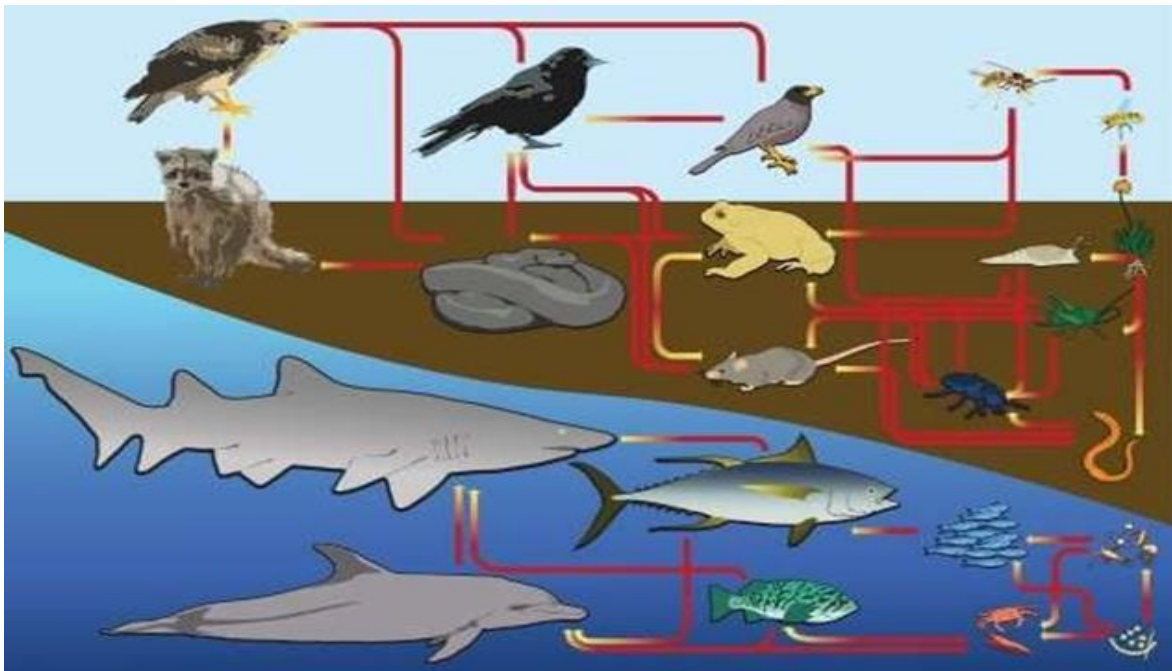


République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère  
de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mostefa Ben Boulaid- Batna2

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département Ecologie et Environnement

# **Polycopié du Cours: Structure et fonctionnement des écosystèmes**

Destiné aux étudiants de Master 1 Biologie de la conservation



**Intitulé du Master : Biologie de la Conservation**

**Semestre : S1**

**Intitulé de la matière : Structure et fonctionnement des écosystèmes**

**Crédits : 6**

**Coefficients : 3**

**Objectifs de l'enseignement :** Connaissance approfondie sur la structure, les facteurs d'organisation et le fonctionnement des écosystèmes terrestres et aquatiques, en se focalisant sur les écosystèmes méditerranéens.

**Connaissances préalables recommandées :** Bases en biologie et écologie

**Contenu de la matière :**

I. Structure et fonctionnement des écosystèmes terrestres

1. Structuration macroécologique

a) historiques

b) rôle des facteurs environnementaux

2. Successions et dynamiques des écosystèmes

a) principales conceptions

b) modèles

3. Importance des perturbations dans la structure et la dynamique des écosystèmes

4. Biodiversité et fonctionnement des écosystèmes

II. Structure, fonctionnement et évolution des écosystèmes aquatiques

1. Importance du facteur hydrodynamique

2. Structure des assemblages biologiques et perturbations

3. Boucle microbienne

**Mode d'évaluation :**

Examen final écrit

Contrôle continu

# Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

<b>I. Structure et fonctionnement des écosystèmes terrestres</b>	<b>1</b>
1. Structure macro-écologique	1
1.1. Historique	1
1.2. Composition de l'écosystème	3
1.3. Influence des facteurs sur les êtres vivants	4
1.3.1. Influence des facteurs abiotiques	4
a. Notion de facteur limitant	4
b. Loi de tolérance	5
c. Valence écologique	6
d. Adaptation aux facteurs de l'environnement	7
d.1. Acclimatation	7
d.2. Accommodation	8
d.3. Apparition d'écotypes	9
1.3.2. Influence des facteurs biotiques	9
2. Quelques caractéristiques structurales	10
2.1. Taille des écosystèmes	10
2.2. Types d'écosystèmes actuels	10
2.3. Variabilité des écosystèmes	10
2.3.1. Types biologiques de la végétation	11
2.3.2. Groupes phytoécologiques	12
3. Successions et dynamiques des écosystèmes	12
3.1. Principales conceptions	12
3.2. Modèles	13
3.2.1. Succession autogène et allogène	13
3.2.2. Succession primaire et secondaire	13
a. Notion de succession primaire	13
b. Notion de succession secondaire	14
3.2.3. Succession progressive et régressive	15
4. Importance des perturbations dans la structure et la dynamique des écosystèmes	16
5. Biodiversité et fonctionnement des écosystèmes	17
5.1. Biodiversité	17
5.1.1. Indicateurs de diversité	17
a. Richesse spécifique	18
b. Abondance	18
c. Abondance relative	18
d. Indices de diversité et l'équitabilité	19
5.1.2. Causes majeures de la perte de biodiversité	19
5.2. Différents types de chaînes trophiques	20
5.2.1. Relations trophiques	20
a. Niveau trophique des producteurs	20
b. Niveau trophique des consommateurs	20
c. Niveau trophique des décomposeurs	21
5.2.2. Chaînes et réseaux trophiques	21
a. Chaîne alimentaire	21
b. Réseaux trophiques	22

5.2.3. Pyramides écologiques	23
a. Pyramide des nombres	24
b. Pyramide des énergies	24
c. Pyramide des biomasses	25
5.3. Interactions fonctionnelles	25
5.3.1. Généralités sur le fonctionnement d'un écosystème naturel	25
5.3.2. Circulation globale de l'énergie sur Terre	26
5.3.3. Les écosystèmes, convertisseurs d'énergie (flux d'énergie)	27
5.3.4. Flux de la matière dans l'écosystème (cycle de la matière)	30
a. Les producteurs	30
b. Les consommateurs	30
c. Les décomposeurs	31
5.4. Niche écologique	32
5.5. Groupes fonctionnels: complémentarité et redondance	32
5.6. Fonctions des espèces dans l'écosystème	33
5.6.1. Espèces clés	33
5.6.2. Organismes ingénieurs	33
5.7. Rôle de la biodiversité dans les cycles biogéochimiques	34
5.7.1. Quelques cycles biogéochimiques	34
a. Le cycle du carbone	35
b. Le cycle de l'azote	39
c. Le cycle du phosphore	41
d. Le cycle de l'eau	43
5.7.2. Rôle de la biodiversité	44
<b>II. Structure, fonctionnement et évolution des écosystèmes aquatiques</b>	<b>47</b>
1. Ecosystème d'eau douce (Ecosystème limnique)	47
2. Ecosystèmes aquatiques continentaux	48
a. Ecosystème lentique	48
b. Ecosystème lotique	50
3. Ecosystème Océanique	51
a. Domaine pélagique	52
b. Domaine benthique	52
4. Compartiments biologiques d'un écosystème aquatique	54
a. Les producteurs	54
b. Les consommateurs	54
c. Les décomposeurs	54
5. Importance du facteur hydrodynamique	56
6. Importance des facteurs chimiques	58
7. Adaptation aux facteurs	57
a. Acclimatation	58
b. Accommodation	58
c. Apparition d'écotypes	58
8. Structure des assemblages biologiques et perturbations	60
8.1. Les facteurs d'organisation horizontale	60
8.2. Les facteurs d'organisation verticale	60
9. Boucle microbienne	61
9.1. Incidence des bactéries sur le fonctionnement des milieux oligotrophes	62
9.2. Incidence des bactéries sur le fonctionnement des milieux eutrophes	63
9.3. Conclusion	63
<b>Références bibliographiques</b>	<b>65</b>

## Liste des figures :

N°	Titre	Page
Figure. 01	Limites de tolérance d'une espèce en fonction de l'intensité du facteur écologique étudié (l'abondance de l'espèce est maximale au voisinage de l'optimum écologique)	5
Figure. 02	Loi de tolérance (Shelford, 1911)	6
Figure. 03	Courbes de tolérance de deux espèces à valences écologiques différentes (une espèce euryèce : à grande valence écologique ; une espèce sténoèce : à faible valence écologique)	7
Figure. 04	Les trois formes de la Sagittaire <i>Sagittaria sagittifolia</i>	9
Figure. 05	Chaines alimentaires terrestre	22
Figure. 06	Exemple d'un réseau trophique dans le milieu arctique	23
Figure. 07	Pyramides écologiques	25
Figure. 08	Les processus biochimiques du cycle du carbone	36
Figure. 09	Les processus du cycle de l'azote	39
Figure. 10	Les processus du cycle du phosphore	42
Figure. 11	Cycle de l'eau	44
Figure. 12	Composition de la biocénose d'un lac	47
Figure. 13	Zonation spatiale d'un lac profond	48
Figure. 14	Evolution naturelle d'un écosystème lentique	50
Figure. 15	Ecosystèmes lotiques et lenticques	51
Figure. 16	Zonation horizontale et verticale des océans	53
Figure. 17	Biocénoses des stratifications océaniques	53
Figure. 18	Réseau trophique	55
Figure. 19	Boucle microbienne	62

## Liste des tableaux

N°	Titre	Page
Tableau. 1	Caractéristiques des différents types d'océans	51
Tableau. 2	Les principaux constituants de l'eau de mer	52

## I. Structure et fonctionnement des écosystèmes terrestres

Un écosystème, également connu sous le nom de système écologique, est un système opérationnel qui englobe une communauté d'organismes vivants et leur environnement. Il se caractérise par sa stabilité relative et son intégration, soutenue par des organismes photosynthétiques. Un écosystème est perçu comme une entité collective composée d'individus éphémères. Certains de ces individus, tels que les grands arbres, peuvent vivre pendant plusieurs milliers d'années, tandis que d'autres, comme les micro-organismes, ont une durée de vie limitée, allant de quelques heures à quelques minutes.

Un écosystème se manifeste comme une unité intégrée, comprenant à la fois des composantes abiotiques et biotiques, qui fonctionne malgré la compétition intense entre de nombreux organismes pour les ressources disponibles. Chaque être vivant, même les plus petits comme les bactéries et les champignons, représente une source de nourriture potentielle pour d'autres organismes vivants. Cela constitue ce que l'on appelle une chaîne trophique ou chaîne alimentaire, impliquant le transfert de matière et d'énergie d'un niveau trophique à un autre (Décamps, 2020).

### 1. Structuration macro-écologique

#### 1.1. Historique

Ernst Haeckel en 1866 désigne la science qui étudie les rapports entre les organismes et le milieu où ils vivent comme suit : « c'est la connaissance de l'économie de la nature, l'investigation de toutes les relations d'un animal à la fois avec son milieu inorganique et organique incluant par-dessus tout, ses relations amicales et antagonistes avec ceux des animaux et des plantes avec lesquels il entre directement en contact ».

Il existe généralement trois de rapports :

- Influence des facteurs du milieu sur les êtres vivants,
- Influence et activités des êtres sur le milieu.
- Influence des êtres vivants entre eux.

Du point de vue historique, la connaissance des exigences écologiques des êtres vivants existait déjà chez l'Homme préhistorique qui l'avait acquise au cours de ses recherches de gibier et de plantes comestibles. L'écologie moderne s'est développée à partir de 1930 aux pays anglo-saxons (destruction de grandes superficies, abus de l'utilisation des insecticides qui ont détruit l'équilibre naturel, etc.). Il y avait aussi un abus d'élevage : surpâturage, d'où une menace pour certains végétaux et animaux sauvages (Barbault, 2000).

Le monde vivant est structuré selon des niveaux d'organisation de complexité croissante (molécules, organites, cellules, tissus, organes, individus, populations, communautés).

Les niveaux concernés par les études écologiques sont essentiellement :

- L'individu : ce niveau englobe tous les organismes individuels depuis les êtres unicellulaires jusqu'aux arbres et aux gros mammifères. A ce niveau, les études sont qualifiées d'autoécologiques, par opposition à celles des niveaux supérieurs, qualifiées de synécologies (Duvigneaud, 1980).

**Ex :** Organisme végétal = 1 espèce (1 individu) + ensemble de fonctions ;

- Photosynthèse (chloroplastes).
- Respiration (stomates) - Transpiration (stomates).
- Absorption (stomates / racines).
- Stockage (glucides / lipides / protide).
- La population : une population est l'ensemble des individus de même espèce, vivant sur une surface déterminée. Le développement d'une population et son évolution sont contrôlés par l'environnement (Barbault, 1981).
- La communauté : une communauté est l'ensemble des populations réunies dans un même espace et dont l'ensemble présente une certaine homogénéité vis à vis des critères retenus pour la distinguer. La notion de communauté peut désigner le milieu dans son sens écologique le plus large, est constitué au niveau planétaire par la Biosphère qui est définie comme étant la région de la planète qui conformé l'ensemble des êtres vivants et dans laquelle la vie est possible en permanence. En effet toute la surface du globe terrestre n'est pas également favorable aux organismes. On y rencontre des territoires, comme les calottes polaires et les hautes montagnes où la vie y est presque impossible (Duvigneaud, 1980).

**Ex :** communauté végétale = assemblage d'espèces + ensemble de fonctions ;

- Production primaire (nutriments).
- Transfert de matière (chaîne trophique).
- Support des écosystèmes (habitat).
- Stockage (carbone).
- Cycles biogéochimiques (azote / carbone).

La biosphère peut être subdivisée en trois compartiments de natures physiques différentes :

- La lithosphère : limitée aux couches les plus superficielles de l'écorce terrestre. C'est le milieu solide constitué par l'ensemble des continents émergés.
- L'hydrosphère: ou océan mondial, milieu liquide qui recouvre les 7/10 de la surface planétaire.
- L'atmosphère: couche gazeuse homogène qui constitue la zone la plus périphérique de notre planète et enveloppe les deux précédents milieux.

### 1.2. Composition de l'écosystème

L'écosystème est composé de deux éléments : un biotope et une biocénose (Goudard, 2007).

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

#### Facteurs physiques

- Facteurs climatiques : Précipitations, Température, Luminosité, Vents, Humidité relative,

- Facteurs géographiques,

- Facteurs édaphiques.

#### Facteurs chimiques

- \*Teneur en oxygène,

- \*Teneur en sels minéraux,

- \*PH, ...

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

Dans le sol: les facteurs abiotiques importants sont :

- L'eau : indispensable pour la faune et la flore,

- La texture et la structure du sol : la nature du substrat et la taille des particules interviennent dans la nutrition et l'aération des plantes,

- La salinité ou quantité de sels est très variable et est importante dans la détermination d'une flore caractéristique (halophytes, nitrophytes, psammophytes, etc.),

- Le pH dépend de la nature du sol mais aussi de l'humus (acide humique)

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



### 1.3. Influence des facteurs sur les êtres vivants

On appelle facteur écologique tout élément du milieu susceptible d'agir directement ou indirectement sur les êtres vivants au moins durant une phase de leur cycle de développement (agents climatiques, édaphiques, chimiques ou biotiques) (Ramad, 2003).

Les facteurs écologiques agissent sur les êtres vivants de diverses façons :

- En éliminant certaines espèces des territoires dont les caractéristiques climatiques ou physico-chimiques ne leur conviennent pas et par conséquent en intervenant dans leur répartition géographique.
- En modifiant les taux de fécondité et de mortalité des diverses espèces en agissant sur leur cycle de développement et en provoquant des migrations, donc en agissant sur la densité des populations.
- En provoquant l'apparition de modifications adaptatives: modifications quantitatives du métabolisme et aussi modifications qualitatives telles que l'hibernation, estivation, réactions photopériodiques, etc. Ainsi, la cible fondamentale est l'individu et les premiers effets sont: D'ordre physiologique (écophysiologie) soit comportemental (éco-éthologie). Dans un second temps les effets peuvent être d'ordre démographique par suite d'une répercussion sur les processus démographiques (natalité mortalité, émigration, immigration). Un dernier type d'effet peut affecter la composition et la structure génétique de la population.

#### 1.3.1. Influence des facteurs abiotiques

##### a. Notion de facteur limitant

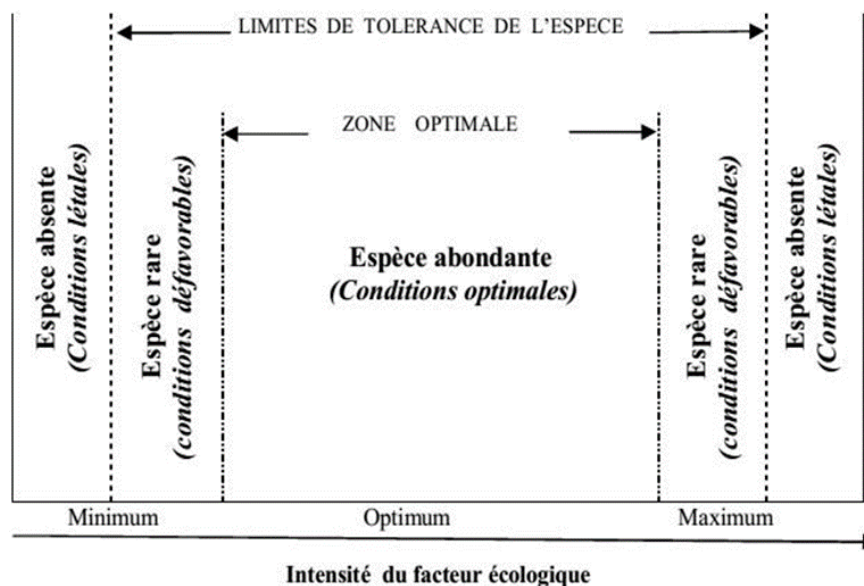
À l'origine, cette loi a été établie en se basant sur les espèces végétales. Justus von Liebig (1840) a mis en évidence que la croissance des plantes est restreinte par la concentration d'un élément qui tombe en dessous d'un seuil minimum nécessaire pour que les processus de synthèse puissent se dérouler. Par exemple, le bore est un élément rare présent en traces dans le sol. Cependant, si son absence est totale, la croissance des plantes s'interrompt, même si les autres éléments nutritifs sont présents en quantité suffisante. Ainsi, ce sont les éléments rares et en déficit qui vont influencer la croissance. En conséquence, la production de biomasse ne dépend que partiellement de cet élément spécifique désigné comme le facteur limitant. Cette loi peut être généralisée pour s'appliquer à tous les facteurs environnementaux et à tous les organismes. Le facteur limitant est celui qui, à un moment donné, détermine la vitesse ou l'ampleur d'un phénomène complexe, car tous les autres facteurs requis pour ce phénomène sont présents en excès par rapport au facteur limitant. Chaque facteur écologique agit

conformément à la loi de Liebig de 1840, également connue sous le nom de loi du minimum ou du facteur limitant.

Pour qu'un organisme puisse se développer dans un biotope, il exige des conditions particulières de température, éclairage, sol, etc. Parmi l'ensemble des facteurs écologiques, celui qui sera le plus proche du minimum critique se conduira alors comme facteur limitant. Tous les facteurs écologiques, à un moment ou un autre, sans aucune exception, sont susceptibles, dans certaines conditions, de se comporter comme des facteurs limitant, soit parce que leur intensité tombe au-dessous d'une valeur minimale incapable de satisfaire aux exigences de l'espèce, soit parce que leur valeur dépasse celle acceptable pour l'espèce. → Loi de facteur limitant (loi du minimum) La manifestation de tout processus écologique est conditionnée dans sa rapidité et son ampleur par celui du facteur qui est le plus faiblement représenté dans le milieu. Cette loi du minimum n'est qu'une restriction d'un concept plus général : la loi de tolérance (Barbault, 2000).

