, ingestion de matière organique ;
- le processus de production, synthèse de matière organique ;
- le processus de décomposition ou de minéralisation, recyclage de la matière.

La structure fonctionnelle fondamentale, reconnaissable à quelque endroit de la biosphère est illustrée dans la figure 14. D'un point de vue fonctionnel la multitude des espèces qui peuplent la terre et les mers peuvent être réparties en quatre principaux ensembles constituant autant de compartiments fondamentaux du système biosphère : **les producteurs primaires, les consommateurs primaires, les consommateurs secondaires** et de rang supérieur, **les décomposeurs**.

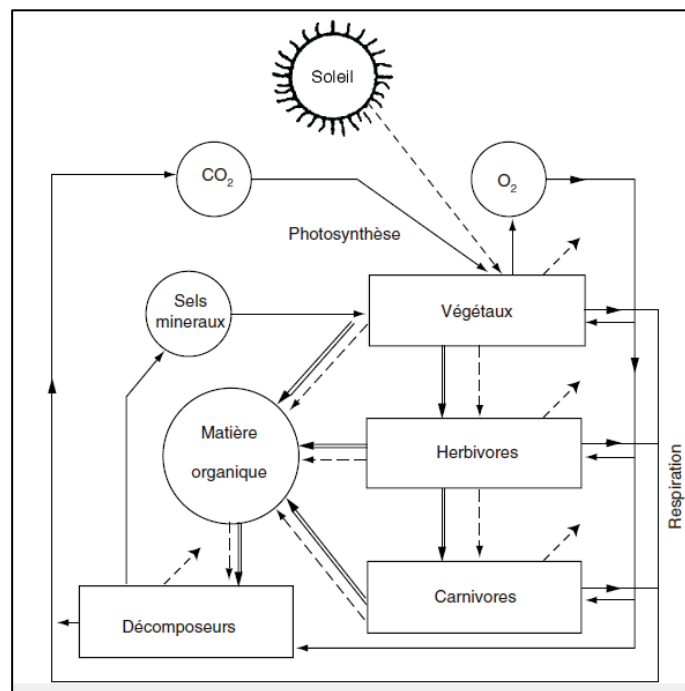
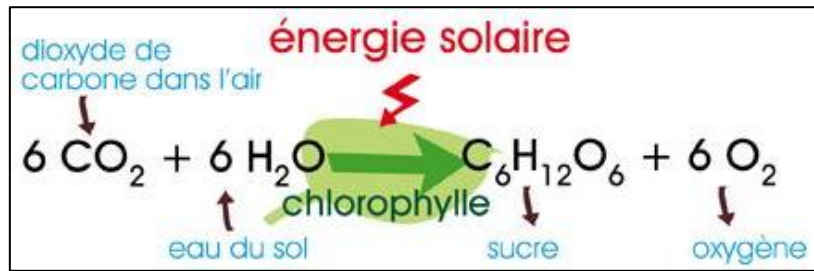


Fig.6. Représentation schématique des principaux compartiments de la biosphère

1.2.4.4.1. Les producteurs primaires

Les écosystèmes sont alimentés en énergie par le soleil. Le premier compartiment trophique de tout écosystème est celui qui réunit les organismes autotrophes, algues et végétaux chlorophylliens capables de fixer l'énergie solaire et de synthétiser leurs tissus à partir de substances inorganiques simples. L'opération fondamentale de la photosynthèse, rappelons-le, est la production de molécules de glucose et d'oxygène à partir de gaz carbonique et d'eau :



L'énergie nécessaire à la réalisation de cette synthèse est fournie par les photons solaires que capturent la chlorophylle et d'autres pigments végétaux.

1.2.4.4.2. Les consommateurs :

Les consommateurs sont des hétérotrophes qui ne peuvent se nourrir qu'avec des matières organiques complexes (Glucides, acides aminés, triglycérides). Ils dépendent donc entièrement des producteurs qui représentent la seule source d'énergie utilisable par animaux, de manière directe dans le cas des herbivores (Consommateurs primaires) ou indirecte dans celui des carnivores (Consommateurs secondaires et d'ordre supérieur). Un type particulier de consommateurs secondaires est constitué par les ectoparasites et/ou les endoparasites d'autres animaux qui vivent de façon sédentaire.

- **Herbivores (Consommateurs primaires) :**

Ces herbivores produisent, eux aussi, de la matière organique (croissance, reproduction) mais ils dépendent totalement pour cela de la matière organique synthétisée par les plantes ou le phytoplancton dont ils se nourrissent. Les herbivores sont les consommateurs primaires (C1). Comme ils consomment des végétaux, ils constituent le second niveau de la chaîne alimentaire. Les consommateurs primaires sont donc des producteurs de second niveau ou producteurs secondaires. Leur taille est fort variable : Cela va de petits organismes brouteurs d'algues aux grands mammifères végétaliens que sont les girafes et les éléphants, en passant par la plupart des insectes et les rongeurs. Certains ont une nourriture très spécialisée ; les oiseaux granivores ne consomment que des graines ; les insectes xylophages le bois des troncs...

