

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abd El Hafid Boussouf –Mila

Institut des Sciences de la nature et de la vie

Département d'écologie et d'environnement



Polycopié pédagogique

Cours : Analyse et protection de l'environnement

Destiné aux étudiants de troisième année licence ; Ecologie et environnement ;
Sciences de la Nature et de la Vie

Réalisé par : Dr. Boudjahem Ibtissem

Maitre de conférences « B »

i.Boudjahem@centre-univ-mila.dz

Année universitaire 2024-2025

Avant-propos

Ce polycopié est destiné aux étudiants de « troisième année licence » « spécialité : Ecologie et environnement » « Sciences de la nature et de la vie ». Ce support pédagogique présente des concepts fondamentaux pour l'apprentissage de la matière d'« Analyse et protection de l'environnement ».

Le polycopié se dispose de trois chapitres bien détaillés, bien illustrés avec des exemples sur les différentes techniques d'analyses des milieux écologiques des différents paramètres et équipements de laboratoire pour l'évaluation de leurs qualités, ainsi que les principales étapes de leurs classements par des mesures in situ ou par des indices écologiques estimées sur des espèces animales et végétales indicatrices du taux de pollution. Ce polycopié étant rédigé conformément au canevas, est préparé d'une manière à respecter le caractère pédagogique et progressif des cours.

L'objectif principal de ce cours est de sensibiliser les étudiants sur l'importance d'étudier les procédures nécessaires pour analyser les milieux naturels afin de les protéger contre toute menace naturelle ou anthropique. Il s'agit de leur faire prendre conscience qu'il est possible de sauver notre environnement écologique par prendre les mesures primaires avant qu'il soit trop tard. Et cela n'est réalisable que par une évaluation permanente de la qualité écologique de nos écosystèmes naturels ainsi que l'état des populations animales et végétales qu'il abrite.

L'analyse de notre environnement est une mesure de sa santé et de sa durabilité afin de préserver la nature et de conserver les ressources naturelles nécessaires pour notre survie, et la survie de tout existant.

Table de matière

Table des matières

Avant-propos

Liste des tableaux

Liste des figures

Chapitre 01 : Notions fondamentales et paramètres d'analyse des milieux

Introduction.....	2
1. Notions fondamentales :.....	2
1.1. Notion d'écosystème.....	2
1.1.1. Services écosystémiques.....	2
1.2. Notion de l'environnement.....	3
1.2.1. Dégradation de l'environnement	3
1.2.2. Causes et conséquences de dégradation de l'environnement.....	4
1.2.2.1. Causes de dégradation de l'environnement.....	4
1.2.2.2. Conséquences de dégradation de l'environnement.....	4
1.3. Notion du Changement climatique et son impact sur l'environnement.....	4
1.3.1. Effet de serre	5
1.3.1.1. Effet de serre naturel.....	5
1.3.1.2. Effet de serre additionnel.....	6
1.3.2. Changement climatique et destruction de la couche d'ozone.....	7
1.3.3. Changement climatique et pluies acides.....	7
1.4. Notion de contamination (Toxicologie).....	8
1.5.1. Objectifs de l'analyse de l'environnement.....	8
1.5.2. Matrices analysées lors de l'analyse de l'environnement.....	9
2. Paramètres déterminés lors d'analyse de l'environnement.....	10
2.1. Définition d'un paramètre.....	10
2.2. Paramètres physico-chimiques et normes.....	10
2.2.1. La température (T).....	10
2.2.2. Le potentiel d'hydrogène (PH).....	11
2.2.3. La conductivité électrique (CE).....	12
2.2.4. L'oxygène dissous (Saturation en oxygène) (OD).....	12
2.2.5. Dureté de l'eau (TH).....	13