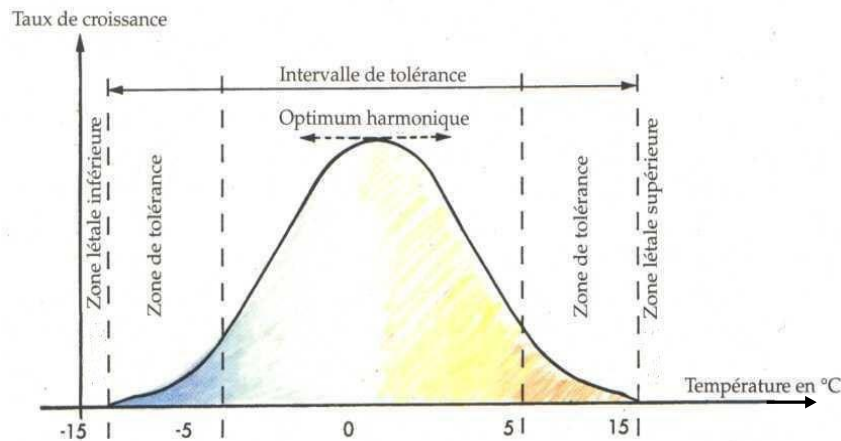
### b. Loi de tolérance

Pour tout facteur de l'environnement existe un domaine de valeurs ou gradient (nommé intervalle de tolérance) dans lequel tout processus écologique sous la dépendance de ce facteur pourra s'effectuer normalement. C'est donc seulement à l'intérieur de cet intervalle que la vie est possible pour une espèce donnée (**Fig. 1**).



**Figure 1** : Limites de tolérance d'une espèce en fonction de l'intensité du facteur écologique étudié (l'abondance de l'espèce est maximale au voisinage de l'optimum écologique)

Ainsi chaque être vivant présente vis-à-vis des facteurs écologiques des limites de tolérance entre lesquelles se situe la zone de tolérance et l'optimum écologique (optimum de Shelford). Cette loi permet en fonction d'un facteur du milieu de déterminer plusieurs zones pour la survie de la population (**Fig. 2**).



**Figure 2 :** Loi de tolérance (Shelford, 1911)

- **Zone optimale :** zone où la population est dans des conditions favorables.
- **Zone de tolérance :** zone où la population se maintient bien que le facteur abiotique devient défavorable.
- **Zone létale :** zone où la population ne peut plus survivre.

La zone optimale et la zone de tolérance forment l'intervalle de tolérance. Pour chaque espèce, on peut donc tracer une courbe de tolérance en fonction d'un facteur abiotique. Si l'intervalle de tolérance est grand, l'espèce est dite euryécique et si l'intervalle de tolérance est petit, l'espèce est dite sténoécique.

**Ex :** le facteur température, suivant l'amplitude de l'intervalle de tolérance, on parle d'espèces sténothermes (ex : une espèce de poisson de l'océan glacial arctique qui vit entre - 2,5 °C et 2 °C) et eurytherme (ex : une espèce d'insecte qui reste active entre -12 °C et 32 °C).

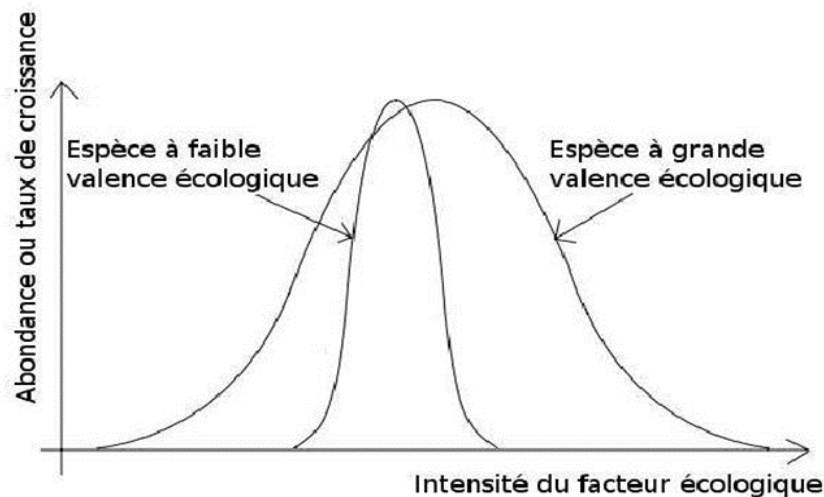
### c. Valence écologique

La valence écologique est la possibilité pour une espèce de peupler des milieux différents. La valence écologique d'une espèce représente sa capacité à supporter des variations plus ou moins grandes d'un facteur écologique. Elle représente la capacité à coloniser ou à peupler un biotope donné (Carpenter, 1998).

- Les espèces sténoères (sténoèce ou sténœciques) ont une faible valence écologique. Elles sont étroitement limitées dans des biotopes spécifiques et seront très sensibles aux fluctuations des facteurs écologiques (**Fig. 3**).

- Au contraire, les espèces euryères (euryèce ou euryœciques) ont une forte valence écologique. Elles seront capables de peupler des milieux très différents ou à caractéristiques écologiques variables. Elles seront largement réparties dans des écosystèmes différents (**Fig. 3**).

- Une espèce à valence écologique moyenne, est dite mesoèce. Cette notion de valence écologique peut s'appliquer à un peuplement tout entier.



**Figure 3 :** Courbes de tolérance de deux espèces à valences écologiques différentes (une espèce euryèce : à grande valence écologique ; une espèce sténoèce : à faible valence écologique).

#### d. Adaptation aux facteurs de l'environnement

La variabilité de l'environnement implique l'aptitude pour chaque organisme à s'adapter à un gradient pour n'importe quel facteur écologique. Les populations ne subissent pas de façon passive l'influence des facteurs de l'environnement. Elles présentent des degrés variés de plasticité écologique leur permettent de s'adapter aux fluctuations temporelles et/ou spatiales des facteurs limitants dans les milieux auxquels ils sont inféodés. La variabilité des facteurs écologiques implique l'aptitude pour chaque organisme de s'adapter. Les espèces peuvent répondre à trois niveaux différents d'adaptations aux facteurs écologiques. A chaque fois le degré d'adaptation de l'espèce à son milieu sera plus poussé :

##### d.1. Acclimatation

L'adaptation physiologique, également appelée acclimatation, représente la première manifestation de la flexibilité écologique des espèces. Pour illustrer ce concept, prenons l'exemple des poissons : lorsqu'il y a une variation de la température de l'eau sur plusieurs mois, cela entraîne un processus d'acclimatation chez les poissons. Ce processus se traduit par un ajustement de la plage de tolérance de ces poissons, soit vers le haut, soit vers le bas,

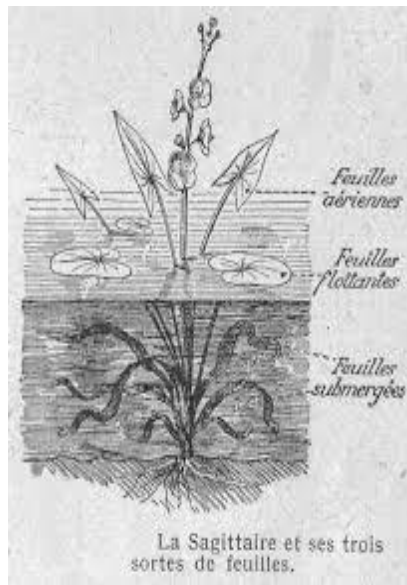
en fonction de l'augmentation ou de la diminution de la température de l'eau. Il est essentiel que la modification de la température de l'eau se fasse progressivement afin de permettre aux processus physiologiques de s'adapter, sur une échelle temporelle saisonnière, par exemple.

L'acclimatation est une réponse appropriée aux variations saisonnières de l'environnement. Ces variations se produisent lentement, laissant ainsi le temps aux organismes de modifier leur physiologie. Les réponses des animaux aux changements saisonniers de leur milieu peuvent se manifester sous forme de réactions physiologiques (comme c'est le cas chez les poissons mentionnés précédemment), de comportements (par exemple, les truites qui descendent dans les profondeurs des lacs en été) ou de modifications morphologiques (comme le changement de couleur de la fourrure des renards en fonction de la saison et de la couleur de leur environnement). Il est important de noter que toutes ces réponses ne sont que des acclimatations, car elles sont réversibles au niveau de l'animal (Viviand-Morel, 1883).

#### **d.2. Accommodation**

L'accommodation se réfère à une modification phénotypique, c'est-à-dire une expression génétique, résultant de l'influence des facteurs écologiques sur les organismes. En général, cette adaptation est peu réversible au niveau de l'individu (Lévêque, 2001).

Les plantes offrent de bons exemples d'accommodations, notamment en ce qui concerne leur forme et leur anatomie foliaire. Prenons l'exemple d'une plante aquatique, la sagittaire (*Sagittaria sagittifolia*) : elle peut adopter trois morphologies différentes en fonction de son environnement de croissance. Lorsqu'elle pousse complètement immergée, dans un milieu émergé mais humide, ou dans un milieu peu profond, elle présente une forme intermédiaire. Un même ensemble de graines est capable de produire ces trois formes en réponse à l'environnement dans lequel la plante se développera (**voir Figure 4**).



**Figure 4 :** Les trois formes de la Sagittaire *Sagittaria sagittifolia*

### d.3. Apparition d'écotypes

Les écotypes représentent la forme d'adaptation la plus parfaite des populations d'une espèce donnée aux conditions écologiques locales. A la différence des accommodats les écotypes constituent une expression héréditaire de la plasticité écologique des espèces.

Dans les écotypes, l'adaptation est inscrite dans les gènes de l'individu et ne peut plus faire l'objet de modification à court terme (Lowry, 2012).

#### 1.3.2. Influence des facteurs biotiques

Les êtres vivants exercent diverses influences sur le milieu où ils vivent. Ces influences peuvent être de nature physico-chimique (Frontier S. et al., 2008), on peut citer :

- les influences mécaniques exercées par les racines des végétaux, par les animaux fouisseurs ;
- les influences climatiques liées au rejet de gaz du métabolisme par de nombreux animaux ou de nombreux microorganismes (dioxyde de carbone, méthane, etc.) ou au rejet d'oxygène par les végétaux photosynthétiques ;
- les influences diverses des êtres vivants modifiant la composition chimique du milieu où ils vivent (urines, fèces, déchets divers, toxines, etc.).

## 2. Quelques caractéristiques structurales

### 2.1. Taille des écosystèmes

Si on considère le critère taille, on distingue trois catégories d'écosystèmes (Frontier S. et al., 2008) :

- Un micro-écosystème: une souche d'arbre par exemple;
- Un méso-écosystème : une forêt ou une prairie par exemple ;
- Un macro-écosystème: océan, savane, désert, etc.

Si on considère les biocénoses :

- La synusie : correspond au micro-écosystème : biocénose temporaire et indépendante,
- La communauté : correspond au méso-écosystème : c'est une biocénose durable et autonome,
- Le biome : est la communauté d'êtres vivants spécifique à un macro- écosystème.

La productivité est la quantité de matière organique fabriquée par l'écosystème ceci est lié au flux d'énergie eau éléments libéraux CO<sub>2</sub> etc.

- **Étendue**

Dans la nature, les limites de l'écosystème sont difficiles à obtenir, parce qu'il existe un gradient entre deux écosystèmes voisins, d'où un effet de lisière ou écotone. Les écotones sont particulièrement riches en faune dont les espèces ne se mélangent pas.

### 2.2.Types d'écosystèmes actuels

Les écosystèmes actuels ne sont pas les écosystèmes originels parce qu'ils ont été modifiés par l'Homme surtout en ce qui concerne la biocénose (Angelier, 2002) :

- Biocénose originelle : très rare : exemple : forêts vierges ;
- Biocénose potentielle : une biocénose redevient originelle ou presque, si toute action de l'homme cesse, elle retrouverait une espèce d'équilibre ou climax;
- Biocénose réelle : c'est celle qui existe dans son état actuel.

### 2.3. Variabilité des écosystèmes

Les écosystèmes méditerranéens sont caractérisés par de grandes diversités physiques et physiologiques. Ces variabilités éco-systémiques engendrent des structures et des typologies très diversifiées résultant de la variabilité des facteurs physiques du Milieu comme le sol, l'orographie et la topographie, des facteurs climatiques (pluviosité, température, luminosité, vents, etc.) et de la composition spécifique de la biocénose.

L'architecture d'ensemble constitue le premier paramètre de distinction des écosystèmes méditerranéens, cette architecture est donnée par les végétaux dominants qui restent les meilleurs indicateurs du Milieu, (Teyssède et Lami, 2015).

### 2.3.1. Types biologiques de la végétation

Les espèces végétales peuvent être classées en fonction de leur mode d'adaptation aux rigueurs d'hiver, (Godron, 1984) :

- Les phanérogames : ce sont les plantes les plus résistantes : les arbres dont les bourgeons résistent suffisamment au froid pour que les jeunes feuilles soient prêtes à s'épanouir dès les premières chaleurs du printemps. Ces plantes sont dites phanérophytes par analogie avec les phanérogames (plantes dont le système reproducteur se développe de manière très apparente). La hauteur est supérieure à 2 m.

- Les chaméphytes : ce sont les plantes dont les bourgeons sont moins résistants au froid ; elles restent près du sol, abritées sous la neige (chamé = près de la terre). Ce sont de petits ligneux.

- Les hémicryptophytes : les bourgeons sont au ras du sol.

- Les cryptophytes : plantes dont les bourgeons sont enterrés, près d'une réserve de substances nutritives (souvent concentrée dans des tubercules, des rhizomes, des bulbes, etc.), qui leur donnera les forces suffisantes pour percer au printemps, la couche de terre où ils sont ensevelis.

- Les thérophytes : plantes qui échappent aux rigueurs de l'hiver en se mettant sous forme de graines (ou plus généralement, de diaspores).

- Les épiphytes : petits organismes qui vivent sur les arbres ou les roches (exemple : les mousses).

Le spectre biologique dépend essentiellement des conditions climatiques (Duvigeaud, 1980). Il est exprimé en % du couvert végétal. On peut définir la végétation par son aspect : exemples :

- Pelouse : elle comprend essentiellement une végétation herbacée ; elle peut être obtenue suite à un défrichement total d'un terrain boisé.

- Mattoral : c'est une étape de dégradation de la forêt. Il s'agit d'un maquis sur sol acide

- Garrigue : c'est un maquis sur sol calcaire.

- Fruticée : formation végétale de petits ligneux sur sol acide (exemple : formation de cistes).



### 2.3.2. Groupes phytoécologiques

La végétation naturelle peut être classée par groupes selon le facteur écologique dominant qui caractérise le plus ce groupe :

- groupes climatiques,
- groupes édaphiques,
- groupes orographiques,
- groupes anthropozoïques (où l'Homme et l'animal interviennent pour dégrader le milieu naturel).

## 3. Successions et dynamiques des écosystèmes

### 3.1. Principales conceptions

La succession écologique est un processus naturel qui guide l'évolution des écosystèmes depuis leur étape initiale jusqu'à un stade théorique final appelé "climax". Ce stade final représente la forme la plus stable et le plus haut niveau de développement que l'écosystème peut atteindre compte tenu des conditions environnementales existantes. Il se caractérise par un équilibre dynamique où l'énergie et les ressources sont principalement consacrées à la maintenance de l'écosystème dans cet état.

Au fil du temps, des changements naturels et progressifs se produisent dans les habitats et les communautés de la vie sauvage, comme illustré dans le schéma ci-dessous. Par exemple, sur d'anciennes voies ferrées, des terrains industriels abandonnés ou des routes en bitume désaffectées, la végétation reprend progressivement possession du terrain. C'est un exemple de succession écologique : tout d'abord, des plantes pionnières telles que de petites plantes annuelles apparaissent, puis des plantes vivaces, des arbustes, et enfin des arbres se succèdent. Ces environnements sont souvent très riches en biodiversité en raison de leurs caractéristiques écologiques spécifiques (Frontier S. et al., 2008).

Pour illustrer ce processus, prenons l'exemple des hydrophytes, des plantes qui préfèrent les milieux aquatiques. Lorsqu'elles colonisent un étang, elles retiennent la boue avec leurs racines, modifiant ainsi le milieu pour le rendre propice à la croissance de mésophytes voire de xérophytes. L'étang ou le lac se transforme progressivement en marais, puis en terrain sec couvert de forêt dense.

La succession écologique est un élément fondamental de la dynamique des écosystèmes, où les organismes vivants et leur environnement interagissent continuellement pour atteindre un équilibre spécifique à chaque étape (Frontier S. et al., 2008).

## 3.2. Modelés

### 3.2.1. Successions autogènes et allogènes

Selon (Maire, 2011) ;

- Les successions **autogènes** résultent d'un processus **biotique** s'exerçant à l'intérieur de l'écosystème. Les modifications sont induites par les organismes eux-mêmes.
- Les successions **allogènes** résultent de l'influence de facteurs extérieurs à l'écosystème (ex. pollution, incendie). Les successions allogènes peuvent engendrer des séries régressives (peuplements successifs de plus en plus pauvres) pouvant aboutir à la destruction totale de l'écosystème.

### 3.2.2. Succession primaire et secondaire

#### a) Notion de succession primaire

La succession est dite **primaire** lorsqu'elle débute sur un habitat vierge, dépourvu de sol au stade initial à cause d'un glissement de terrain, d'une éruption volcanique ... La roche apparaît à la surface (Maire, 2011).

- La succession débute avec l'installation d'espèces qui n'ont pas besoin de sol pour survivre, les **espèces pionnières**.
- En écologie terrestre, la formation du sol (= **pédogenèse**) commence avec l'arrivée de lichens qui en se décomposant fourniront les premiers apports de matière organique.
- Des plantes simples, telles que mousses et fougères, se développent sur la matière organique laissée par les lichens après leur mort.
- Les plantes simples (mousses, fougères) meurent et se décomposent à leur tour, apportant plus de matière organique.
- L'épaisseur du sol augmente permettant l'installation d'autres plantes (graminées); Ces plantes meurent et se décomposent à leur tour, apportant plus de sels nutritifs disponibles dans le sol.
- Arbres et arbustes peuvent désormais se développer et survivre.
- Insectes, oiseaux et mammifères apparaissent au fur et à mesure des changements de stade.
- Ce qui était initialement un sol nu est désormais colonisé par une large variété d'organismes vivants.

## b) Notion de succession secondaire

La succession est dite **secondaire** (Maire, 2011) ; lorsque le milieu initial est engendré par la perturbation d'un milieu déjà avancé dans la succession écologique (feu de forêt, tempête...). Les pionniers sont alors différents et la succession est plus rapide (le sol est déjà en place, il reste des propagules laissés par le milieu précédent...).

La succession secondaire est généralement cinq à dix fois plus rapide que la succession primaire car :

- La déstructuration de l'habitat est moins forte.
- Il existe un stock de re-colonisateurs.

La distinction entre les deux est parfois difficile en fonction de l'intensité de la perturbation.

- **Communauté climacique:** Un assemblage mature et stable d'organismes vivants qui représente le stade finale d'une succession écologique (Maire, 2011).
  - Chaque écosystème particulier à son propre assemblage d'espèces climaciques, qui sont les organismes les mieux adaptés et qui persistent après le stade ultime de la succession .... Jusqu'à une nouvelle perturbation.
  - Au sein d'un écosystème avec une communauté climacique, les conditions continuent d'être propices pour l'ensemble des organismes de la communauté.

**Remarque :** Il est important de noter que l'état climacique ne signifie pas nécessairement une forêt de vieux arbres. Il peut s'agir d'un équilibre de cactus dans un biome désertique ou de communautés d'herbacées dans une prairie sèche (steppe) où le climat annihile le développement d'une forêt.

**Exemple d'une succession urbaine :** Les murs des vieux édifices (citadelles, vieilles fermes ...), les murs abandonnés ou peu entretenus sont le support et le milieu de vie de successions végétales riches. On observe la colonisation spontanée et la dynamique naturelle des successions végétales des murs ...

Les espèces pionnières seront les espèces lithophytes, c'est-à-dire celles qui s'attachent directement à la pierre et qui n'ont quasiment pas besoin de substrat. Ce sont principalement les lichens.

Les mousses (bryophytes) sont capables de s'implanter sur les murs.

Au fur et à mesure de la dégradation de la « roche mère », donc du mur, et de l'accumulation de substrat dans les interstices du mur, des espèces de plus en plus exigeantes pourront s'installer grâce à des semences : de petits arbustes, voire des arbres. De grands individus pourront d'ailleurs y croître s'ils accèdent au substrat derrière les murs de

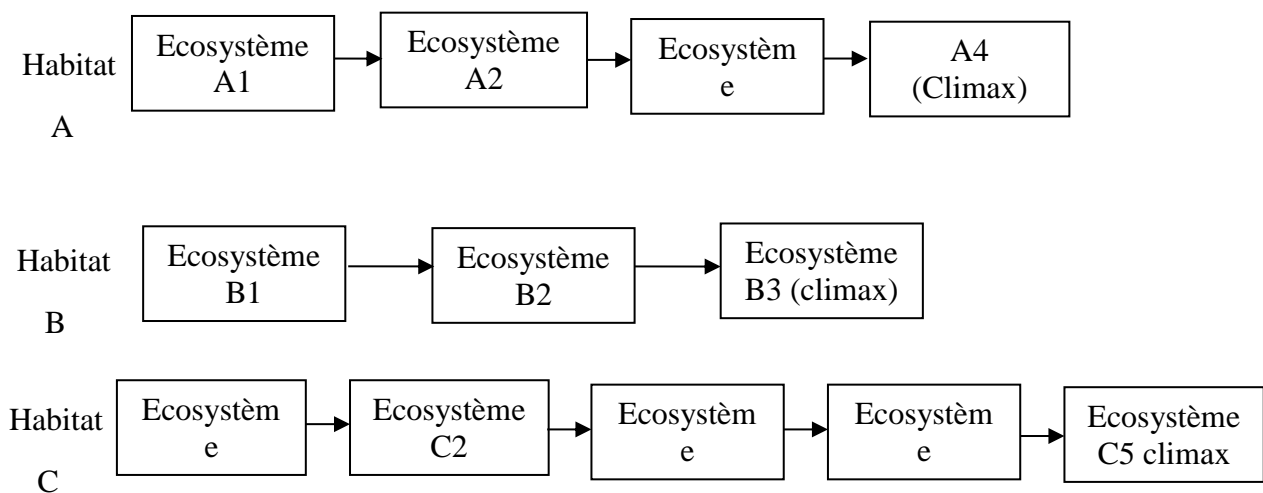
soutènements (Duvigeaud, 1980).