- **Carnivores (Consommateurs à plusieurs degrés) :**

Sont consommateurs secondaires les carnivores *sensu lato*, c'est-à-dire tous les organismes qui se nourrissent aux dépens d'autres animaux vivants. Pour une analyse plus précise on verra qu'il convient de subdiviser cet ensemble en consommateurs secondaires *sensu stricto* (mangeurs d'herbivores), en consommateurs tertiaires (qui se nourrissent des précédents), etc. En fait, beaucoup d'espèces ne se plient pas facilement à cette classification par niveaux trophiques et peuvent

appartenir à plusieurs compartiments — consommateurs primaires et secondaires (espèces omnivores), consommateurs secondaires et tertiaires (prédateurs ou parasites d'herbivores et de carnivores), etc.

1.2.4.4.3. Détritivores et décomposeurs

Utilisant la matière organique morte pour assurer leur métabolisme, leur croissance et leur reproduction, ces organismes se comportent bien comme des consommateurs. Ce sont les invertébrés, les champignons et les bactéries qui se nourrissent de la matière organique morte (cadavres, litière, excreta, fèces). L'aboutissement de leur action est la minéralisation des différents éléments. Ils assurent ainsi un rôle considérable dans le recyclage de la matière, ce qui leur permet de récupérer au passage l'énergie nécessaire à leur vie. Ce rôle est d'une importance capitale dans le fonctionnement des écosystèmes puisqu'il correspond au bouclage du cycle de la matière. Il remet ainsi à la disposition des végétaux les éléments nutritifs indispensables à la réalisation de l'activité photosynthétique. Ce recyclage s'effectue en deux étapes et met en cause deux catégories d'êtres vivants : les détritivores et les décomposeurs.

A. Détritivores

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

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

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

- **Nécrophages :**

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

- **Coprofages :** Individus mangeant des excréments. Ex. : Bousier.

- **Saprophages** : Désigne les êtres vivants qui mangent des éléments végétaux en décomposition. Ex. : Cloportes qui trouvent leur nourriture sous les écorces pourries.
- **Géophages** : Ce sont les animaux du sol qui assurent un rôle primordial dans l'humification. Ex. : Vers de terre qui « mangent leur chemin en avançant ». Ainsi, ils digèrent les fragments de matière végétale enfouis ou tombé sur le sol.

B. Décomposeurs

La première étape de dégradation de la matière organique morte, assurée par les détritivores, permet à des êtres microscopiques, des bactéries, des champignons ou des protozoaires d'accomplir la seconde étape de cette transformation. Ces micro-organismes sont les responsables de la minéralisation proprement dite.



Photo.1. Les décomposeurs

1.2.4.4.4. Productivité

L'une des caractéristiques fondamentales des écosystèmes, en relation avec leur fonctionnement, est la productivité qui est définie en écologie comme la vitesse à laquelle l'énergie est assimilée par des organismes sous forme de biomasse. La biomasse est la quantité de matière stockée au sein d'un groupe d'organismes. Elle peut s'exprimer en unités d'énergie ou de biomasse. Toute l'organisation des écosystèmes dépend, en définitive, de la quantité d'énergie captée par les producteurs primaires.

La biomasse est la masse totale de matière vivante dans un organisme, une population ou un écosystème, souvent mesurée en poids sec. Pour exprimer cette biomasse en termes d'énergie, on utilise des coefficients de conversion qui transforment le poids sec en énergie (généralement en kilocalories).

$$\text{Energie (kcal)} = \text{Biomasse (kg sec)} \times \text{Coefficient de Conversion (kcal/kg sec)}$$

Coefficient de Conversion pour les plantes (ex : herbes, feuilles) : environ 4300-4800 kcal/kg.

Coefficient de Conversion pour les animaux (ex : viande, poissons) : environ 4800-6000 kcal/kg.

1.2.4.4.1. Productivité primaire

La productivité primaire se réfère à la quantité de biomasse produite par les producteurs primaires à partir de l'énergie solaire (dans les écosystèmes terrestres) ou de l'énergie chimique (dans les écosystèmes hydrothermaux). Elle est mesurée en termes de productivité primaire brute (PPB) et de productivité primaire nette (PPN). L'énergie primaire nette terrestre est estimée à 110-120 x 10⁹ tonnes de masse sèche par an, et 50-60 x 10⁹ tonnes dans les mers. Bien que les écosystèmes marins couvrent les deux tiers de la surface de la Terre, ils ne contribuent qu'à un tiers à la moitié de sa production. Il existe une tendance latitudinale dans laquelle la productivité est concentrée dans les régions tropicales et tempérées et est primitivement contrainte par les radiations solaires (comme ressource) et la température (comme condition).

Productivité Primaire Brute (PPB) : C'est la quantité totale d'énergie captée par les producteurs primaires au cours de la photosynthèse ou de la chimiosynthèse. Cela inclut toute l'énergie utilisée pour la croissance, la reproduction et les activités métaboliques, ainsi que l'énergie stockée sous forme de biomasse.