2.2.6.	Paramètres organoleptiques de l'eau.....	14
2.2.7.	Exercices sur les paramètres physico-chimiques des eaux.....	14
2.2.	Paramètres inorganiques (Composition chimique métallique).....	17
2.2.1.	Définition d'un élément chimique.....	17
2.2.2.	Définition de la géochimie.....	17
2.2.3.	Eléments majeurs.....	17
2.2.3.1.	Eléments majeurs et métabolisme végétal.....	19
2.2.4.	Les éléments traces.....	19
2.2.2.1.	Toxicité des éléments métalliques traces (ETM).....	20
2.2.2.2.	Différentes analyses de la qualité écologique des sols.....	20
2.3.	Paramètres organiques.....	22
2.3.1.	Définition de la matière organique.....	22
2.3.2.	Production de la matière organique.....	22
2.3.3.	Dégradation de la matière organique.....	23
2.3.4.	Différentes étapes de la dégradation de la matière organique.....	23
2.3.5.	Pollution organique.....	24
2.3.6.	Évaluation de la matière organique d'un milieu naturel.....	25
2.3.7.	Techniques d'analyse des composants d'un milieu naturel.....	26
2.3.7.1.	Techniques de gravimétrie.....	26
2.3.7.2.	Techniques de Titrimétrie	27
2.3.7.3.	Techniques de Potentiométrie.....	27
2.3.7.4.	Techniques de spectrophotométrie.....	27
2.3.7.5.	Méthodes d'activation neutronique.....	28
2.3.7.6.	Méthodes chromatographiques.....	29

Chapitre 02 : Analyses biologiques de l'environnement

Introduction.....	32
1. Notions fondamentales.....	32
1.1. Notion d'écotoxicologie.....	32
1.2. Notion de bio-indicateur.....	32
1.2.1. Rôles écologiques des bio-indicateurs	32
1.2.2. Critères des bio-indicateurs.....	33
1.2.3. Types de bio-indicateurs selon leurs réactions.....	33
1.3. Notion de biomarqueur.....	33
1.3.1. Niveaux d'étude des biomarqueurs.....	33

1.3.2.Types de biomarqueurs	34
2. Passage des contaminants dans les organismes vivants.....	34
2.1. Bio-concentration	34
2.2.Bio-accumulation.....	35
2.3.Bio-amplification (ou biomagnification).....	35
3. Méthodes biologiques évaluant la qualité des milieux.....	35
3.1.Notion de biosurveillance	35
3.2. Méthodes biochimiques.....	35
3.3. Méthodes éco-toxicologiques.....	36
3.4.Méthodes biocénotiques.....	36
3.4.1. Zonation des cours d'eaux.....	36
3.4.2. Analyses numériques et les indices écologique de biodiversité	37
3.4.3. Exercices sur les analyses numériques des populations.....	40
4.Bioindicateurs et indices de pollution des milieux naturels.....	41
4.1. Cas du milieu aquatique.....	41
4.1.1. Pour les espèces végétales.....	41
4.1.1.1.Indices diatomiques	41
4.1.2.Pour les espèces animales.....	44
4.1.2.1. Indices de saprobie.....	44
4.1.2.2.Indices des invertébrés.....	44
4.1.2.3. Indices des vertébrés.....	48
4.2.Cas du milieu atmosphérique.....	50
4.2.1.Pour les espèces végétales.....	50
4.2.2.Pour les espèces animales.....	51
4.3.Cas du milieu terrestre.....	52
4.3.1.Pour les espèces végétales.....	52
4.3.2.Pour les espèces animales.....	53
4.4. Exercices sur les Analyses biologiques de l'environnement	54
5. Diagnostic écologique des milieux naturels.....	57
5.1. Analyse bibliographique et récolte des informations	57
5.2. Inventaires	58
5.3. Résultats des inventaires et analyses des données	58
5.4. Valorisation des données	58