### 3.2.3. Succession progressive et régressive

- La succession est dite progressive lorsqu'elle conduit à une complexification de la composition et de la structure des biocénoses (succession primaire) (Godard, 2007b).
- La succession est dite régressive lorsqu'elle conduit à une simplification de la composition et de la structure des biocénoses (succession secondaire causée par une dégradation du milieu sous l'action de l'homme) (Godard, 2007b).

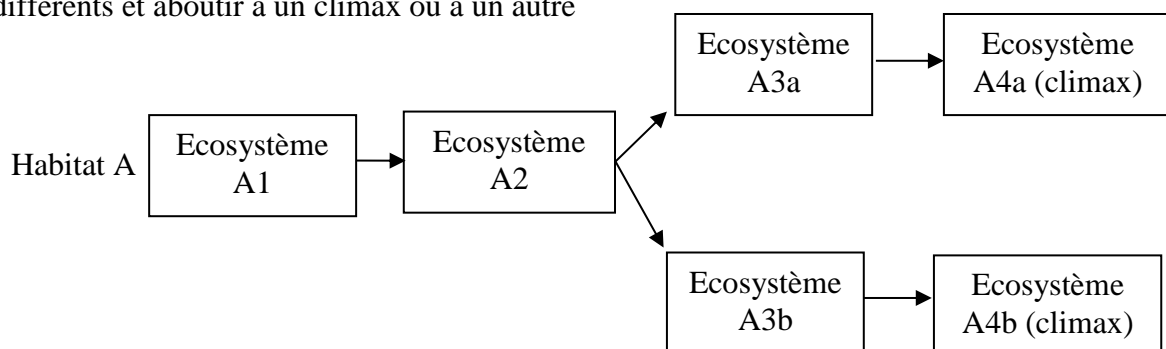
- **L'approche déterministe des successions (approche classique)**

**Théorie 1:** Pour un habitat dans une région donnée, la succession aboutit à un climax prédéterminé (Maire, 2011), c'est-à-dire qui peut être prédit.



- C'est généralement le cas en milieu continental.
- La dynamique des producteurs primaires l'emporte sur les interactions trophiques.

**Théorie 2:** Pour un habitat d'une région donnée, la succession peut suivre des itinéraires différents et aboutir à un climax ou à un autre



- Des interactions biotiques, non prévisibles au départ, déterminent l'itinéraire suivi par la succession.

- On désigne sous le nom de multiple "stable" states (MSS) ou switch-climax ces climax différents dans un habitat donné.
- Plus rares que les successions déterministes: Découvertes en milieu marin où elles sont plus fréquentes qu'en milieu continental.

**Remarque :**

1. La succession est le processus ordonné de changement dans la communauté dans une certaine direction, donc prévisibles.
2. Elle résulte de la modification de l'environnement par la communauté.
3. Elle culmine dans l'instauration d'un écosystème aussi stable que possible biologiquement sur le site. »

#### **4. Importance des perturbations dans la structure et la dynamique des écosystèmes**

En écologie, une **perturbation** est un changement temporel de **courte durée** et **imprédictible** dans les conditions du milieu et/ou dans la composition des biocénoses suffisamment important pour induire un changement significatif de l'écosystème (Maire, 2011).

- **La résilience** écologique est la capacité d'un écosystème à retrouver un fonctionnement et un développement normal après avoir subi une perturbation importante.
- Correspond à l'amplitude maximale de la modification du paramètre considéré pour laquelle il y a une réponse réversible possible de l'écosystème.

Tout ce qui va entraîner une modification « non négligeable » de la nature de l'environnement; même sur de petites échelles d'espace.

Ex: Ouverture dans la canopée provoquée par la mort d'un arbre.

## 5. Biodiversité et fonctionnement des écosystèmes

### 5.1. Biodiversité

La biodiversité englobe tous les êtres vivants dans toutes leurs manifestations, couvrant une gamme variée de formes de vie et de leurs évolutions à différentes échelles. Elle est définie comme suit : « La diversité des organismes vivants de toutes origines, y compris les écosystèmes terrestres, marins, et autres écosystèmes aquatiques, ainsi que les interactions complexes au sein desquelles ils évoluent. Cela inclut la diversité au sein des espèces, entre les espèces, ainsi que la diversité des écosystèmes » (Article 2 de la Convention sur la diversité biologique, CBD, adoptée lors du Sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992).

Cette définition met en avant trois principaux niveaux de diversité (comme expliqué par Fischesser et Dupuis en 1996) :

- La diversité écosystémique, qui représente la variété des écosystèmes présents sur notre planète.
- La diversité spécifique, qui correspond à la variété des espèces vivantes.
- La diversité génétique, définie par la variabilité des gènes au sein des individus d'une même espèce ou population. On parle également de diversité intra-spécifique chez les espèces domestiquées, ce qui permet de caractériser des races (pour les animaux) et des variétés (pour les plantes).

#### 5.1.1. Indicateurs de diversité

Evaluer la diversité d'un site est complexe, mais il existe des indicateurs simples ici que le nombre d'espèces présentes, le nombre d'individus pour chaque espèce, le nombre d'individus d'une espèce comparé au nombre d'individus présents toutes espèces confondues...(Gravel et al., 2010)

Si ces indicateurs simples donnent une première vision de la biodiversité présente sur un site, il faut être conscient de leur non exhaustivité lorsqu'on les interprète.

Ces outils doivent prendre en compte :

- Les variables patrimoniales, par exemple l'évolution du nombre d'espèces dites charismatique, cléf de voûte, les espèces rares ou encore l'évolution de la variabilité génétique totale et de la diversité des écosystèmes.
- Les variables décrivant le caractère fonctionnel de la biodiversité comme élément fondamental des écosystèmes. L'état des réseaux trophiques, du maillage écologique, la

résilience, la capacité à rendre différents services écosystémiques sont par exemple importants.

- Les indicateurs état-Pression – Réponse; Les pressions sont décrites par des variables «négatives» (ex : espèces invasives, fragmentation écologique et isolats génétiques...). Les réponses sont les mesures prises en fonction des seuils proposés ou validés. Ces seuils indiquant des degrés de menace et de gravité.
- La diversité biologique dans la nature «banale» ou domestiquée (espèces élevées et cultivées), laquelle peut aussi se dégrader.

Les indicateurs fréquemment utilisés sont :

#### **a. Richesse spécifique**

La richesse spécifique fournit des informations sur le nombre d'espèces répertoriées dans un lieu donné. La richesse spécifique totale représente le nombre total d'espèces de la faune ou de la flore présentes dans cet endroit spécifique. En revanche, la richesse spécifique moyenne indique la moyenne du nombre d'espèces présentes dans divers échantillons collectés. Elle dépend de la qualité du milieu, mais aussi de sa taille et de sa position géographique, ce qui englobe la notion de connectivité Vanpeene Bruhier et al, 1998).

**Exemple :** On a 2 communautés différentes :

° La communauté 1 est faite de 25 % de bouleaux, 25 % de frènes, 25 % de sapins et de 25 % de pins.

° La communauté 2 se compose de 15 % de bouleaux, 70 % de frènes, 5 % de sapins et de 10 % de pins.

#### **b. Abondance**

En écologie, l'abondance d'une espèce fait référence au nombre total d'individus de cette espèce ou au nombre d'individus par unité d'espèce. La seconde définition se rapporte à la densité de la population de l'organisme. En général, les organismes sont plus abondants là où les conditions sont plus favorables pour eux, même si l'abondance est principalement liée à leur capacité de survie et de reproduction. Prenons l'exemple des orchidées : même si elles sont parfaitement adaptées à un écosystème donné, elles ne seront jamais aussi abondantes (par exemple, aussi nombreuses que les graminées) en raison de leur biologie et de leur mode de reproduction spécifiques (Hattour et al, 2004).

#### **c. Abondance relative**

L'abondance relative d'une espèce compare le nombre d'individus de l'espèce et le nombre total d'individus (Hattour et al, 2004).

#### **d. Indices de diversité et l'équitabilité**

Plusieurs indices sont disponibles pour évaluer la diversité d'un habitat à partir de données simples. Parmi les plus couramment utilisés figurent l'indice de Simpson et l'indice de (Shannon et Weaver, 1949). Ces deux indices, basés sur des calculs de probabilité, prennent en considération à la fois le nombre d'espèces (richesse spécifique) et l'abondance relative de ces espèces. Ils sont souvent accompagnés d'un indice d'équitabilité, qui varie de 0 à 1. Plus l'indice d'équitabilité se rapproche de 1, plus les espèces sont réparties de manière équilibrée, ce qui signifie qu'elles présentent un nombre similaire d'individus, sans qu'aucune ne domine les autres. Parfois, il peut y avoir une grande richesse spécifique avec de nombreuses espèces répertoriées, mais une seule espèce peut être très dominante en termes d'abondance (Marcon, 2022).

En somme, un habitat diversifié devrait tendre vers une grande richesse spécifique et une distribution équilibrée des espèces.

Il est important de noter que la réduction de la biodiversité affecte les trois niveaux de diversité : la diversité des écosystèmes, des espèces et la diversité génétique.

#### **5.1.2. Causes majeures de la perte de biodiversité**

- La destruction et perte de l'habitat ; C'est l'une des causes principales de disparition des espèces. Par la construction de routes et l'habitations, l'Homme morcelle le paysage et fragmente ainsi les habitats naturels. Il perturbe donc le fonctionnement général des espèces et donc des écosystèmes. Les espèces qui vivaient alors en équilibre subissent une forte perturbation. Toutes n'ont pas les capacités pour survivre à ces perturbations et certaines disparaissent (Chapin, 2000).
- L'exemple le plus cité est celui de la forêt amazonienne qui est incendiée et détruite au profit de grandes surfaces agricoles permettant de cultiver de façon intensive du soja ou des palmiers permettant la production de l'huile de palme malheureusement nécessaire au développement économique du pays et à la consommation mondiale.
- L'assèchement des zones et la modification des cours d'eau conduisent à la disparition des frayères, zones de reproduction des poissons (ex : esturgeon sauvage en France) et perturbent les zones de reproduction de certains oiseaux (11 % d'espèces d'oiseaux sont menacées aujourd'hui de disparition) dépendant des milieux aquatiques.

Les amphibiens sont un exemple d'espèces principalement menacées par la fragmentation de leur habitat par les routes. En effet, lorsqu'une route coupe le passage entre la



forêt (lieu de vie) et un milieu aquatique (lieu de reproduction), la survie de la population est gravement menacée.

- L'introduction d'espèces invasives, Une espèce invasive est une espèce (animale ou végétale) exogène, qui ne provient pas du milieu dans lequel elle est introduite et qui va être nocive pour les espèces autochtones, soit par compétition (pour le territoire ou les ressources) soit par prédation directe ou indirecte. Les espèces invasives sont considérées par l'ONU comme l'une des causes majeures de perte de biodiversité.

L'Homme en est le principal vecteur soit de manière intentionnelle soit accidentelle.

Exemple d'introduction intentionnelle et commerciale : la Tortue de Floride.

- La surexploitation des ressources.
- La pollution par l'utilisation de pesticides et d'herbicides en agriculture,
- Le dérèglement climatique.

## 5.2. Différents types de chaînes trophiques

### 5.2.1. Relations trophiques

Les relations trophiques font référence aux relations alimentaires entre les êtres vivants d'un même écosystème. Dans tout écosystème, on distingue trois niveaux trophiques, aussi appelés niveaux alimentaires : les producteurs, les consommateurs et les décomposeurs (Lévêque, 2001).

#### a. Niveau trophique des producteurs

Ce niveau est occupé par les végétaux, les algues et le phytoplancton. Ils représentent le premier échelon de la plupart des chaînes alimentaires présentes sur notre planète. Ces organismes captent la lumière du soleil et, grâce au processus de photosynthèse, utilisent cette énergie solaire pour convertir des éléments non organiques tels que l'eau, les sels minéraux et le dioxyde de carbone en matière organique, notamment en glucose (Ricklefs et Miller, 2005). Tous les producteurs ont la capacité de produire leur propre nourriture, ce qui les qualifie d'autotrophes (le terme "autotrophe" vient du grec "auto," signifiant "seul," et "trophos," signifiant "nutrition").

En revanche, les autres niveaux trophiques sont qualifiés d'hétérotrophes, car ils ne peuvent pas produire leur propre nourriture. Ils se nourrissent de matière organique préexistante pour survivre.

#### b. Niveau trophique des consommateurs

Ce niveau est occupé par tous les organismes vivants qui se nourrissent d'autres êtres vivants pour leur subsistance. On distingue plusieurs niveaux de consommateurs, pouvant atteindre trois ou quatre niveaux dans certains écosystèmes.

Les consommateurs primaires, également appelés consommateurs de premier ordre, sont des organismes se nourrissant de végétaux, ce qui les classe parmi les herbivores. Par exemple, le lièvre est

un exemple de consommateur primaire (Ricklefs et Miller, 2005).

Les consommateurs secondaires, ou consommateurs de deuxième ordre, sont des animaux qui se nourrissent d'autres animaux herbivores. On les désigne également comme des carnivores de premier ordre. Le lynx, prédateur se nourrissant de lièvres, en est un exemple.

Les consommateurs tertiaires, également connus sous le nom de consommateurs de troisième ordre, sont des animaux qui se nourrissent d'autres animaux carnivores, parfois appelés carnivores de deuxième ordre. Par exemple, le loup, qui se nourrit de lynx, est un consommateur tertiaire (Ricklefs et Miller, 2005).

Certains consommateurs ont un régime alimentaire varié, se nourrissant à la fois de végétaux et d'animaux. Ce sont des animaux omnivores. Ils interagissent donc avec plusieurs niveaux trophiques à la fois. Par exemple, un ours peut se nourrir de baies, de racines, d'insectes, de poissons et de petits mammifères en fonction des circonstances, ce qui en fait un omnivore. De ce fait, il interagit avec des producteurs, des consommateurs primaires et des consommateurs secondaires.

### **c. Niveau trophique des décomposeurs**

Ce niveau est occupé par les organismes vivants qui tirent leur énergie de la décomposition de la matière organique en décomposition, telle que les feuilles mortes, le bois en décomposition, les cadavres d'animaux, etc., ainsi que des déchets organiques produits par d'autres organismes vivants, tels que les excréments et les restes d'aliments. Ces organismes transforment la matière organique en matière inorganique, la rendant ainsi disponible pour les producteurs (Cain et al. 2006).

Il existe deux types principaux de décomposeurs :

- Les détritivores, tels que les blattes et les vers de terre, se nourrissent exclusivement de débris organiques en décomposition.
- Les transformateurs, comme les champignons et les bactéries, effectuent une transformation complète de la matière organique en matière inorganique, minérale.

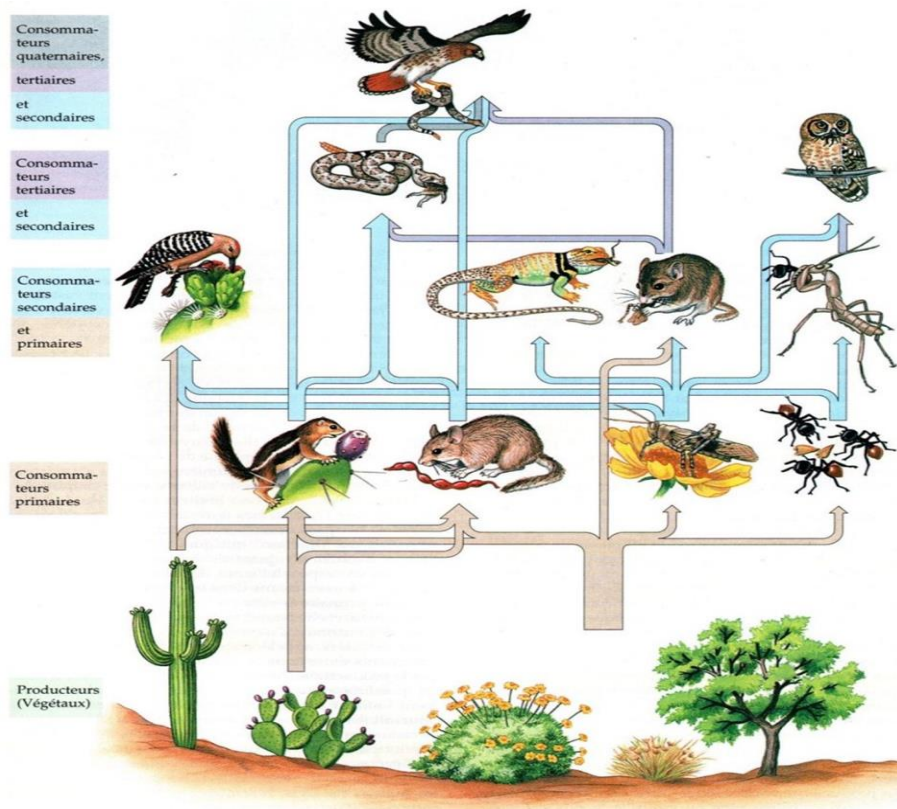
### **5.2.2. Chaînes et réseaux trophiques**

Dans un écosystème, les liens qui unissent les espèces sont le plus souvent d'ordre alimentaire. Ces relations forment des séquences où chaque individu mange le précédent et est mangé par celui qui le suit ; on parle de chaîne alimentaire. Chaque maillon est un niveau trophique (Bouline, 1996).

#### **a. Chaîne alimentaire**

Une chaîne alimentaire est une suite d'êtres vivants de différents niveaux trophiques dans laquelle chacun mange des organismes de niveau trophique inférieur dans le but d'acquérir de l'énergie. Le premier maillon d'une chaîne est toujours un organisme autotrophe (Fischesser & Dupuis, 1996). Dans les mers et les océans, le phytoplancton assure ce rôle. Dans les profondeurs abyssales où les

rayons du soleil ne parviennent pas, les bactéries thermophiles sont les premiers maillons de la chaîne. Ci-dessous, on distingue des chaînes alimentaires terrestres (**Fig. 5**): Plantes > Herbivores > Carnivores 1 > Carnivores 2.



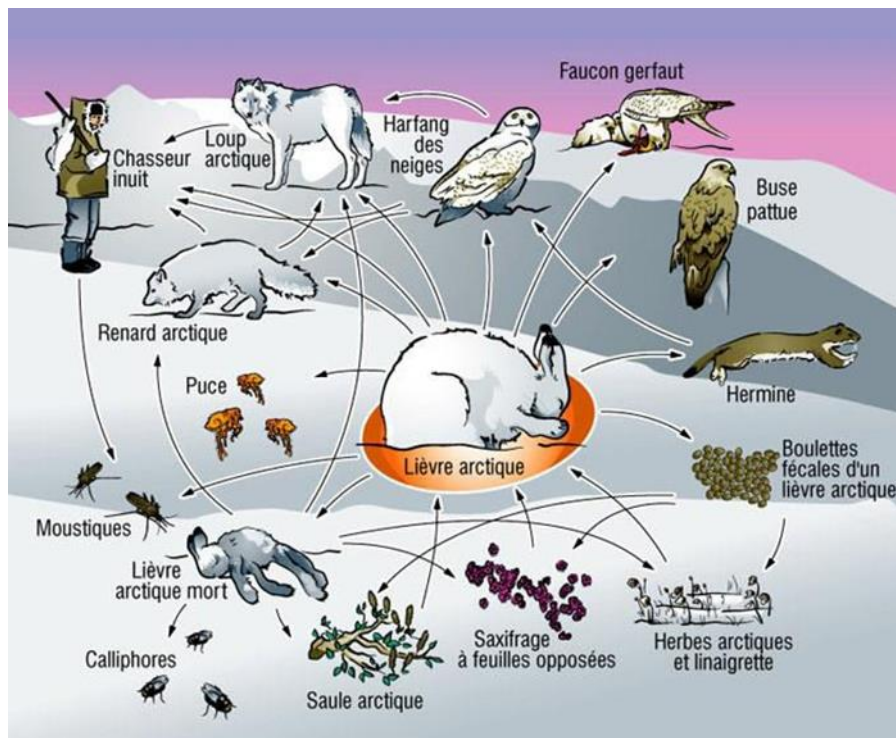
**Figure 5:** Chaînes alimentaires terrestre (<https://www.aquaportail.com/>)

## b. Réseaux trophiques

La notion de réseau trophique englobe toutes les interactions alimentaires au sein d'une communauté biologique donnée. Un réseau trophique est un ensemble de chaînes alimentaires interconnectées à l'intérieur d'un écosystème, par lesquelles circulent l'énergie et la biomasse. Cela comprend les échanges d'éléments tels que le flux de carbone et d'azote entre les différents niveaux de la chaîne alimentaire, ainsi que les transferts de carbone entre les organismes producteurs autotrophes et les organismes consommateurs hétérotrophes.