Productivité Primaire Nette (PPN) : C'est l'énergie restante après que les producteurs ont consommé une partie de l'énergie captée pour leurs besoins métaboliques. La PPN représente donc l'énergie disponible pour les consommateurs primaires (herbivores) et est calculée comme la PPB moins la respiration des producteurs.

1.2.4.4.2. La productivité secondaire

La productivité secondaire concerne la biomasse produite par les consommateurs (herbivores, carnivores et décomposeurs) à partir de la biomasse des producteurs primaires qu'ils consomment. Elle peut être divisée en productivité secondaire brute (PSB) et productivité secondaire nette (PSN).

Productivité Secondaire Brute (PSB) : C'est la quantité totale de biomasse produite par les consommateurs à partir de la biomasse ingérée. Cela inclut toute l'énergie utilisée pour la croissance, la reproduction et les activités métaboliques, ainsi que l'énergie stockée sous forme de biomasse.

Productivité Secondaire Nette (PSN) : C'est l'énergie disponible pour la croissance et la reproduction des consommateurs, après soustraction de l'énergie dépensée pour les processus métaboliques (respiration).

La capacité de production des écosystèmes, liée au type de formation végétale qui s'y est développée, dépend comme celle-ci, dans une large mesure, des deux grandes variables climatiques que sont la température et les précipitations (fig. 102).

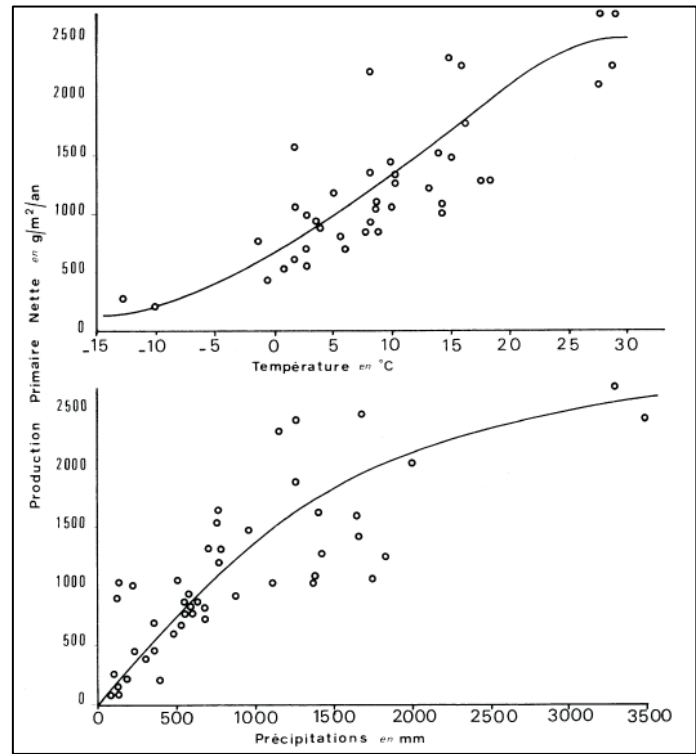


Fig.7. Relations entre, d'une part, la production primaire nette (en g de matière sèche par m² et par an), d'autre part, la température annuelle moyenne (en haut), et les précipitations annuelles (en bas), (données in Lieth, 1975).

L'importance de la productivité primaire a incité beaucoup d'auteurs à élaborer ces modèles permettant de la calculer à partir des variables climatiques :

– le modèle de Miami prédit la production primaire nette (PPN) en g de matière sèche par m² et par an à partir de la température en °C ou à partir des précipitations en mm (P) :

$$PPP = \frac{3\,000}{1 + C^{-1.315 - 0.119P}}$$

$$PPP = 3\,000 (1 - e^{-0,000664 P})$$

– le modèle de Montréal prédit la PPN à partir de l'évapotranspiration réelle E :

$$PPP = 3\,000 (1 - e^{-0,0009635 (E - 20)})$$

– le modèle dérivant la PPN de la longueur de la période d’activité de la végétation (nombre de jours de photosynthèse T) :

$$PPN = - 157 + 5.17 T$$

1.2.4.4.5. Diversité

Lorsqu’on parle de la diversité d’un écosystème on désigne généralement sous ce vocable sa richesse spécifique qui est défini comme le nombre d’espèces qui constituent un peuplement. Cette mesure est jugée insuffisante puisqu’elle ne permet pas de différencier des peuplements qui comporteraient un même nombre d’espèces mais avec des fréquences relatives très différentes. On conçoit qu’un peuplement de 10 espèces toutes très communes ne puisse être assimilé à un autre, riche de 10 espèces également mais dont 9 seraient très rares. Le premier paraît plus diversifié que le second : il a une diversité spécifique plus élevée. Cette diversité est mesurée par différents indices dont le plus utilisé est celui de Shannon.