Chapitre 03 : Protection de l'environnement

Introduction.....	60
1.Protection de l'environnement et développement durable.....	60
1.1.Principaux axes du développement durable.....	60
1.2.Objectifs du développement durable	60
2.Protection de l'environnement et conservation de biodiversité.....	62
3.D'autres pratiques pour la protection de l'environnement.....	63
3.1.Restauration des habitats.....	63
3.1.1.Objectifs de la restauration écologique.....	63
3.2.Remédiation des écosystèmes.....	63
3.3.Recyclage des ressources naturelles.....	64
4.Législation de l'environnement.....	64
4.1. Droit international de l'environnement	64
4.2.Conventions internationales pour la protection de l'environnement.....	64
4.2.1. Définition d'une convention internationale.....	64
4.2.2.Principales conventions internationales.....	65
4.3.Intervention de l'Algérie pour la protection de l'environnement	66
4.4. Législation algérienne pour la protection de l'environnement	67
Références bibliographiques.....	68

Liste des tableaux

Numéro de tableau	Titre	Page
1	Types de contaminants dans la nature	15
2	Température et qualité d'eau	18
3	PH et qualité d'eau	19
4	Conductivité électrique et qualité d'eau	19
5	DBO5 et qualité d'eau	20
6	Dureté et qualité d'eau	20
7	Principaux décomposeurs de la matière organiques dans la nature	32
8	Indice de Shannon (H') et diversité écologique d'un milieu naturel	46
9	Sensibilité à la pollution (s) et valeurs indicatrices (v) de quelques espèces diatomiques:	50
10	IPS et qualité du milieu	50
11	Valeurs des IBD en fonction des valeurs de B	51
12	IBD et qualité du milieu	51
13	IOBS et qualité du milieu	53
14	Valeurs standards de l'indice IMOL	55
15	IPR et qualité du milieu	56
16	IPA et qualité du milieu	58
17	CMT-végétaux et qualité du sol	60
18	SET-Escargots et qualité du sol	61

Liste des figures :

Numéro de Figure	Titre	Page
1	Structure d'un écosystème	9
2	Principaux services écosystémiques	10
3	Variation des températures annuelles depuis 1850	12
4	Effet de serre naturel et additionnel	13
5	Différents éléments chimiques dans la nature	25
6	Cycle de pesticides dans la nature	26
7	Cycle de la Matière organique entre photosynthèse et Biodégradation	30
8	Etape d'évaluation de la qualité des écosystèmes naturels	33
9	Position des types de bio-indicateurs dans le profil toxicologique des espèces	41
10	Les processus de Bioaccumulation ; Bioconcentration et Biomagnification dans la nature.	42
11	Différentes classes de diatomées des milieux aquatiques	49
12	Exemples d'Oligochètes marins	52
13	Cycle de vie des Chironomidés (A : Adulte ; B : Ponte ; C : Larve ; D : Nymphose)	53
14	Des espèces de mollusques marins	54
15	Poissons de rivières indicateurs de pollution	56
16	Variété d'espèces de lichens	57
17	Abeilles indicatrices de la qualité des milieux atmosphériques.	58
18	Phyllanthus orbicularis ; plante hyper-accumulatrice des métaux lourds	59
19	Escargot Bio-indicateur Bio-accumulateur de pollution des milieux Terrestres	60
20	Principaux piliers du développement durable	68
21	Les Objectifs du développement durable	68
22	Conservation in-situ et ex-situ de la biodiversité de l'environnement	69

**Chapitre 01 : Notions fondamentales et paramètres d'analyse
des milieux naturels.**



Introduction :

L'étude des milieux naturels a pour objectif d'analyser les enjeux patrimoniaux de la zone écologique et la sensibilité des espèces qui l'abritent. Elle permet d'évaluer les impacts directs et indirects, de proposer des recommandations techniques et d'apporter les mesures compensatoires éventuelles.

1. Notions fondamentales :

1.1. Notion d'écosystème :

La notion d'écosystème a été définie par le botaniste anglais Arthur Tansley en 1935 comme l'ensemble d'éléments en interaction les uns avec les autres. C'est un système biologique formé d'une Biocénose (Ensemble des êtres vivants ; animaux (Zoocénose), et végétaux (Phytocénose)), occupants un environnement physique, biologique, géologique, édaphique et climatique (Biotope), dans un réseau d'échange d'énergie et de matière, permettant le maintien de la vie (**Fig 01**).