L'établissement du réseau trophique d'un écosystème est une tâche difficile par suite du grand nombre d'espèces en présence et de la complexité du régime alimentaire de chacune (**Fig. 6**). Non seulement, en effet, un individu se nourrit généralement, à un moment donné de son existence, aux dépens de nombreuses autres espèces, mais son spectre alimentaire varie avec son stade de développement, son âge, sa taille, et aussi avec

la période de l'année et les disponibilités qu'elle offre.



**Figure 6 :** Exemple d'un réseau trophique dans le milieu arctique

Chaque réseau trophique se caractérise par des boucles de rétroaction complexes et des équilibres dynamiques, qui sont fortement influencés par des facteurs biotiques et abiotiques tels que la température, le pH, la disponibilité de lumière, l'oxygène et les nutriments, entre autres. Il s'agit d'un équilibre instable maintenu grâce à un équilibre dynamique, grâce à l'interaction de deux principales chaînes de rétroactions : les relations "top-down" (qui impliquent la régulation des ressources par leurs consommateurs) et les relations "bottom-up" (où les ressources influencent leurs consommateurs par des rétroactions).

Dans un écosystème, la structure des réseaux trophiques influence fortement la quantité, la diversité, la stabilité et la qualité de la biomasse et de la matière organique résiduelle (excrétions, nécromasse) produites par les écosystèmes. La qualité d'un réseau trophique et de ses interactions à un lien direct avec la stabilité et la résilience des populations qui en font partie (Lévêque, 2001).

### 5.2.3. Pyramides écologiques

Une pyramide écologique est une représentation graphique pour indiquer des rapports entre différentes catégories d'espèces correspondant à différents niveaux trophiques. Le premier maillon est les décomposeurs, puis les plantes autotrophes, les herbivores, les

prédateurs primaires et les prédateurs secondaires, voire les prédateurs tertiaires (superprédateurs).

Selon (Fischesser & Dupuis, 1996 ; Lévêque, 2001 ; Duvigneaud, 1980). On distingue trois types de pyramides écologiques (**Fig. 7**) :

- Pyramide des nombres
- Pyramide de la biomasse
- Pyramide des énergies

Les décomposeurs ne sont pas toujours représentés dans ces pyramides mais ils jouent un rôle essentiel dans le cycle de la matière.

#### **a. Pyramide des nombres**

Dans la hiérarchie des consommateurs qui se succèdent, les consommateurs de rang inférieur seront plus nombreux et plus petits que les consommateurs du rang suivant et ainsi de suite jusqu'au dernier rang de consommateur connu pour une chaîne trophique.

La pyramide des nombres représente le nombre d'individus à chaque niveau trophique. Dans tout écosystème, ce nombre diminue en passant du niveau des proies à celui des prédateurs. L'évaluation des populations fournit des indications sur l'état de l'écosystème et peut, par exemple, expliquer des phénomènes d'extinction ou, au contraire, de pullulation (Fischesser & Dupuis, 1996).

#### **b. Pyramide des énergies**

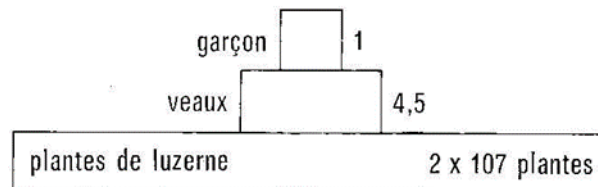
La pyramide des énergies illustre les transferts d'énergie d'un niveau trophique à l'autre et montre que chaque niveau trophique ne dispose que d'une fraction de l'énergie de celui qui le précède. Elle insiste l'aspect dynamique d'un écosystème (Lévêque, 2001).

La pyramide des énergies représente la quantité d'énergie accumulée à chaque niveau de la chaîne alimentaire. Cependant, il est important de noter que toute l'énergie solaire captée par les végétaux n'est pas directement disponible pour les herbivores (Odum et al., 1976). Une partie de cette énergie est utilisée par les plantes pour répondre à leurs propres besoins, ce qui réduit le rendement de la photosynthèse. En conséquence, le deuxième niveau de la pyramide (les herbivores) est moins étendu que le premier. Cette même tendance se répète au troisième niveau, où les carnivores de premier ordre n'obtiennent pas la totalité de l'énergie accumulée par les herbivores, et ainsi de suite (Fischesser & Dupuis-Tate, 1996).

### c. Pyramide des biomasses

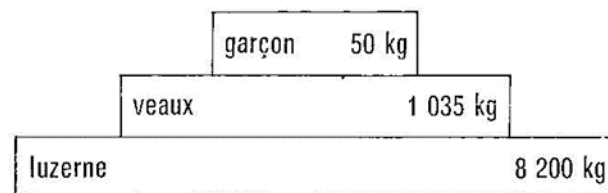
La pyramide des biomasses fournit une évaluation de la masse des producteurs par rapport à celle des consommateurs. La première étant toujours supérieure à la seconde (Duvigneaud, 1980). Questions : faites une représentation graphique pour chaque type de pyramide ?

#### pyramide des nombres

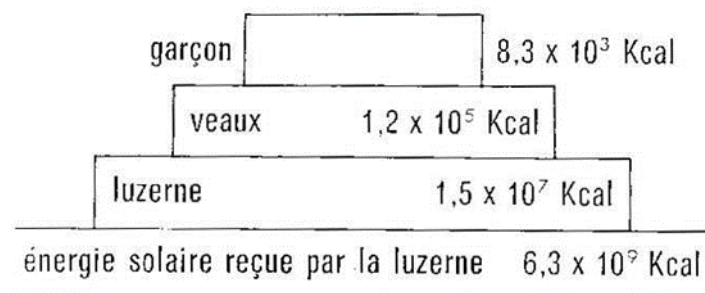


*Pyramide des nombres pour la chaîne théorique : luzerne — veaux — garçon de douze ans (d'après ODUM).*

#### pyramide des masses



#### pyramide des énergies



**Figure 7 :** Pyramides écologiques (Odum et al., 1976 ; Duvigneaud, 1980)

### 5.3. Interactions fonctionnelles

#### 5.3.1. Généralités sur le fonctionnement d'un écosystème naturel

Un écosystème naturel se compose d'un biotope, c'est-à-dire un environnement physique et chimique particulier, ainsi que de la biocénose, qui représente l'ensemble des êtres vivants qui habitent cet environnement. Le fonctionnement global de l'écosystème est rendu possible par les interactions complexes qui se produisent entre les organismes vivants et les

facteurs physiques et chimiques du milieu. Les éléments constituant un écosystème établissent un réseau d'échanges d'énergie et de matière qui soutient la vie et favorise son développement. En général, un écosystème comprend trois catégories fonctionnelles principales d'organismes vivants : les producteurs, qui captent l'énergie, les consommateurs, qui se nourrissent des producteurs ou d'autres consommateurs, et les décomposeurs, qui décomposent la matière organique morte pour la recycler dans le système (Barbault, 2000).

Un des aspects les plus intéressants qui se dégage de l'étude des écosystèmes, c'est que ceux-ci sont toujours traversés par deux flux :

- Flux de l'énergie, dont l'origine est solaire et qui traverse successivement les producteurs, puis les consommateurs et les décomposeurs qui dispersent cette énergie (respiration et au travers les déchets qu'ils laissent : excréments, fèces, etc.).
- Flux de la matière qui circule en permanence entre herbivores, carnivores, détritivores, coprophages, nécrophages, etc. et tous les organismes de la microfaune et de la microflore qui participent à la minéralisation de la matière organique assurant la fourniture de l'alimentation minérale nécessaire aux plantes et la fermeture du cycle de la matière.

### **5.3.2. Circulation globale de l'énergie sur Terre**

L'énergie solaire joue un rôle fondamental sur Terre. Environ 30% de cette énergie solaire est directement renvoyée dans l'espace sous forme de lumière, tandis qu'environ 20% est absorbée par notre atmosphère. La majeure partie des 50% restants est captée par la surface terrestre et se transforme en chaleur.

Cette énergie solaire a de nombreuses implications pour notre planète. Elle contribue à l'évaporation de l'eau des océans et à la formation de nuages, qui à leur tour donnent lieu à des précipitations telles que la pluie et la neige. De plus, l'énergie solaire, combinée à d'autres facteurs, est responsable des mouvements de l'air et des courants marins, ce qui influence la création de divers types de climats à travers le monde (Ricklefs et Miller en 2005).

Moins de 1% de l'énergie solaire est captée par les organismes photosynthétiques tels que les cyanobactéries, les algues et les plantes. Ces organismes transforment cette énergie en énergie chimique, qui est utilisée pour leur propre nutrition ainsi que pour alimenter tous les autres êtres vivants, appelés hétérotrophes. Cela assure leur survie et leur permet d'accomplir diverses activités vitales.

Pour les êtres vivants, l'énergie est la capacité à effectuer un travail. Ce travail peut se produire à différentes échelles, allant de la cellule (synthèse de molécules, déplacement d'organites et de chromosomes, transport de substances, etc.) à l'écosystème et à la Biosphère.

L'énergie captée par les plantes vertes est transférée de manière organisée à travers les différents niveaux de la chaîne alimentaire avant de se dissiper. Il est important de noter que la quantité d'énergie disponible diminue progressivement le long de cette chaîne alimentaire (comme expliqué par Ricklefs et Miller en 2005).

### 5.3.3. Les écosystèmes, convertisseurs d'énergie (Flux d'énergie)

Trois formes d'énergie entrent en jeu dans le fonctionnement d'un écosystème :

- le rayonnement électromagnétique de courte longueur d'onde (la lumière) ;
- le rayonnement électromagnétique de grande longueur d'onde (infrarouges : chaleur) ;
- l'énergie chimique (sous forme de molécules organiques : glucides, lipides...). etc.).

#### a. Conversion de la lumière en énergie chimique par les organismes photosynthétiques

La lumière solaire est l'élément déclencheur des réactions de photosynthèse, qui permettent aux végétaux et aux bactéries photosynthétiques autotrophes de produire des matières organiques utilisées par les êtres vivants hétérotrophes. Les plantes captent l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique, principalement sous forme de lumière solaire. La photosynthèse convertit une partie de cette énergie en énergie chimique, qui se manifeste sous forme de liaisons entre les atomes au sein de la molécule de glucose. La quantité totale d'énergie captée par l'écosystème est appelée production primaire brute (PB1) (Boulaine, 1996).

Tous les êtres vivants utilisent cette énergie chimique stockée dans les molécules organiques, la transformant finalement en chaleur. Une partie de la production brute est utilisée lors de la respiration des plantes (R1), ce qui génère de la chaleur. La portion qui n'est pas utilisée dans la respiration constitue la production primaire nette (PN1). Ainsi, nous avons l'équation :  $PN1 = PB1 - R1$ .

La production primaire nette (PN1) est utilisée pour diverses fins, notamment la croissance des plantes (T1), la formation de litières de feuilles mortes (L1) et la nourriture des herbivores (C1). Donc, l'équation est :  $PN1 = T1 + L1 + C1$  (Boulaine, 1996).



## b. Transferts d'énergie dans les chaînes trophiques

La matière organique fabriquée par les organismes d'un niveau trophique a quatre destinées différentes (Boulaine, 1996):

- Une partie sert au fonctionnement de l'organisme et est perdue sous forme de CO<sub>2</sub> et d'eau au cours de la respiration cellulaire (R) ;
- Une autre partie est représentée par les excréments, feuilles mortes, cadavres, elle est dégradée et recyclée par l'action des décomposeurs (L) ;
- Une partie sert à la croissance de la biomasse des organismes (T) ;
- Enfin une dernière partie est consommée par les organismes du niveau trophique supérieur (C).

Ainsi, les animaux herbivores consomment une partie C1 de PN1. Cette énergie se partage en quatre postes :

- accroissement de la taille et du nombre d'individus de la communauté d'herbivores (T2)
- respiration des herbivores (R2) ;
- prédation par les carnivores (C2) ;
- cadavres et déchets (L2).

Le même raisonnement s'applique aux carnivores (postes T3, R3, C3, L3). Il n'y a pas de poste C3 si les carnivores ne sont pas mangés par des prédateurs.

Les déchets et cadavres produits par chaque niveau trophique (L1 + L2 + L3) alimentent les organismes du sol, principalement des bactéries et des champignons. Cette énergie se partage en trois postes :

- accroissement de la masse des organismes du sol (T4),
- accroissement de la quantité de matière organique morte dans le sol (humus : DH),
- respiration des organismes du sol (R4).

Nous constatons donc un transfert d'énergie d'un niveau trophique à un autre : Photosynthèse → matières organiques végétales → matière organique herbivore → matière organique carnivore I → matière organique carnivore II → matière organique carnivore III.

La chaîne trophique ne va pas s'allonger indéfiniment, en principe elle va s'arrêter au niveau du carnivore III parce qu'il y a perte d'énergie d'un niveau à un autre (Ricklefs et Miller, 2005).

### c. Bilan d'énergie de l'écosystème

Nous observons donc, que l'énergie entrée dans l'écosystème sous forme de production brute **PB** est répartie comme suit (Tarnaud et al., 2010) :

- Une partie est perdue par la respiration :  $R = R1 + R2 + R3 + R4$  ;
- Une autre partie peut rester stockée dans l'écosystème sous forme d'accroissement des populations d'organismes vivants ( $T = T1 + T2 + T3 + T4$ ) ou d'accumulation de matière organique morte dans le sol (**L**).

$$\text{Nous avons donc : } \mathbf{PB = R + T + L}$$

### d. Dispersion de l'énergie

Les écosystèmes ont tendance à ne pas conserver l'énergie qui y pénètre, et cette énergie est généralement dissipée sous forme de chaleur. Le cycle de l'énergie dans les écosystèmes est donc ouvert et doit constamment être réapprovisionné, principalement par l'énergie solaire.

L'énergie emmagasinée par les producteurs se diffuse à travers les différents niveaux trophiques. Pour illustrer ce concept, prenons l'exemple du niveau des consommateurs primaires. Lorsqu'un organisme se nourrit d'une espèce végétale, il ne consomme pas nécessairement toutes les parties de la plante, ce qui entraîne une perte d'une partie des calories stockées par les parties non consommées de la plante (Boulaine, 1996).

De plus, les calories ingérées par un herbivore ne sont pas toutes converties en matière animale. Environ 80 à 90% de ces calories sont utilisées pour des processus tels que la respiration, l'évapotranspiration, l'excrétion, etc.

Par exemple, dans une prairie, chaque mètre carré peut produire environ 1000 kcal par jour. Lorsque cette production est consommée par un herbivore, il n'obtient que 10 kcal. Si un carnivore se nourrit de l'herbivore, sa masse corporelle ne représentera qu'environ 1 kcal. Enfin, si un deuxième carnivore se nourrit du premier carnivore, il n'obtiendra qu'environ 0,1 kcal (Boulaine, 1996).

En fin de compte, les êtres vivants contribuent également à l'augmentation de l'entropie de l'univers, mais ils ralentissent ce processus. Ceci est particulièrement vrai dans des écosystèmes complexes où de nombreux échanges énergétiques ont lieu entre de nombreux acteurs. Du point de vue de la thermodynamique, maintenir une biodiversité élevée est donc crucial.

### 5.3.4. Flux de la matière dans l'écosystème (cycle de la matière)

Les interactions complexes qui se produisent entre les différents organismes vivants et entre ces organismes et leur environnement sont responsables de la mise en place d'un cycle bien orchestré pour des éléments tels que l'azote, le carbone, le phosphore, et d'autres. Ces éléments suivent un parcours au sein des êtres vivants, retournent au sol où ils sont décomposés par des bactéries et des champignons, puis sont réutilisés par les plantes vertes lorsqu'il y a de la lumière pour reformer de la matière organique.

Ce cycle est communément appelé le "cycle de la matière" et englobe trois principaux groupes d'organismes dans un écosystème : les Producteurs, les Consommateurs et les Décomposeurs (conformément à la classification de Barbault, 2000).

#### a. Les Producteurs

C'est l'ensemble d'êtres vivants autotrophes, notamment les végétaux chlorophylliens qui fixent l'énergie de la lumière solaire par la photosynthèse. Il y a en moyenne 1 à 5 % de l'énergiesolaire qui est captée par les plantes.

#### b. Les Consommateurs

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

**i. Les herbivores :** ce sont les consommateurs des végétaux : par exemple : les Cétacées consomment les phytoplanctons ; les algues sont mangées par les gastéropodes, les tortues marines, etc. ; les lichens constituent la nourriture des gastéropodes terrestres, les myriapodes terrestres, etc. ;

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

- Prédateurs de premier ordre : qui mangent les herbivores : (chacal, lion, etc.).
- Prédateurs de deuxième ordre : qui mangent les prédateurs du premier ordre (serpents mangent les grenouilles, etc.).
- Prédateurs de troisième ordre : ex : les rapaces qui mangent les serpents, etc.

Parmi les carnivores on peut distinguer que :

- Il existe des animaux qui sont capables de tout consommer : ils sont dits omnivores ou

diversivores (sanglier, hérisson, etc.) ;

- En ce qui concerne les parasites : il existe des parasites qui sont fixés en divers points de la chaîne : exemple : l'olivier a deux parasites : un parasite primaire (*Dacus*) et un parasite secondaire (*Opius*).

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

Si nous considérons la chaîne trophique contenant aussi les chaînes de parasites, de saprophages, etc., nous obtiendrons un écosystème très compliqué.

### c. Les Décomposeurs

Il s'agit principalement des organismes qui se nourrissent de matière organique en décomposition, tels que les cadavres et les litières. Leur fonction consiste à décomposer la matière organique, les détritivores comme les vers de terre, ou à la minéraliser, comme c'est le cas pour les transformateurs tels que les bactéries et les champignons. Ils convertissent la matière organique en matière inorganique, la rendant ainsi disponible pour les producteurs.

Ainsi, on distingue deux groupes d'êtres vivants qui interviennent dans la décomposition de la matière organique :

- **Les saprophages** : consomment des végétaux et des animaux morts. Il existe plusieurs types de saprophages :
  - Les détritivores : consomment les débris végétaux et animaux ;
  - Les coprophages : se nourrissent des excréments de divers animaux, ce sont surtout des insectes ;
  - Les nécrophages : se nourrissent de cadavres : ce sont des oiseaux et des insectes(charognards) ;
- **Les transformateurs** : ce sont les bactéries et les champignons qui transforment la matière organique morte en matière minérale par le processus de la minéralisation.

**Exemple** : bactéries nitrifiantes → nitrates ; bactéries sulfurantes → sulfates, etc.

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

nouvelles molécules organiques.

En conclusion on peut dire que les décomposeurs jouent un rôle essentiel dans les cycles biogéochimiques des éléments.

#### **5.4. Niche écologique**

L'écologiste américain (Odum, 1959) définit la niche d'une espèce comme étant son rôle dans l'écosystème: « l'habitat d'une espèce est son adresse, la niche est sa profession ». La niche correspond non seulement à la place de l'espèce dans le réseau trophique, mais également à son rôle dans le recyclage des nutriments, à son effet sur l'environnement biophysique, etc.

La niche écologique d'une espèce est définie par l'ensemble des facteurs abiotiques et biotiques de son environnement, notamment les conditions climatiques, les proies disponibles pour les carnivores, et les espèces végétales consommables par les herbivores.

La présence de plusieurs niveaux trophiques interconnectés est essentielle pour le fonctionnement des cycles écologiques, qui peuvent être plus ou moins ouverts. Chaque groupe fonctionnel majeur joue un rôle indispensable pour les autres, et tout dysfonctionnement ou disparition d'un de ces groupes peut perturber l'ensemble de l'écosystème. Les conditions de fonctionnement d'un écosystème peuvent également entraîner des modifications dans son milieu. Par exemple, l'apparition de la photosynthèse oxygénique a introduit de l'oxygène dans l'atmosphère et a favorisé la transition de l'anaérobiose à l'aérobiose.

Le fonctionnement d'un écosystème est étroitement lié à chaque composante qui conserve ses caractéristiques spécifiques, tout en contribuant au fonctionnement global de l'écosystème selon ses propres règles. La survie d'un écosystème dépend de la présence et du bon fonctionnement de tous les éléments impliqués à différentes étapes (Fauri et al., 2012).