Les naturalistes ont relevé depuis longtemps l’existence de gradients latitudinaux et altitudinaux de richesse spécifique, avec notamment, pour simplifier, des peuplements plus riches en zone tropicale que dans les régions tempérées. Diverses hypothèses ont été avancées pour expliquer la plus grande richesse spécifique des peuplements tropicaux, chacune mettant l’accent sur un facteur particulier : histoire, stabilité climatique, productivité du milieu, prédation, compétition, hétérogénéité spatiale.

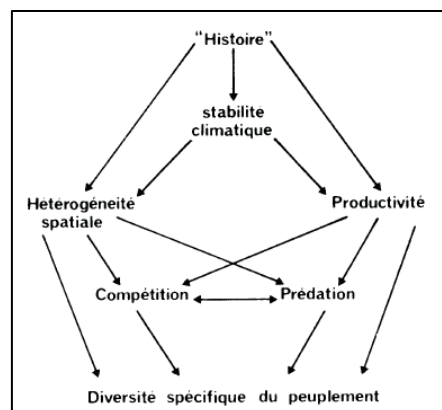


Fig.8. Principaux facteurs susceptibles d’intervenir dans le déterminisme de la diversité spécifique des peuplements (Pianka, 1974)

1.2.4.4.6. Stabilité

La stabilité d’un écosystème est sa capacité à maintenir sa structure et ses fonctions en dépit des perturbations et des changements environnementaux. La stabilité d’un écosystème dépend de l’équilibre des relations entre ses différents éléments. Lorsque certaines espèces ou certains milieux

naturels sont menacés, les écosystèmes sont eux aussi en péril. Si, par exemple, l'effectif des abeilles sauvages diminue, les plantes dont elles assurent la pollinisation risquent de disparaître, car elles ne peuvent se reproduire si elles ne sont pas fécondées par ces abeilles. Et réciproquement : l'extinction de ces plantes implique la disparition de la source de subsistance des abeilles sauvages. La richesse de la biodiversité ne dépend donc pas seulement du nombre d'espèces et d'espaces vitaux en présence, mais également de leurs interactions. Les écosystèmes sont d'autant plus stables qu'ils sont diversifiés (à diversité spécifique élevée).

Considérons un écosystème, si la quantité d'énergie fixée par photosynthèse est égale à la quantité d'énergie utilisée par respiration à tous les niveaux, le système sera stable.

$P/R = 1$ Système stable

La stabilité d'un écosystème ne dépend pas de sa productivité mais de l'équilibre entre production et consommation. Les écosystèmes où $P/R > 1$ sont de types autotrophes. Les écosystèmes où $P/R < 1$ sont de types hétérotrophes.

Le climax est l'état d'équilibre stable des écosystèmes. C'est l'aboutissement de la succession écologique.

1.2.4.4.7. Résilience

On nomme résilience la capacité d'un écosystème à retourner à son état initial après une perturbation. Si un écosystème est soumis à une perturbation trop forte ou trop fréquente, il peut perdre sa capacité à retrouver son équilibre initial. On appelle cela *l'effet de seuil*. Lorsque ce seuil est dépassé, l'écosystème tend vers un nouvel équilibre plus pauvre en biodiversité. La perte d'organismes clés dans les écosystèmes forestiers, comme les invertébrés, les pollinisateurs et les décomposeurs, peut également ralentir considérablement la régénération l'écosystème.

Si un écosystème est perturbé au-delà d'un certain seuil, il passe d'un équilibre à un autre plus simple en biodiversité. Il sera ensuite très difficile de rétablir l'état initiale.