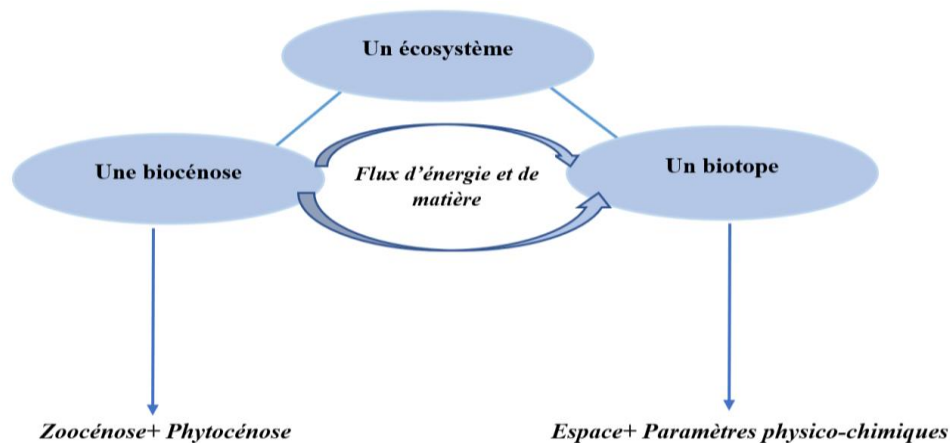


Figure 01. Structure d'un écosystème (Schéma personnel).

1.1.1. Services écosystémiques :

Ils illustrent d'une part le rapport écologique entre les interactions des espèces entre elles et avec leur environnement physique, et d'autre part, le bien-être des populations en termes de santé, nutrition et sécurité. L'évaluation des écosystèmes pour le Millénaire, publiée en 2005, a divisé les services des écosystèmes en quatre catégories (**Fig 02**) :

- **Les services d'approvisionnement :** La fourniture de produits ayant un intérêt depuis des ressources directes pour les populations, comme le bois des forêts, les plantes médicinales, les poissons des océans, des rivières et des lacs....etc.
- **Les services de contrôle :** Ils incluent les initiatives pour la protection contre les

catastrophes naturelles comme la régulation du climat par stockage du carbone ou par contrôle des précipitations locales, ainsi que l'élimination des polluants par filtrage de l'air ou de l'eau.

- **Les services culturels** : Ils visent la valeur spirituelle attachée à des écosystèmes particuliers tels que les bois sacrés, ainsi que la beauté esthétique des paysages ou du littoral.
- **Les services de soutien** : Ils s'intéressent aux processus de la formation des sols, aux cycles des nutriments, et aux processus de croissance des plantes essentiels au bon fonctionnement des écosystèmes.



Figure 02. Principaux services écosystémiques (Schéma personnel)

1.2. Notion d'environnement :

Tout facteur externe, affectant un organisme, fait partie du concept « Environnement ». Il peut être un autre organisme ou un des variables non vivants (Eau, sol, climat, lumière, oxygèneetc). L'environnement est un système complexe composé du sol, de l'eau, de l'air, du monde vivant (Animaux et végétaux), ainsi que tout type d'interaction entre eux.

1.2.1. Dégradation de l'environnement :

La dégradation de l'environnement est une des menaces majeures pour notre planète. Elle se produit à cause de multiples dégâts que subit l'environnement et dont les facteurs sont nombreux. Elle peut provoquer de nombreuses conséquences comme l'extinction des espèces, la perte de la biodiversité, la dégradation de la qualité de l'air, la pollution de l'eau, l'érosion du sol et l'augmentation de l'effet de serre.....etc.