Il est clair que l'environnement joue un rôle crucial dans la formation de la biodiversité. Plus l'environnement varie spatialement, plus il existe de types d'écosystèmes différents, ce qui favorise une plus grande biodiversité.

#### **5.5. Groupes fonctionnels: complémentarité et redondance**

Parfois, il est difficile de préciser la contribution individuelle de chaque espèce à certains processus écologiques. C'est pourquoi on utilise le concept de "groupes fonctionnels" pour regrouper des espèces ayant des rôles similaires dans un processus donné ou qui réagissent de manière similaire aux changements des conditions extérieures. Ces groupes fonctionnels peuvent être formés par des espèces partageant la même catégorie de ressources alimentaires ou celles qui participent à des cycles biogéochimiques majeurs tels que l'azote ou le carbone.

Une fonction écologique peut être assurée par une seule espèce ou un petit nombre d'espèces dans un écosystème, tandis que dans un autre écosystème, elle peut l'être par un grand nombre d'espèces. Cela peut donner lieu à ce que l'on appelle la "redondance fonctionnelle", où plusieurs espèces occupent la même niche spatiale et exercent des fonctions similaires, même si leur importance relative peut varier.

## 5.6. Fonctions des espèces dans l'écosystème

### 5.6.1. Espèces clés

Le concept d'espèce clé, introduit par Robert Paine en 1966 de l'Université de Washington, suggère que certaines espèces jouent un rôle plus crucial que d'autres au sein du réseau complexe des interactions au sein d'un écosystème. Une espèce clé est celle dont la disparition entraînerait des changements significatifs dans la structure et le fonctionnement global de l'écosystème. Il existe deux catégories principales d'espèces clés : les prédateurs clés, dont la présence exerce une forte régulation sur d'autres espèces, et les mutualistes clés, des organismes indispensables, directement ou indirectement, au maintien des populations d'autres espèces.

**Ex;** l'abondance des fécondations chez les plantes dépend souvent de la présence d'une faune variée de pollinisateurs (essentiellement des insectes).

### 5.6.2. Organismes ingénieurs

Les ingénieurs autogènes sont des organismes qui influent directement ou indirectement sur la disponibilité des ressources pour d'autres espèces en provoquant des modifications dans les caractéristiques physiques de leur environnement. En d'autres termes, leur propre structure physique entraîne des changements dans leur habitat. Un exemple de cela serait les arbres, qui, en raison de leurs caractéristiques physiques, créent des habitats pour d'autres espèces (Dubois, 2014).

D'un autre côté, les ingénieurs allogènes modifient l'environnement en altérant la structure de celui-ci.

**Ex 1 :** Les termites, les fourmis et les vers de terre creusent et mélangent les sols, modifient leur composition organique et minérale, ainsi que le cycle des éléments nutritifs et le drainage.

**Ex 2 :** Les barrages de castor jouent un rôle important dans le fonctionnement des écosystèmes associés ;

- Limite l'érosion des berges en réduisant la puissance du courant.
- Favorise l'accumulation de sédiments - Entretien les ripisylves.
- Augmente la productivité.

- Amélioration de la qualité de l'eau.
- Source d'habitat pour de nombreuses espèces.

Donc protéger ces animaux ne signifie donc pas juste protéger une seule espèce, mais bien tout un écosystème, et par là même la biodiversité des milieux.

## 5.7. Rôle de la biodiversité dans les cycles biogéochimiques

### 5.7.1. Quelques cycles biogéochimiques

Ce sont des cycles qui participent dans la vie, la géologie et en chimie (H<sub>2</sub>O, C, O, N, S, P). Notez bien qu'il existe des cycles ouverts et des cycles fermés (Pédro, 2007).

**Définition 1:** Un cycle biogéochimique correspond à un ensemble de processus grâce auxquels un élément passe d'un milieu à un autre, puis retourne dans son milieu original, en suivant une boucle de recyclage infinie.

**Définition 2:** En écologie et dans le domaine des sciences de la Terre, un cycle biogéochimique représente le processus par lequel un élément ou un composé chimique est continuellement transporté et transformé de manière cyclique entre les principaux réservoirs que sont la géosphère (la Terre solide), l'atmosphère (l'air), l'hydrosphère (l'eau), et la biosphère (les organismes vivants).

Ces cycles entraînent souvent la conversion d'éléments organiques en éléments minéraux au sein de la biosphère. Les interactions complexes entre ces différents cycles confèrent à la biosphère une capacité de régulation appelée homéostasie. Cette régulation est essentielle pour la durabilité des écosystèmes et garantit leur stabilité, du moins en dehors des perturbations causées par les activités humaines et les événements géoclimatiques exceptionnels.

Les organismes vivants, pour leur survie, dépendent de l'apport constant de certains éléments essentiels tels que le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le phosphore et le soufre. Ces éléments se trouvent dans diverses réserves, notamment dans le sol, l'atmosphère, l'eau et les tissus vivants. Ils circulent continuellement d'un milieu à l'autre, subissant des transformations tout au long de leur voyage. Ce processus de circulation constante est ce que l'on appelle un cycle biogéochimique (Pédro, 2007).

Tous les cycles biogéochimiques, quels que soient les éléments considérés, impliquent des processus biologiques, chimiques et géologiques. Les processus biologiques, tels que la respiration ou la digestion, ainsi que les processus chimiques, comme la combustion ou les réactions de synthèse, se produisent rapidement, en quelques heures ou jours. En revanche, les processus géologiques, tels que l'érosion ou la sédimentation, se déroulent sur des échelles de

temps beaucoup plus longues, allant de plusieurs mois à plusieurs années.

La circulation de chacun de ces éléments peut être expliquée au moyen d'un cycle biogéochimique spécifique.

Les liens suivants décrivent trois de ces cycles:

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

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

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

#### **a. Le cycle du carbone**

Selon Pédro (2007), le cycle du carbone est un processus biogéochimique qui englobe tous les échanges de carbone sur notre planète. Le carbone, élément essentiel à la vie, existe sous deux formes principales dans la nature. Tout d'abord, il compose les molécules complexes (protéines, lipides, glucides) qui servent à construire les tissus des organismes vivants, ce qui constitue le carbone organique. Ensuite, on trouve le carbone inorganique, qui se présente sous forme de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et de méthane (CH<sub>4</sub>), notamment, deux gaz à effet de serre ayant un impact significatif sur le climat planétaire.

Un échange continu de carbone se produit entre l'hydrosphère (les océans et autres réservoirs d'eau), la lithosphère (la croûte terrestre et les roches) et la biosphère (les êtres vivants et leurs habitats), ainsi que l'atmosphère. Cependant, la majeure partie du cycle à court terme se déroule entre l'atmosphère, les couches superficielles du sol et des océans, et la biosphère. Deux grands réservoirs de carbone, la lithosphère et l'hydrosphère, emprisonnent le carbone pour de longues périodes grâce à la formation de sédiments, à la présence dans les roches et à l'absorption par les océans.

Le recyclage chimique du carbone revêt une importance cruciale pour maintenir l'équilibre de notre planète. En effet, ce cycle influence directement la productivité biologique et le climat. Parmi les processus qui contribuent au recyclage chimique du carbone, certains



sont très rapides, impliquant des réactions biochimiques, tandis que d'autres, de nature géochimique, se déroulent sur des échelles de temps beaucoup plus longues, s'étendant sur plusieurs centaines d'années.

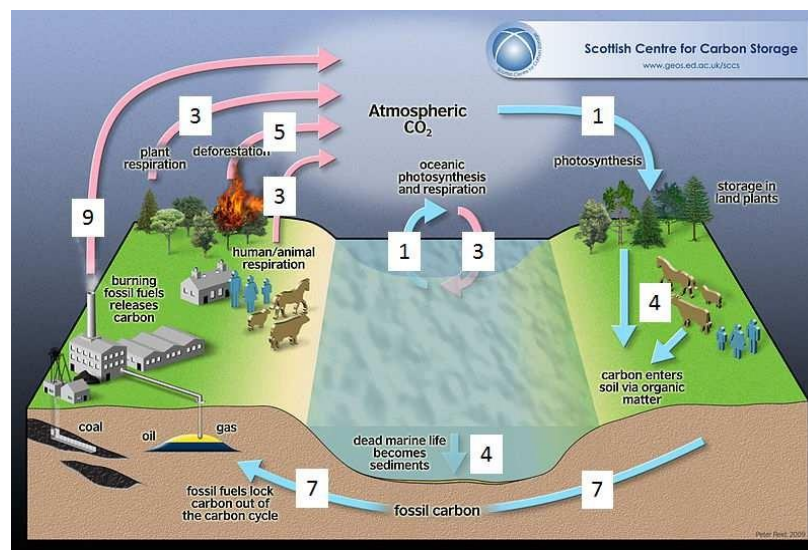
- **Les principaux processus biochimiques** se déroulant lors du cycle du carbone sont (Fig.8):

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

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

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

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



**Figure 8 :** Les processus biochimiques du cycle du carbone

<https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/le-cycle-du-carbone-s1335>

- **Les processus géochimiques du cycle du carbone (Pédro, 2007)**

### 1. La photosynthèse

La photosynthèse se déroule autant en milieu terrestre qu'en milieu aquatique. Par ce processus, les végétaux emmagasinent du carbone d'origine atmosphérique ou dissous dans l'eau. Ils utilisent l'énergie solaire pour transformer le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) en glucose en produisant du dioxygène. Le glucose servira ainsi de matière organique servant à la

fabrication des tissus végétaux.

## **2. La consommation**

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

## **3. La respiration**

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

## **4. La décomposition et la fermentation**

La portion du carbone qui n'est pas relâchée par la respiration s'élimine dans les déchets végétaux et animaux (urine, selles, organismes morts, etc.). Dans les sols et les sédiments des lacs et des océans, ces déchets sont décomposés par des microorganismes. Selon la présence ou l'absence de dioxygène, les décomposeurs effectueront la décomposition ou la fermentation de la matière organique. Ces processus libèrent du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et du méthane ( $\text{CH}_4$ ) tout en permettant de transformer la matière organique en matière inorganique.

## **5. La déforestation et les feux de forêt**

Sous l'action de la combustion, le carbone contenu dans les troncs et les feuilles des arbres se transforme en dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). La déforestation, quant à elle, diminue le nombre d'arbres en présence pouvant effectuer la photosynthèse. Habituellement, en l'absence de ces deux phénomènes, la quantité de carbone fixée à l'échelle planétaire par les organismes qui réalisent la photosynthèse s'équilibre avec celle qui est libérée par la respiration et la décomposition des autres organismes. Toutefois, en présence de ces deux phénomènes, davantage de dioxyde de carbone sera relâché dans l'atmosphère.

## **6. La dissolution et la fixation en carbonate de calcium**

La dissolution du carbone se déroule dans l'hydrosphère. Une grande partie du dioxyde de carbone atmosphérique est dissous dans les océans. En effet, les océans sont des puits à carbone, car ils prélèvent globalement plus de carbone à l'atmosphère qu'ils ne lui en redonnent. Une partie du dioxyde de carbone dissous dans l'eau réagit avec les molécules

d'eau, puis avec du calcium pour devenir du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). On retrouve le carbonate de calcium dans la composition des coquilles et squelettes des organismes marins.

### **7. La sédimentation et la fossilisation**

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

### **8. Le volcanisme**

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

### **9. La combustion de combustibles fossiles**

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

#### **• Les facteurs qui peuvent modifier le cycle du carbone**

Le cycle du carbone présente des phases géologiques, telles que la subduction et la formation de combustibles fossiles, qui se déroulent sur des millions d'années. En revanche, les phases biologiques du cycle du carbone, comme la photosynthèse, la respiration et la décomposition, s'étalent sur des périodes allant de quelques jours à des milliers d'années.

Avant l'ère industrielle, c'est-à-dire jusqu'à la fin du XIXe siècle, le cycle du carbone impliquait principalement l'atmosphère, les océans et la biomasse terrestre. Les combustibles fossiles ne faisaient pas partie intégrante de ce cycle, et il était en équilibre. Cependant, l'intervention humaine, par la déforestation et l'utilisation des combustibles fossiles, a perturbé cet équilibre. L'utilisation excessive et rapide des combustibles fossiles ne laisse pas suffisamment de temps pour leur régénération. La combustion de ces matières fossiles entraîne un surplus de carbone qui est libéré dans l'atmosphère et les océans.

On estime que la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère terrestre a augmenté d'environ 30 % depuis le milieu du XIXe siècle. Les activités humaines émettent désormais plus de carbone que les océans et les forêts ne peuvent en absorber, perturbant ainsi le cycle naturel du carbone. Ce déséquilibre est la principale cause du renforcement de l'effet de serre, ce qui peut entraîner d'importants changements climatiques.

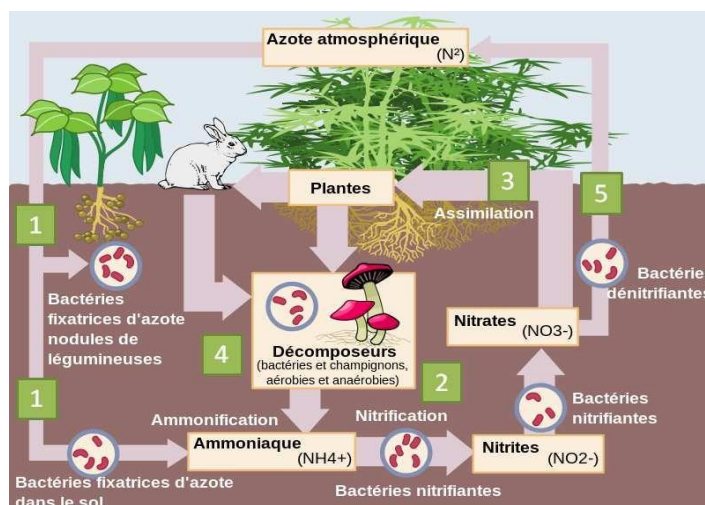
## b. Le cycle de l'azote

Le **cycle de l'azote** est un cycle biogéochimique qui correspond à l'ensemble des échanges d'azote sur la planète. Le diazote est le plus abondant des gaz atmosphériques (l'air contient 78% de ce gaz). L'azote est essentiel au fonctionnement des êtres vivants. Il sert notamment à fabriquer des protéines et à produire les bases azotées présentes dans l'ADN. Il ne peut toutefois pas être assimilé directement sous cette forme par la majorité des vivants. Ce sont des bactéries qui transforment l'azote de l'atmosphère en une forme assimilable par les autres organismes vivants. C'est grâce à son cycle biogéochimique que l'azote peut passer d'une forme à une autre (Boulaine, 1996).

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

**Les principaux processus** qui se déroulent lors du cycle de l'azote sont les suivants (**Fig. 9**):

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



**Figure 9** : Les processus du cycle de l'azote

([https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d3/Cycle\\_azote\\_fr.svg/440px-Cycle\\_azote\\_fr.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d3/Cycle_azote_fr.svg/440px-Cycle_azote_fr.svg.png))

### 1. La fixation de l'azote

Certaines bactéries, vivant dans le sol ou dans l'eau, captent l'azote atmosphérique et le transforment en azote utilisable par les plantes et les animaux, soit en ammoniac ( $\text{NH}_3$ ). Une portion de l'ammoniac est utilisée par les végétaux et les animaux, alors qu'une autre portion réagit avec de l'hydrogène pour former de l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Parmi les bactéries capables de réaliser la fixation de l'azote, on retrouve des cyanobactéries et certaines bactéries, comme celles du genre *Rhizobium*, vivant en symbiose avec des plantes (entre autres des légumineuses).

### 2. La nitrification

Des bactéries oxydent l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) pour former des nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) et d'autres bactéries oxydent les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) pour former des nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ). Ce sont deux réactions d'oxydation.

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

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

### 4. La décomposition des déchets

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

### 5. La dénitrification

Les bactéries dites dénitrifiantes transforment les nitrates en diazote. Le diazote retourne alors dans l'atmosphère. Cette réaction chimique produit aussi du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et de l'oxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

#### • Les facteurs qui peuvent modifier le cycle de l'azote

Parmi les facteurs naturels qui peuvent modifier le cycle de l'azote, on retrouve, entre autres, la température, le taux d'humidité et le pH. Cependant, avec les explications données ci-dessus, on comprendra que l'activité humaine est malheureusement le facteur qui a le plus d'impact sur la modification du cycle de l'azote. Les engrais que l'on étend sont riches en ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), en ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) et en nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ). Par le lessivage,

ce surplus de composés azotés se retrouve dans les cours d'eau.

L'utilisation des combustibles fossiles dans les moteurs et les centrales thermiques transforment l'azote en oxyde d'azote. La dénitrification est alors augmentée. Or, la dénitrification émet aussi dans l'atmosphère une faible quantité d'oxyde d'azote (N<sub>2</sub>O). L'oxyde d'azote est un gaz à effet de serre qui contribue à détruire la couche d'ozone dans la stratosphère.

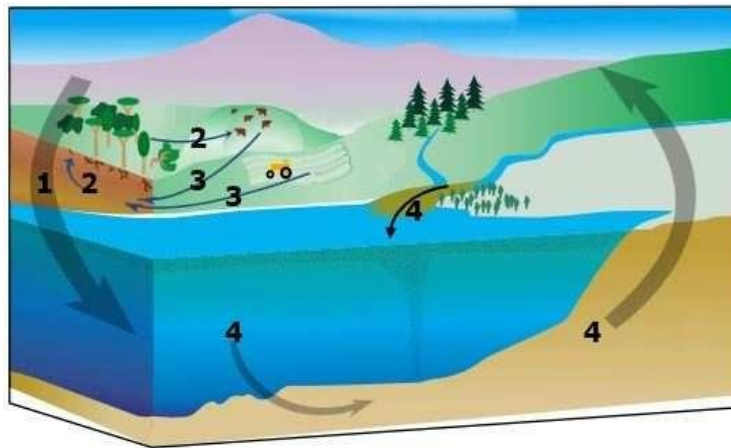
### c. Le cycle du phosphore

Le cycle du phosphore est un cycle biogéochimique qui englobe tous les échanges de phosphore qui se produisent sur notre planète. Le phosphore est un élément essentiel à la vie, jouant un rôle crucial dans la composition de l'ADN, la formation des dents, des os et des coquilles, entre autres fonctions vitales. Le phosphore est en perpétuel échange entre la lithosphère (la couche solide extérieure de la Terre), l'hydrosphère (les réservoirs d'eau sur Terre, comme les océans et les lacs) et les organismes vivants.

Contrairement aux cycles du carbone et de l'azote, le cycle du phosphore est essentiellement un cycle sédimentaire. Cela signifie qu'il n'implique que très peu de composants gazeux et qu'il ne comporte pas de processus atmosphériques significatifs. La majeure partie du phosphore provient de l'érosion des roches sédimentaires, qui libère de petites quantités de phosphates sous forme dissoute. Ces phosphates sont directement assimilables par les plantes et constituent une source vitale de phosphore pour les êtres vivants (Némery and Garnier. 2007).

- **Les principaux processus qui se déroulent lors du cycle du phosphore(Fig. 10) sont les suivants (Pédro, 2007)**

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



**Figure 10** : Les processus du cycle du phosphore  
 ([https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/56/Phosphorus\\_cycle.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/56/Phosphorus_cycle.png))

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

### **2. L'absorption par les êtres vivants**

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

### **3. La décomposition des déchets**

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

### **4. La prolifération du plancton et la sédimentation**

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

### **5. Les facteurs qui peuvent modifier le cycle du phosphore**

Le cycle naturel du phosphore est déstabilisé par les activités humaines, principalement en raison d'apports supplémentaires en phosphore. Les activités humaines telles que l'épandage de grandes quantités d'engrais riches en phosphates sur les terres agricoles, le

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

#### **d. Le cycle de l'eau**

L'eau qui existe sur Terre aujourd'hui est la même que celle présente depuis la formation de la planète il y a environ 4 milliards d'années. Grâce à un processus naturel constant, l'eau se renouvelle continuellement, ce qui permet aux êtres vivants d'exister et de prospérer. Ce processus est connu sous le nom de cycle de l'eau, ou cycle hydrologique, et il représente les flux d'eau sous forme liquide, solide ou gazeuse entre différents réservoirs d'eau sur Terre, tels que les océans, l'atmosphère, les lacs, les rivières, les nappes phréatiques et les glaciers. Le soleil joue un rôle central dans ce cycle, car c'est l'énergie solaire qui stimule les transformations de l'eau, telles que la formation de glace, la fonte, et l'évaporation, qui engendrent les étapes suivantes du cycle (Boulaine, 1996).