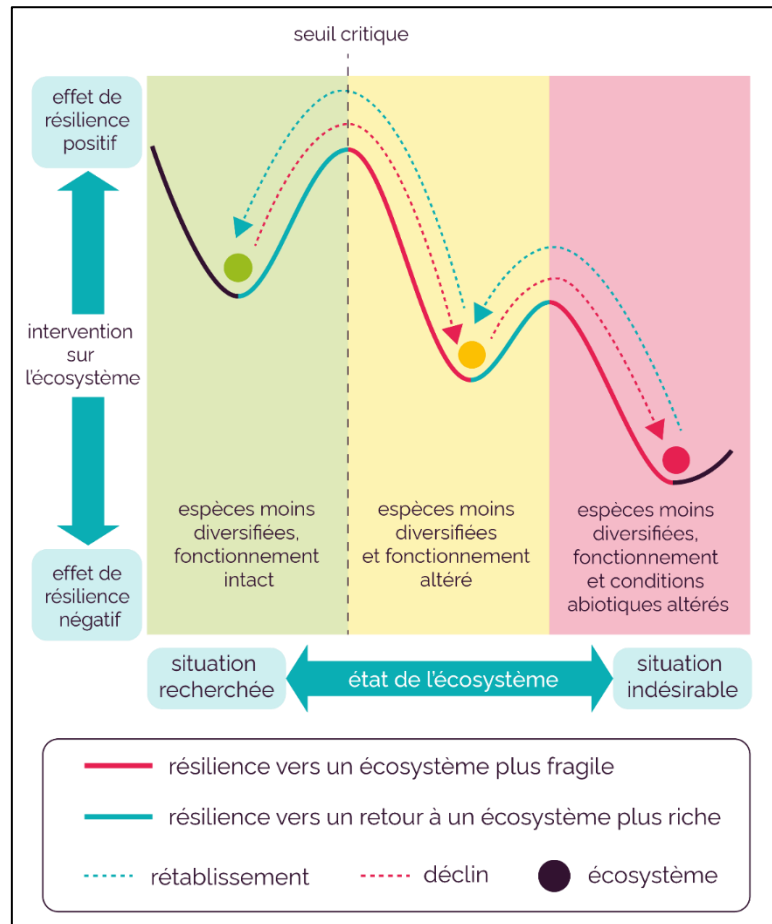


Fig.9. Les équilibres dynamiques des écosystèmes

De nombreuses études montrent que la complexité et la complémentarité des relations entre les espèces de la biocénose permettent à un écosystème de mieux se rétablir après une perturbation. De fait, la disparition d'espèces importantes peut mettre en danger la récupération de l'écosystème. Exemples : Les prédateurs permettent de contenir le nombre de phytophages présents dans une forêt, réduisant la probabilité que la pression d'herbivorie qu'ils exercent n'atteigne un niveau critique. Avec la disparition des pollinisateurs, de nombreuses plantes ne pourraient plus se reproduire. La diversité et la redondance des fonctions écologiques remplies par les espèces de la biocénose est donc indispensable à la résilience des écosystèmes. Si une espèce disparaît, il est primordial qu'une autre espèce puisse remplir sa fonction écologique à sa place, afin que l'écosystème puisse continuer à se régénérer et se développer après une perturbation.

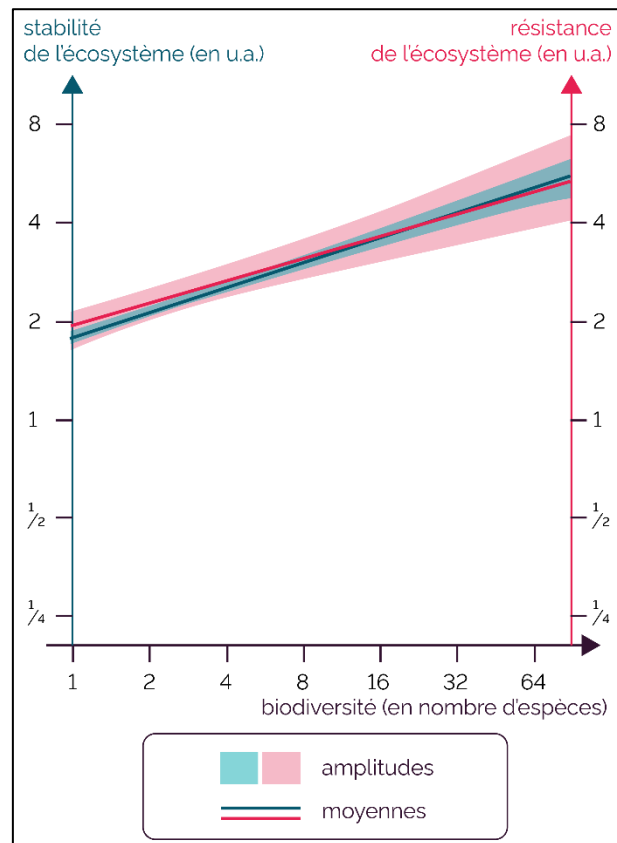


Fig.10. Stabilité et résistance des écosystèmes selon leur biodiversité

Dans la plupart des cas les écosystèmes riches en biodiversité sont plus stables et plus résistants. Dans le cadre du changement climatique, de nombreuses espèces pourraient atteindre leurs limites physiologiques. Cependant, la sélection naturelle pourrait permettre aux populations de s'adapter aux changements abiotiques futurs, comme la hausse des températures, des événements climatiques extrêmes tels que les sécheresses et les inondations, et l'arrivée de nouvelles espèces. La diversité génétique est donc primordiale pour que les espèces disposent d'un pool d'allèles suffisant pour faire face à ces changements.

1.3. Chaînes et réseaux alimentaires

Les interactions trophiques au sein d'une communauté peuvent être représentées par des diagrammes appelés : chaînes et réseaux alimentaires.

1.3.1. Chaîne trophique

C'est une séquence linéaire d'organismes à travers laquelle les nutriments et l'énergie passent lorsqu'un organisme en mange un autre. Elle montre parfaitement à quel point les êtres vivants dépendent les uns des autres. Chaque organisme d'une chaîne alimentaire occupe un niveau trophique spécifique (niveau énergétique). Les producteurs constituent le premier niveau trophique de la chaîne alimentaire. Les principaux consommateurs constituent le deuxième niveau trophique. Viennent

ensuite les consommateurs de haut niveau. Les consommateurs de niveau supérieur incluent les consommateurs secondaires (troisième niveau trophique), qui sont généralement des carnivores qui mangent les principaux consommateurs, et les consommateurs tertiaires (quatrième niveau trophique), qui sont des carnivores qui mangent d'autres carnivores.

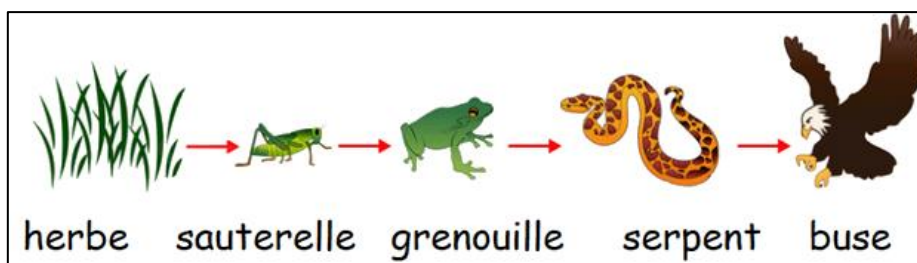


Fig.11. Exemple d'une chaîne alimentaire

L'énergie est l'un des principaux facteurs qui limitent le nombre d'étapes d'une chaîne alimentaire. Environ 10 % seulement de l'énergie d'un niveau trophique est transférée au niveau trophique suivant. Cela est dû au fait qu'une grande partie de l'énergie est perdue sous forme de chaleur lors des transferts entre les niveaux trophiques ou vers les décomposeurs en raison de la deuxième loi de la thermodynamique. Ainsi, après quatre à six transferts d'énergie trophiques, la quantité d'énergie restant dans la chaîne alimentaire peut ne pas être suffisante pour soutenir des populations viables aux niveaux trophiques supérieurs.

Certaines toxines environnementales peuvent devenir plus concentrées au fur et à mesure qu'elles remontent dans la chaîne alimentaire, les concentrations les plus élevées se produisant chez les principaux consommateurs, un processus appelé bioamplification. Essentiellement, un consommateur de haut niveau ingère toutes les toxines qui s'étaient accumulées auparavant dans le corps des organismes des niveaux trophiques inférieurs. Cela explique pourquoi la consommation fréquente de certains poissons, comme le thon ou l'espadon, augmente votre exposition au mercure, un métal lourd toxique.

1.3.1.1. Différents types de chaînes trophiques

A. Chaîne de prédateurs (de consommateurs)

Cette chaîne démarre généralement à partir des producteurs à la suite desquels, on observe une série d'organismes de plus en plus prédateurs. Le nombre d'individus diminue d'un niveau trophique à l'autre, mais leurs tailles augmentent.

Exemple. : (100) Carottes - (5) Lièvres - (3) Loups.

B. Chaîne de parasites

Ce type de chaînes se constitue à partir d'organismes de grande taille vers des organismes de petite taille mais de plus en plus nombreux. On peut observer dans ces chaînes l'apparition d'hyper parasite (parasites de parasites).

Exemple: (1) Sapin (Producteur) - (10) Chenille (Herbivore) - (40) Braconides (Parasite) - (80) Chalcidiens (Hyperparasites).

C. Chaîne de détritivores (saprophytiques)

Dans ce cas, le support trophique est constitué de matière détritique c'est-à-dire de matière organique en décomposition. Ce type de chaînes fait intervenir de nombreux organismes (vers de terre, bactéries, champignons) et joue un rôle fondamental dans les écosystèmes forestiers.

- Exemple. : (1) Cadavre (renard) - (80) Nématodes - (250) Bactéries.

1.3.2. Réseaux trophiques

Même lorsque tous les organismes sont regroupés dans les niveaux trophiques appropriés, certains d'entre eux peuvent se nourrir à plus d'un niveau trophique. De plus, les espèces se nourrissent de plus d'une espèce et sont consommées par elles. En d'autres termes, le modèle linéaire des interactions trophiques, la chaîne alimentaire, est une représentation hypothétique et trop simpliste de la structure de la communauté. Un modèle holistique, qui inclut toutes les interactions entre les différentes espèces et leurs relations interconnectées complexes entre elles et avec l'environnement, est un modèle plus précis et plus descriptif. Un réseau trophique est un concept qui tient compte des multiples interactions trophiques entre chaque espèce.