Le cycle de l'eau est un élément essentiel qui maintient l'eau disponible comme une ressource vitale pour tous les êtres vivants. Ce cycle se déroule entre le ciel et la Terre en suivant quatre étapes clés : l'évaporation, la condensation, les précipitations, et le ruissellement (Andréassian et Lerat, 2002) ;

#### **1. L'évaporation et la transpiration des végétaux**

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

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

#### **a. La condensation**

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



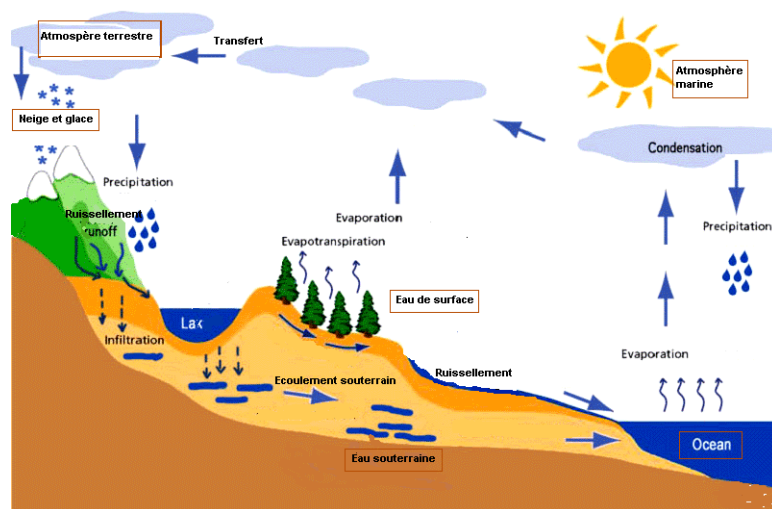
## b. Les précipitations

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

## c. Le ruissellement ou l'infiltration

Lorsque l'eau de pluie n'est pas absorbée par le sol, elle s'écoule le long des pentes, se dirigeant vers les rivières, les fleuves et les lacs, formant ainsi ce que l'on appelle les « cours d'eau de drainage ». Cependant, lorsque cette eau de pluie rencontre un sol imperméable, elle ne peut pas pénétrer et s'infiltre alors dans les sols perméables. Cette infiltration peut conduire à la formation de poches souterraines, parfois appelées grottes, qui agissent comme des réservoirs d'eau souterraine. L'eau contenue dans ces réservoirs, également connue sous le nom de nappe d'eau ou nappe phréatique, peut parfois trouver un chemin naturel pour remonter à la surface. L'endroit où l'eau jaillit hors du sol est appelé une source. Dans certains cas, les nappes phréatiques découvertes peuvent être exploitées par l'homme comme sources d'eau potable.

Il est important de noter que moins de la moitié des précipitations parvient à recharger les nappes phréatiques, tandis que le reste s'évapore ou suit d'autres trajectoires.



**Figure 11 : Cycle de l'eau**

<https://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/hydro/cycleau/modeliser>

### 5.7.2. Rôle de la biodiversité

La disponibilité des éléments nutritifs joue un rôle essentiel dans la productivité des écosystèmes, et cette dynamique des nutriments est principalement entretenue par les organismes vivants. Pendant longtemps, les géochimistes ont sous-estimé ce rôle, et il reste encore de nombreux aspects complexes à découvrir. De nombreuses fonctions critiques, telles

que la nitrification et la dénitrification, la fixation de l'azote, la méthanogenèse et la dépollution, dépendent étroitement de cette dynamique. Ces cycles nutritifs sont parmi les plus cruciaux pour garantir la continuité et l'équilibre des écosystèmes Gravel et al., 2010).

#### **a. La fixation biologique de l'azote**

L'azote est l'un des éléments les plus importants pour la croissance des plantes, juste après le carbone. Cependant, la concentration des formes azotées assimilables par les plantes, telles que l'ammonium, les nitrates et les composés organiques simples, est souvent insuffisante dans le sol ou dans l'eau pour soutenir la croissance végétale. Le complément d'azote provient de la fixation biologique de l'azote moléculaire ou diazote ( $N_2$ ), qui constitue une grande partie de l'atmosphère. Le diazote est un gaz chimiquement inerte qui ne peut être utilisé que par certains micro-organismes procaryotes appelés fixateurs d'azote. La fixation biologique de l'azote est donc le principal mécanisme permettant d'introduire l'azote dans la biosphère, avec environ 175 millions de tonnes d'azote atmosphérique fixées chaque année par les micro-organismes. En comparaison, la quantité d'engrais azotés utilisée en agriculture s'élève à environ 40 millions de tonnes par an.

En milieu marin, seules les cyanobactéries ont la capacité d'utiliser le diazote pour répondre à leurs besoins métaboliques.

Sur terre, il existe deux groupes principaux de bactéries fixatrices d'azote associées aux plantes supérieures :

Le vaste groupe des *Rhizobium*, qui sont associés aux légumineuses, notamment les familles des Papilionacées, des Mimosacées et des Césalpiniciacées.

#### **b. Minéralisation de la matière organique**

Bien que l'énergie solaire soit disponible de manière continue à la surface de la Terre, il en va différemment pour les éléments minéraux. La viabilité de la vie dépend donc du recyclage des éléments chimiques contenus dans les organismes vivants une fois qu'ils décèdent. Les procaryotes jouent un rôle vital dans les cycles biogéochimiques en décomposant la matière organique détritique, libérant ainsi les éléments inorganiques qui seront utilisés pour la synthèse de nouvelles molécules organiques. En l'absence de ces décomposeurs, des éléments essentiels à la vie tels que le carbone, l'azote et d'autres resteraient piégés dans la matière organique en décomposition.

### **c. Stockage à long terme des éléments minéraux**

Les cycles biogéochimiques faisant intervenir les organismes vivants conduisent également à l'accumulation de formations sédimentaires importantes dont une conséquence est le stockage à long terme de certains éléments minéraux qui échappent pour un temps souvent fort long aux cycles biogéochimiques.

Les différentes formes de vie sur la terre sont influencées par les technologies développées et la mondialisation de l'économie dues aux activités des êtres humains.

D'une manière générale, une espèce a une durée de vie limitée. Au cours des temps géologiques, et avec l'évolution des conditions de milieu, de nombreuses espèces ont disparu et de nouvelles ont vu le jour. Les disparitions d'espèces sont progressives ou, au contraire, brutales si une modification majeure du milieu se produit. Depuis le développement des activités humaines et en raison des modifications de milieu qui en ont résulté et en particulier la réduction de la couverture forestière, la disparition des espèces s'est considérablement accélérée.

## II. Structure, fonctionnement et évolution des écosystèmes aquatiques

### 1. Ecosystème d'eau douce (Ecosystème limnique)

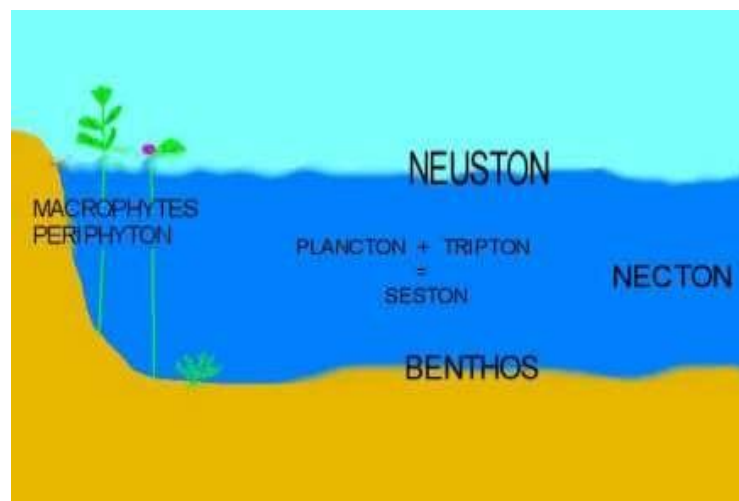
#### A. Les conditions du milieu liquide

Selon Bartout et Touchart (2017), les propriétés physicochimiques des écosystèmes aquatiques sont fort différentes de celles du milieu terrestre ; La densité de l'eau est 775 fois plus grande que celle de l'air. Pratiquement tous les bioéléments connus existent dans les eaux mais N et P, en concentration très faible, sont limitant (Sédimentation de N et P à la profondeur).

Le pH est important, il est stable dans les océans ( $\pm 8$ ), et varie de 3 à 10 dans les eaux douces. La consommation de l'O<sub>2</sub> par la matière organique en décomposition des végétaux morts peut mener à l'asphyxie de la faune dans les écosystèmes fermés (lacs) (Eutrophisation).

#### B. La distribution des organismes

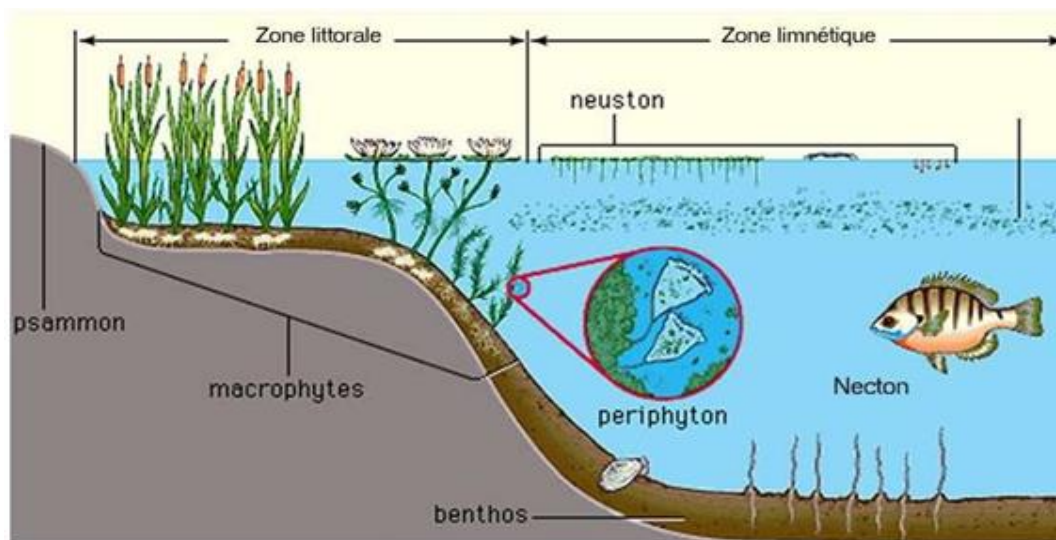
- **La vie pélagique** (nageante ou flottante) comporte les communautés suivantes (**Fig. 12**):
  - **Necton** : animaux nageant (Poissons, céphalopodes, Décapodes, Mammifères);
  - **Neuston** : Organismes nageant dans le microclimat de l'interface eau-air ;
  - **Seston** : Ensemble des particules et organismes flottants dans l'eau ; se subdivise en :
    - **Plancton** : organismes microscopiques : nanoplancton, phytoplancton, bactérioplancton, zooplancton ;
    - **Tripton** : débris d'origine organique ;
  - **Pleuston** : organismes de surface poussés par le vent.



**Figure 12** : Composition de la biocénose d'un lac  
([http://jacquet.stephan.free.fr/Faune\\_Flore\\_lacs\\_alpins.pdf](http://jacquet.stephan.free.fr/Faune_Flore_lacs_alpins.pdf))

• **La vie benthique** est liée au fond de l'eau : formes fixées, mobiles ou nageantes (**Fig. 13**); phytobenthos, bactériobenthos, zoobenthos, poissons benthivores. D'une manière plus spécifique, on peut classer les organismes du benthos en fonction de leur inféodation (Comlan, 2014):

- **Rhizomenon** : plantes aquatiques fixées par racines ;
- **Biotecton** : communautés recouvrant le substrat solide tel que pierres, détritiques ;
- **Épiphyton** : communautés fixées sur plantes aquatiques ;
- **Psammon** : regroupe les espèces animales et végétales suffisamment petites pour vivre dans l'eau des espaces interstitiels des sédiments ou des sables du lit des rivières, du fond des étangs ou des lacs, des plages et des fonds littoraux.



**Figure 13** : Zonation spatiale d'un lac profond (Comlan, 2014).

## 2. Ecosystèmes aquatiques continentaux

Ce sont des écosystèmes de terre : écosystème limnique, désignant l'ensemble de réseaux continentaux courants, lacustres ou stagnants (Lévêque, 2001), ils sont subdivisés en :

### 2.1. Ecosystème lentique

Concerne les eaux continentales à renouvellement d'eau lent (lacs, étangs, marées), ils sont caractérisés par une richesse en plancton et une pauvreté en oxygène, vulnérable à la pollution par la matière organique (eutrophisation) (**Fig. 14**).

- A. Structure selon les propriétés physicochimiques** : sont subdivisés en quatre régions distinctes ; il y a :
- **Zone littorale**, se trouve du part et d'autre de la pièce d'eau ;
  - **Zone limnique**, correspond à la couche superficielle où la photosynthèse est supérieure à la respiration des autotrophes (colonisation par phytoplancton : Diatomées, Cyanobactéries, et zooplancton) ;

- **Zone profonde**, corresponde à la zone où la photosynthèse est absente, zone sombre et obscure ;
- **Zone benthique**, corresponde au fond de la pièce d'eau.

## **B. Les organismes limniques (structure trophique)**

### **i. Les producteurs**

- **En zone littorale**, sont représentés en végétaux supérieurs (macrophytes émergentes, fragmites, etc... ;
- **En zone limnique**, la production primaire est assurée par le phytoplancton exp : diatomées et par les algues filamenteuses.

### **ii. Les consommateurs** : les consommateurs de la biocénose benthique appartiennent à trois groupes distincts :

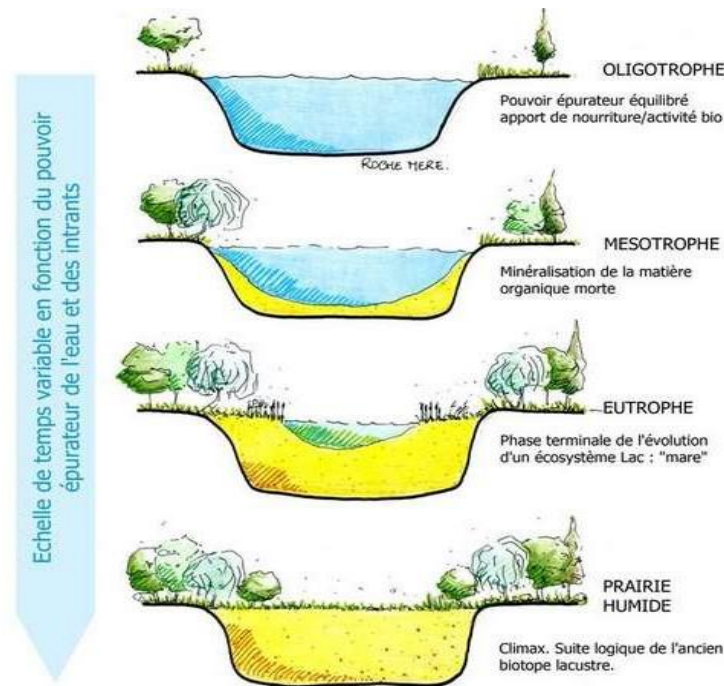
- **Zooplancton**, est constituée par des microcrustacées et autres ;
- **Necton**, représenté par les insectes, les amphibiens et les poissons ;
- **Neuston**, représenté par certains insectes exp : coléoptères

### **iii. Les décomposeurs** : appelés benthos qui désigne une biocénose particulière constituée en détritux ou en décomposeurs, elle est constituée les nombreux saprophages, microphage, etc...

Les groupes dominants sont les nématodes et les protozoaires.

## **C. Classification des lacs** : On à 3 grandes catégories selon la richesse en matière organique.

- **Lacs oligotrophes**, Ce sont des lacs ayant des eaux très pures une grande transparence, leur productivité et leur biomasse est très faible ;
- **Lacs mésotrophes**, moyennement pure, productivité moyenne ;
- **Lacs eutrophes**, lac riche en éléments nutritifs, sont trop productif et ont une bonne biomasse.



**Figure 14 :** Evolution naturelle d'un écosystème lenticque

([https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ0dL403Nxq\\_yWQCRnmLhjZOpj1-3IyJ825mT7B0kcj&s](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ0dL403Nxq_yWQCRnmLhjZOpj1-3IyJ825mT7B0kcj&s))

## 2.2. Ecosystème lotique

Ce sont des écosystèmes aquatiques continentaux où le renouvellement de l'eau est rapide, ils ont une bonne oxygénation pauvre en matières organiques exp : oued, rivière, fleuve (**Fig. 15**). La structure des écosystèmes lotiques comporte 4 régions distinctes et d'altitude décroissante (de l'amont vers l'aval) (Kherief Nacereddine, 2020) :

- 1) **Crénon**, Correspond à la région la plus élevée où se trouvent les sources et leur émissaire il s'agit de biotope à caractère (torrentiel) (eau très rapide), souvent située dans les zones montagneuses.
- 2) **Rhitron**, constitue la partie supérieure des coins d'eau à forte pente et rapide, eau bien oxygénée.
- 3) **Potamon**, zone inférieure, à faible pente et courant lent.
- 4) **Estuaire**, est la dernière région des écosystèmes lotiques c'est une zone de mélange des eaux fluviales et marine, elle présente une augmentation graduelle de la salinité vers l'aval et une turbidité importante des eaux chargés des sédiments possédant une grande productivité biologique par la suite de l'apport en éléments nutritifs parvenant du lessivage et de l'érosion des parties supérieurs du bassin versant.



Les écosystèmes lotiques : ce qu'ils sont ...  
oceanium.org



Principes lentiques pour mare | Milieux natur...  
humanite-biodiversite.fr

**Figure 15 :** Ecosystèmes lotiques et lentiques

### 3. Ecosystème Océanique

En géographie, un océan est souvent décrit comme une vaste étendue d'eau salée, bien que ce soit plus précisément un volume d'eau constamment renouvelé par les courants marins. Environ 70,7 % de la surface de la Terre est couverte par l'océan mondial (Kherief Nacereddine. 2020), qui est généralement divisé en cinq grands océans, ainsi qu'en plusieurs dizaines de mers (Tableau 1).

L'océan mondial joue un rôle essentiel en fournissant plus de 60 % des services écosystémiques nécessaires à notre existence, notamment en produisant la majeure partie de l'oxygène que nous respirons.

Chaque océan est lui-même subdivisé en mers, golfes, baies, détroits, etc. Par exemple, le Pacifique et l'Atlantique sont divisés en zones nord et sud autour de l'équateur. Il existe également des étendues d'eau salée à l'intérieur des terres, comme la mer Caspienne, la mer d'Aral, le Grand lac salé, ou encore la mer Morte (Tableau 2). Bien que certains d'entre eux soient qualifiés de « mers » en raison de leur taille ou de leur salinité, ce sont en réalité des lacs salés, car ils ne sont pas directement connectés à l'océan.

**Tableau 1 :** Caractéristiques des différents types d'océans (Kherief Nacereddine. 2020)

Nom	Superficie	% océans	Remarques
Océan Pacifique	165 250 000 km <sup>2</sup>	43,5	Il est le plus grand et le plus profond des océans puisqu'il recouvre 1/3 de la surface de la planète. Le volcanisme aérien ou sous-marin y est important dans sa partie centrale et occidentale. Il est très ouvert au sud vers l'océan Atlantique et quasiment fermé au nord par le détroit de Béring



Océan Atlantique	106 400 000 km <sup>2</sup>	28	Il est le 2 <sup>e</sup> océan par sa superficie. Il s'étend du nord au sud sur une largeur de 5 000 km de moyenne et présente peu de volcanisme. Le fond de cet océan est jeune et il reçoit une grande quantité d'eau douce avec les nombreux fleuves qui s'y jettent comme l'Amazone, le Congo, le Saint-Laurent, etc.
Océan Indien	73 556 000 km <sup>2</sup>	19,4	Il est situé au sud de l'Asie entre l'Afrique et l'Australie. Il n'est quasiment présent que dans l'hémisphère Sud.
Océan Antarctique	20 327 000 km <sup>2</sup>	5,4	Il entoure le continent antarctique et ses limites sont moins nettes que les autres océans.
Océan Arctique	14 090 000 km <sup>2</sup>	3,7	Il est centré sur le pôle Nord et est de petite taille et peu profond. Il est entouré de nombreuses terres et recouvert d'une épaisse couche de glace

**Tableau 2 :** Les principaux constituants de l'eau de mer (Lebrato and al., 2019)

Cations	g/l	Anions	g/l
Na	10,75	Cl	19,34
K	0,39	Br	0,06
Mg	1,29	F	0,001
Ca	0,41	Sulfat	2,70
Sr	0,01	Bicarbonate	0,14

L'océan mondial possède une remarquable constance dans ces facteurs physicochimiques, en particulier dans sa salinité et sa température.