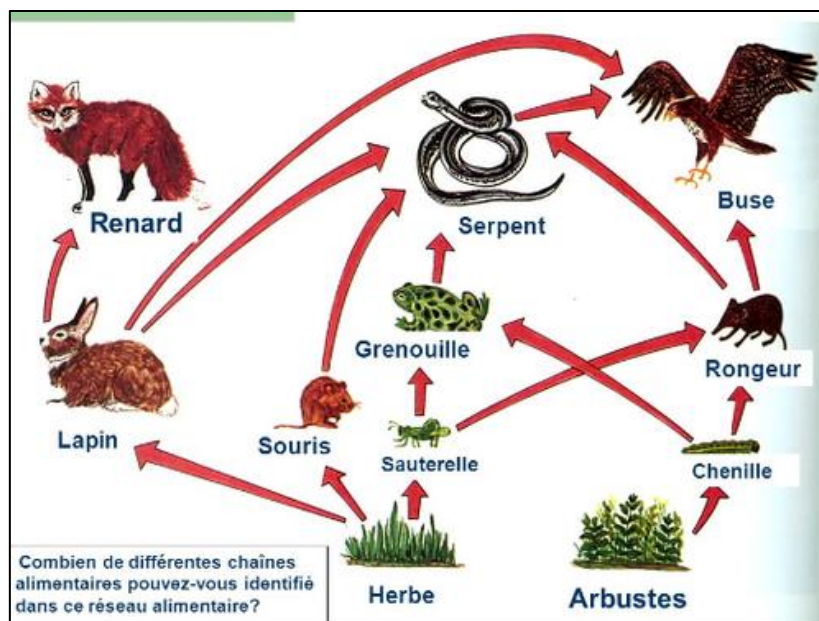


Fig.12. Exemple d'un réseau trophique

1.4. Représentation graphique des chaînes trophiques

La représentation de la structure des biocénoses est généralement réalisée à l'aide de pyramides écologiques, qui correspondent à la superposition de rectangles horizontaux de même hauteur, mais de longueurs proportionnelles au nombre d'individus, à la biomasse ou à la quantité d'énergie présentes dans chaque niveau trophique. On parle alors de pyramide des nombres, des biomasses ou des énergies.

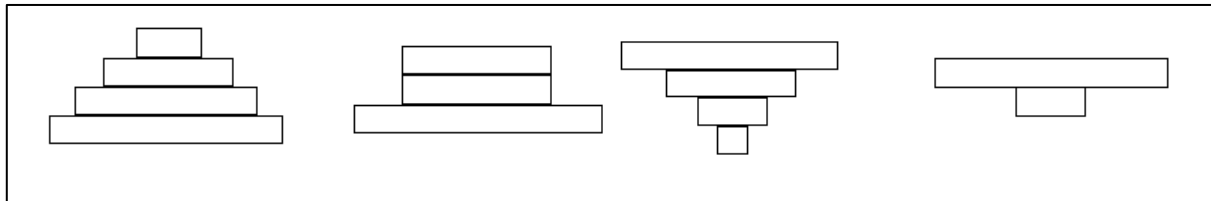


Fig.1. Divers types des pyramides écologiques

1.4.1. Pyramides écologiques des nombres

Ils représentent le nombre de producteurs, herbivores ou consommateurs primaires, carnivores ou consommateurs secondaires, et décomposeurs ou consommateurs tertiaires dans l'écosystème. Les pyramides typiques sont celles où les producteurs sont situés à la base et comptent le plus grand nombre d'individus, suivis par les herbivores en moins grand nombre et enfin les carnivores et les décomposeurs, toujours en plus petit nombre. Celles-ci peuvent être plus ou moins prononcées, c'est-à-dire que pour un même nombre de producteurs, le nombre d'herbivores et de carnivores peut être plus ou moins grand, pourvu que ce qui est expliqué ci-dessus soit respecté. Il peut également exister des pyramides écologiques de nombres inversés, où le plus grand nombre d'individus se trouve au sommet de la pyramide et le plus petit en bas. Cela se produit dans les populations âgées où il y a beaucoup d'individus plus âgés et peu de jeunes ou dans le parasitisme où il y a quelques individus et beaucoup qui s'en nourrissent.