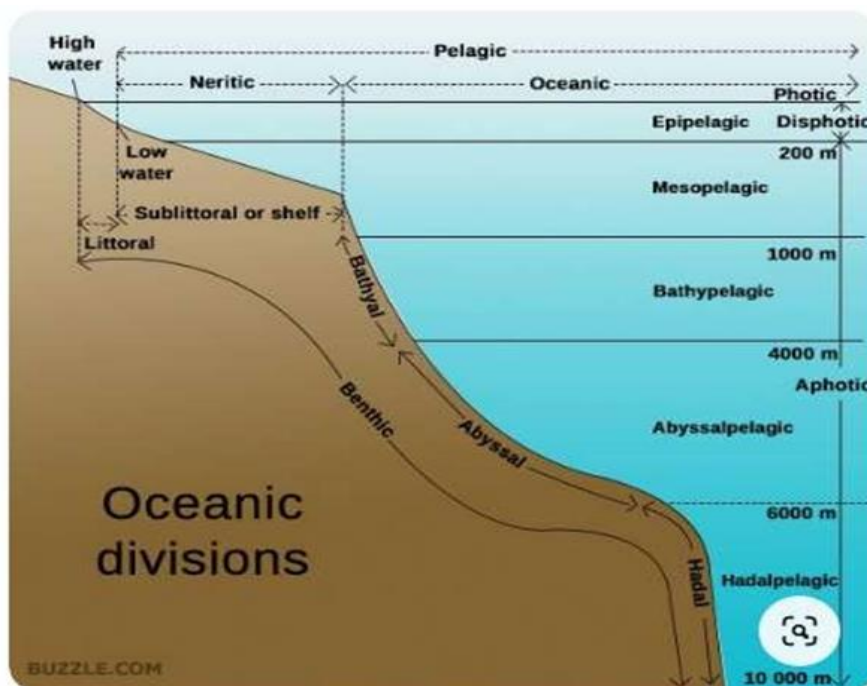
### a) Zonation horizontale et verticale

Les figures 16 et 17 montrent deux domaines :

- 3.1. **Domaine pélagique** : Représente la zone de pleine eau, elle-même divisée en plusieurs sous-unités correspond à l'eau libre est subdivisé en fonction de la profondeur en zone horizontale. Représenté par : Le plateau continental, zone bathyale, zone abyssale et zone hadale.
- 3.2. **Domaine benthique** : se définit comme le domaine où les organismes sont plus où moins liés au sédiment. Correspond au fond de la pièce d'eau subdivisé verticalement en étage Représenté par deux provinces :
  - 3.2.1. **Province néritique** ; correspondant à la zone d'eau peu profond et en limite de plateau continental (200m). abrite les 2/3 des espèces connues des poissons, riche en profondeur (phytoplancton).

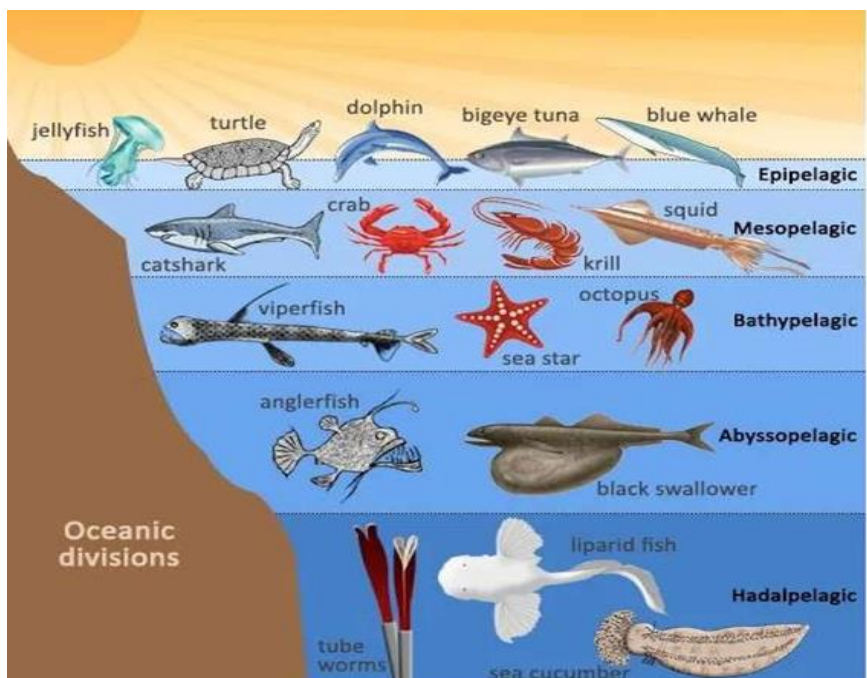
3.2.2. **Province océanique** ; s'étend au-delà de la néritique et représente les eaux du grand large.

**Remarque** : il est évident que pour chaque biotope, il existe une biocénose donnée, ainsi la faune épipélagique comporte plusieurs milliers de poissons. **exp.** balein, thon...etc.



**Figure 16** : Zonation horizontale et verticale des océans

<http://www.buzzle.com/articles/understanding-the-ocean-ecosystem.html>



**Figure 17** : Biocénoses des stratifications océaniques

[https://lh5.googleusercontent.com/25094iBG3x\\_oXeB2GhE77ZM82LTY8FgRthPdGdf\\_KwtOtm25mVyUZsk7Bq89MdAUwXX1SmtQ\\_YI9F21fG7JyOLOP5Tqy40b\\_4U7Ka8SoLinfY-uviLmweoT\\_4gwgEiGR2eAtJjNG](https://lh5.googleusercontent.com/25094iBG3x_oXeB2GhE77ZM82LTY8FgRthPdGdf_KwtOtm25mVyUZsk7Bq89MdAUwXX1SmtQ_YI9F21fG7JyOLOP5Tqy40b_4U7Ka8SoLinfY-uviLmweoT_4gwgEiGR2eAtJjNG)

#### 4. Compartiments biologiques d'un écosystème aquatique

La préservation de la biodiversité est largement motivée par la nécessité de maintenir le fonctionnement des écosystèmes et les avantages qu'ils procurent à l'humanité. Le terme "fonctionnement" englobe les processus biologiques et physiques qui se déroulent au sein des écosystèmes, tels que le recyclage des éléments ou la production de biomasse. Les "services" désignent les multiples bénéfices que les populations humaines tirent des écosystèmes, parmi lesquels figurent la production alimentaire, la régulation des flux d'eau, la pollinisation, etc.

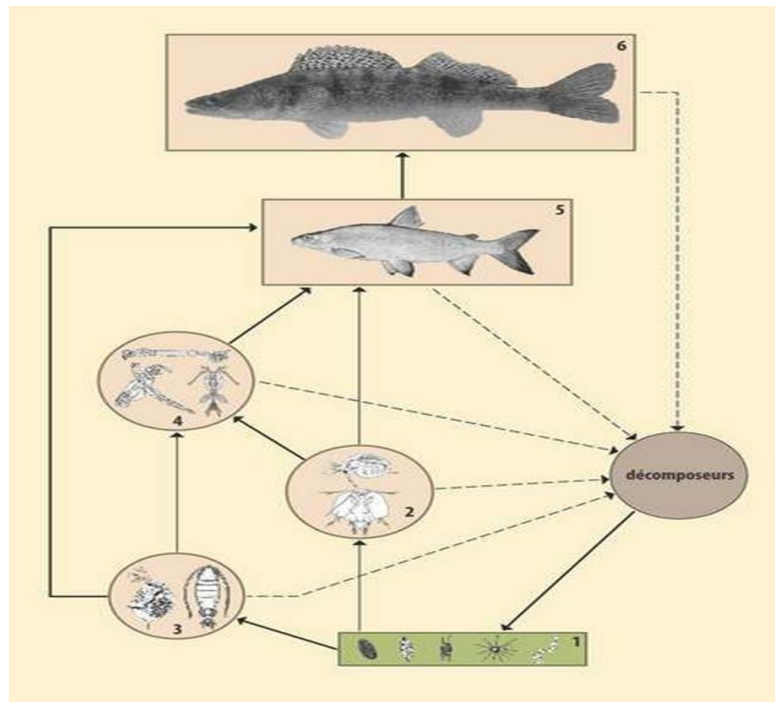
Un écosystème aquatique est en permanence producteur de matière vivante. Cette matière vivante se transforme progressivement en matière organique morte, qui à son tour subit une minéralisation, partielle ou totale, au fil du temps. L'écosystème aquatique peut être divisé en trois compartiments (Lacroix G et Danger M., 2008) (**Figure 18**).

**4.1. Les producteurs :** Ce sont principalement les organismes végétaux qui exploitent la lumière solaire comme source d'énergie pour créer les matières organiques nécessaires à leur croissance via le processus de photosynthèse. Les plantes aquatiques utilisent le dioxyde de carbone dissous dans l'eau ainsi que les nutriments dissous tels que l'azote, le phosphore et la silice, ainsi que divers autres minéraux, pour leur développement, tout en libérant de l'oxygène. Les principaux producteurs dans ce contexte sont les micro-organismes algues, également connus sous le nom de phytoplancton.

**4.2. Les consommateurs :** Il existe différents types de consommateurs dans les écosystèmes aquatiques. Certains sont des herbivores stricts, comme le zooplancton, ainsi que certaines espèces d'invertébrés et de poissons qui se nourrissent principalement d'algues et d'autres plantes aquatiques fixées au fond. D'autres espèces sont plus omnivores, se nourrissant d'une variété de végétaux, de zooplancton et d'invertébrés. Enfin, il y a des espèces strictement carnivores, comme certains gros poissons qui se nourrissent de proies plus petites, ainsi que certains oiseaux et petits mammifères qui chassent d'autres animaux. Tous ces animaux respirent en utilisant l'oxygène produit par les plantes aquatiques lors de la photosynthèse, et ils rejettent du dioxyde de carbone dans le processus.

**4.3. Les décomposeurs :** Les écosystèmes aquatiques abritent également une multitude de micro-organismes, tels que les bactéries aérobies et les champignons. Ces micro-organismes jouent un rôle essentiel en se nourrissant de toute la matière organique morte et biodégradable présente dans le milieu aquatique. Cette matière organique peut être issue des sécrétions des autres organismes, résulter de leur décomposition, ou provenir d'eaux de ruissellement, d'infiltrations dans les sols ou encore des eaux usées rejetées par les activités

humaines. Pour dégrader ces matières organiques, les décomposeurs utilisent l'oxygène produit par les plantes aquatiques au cours de la photosynthèse.



**Figure 18 :** Réseau trophique (d'après. Lacroix G et Danger M., 2008)

## 5. Importance du facteur hydrodynamique

Le milieu aquatique présente des singularités quant à la nature des facteurs écologiques qui le caractérisent. L'eau est un composé de densité et de viscosité relativement élevées. Elle présente une forte chaleur spécifique ce qui rend les biotopes aquatiques moins sensibles aux variations thermiques saisonnières. Enfin, elle possède la propriété de dissoudre aisément des quantités importantes de sels minéraux et de gaz (Lévêque, 1996).

- **La densité** de l'eau varie en fonction de la température et de la teneur en matières dissoutes, atteignant son maximum à environ 4°C. Cette variation de masse en relation avec la température est responsable de la stratification observée dans les lacs et les océans, où l'eau est plus dense en profondeur (à environ 4°C) et moins dense en surface (que ce soit des eaux chaudes ou très froides). La température de l'eau dépend de l'énergie lumineuse qu'elle reçoit, ce qui entraîne des différences de température en fonction de la position géographique sur la Terre. Seule la surface de l'eau est chauffée par les rayons lumineux, car ceux-ci sont rapidement absorbés même dans une eau parfaitement transparente. Ces variations de température ont des répercussions sur la vie aquatique, notamment sur la distribution verticale des algues dans la zone de balancement des marées. Chaque espèce d'algue occupe une position en fonction de sa capacité à capter la lumière disponible à une certaine profondeur.

La densité de l'eau est environ 800 fois plus élevée que celle de l'air, ce qui permet la flottaison d'organismes de grande taille. Les organismes aquatiques ont généralement une densité légèrement supérieure à celle de l'eau, mais ils ont développé des adaptations pour éviter de couler, comme la vessie natatoire chez les poissons et les flotteurs chez les algues et les méduses.

- **La viscosité** de l'eau facilite la flottabilité des organismes planctoniques de petite taille. Cependant, dans les eaux tropicales moins denses et moins visqueuses, certains organismes planctoniques développent des adaptations pour maintenir leur flottabilité, comme des soies.
- **Les courants** jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Ils contribuent à réguler les températures et la distribution des nutriments lors des périodes de mélange des eaux, comme dans les lacs, ainsi que le long des grands courants océaniques. Les courants contrôlent également le cycle de vie de nombreux organismes, en assurant la dispersion des larves planctoniques qui se fixent en tant qu'adultes sur des substrats rocheux. Cette dispersion favorise le développement d'une variété d'organismes sessiles, car le milieu est constamment renouvelé et la nourriture peut être apportée par les courants. En eau douce, certaines espèces rhéophiles sont particulièrement adaptées aux forts courants, comme c'est le cas des trichoptères, qui tissent des toiles pour piéger les particules de nourriture.

## 6. Importance des facteurs chimiques

L'eau a la capacité de dissoudre d'importantes quantités de gaz, en particulier l'oxygène et le dioxyde de carbone. Le gaz carbonique se dissout facilement dans l'eau, atteignant environ 2000 ppm à 25 °C et 5000 ppm à 0°C. Toutefois, il ne représente qu'environ 1% du volume total de gaz carbonique dissous dans l'eau, le reste se trouvant sous forme ionique. En conséquence, l'eau contient environ 150 fois plus de gaz carbonique que l'atmosphère. La teneur en gaz carbonique joue un rôle important dans l'ajustement du pH, avec les ions carbonates et bicarbonates agissant comme tampons. Le pH des eaux marines varie généralement de 8 à 8,4 en surface et de 7,4 à 7,8 en profondeur. Dans les eaux continentales, le pH varie de 3 pour les cours d'eau et les lacs sur substrat acide à 10 sur les substrats calcaires (Lévêque, 1996).

Contrairement au gaz carbonique, l'oxygène ne se trouve jamais en fortes concentrations dans l'eau en raison de sa faible solubilité. Les concentrations maximales d'oxygène dans l'eau sont d'environ 10 cm<sup>3</sup> par litre. Ces concentrations sont encore plus faibles dans l'océan, car la solubilité de l'oxygène diminue avec l'augmentation de la température. Par conséquent, la concentration en oxygène est environ deux fois plus faible à 30°C qu'à 0°C. La quantité d'oxygène dissous dépend de la dissolution depuis l'atmosphère et de l'activité photosynthétique. Elle est plus élevée dans les milieux fortement agités, où l'agitation favorise la sursaturation en oxygène (Lévêque, 1996).

\* **La salinité totale** de l'eau varie considérablement, allant de très faibles concentrations dans les lacs et les cours d'eau situés sur des substrats granitiques à des concentrations élevées, atteignant parfois plus de 200 mg/l, dans les lagunes saumâtres et les lacs en voie d'assèchement. En moyenne, la salinité de l'eau de mer est d'environ 20 g/l, dont 80% sont constitués de chlorure de sodium.

\* **Les sels minéraux nutritifs**, en particulier les phosphates et les nitrates, sont généralement présents à de faibles concentrations dans les milieux aquatiques naturels. En milieu marin, la concentration en nitrate est généralement de quelques dizaines de mg d'azote par mètre cube, tandis que celle des phosphates est de quelques mg. Ces faibles concentrations en éléments nutritifs limitent la croissance des végétaux en milieu océanique.

## 7. Adaptation aux facteurs

La curabilité de l'environnement fait référence à la capacité de chaque organisation (généralement des espèces) à s'ajuster à un gradient quelconque de facteurs écologiques. Les populations ne réagissent pas de manière passive aux influences de l'environnement ; au contraire, elles montrent différents niveaux de plasticité écologique, ce qui leur permet de s'adapter aux variations temporelles et/ou spatiales des facteurs limitants présents dans leur milieu. Les espèces

peuvent réagir à ces variations à trois niveaux différents, et plus l'espèce est adaptée à son environnement, plus son degré d'adaptation sera prononcé (Chiras, 2001) ;

### **a. Acclimatation**

L'adaptation physiologique, également connue sous le nom d'acclimatation, représente la première manifestation de la plasticité écologique des espèces. Pour mieux comprendre ce concept, prenons deux exemples liés à la réponse des organismes à la température.

Chez les poissons, une variation de la température de l'eau sur plusieurs mois entraîne un phénomène d'acclimatation. Cela se traduit par un ajustement de l'ensemble de la plage de tolérance en fonction de la hausse ou de la baisse de la température de l'eau. L'acclimatation des poissons à des changements de température nécessite une période suffisamment longue pour permettre aux processus physiologiques de s'adapter, souvent à l'échelle d'une saison, par exemple.

L'acclimatation représente une réponse adaptative aux variations saisonnières de l'environnement. Ces variations se produisent relativement lentement, laissant ainsi aux organismes le temps nécessaire pour ajuster leur physiologie. Les réponses des animaux aux variations saisonnières de leur milieu peuvent se manifester au niveau physiologique, comportemental ou morphologique.

### **b. Accommodation**

Une étape ultérieure impliquant une adaptation plus prononcée des êtres vivants à un gradient de facteurs environnementaux. Les espèces végétales fournissent de nombreux exemples d'adaptations liées à leur port et à leur anatomie foliaire en réponse à leur environnement. Par exemple, la Sagittaire, une plante aquatique, peut présenter trois morphologies différentes en fonction de son milieu de vie. Si elle pousse complètement immergée, elle développe des feuilles immergées et flexibles. Dans un milieu émergé mais humide, elle adopte des feuilles lancéolées et développe un appareil racinaire important. En milieu peu profond, elle a un port intermédiaire. Il est important de noter qu'un même lot de graines peut donner naissance aux trois formes en fonction des conditions environnementales dans lesquelles la plante se développe.

L'accommodation se réfère à des modifications phénotypiques (expressions génétiques) résultant de l'influence des facteurs écologiques sur la croissance des organismes. Ces changements sont généralement peu réversibles au niveau de l'individu.

### **c. Apparition d'écotypes**

Les écotypes, en revanche, représentent la forme la plus avancée d'adaptation des populations d'une espèce donnée aux conditions écologiques locales. Contrairement à l'accommodation, les

écotypes sont une expression héritée de la plasticité écologique des espèces. Par exemple, une espèce de composée appelée *Achillea lanosa* présente une hauteur qui varie en fonction de l'altitude. Sa taille maximale est atteinte à une altitude d'environ 1000 mètres, puis diminue à mesure que l'on monte en altitude (jusqu'à 3500 mètres). Si différents écotypes sont placés dans le même jardin à 1000 mètres d'altitude, ils conserveront leur taille d'origine, correspondant à leur milieu d'origine. Dans le cas des écotypes, l'adaptation est inscrite dans les gènes de l'individu et ne peut pas être modifiée à court terme.



## 8. Structure des assemblages biologiques et perturbations

Les écosystèmes aquatiques englobent l'ensemble des parties de l'hydrosphère où la vie peut s'épanouir de manière durable. On peut les catégoriser en deux grandes divisions : les écosystèmes aquatiques marins et les écosystèmes aquatiques continentaux. Ces derniers ne doivent pas être confondus avec les écosystèmes d'eau douce, car les eaux continentales peuvent parfois avoir une salinité supérieure à celle de l'eau de mer, atteignant parfois 100 g/L, notamment dans certains lacs. La circulation continue de l'eau entre les écosystèmes continentaux et marins montre que l'hydrosystème de la planète forme un continuum, depuis les sources des rivières jusqu'au cœur des océans.

Au sein de ce continuum, la diversité des écosystèmes aquatiques repose sur divers paramètres physico-chimiques structurants qui façonnent leurs caractéristiques fonctionnelles. Ces paramètres incluent les mouvements et le renouvellement de l'eau, la profondeur, la distance par rapport aux substrats, les différentes interactions avec le fond et les frontières horizontales telles que les rives. De plus, ils sont influencés par des facteurs atmosphériques tels que la température, la pluviométrie et la lumière. Les hydrosystèmes ainsi que leurs communautés sont soumises à l'influence de ce système complexe de facteurs structurants (Barbault, 2000).

### 8.1. Les facteurs d'organisation horizontale

L'écoulement unidirectionnel de l'eau par gravité dans les rivières permet les transferts d'éléments minéraux et de matière organique de l'amont vers le système aval, transferts souvent indispensables au fonctionnement de ce dernier. De même, limitée par les masses continentales, la circulation océanique superficielle sous l'action des vents organise les écosystèmes marins et oriente qualitativement et quantitativement la structure des biocénoses.

### 8.2. Les facteurs d'organisation verticale

Les variations saisonnières des échanges d'eau et de substances dissoutes entre les couches d'eau de surface et les eaux souterraines, qui se produisent lors des périodes d'étiage et de crue, jouent un rôle majeur en permettant l'installation de communautés diversifiées dans des conditions temporaires défavorables. Les facteurs qui influent sur la structuration verticale sont d'une importance capitale pour le bon fonctionnement des masses d'eau. Selon la profondeur, ces échanges ont un impact significatif sur les interactions entre l'hydrosphère et l'atmosphère, notamment en ce qui concerne le réchauffement ou le refroidissement des masses d'eau, la formation de glaces de mer, l'évaporation de l'eau liquide, les précipitations, et bien d'autres processus.