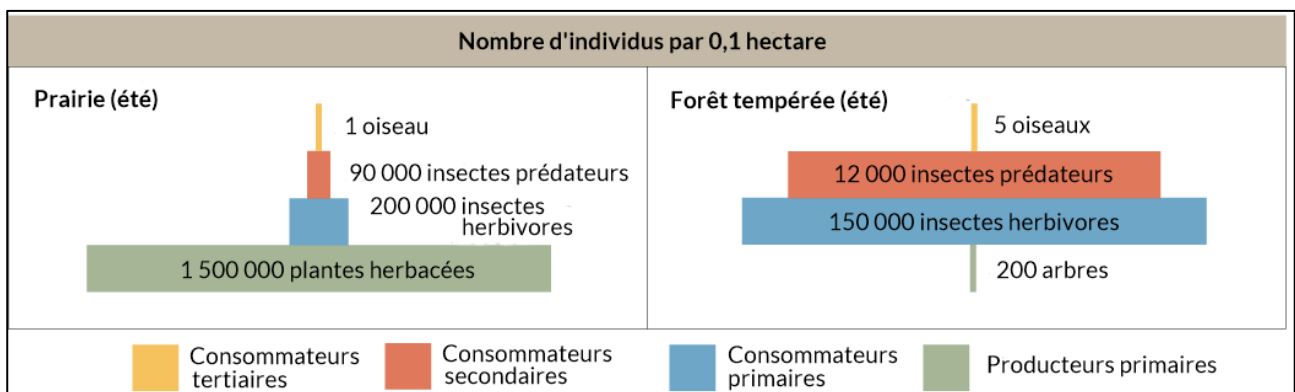


Fig.13. Pyramide des nombres

1.4.2. Pyramides écologiques de la biomasse

Ils représentent les grammes ou kilogrammes de carbone dans chaque surface ou volume. La pyramide la plus courante est celle où les producteurs produisent le plus de carbone, suivi des consommateurs primaires, secondaires et tertiaires. Cependant, il peut y avoir un investissement entre les consommateurs primaires et les producteurs comme dans les écosystèmes marins. Le phytoplancton marin croît et se reproduit rapidement, mais malgré cela, il est consommé encore plus rapidement par les consommateurs primaires, et cela est souvent représenté sous la forme d'une pyramide inversée.

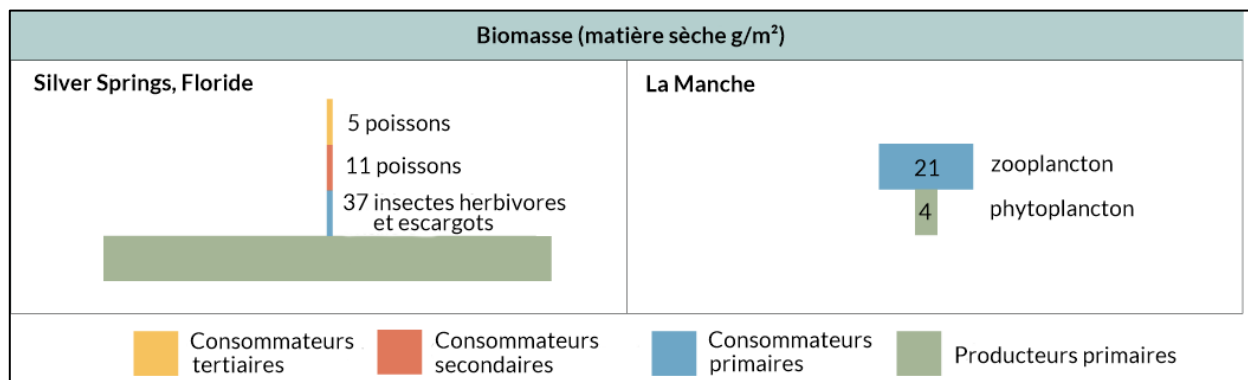


Fig.14. Pyramide des biomasses

1.4.3. Pyramides écologiques de l'énergie

Ils représentent le flux d'énergie dans l'écosystème. Les producteurs sont situés à la base de la pyramide, puisqu'ils représentent les organismes photosynthétiques qui profitent de l'énergie solaire pour transformer la matière inorganique en matière organique et la mettre à disposition du reste des organismes, on placera ensuite les consommateurs primaires et enfin les secondaires et tertiaires. Pour 100 calories d'énergie solaire utilisées par les producteurs, seulement 10 calories seront converties en biomasse utilisable pour les consommateurs primaires. Le reste de cette énergie est utilisé par les producteurs dans le métabolisme, dans des structures telles que les feuilles mortes ou les tiges dans le cas des plantes et dans d'autres processus. Comme dans le cas précédent, seulement 10 % de l'énergie des producteurs primaires sera utilisée par les consommateurs secondaires, c'est ce qu'on appelle la règle des 10 %.

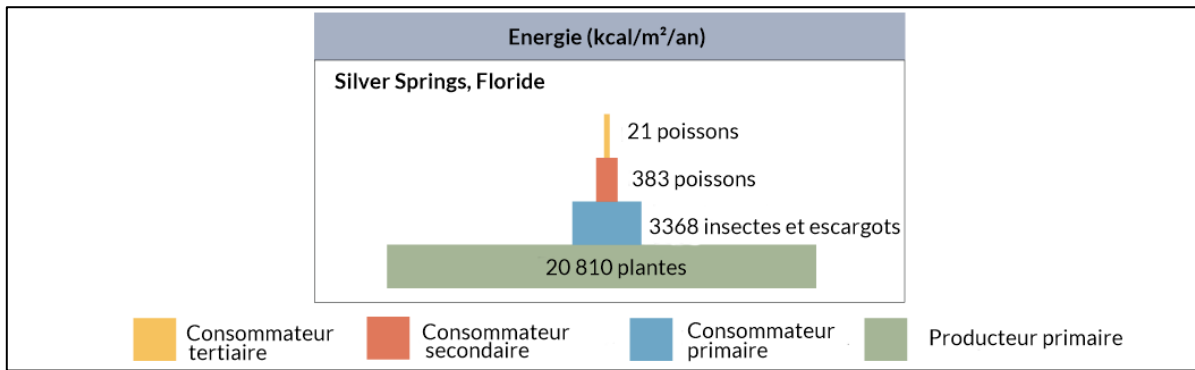


Fig.15 Pyramide des énergies