L'importance relative de l'action de ces différents ensembles de facteurs spatiaux et temporels est à l'origine de la diversité structurelle et fonctionnelle observée dans les écosystèmes aquatiques, qu'ils se trouvent en milieu continental ou marin.

## 9. Boucle microbienne

Le milieu aquatique lacustre, présente des flux de matière et d'énergie ne s'organisent pas seulement selon la voie trophique linéaire classique basée sur l'assimilation photosynthétique (Phytoplancton → Zooplancton → Poissons) mais empruntent aussi la voie du réseau microbien formé des micro-organismes de très petite taille (pico- et nanoplancton) (Carpenter, 1998) pour former un véritable réseau trophique. La structure du réseau microbien dépend, d'une part, du type de milieux, et, d'autre part, des forçages environnementaux qui s'exercent sur ces milieux. En milieu aquatique, les domaines pélagique et benthique sont largement contrastés aussi bien dans les océans, que dans les lagunes ou dans les lacs. L'écosystème pélagique est très souvent sous l'influence de processus se déroulant dans les écosystèmes voisins (la lumière, la pluie, le vent, les apports du bassin versant, la remise en suspension des sédiments ou la remontée d'eau profonde, etc.

Les bactéries hétérotrophes tirent leur énergie de l'oxydation de la matière organique, et elles constituent une part significative de la biomasse totale du plancton. Leur importance relative augmente davantage dans les écosystèmes caractérisés par un faible apport en éléments nutritifs, appelés oligotrophes. En l'absence d'apports externes de matière organique, la production de biomasse bactérienne représente généralement environ 10 à 30 % de la production primaire totale dans ces écosystèmes. Le flux de matière à travers le compartiment bactérien, c'est-à-dire l'activité hétérotrophe totale des bactéries, constitue l'un des flux majeurs dans les écosystèmes aquatiques. Cependant, dans les écosystèmes recevant des apports extérieurs de matière organique, la production de biomasse bactérienne peut atteindre des niveaux comparables à la production primaire elle-même (Cain, Damman & Yoon, 2006).

Du fait de leur abondance et de leur rôle crucial dans les transferts de matière et les flux d'énergie, les micro-organismes jouent un rôle essentiel au sein des écosystèmes aquatiques (voir Figure 19). Il est important de noter que la compréhension des processus impliqués dans ces interactions ne se limite plus au schéma classique linéaire ; les processus sont en réalité plus complexes.

Dans ce contexte, tant le phytoplancton que le zooplancton libèrent de la matière organique dissoute dans l'eau par le biais de l'urine et des excréments. Cette matière organique dissoute est ensuite partiellement décomposée et assimilée par des bactéries organotrophes, qui se nourrissent de cette matière organique dissoute. Ces bactéries sont présentes dans le milieu aquatique à des

concentrations de l'ordre du millionième de bactéries par millilitre d'eau, et elles contribuent à la formation d'une biomasse bactérienne.

Le rôle des bactéries hétérotrophes dans les flux de matière organique au sein de la colonne d'eau peut être conceptualisé à travers le concept de la "boucle microbienne," qui s'intègre dans la chaîne trophique traditionnelle. Dans ce réseau, la matière organique dissoute produite par le phytoplancton (par le biais de l'excrétion et de l'activité du zooplancton qui le consomme, ainsi que par la fragmentation du phytoplancton et l'excrétion de pelotes fécales) est efficacement consommée par les bactéries hétérotrophes.

La biomasse bactérienne ainsi produite est ensuite consommée par le nanoplancton hétérotrophe, contribuant ainsi au recyclage des éléments minéraux libérés de la matière organique. Ces éléments minéraux peuvent ensuite être réutilisés dans la couche euphotique pour favoriser une production primaire supplémentaire, phénomène connu sous le nom de "régénération." Cependant, il convient de souligner que le rôle de ce processus de régénération peut varier considérablement en fonction de l'état trophique particulier de ces écosystèmes.

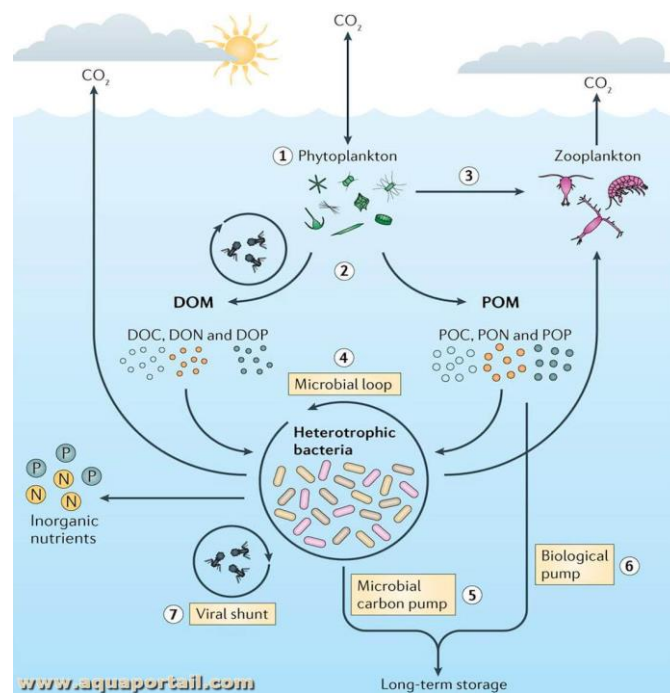


Figure 19 : Boucle microbienne

<https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/14639/boucle-microbienne>

### 9.1. Incidence des bactéries sur le fonctionnement des milieux oligotrophes

- L'activité bactérienne a un premier effet important, à savoir la production d'une biomasse supplémentaire qui peut être exploitée en plus de celle des producteurs primaires. Cette biomasse

bactérienne est générée à partir de matière organique, qu'elle soit sous forme particulaire ou dissoute, qui serait autrement exportée de la couche euphotique par des processus tels que la sédimentation ou la convection (Carlson et al., 1994). En exerçant leur activité dans la couche euphotique, les bactéries contribuent à limiter les sorties de matière organique. Par conséquent, elles jouent un rôle crucial dans la quantité de dioxyde de carbone, produit par la photosynthèse, qui sera stockée dans les couches profondes de l'océan.

- Un autre effet majeur du fonctionnement de la boucle microbienne est la régénération des éléments minéraux. Bien que les bactéries elles-mêmes aient généralement des rapports carbone/azote et carbone/phosphore plus bas que ceux des autres organismes planctoniques (Lee & Fuhrman, 1987), elles ne libèrent pas ces éléments de manière significative. Cependant, elles sont activement consommées par les protistes, ce qui contribue à la régénération des éléments nutritifs issus de la matière organique détritique lors de leur broutage. Cette régénération permet de recycler une partie des éléments nutritifs qui seraient autrement exportés vers les couches profondes sous forme d'organismes morts, de pelotes fécales ou de matière organique dissoute. Ainsi, cette régénération s'ajoute à la production "nouvelle," résultant de la diffusion des nutriments depuis les couches profondes, pour stimuler la productivité globale de l'écosystème aquatique.

## **9.2. Incidence des bactéries sur le fonctionnement des milieux eutrophes**

Dans les écosystèmes eutrophes, qui reçoivent généralement des apports extérieurs de diverses origines, qu'ils proviennent de processus naturels ou de l'activité humaine, la production bactérienne connaît une augmentation significative, au point parfois de surpasser la production primaire. Le bactérioplancton se compose de cellules plus grandes, dont une proportion importante est attachée à des particules. Ces cellules peuvent être activement consommées directement par des ciliés ou le mésozooplancton, ce qui amplifie encore davantage la productivité de ces écosystèmes déjà riches. La synergie entre les bactéries et les protistes permet de régénérer les éléments minéraux issus de la matière organique détritique. L'ajout de ces éléments aux apports directs aggrave l'eutrophisation du milieu. Dans les cas les plus graves, l'activité bactérienne peut entraîner une demande en oxygène si importante qu'elle conduit à l'anoxie, où seuls les procaryotes peuvent survivre (cnrs.fr, 2011d).

## **9.3. Conclusion**

Ces exemples tirés d'écosystèmes aquatiques illustrent le rôle essentiel et diversifié du bactérioplancton hétérotrophe dans leur dynamique et leurs caractéristiques à grande échelle, telles que la productivité, le recyclage, la rétention et l'exportation de la matière organique. Il est désormais évident que les impacts de la boucle microbienne sur le fonctionnement des réseaux

trophiques planctoniques sont fortement influencés par les conditions environnementales spécifiques, notamment le niveau trophique, la présence d'éléments limitants, la structure des communautés en termes de taille, et bien d'autres facteurs.

## Références bibliographiques

- Andréassian, V., et lerat, J., 2002. Le surprenant cycle de l'eau, Le Pommier, «Les minipommes ».
- Angelier E., 2002. Introduction à l'écologie. Des écosystèmes naturels à l'écosystème humain. Tec & Doc Lavoisier.
- Barbault, R., 1981. Ecologie des populations et des peuplements. Des théories aux faits. Paris, Masson, *Revue d'Écologie (La Terre et La Vie)*. 35-4 p. 674.
- Barbault, R., 2000. Écologie générale – structure et fonctionnement de la biosphère. 5e édit. Dunod.
- Bartout, P., et Touchart, L., 2017. Le territoire limnique, une alternative à la gouvernance des plans d'eau par masses d'eau ?. *Biodiversités et gestion des territoires*. Vol 17. N°3. <https://doi.org/10.4000/vertigo.18692>
- Boulaine, J., 1996. Histoire de l'Agronomie - 2e édition. 432 pages. Lavoisier. Paris.
- Bocard, D., 2006. Cours Structure et Fonctionnement des écosystèmes. Département de sciences biologiques. Univ. Montréal. Pp 15.
- Cain, Damman, Lue & Yoon., 2006. “découvrir la biologie”; éd. De Boeck
- Carlson, T., Gillies, R., and Perry, E., 1994. A Method to Make Use of Thermal Infrared Temperature and NDVI measurements to Infer Surface Soil Water Content and Fractional Vegetation Cover. *Remote Sensing Reviews* 9(1):161-173. <http://dx.doi.org/10.1080/02757259409532220>
- Carpenter S.R., 1998. Ecosystem Ecology. Integrated Physical, Chemical and Biological Processes. Chapter 4 in S.I. Dodson et al.: Ecology. Oxford University Press.
- Comlan, A D., 2014. Evaluation de la chaîne trophique d'une aire marine protégée en relation avec sa physico-chimie : cas de Gbèzoumè dans la commune de Ouidah. Diplôme Etudes Approfondies (DEA) Univ ABOMEY-CALAVI (UAC).
- Chapin, F. S., Zavaleta, E. S. et al., 2000. Conséquences of changing biodiversity. *Nature*, 405(6783):234-242,
- Chiras, D.D., 2001. Environmental Science -Creating a Sustainable Future. 6th ed., Jones and Bartlett Publishers.
- cnrs.fr, 2011d. Site du Centre National de la Recherche Scientifique – L'eutrophisation – 2011. <https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/ecosys/eutrophisat.html>
- Décamps, H., 2020. Les écosystèmes. *Livret sur l'environnement*. Institut de France. Pp. 1-22.
- Dubois, S., 2014. Rôles des espèces ingénieurs dans la structure et le fonctionnement des habitats benthiques côtiers. Habilitation à Diriger les Recherches Spécialité Océanologie Biologique. Université de Bretagne Occidentale. Pp. 1-118. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00247/35823/34350.pdf>
- Duvigneaud, J., 1980., La Fagne et la Calestienne aux environs de Doische et de Rancennes (région de Givet). La végétation de quelques sites et son évolution au cours de ces trente dernières années. *Natura Mosana*, 32 (4) : 165-174. <http://biodiversite.wallonie.be/fr/duvigneaud-j-1980-la-fagne-et-la-calestienne-aux-environs-de-doische-et-de-rancennes-region-de-givet-la-vegetation-de-qu.html?IDD=167772625&IDC=3046>

- Duvigeaud, P., 1980. La synthèse écologique. Doin éd.
- Fauri et al., 2012. Écologie approche scientifique et pratique 6<sup>e</sup> édition. 448p. Lavoisier. Paris
- Fischesser, B. et Dupuis-Tate, MF., 1996. Le guide illustré de l'écologie. Editions de La Martinière.
- Frontier S. et al., 2008. Ecosystèmes. Structure, fonctionnement, évolution. 4<sup>ème</sup> éd. Dunod
- Godart, MF., 2007a. Cours Ecologie globale. 83 Page. [https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture/Fertilisation-des-Terres-et-des-Sols/Chimie-des\\_sols/%C3%A9cologie%20Globale.pdf](https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture/Fertilisation-des-Terres-et-des-Sols/Chimie-des_sols/%C3%A9cologie%20Globale.pdf)
- Godart, MF., 2007b. Cours Fonctionnement des écosystèmes. 74 Page. <file:///C:/Users/LENOVO/Desktop/Polycopi%C3%A9%20Biog%C3%A9o+structure%20fonct%20des%20%C3%A9cosyst%20N/structure%20et%20fonc%20ecosys/fonctionnement%20ecosyst.pdf>
- Godron M., 1984. Ecologie de la végétation terrestre. Collection "Abrégés de Sciences". Masson (1984). 10-3-4p. 235
- Goudard, A., 2007. Fonctionnement des écosystèmes et invasions biologiques : importance de la biodiversité et des interactions interspécifiques. Thèse Doct. Univ Pierre et Marie Curie – Paris. 217p.
- Gravel, D., Gounand, I., et Mouquet, N., 2010. Le rôle de la biodiversité dans le fonctionnement des écosystèmes. Pp. 63-83. <https://www.researchgate.net/publication/260096477>
- Hattour, A., Ben Abdallah, L., et Guennegan, Y., 2004. Abondance relative et estimation de la biomasse des petits pélagiques des eaux tunisiennes. *Bull. Inst. Natn. Scien. Tech. Mer de Salammbô*, Vol. 31, Pp. 1-13. <https://aquadocs.org/bitstream/handle/1834/1163/article1.pdf?sequence=1>
- Kherief Nacereddine, S., 2020. Cours structure et fonctionnement des écosystèmes. Pp; 1-66. Univ Mila. [http://elearning.centre-univ-mila.dz/pluginfile.php/90060/mod\\_resource/content/1/Cours%20SFE%202023.pdf](http://elearning.centre-univ-mila.dz/pluginfile.php/90060/mod_resource/content/1/Cours%20SFE%202023.pdf)
- Lacroix G et Danger M., 2008. Des réseaux trophiques au fonctionnement des écosystèmes lacustres : vers une intégration de l'hétérogénéité et de la complexité. *Revue des sciences de l'eau*. Volume 21, numéro 2, p. 155–172. <https://doi.org/10.7202/018464> adresse copiéeune erreur s'est produite.
- Lebrato, M., Garbe-Schönberg, D., Müller, M N., and Oschlies, A., 2019. Global variability in seawater Mg:Ca and Sr:Ca ratios in the modern ocean. *BIOLOGICAL SCIENCES*. 117 (36) 22281-22292. <https://doi.org/10.1073/pnas.1918943117>
- Lowry, David. B., 2012. Ecotypes and the controversy over stages in the formation of new species », *Biological Journal of the Linnean Society*, vol. 106, no 2, p. 241–257 (ISSN 1095-8312, DOI 10.1111/j.1095-8312.2012.01867.x
- Lee, S., et Fuhrman, J A., 1987. Relations between Biovolume and Biomass of Naturally Derived Marine Bacterioplankton. *Appl Environ Microbiol*; 53(6):1298-303. doi: 10.1128/aem.53.6.1298-1303.1987.
- Lévêque, C., 1996. ECOSYSTÈMES AQUATIQUES. Pp. 9-159. Edit. HACHETTE Livre. 43. [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/2022-02/010009775.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/2022-02/010009775.pdf)

- Lévêque, C., 2001. *Écologie – de l'écosystème à la biosphère* ; Dunod.
- Liebig, J., 1840. *Traité de Chimie organique*, Introduction, 1, Paris, Fortin.
- Maire., O., 2011. Cours : Développement et évolution des écosystèmes- Les successions écologiques. UMR 5805 « EPOC » ECOBIOC Station Marine d'Arcachon 2, Bordeaux. Pp ; 1-61.
- Marcon, E., 2022. Mesures de la Biodiversité. Pp. 1-89. code source est sur GitHub : <https://github.com/EricMarcon/MesuresBioDiv2/>.
- Némery, J. and Garnier., J., 2007. Dynamique du phosphore dans le bassin de la Seine et son estuaire. *Techniques Sciences Méthodes*. 4(4):33-45.
- Odum, E.P., 1959. *Fundamentals of ecology*. (2nd Ed.) Saunders, Philadelphia.
- Odum, Howard, T. and Elisabeth, Odum, C., 1976. *Energy Basis for Man and Nature*. McGraw-Hill Book Company.
- Paine, R.T. (1966). Food web complexity and species diversity. *Amer. Natur.*, 100 : 65-75.
- Pédro, G., 2007. Cycles biogéochimiques et systèmes continentaux. RAPPORT SUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE No 27. ACADÉMIE DES SCIENCES. Pp. 1-482. <https://www.edp-open.org/images/stories/books/fulldl/rapport7.pdf>
- Ramade, F., 2003. *Éléments d'écologie*, 3ème édition. Dunod.
- Rapport de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement Rio de Janeiro, 3-14 juin 1992/ A/CONF.151/26/Rev.1 (Vol. I)/PP 503/
- Ricklefs et Miller., 2005. *Écologie*. éd. De Boeck.
- Shannon, C., Weaver, W., 1949. *The mathematical theory of communication*, University of Illinois Press, Urbana.
- Shelford V.E., 1911. Physiological animal geography. *J. Morphol.*, 22 (3) (1911), pp. 551-618, <https://doi.org/10.1002/jmor.1050220303>
- Tarnaud, L., Garcia, C., Krief, S., et Simmen, B., 2010. Apports nutritionnels, dépense et bilan énergétiques chez l'homme et les primates non-humains : aspects méthodologiques. *Revue de primatologie*. <https://journals.openedition.org/primatologie/558>
- Teyssède, A., et Lami, R., 2015. Guide d'usage du projet EcoMedit. Projet pour le MNHN : Denis Couvet, UPMC-Emarin'lab-MNHN-UVED, Pp ; 1-9. <http://emarinlab.obs-banyuls.fr/applications/diactif2/ecomedit>
- Vanpeene Bruhier, S., Moyne, M.L., and Brun, J.J., 1998. La richesse spécifique : un outil pour la prise en compte de la biodiversité dans la gestion de l'espace - Application en Haute Maurienne (Aussois, Savoie). *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, 15, p. 47 - p. 59.
- Viviand-Morel, J V., 1883. Note sur l'acclimatation des espèces adventives. *Publications de la Société Linnéenne de Lyon*. 10-2. pp. 183-190. [https://www.persee.fr/doc/linly\\_1160-6436\\_1883\\_num\\_10\\_2\\_17209](https://www.persee.fr/doc/linly_1160-6436_1883_num_10_2_17209)



**Sites internet**

- <https://www.aquaportail.com/>
- [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d3/Cycle\\_azote\\_fr.svg/440px-Cycle\\_azote\\_fr.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d3/Cycle_azote_fr.svg/440px-Cycle_azote_fr.svg.png)
- [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/56/Phosphorus\\_cycle.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/56/Phosphorus_cycle.png)
- [http://jacquet.stephan.free.fr/Faune\\_Flore\\_lacs\\_alpins.pdf](http://jacquet.stephan.free.fr/Faune_Flore_lacs_alpins.pdf)
- [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ0dL403Nxq\\_yWQCRnmLhjZOpl-3IyJ825mT7B0kcj&s](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ0dL403Nxq_yWQCRnmLhjZOpl-3IyJ825mT7B0kcj&s)
- [https://lh5.googleusercontent.com/25094iBG3x\\_oXeB2GhE77ZM82LTY8FgRthPdGdf\\_KwtOtm25mVyUZsk7Bq89MdAUwXX1SmtQ\\_YI9F21fG7JyOLOP5Tqy40b\\_4U7Ka8SoLinfY-uviLmweoT\\_4gwgEiGR2eAtJjNG](https://lh5.googleusercontent.com/25094iBG3x_oXeB2GhE77ZM82LTY8FgRthPdGdf_KwtOtm25mVyUZsk7Bq89MdAUwXX1SmtQ_YI9F21fG7JyOLOP5Tqy40b_4U7Ka8SoLinfY-uviLmweoT_4gwgEiGR2eAtJjNG)
- <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/14639/boucle-microbienne>