1.2.2. Causes et conséquences de dégradation de l'environnement :

1.2.2.1. Causes de dégradation de l'environnement :

Les principales causes de la dégradation de l'environnement sont plutôt anthropiques que naturelles, elles participent depuis des centaines d'années à l'érosion des écosystèmes naturels, à la dégradation de la qualité écologique des milieux et à l'extinction des espèces animales et végétales. Parmi lesquelles, on peut citer :

- La déforestation, les feux et l'urbanisation.
- L'érosion et la dégradation des sols.
- Le braconnage, la chasse et la pêche non autorisés.
- La pollution industrielle (Eaux usées industrielles et artisanales, ordures ménagères, emballages plastiques).
- La pollution agricole (pesticides et engrais).
- Les pollutions atmosphériques (gaz des usines, fumées des véhicules, odeurs).
- La pollution des eaux et des sols (pollution radioactive, chimique et biologique).
- L'augmentation des gaz à effet de serre qui provoque le réchauffement de la terre et les changements climatiques.

1.2.2.2. Conséquences de dégradation de l'environnement :

La dégradation de l'environnement a pour conséquences majeures :

- Les catastrophes naturelles et les phénomènes météorologiques extrêmes (inondations, séismes, volcans....etc).
- Les migrations désordonnées et la pollution génétique des espèces.
- La propagation des maladies et des épidémies chez l'humain et l'animal.
- La détérioration de la qualité de l'eau, d'air et des terrains agricoles.
- La dégradation des ressources naturelles, de la diversité des écosystèmes, et des espèces naturelles.

1.3. Notion du Changement climatique et son impact sur l'environnement :

Le terme de « changement climatique » a été utilisé pour la première fois par un groupe d'experts sur l'évolution du climat sur la planète (GIEC) en 1988. Il correspond à une modification durable du climat de la terre (**Fig 03**), dus à une augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, engendrée principalement par les

activités humaines (industrie, transport, agriculture...), et traduite principalement par l'intensification des catastrophes naturelles et de leur ampleur (inondations, cyclones, sécheresses...etc).

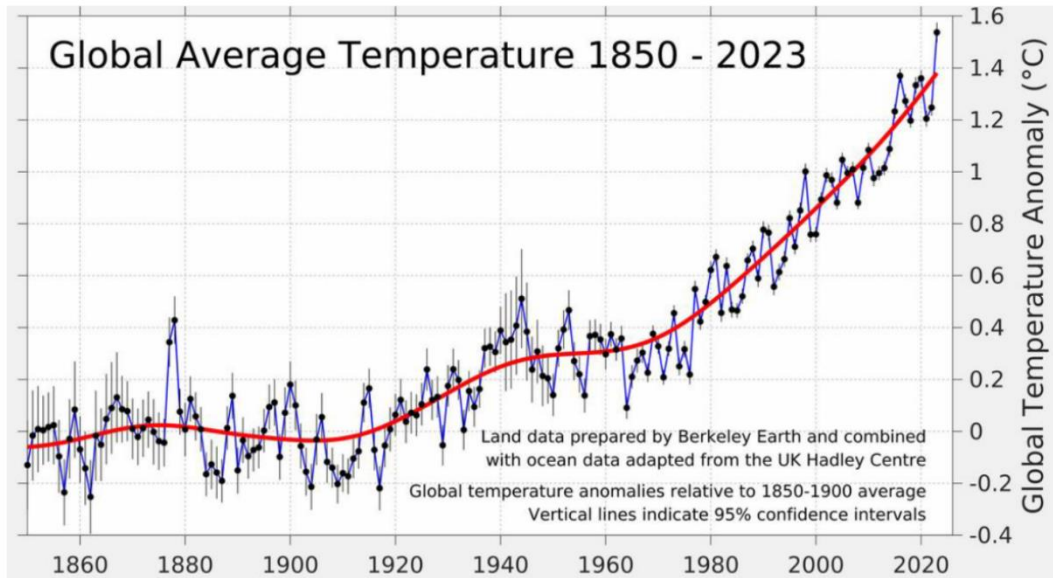


Figure 03. Variation des températures annuelles depuis 1850 (Berkeley Earth's Annual Temperature Report for 2024)

1.3.1. Effet de serre :

L'effet de serre est un phénomène naturel d'absorption d'une partie du rayonnement infrarouge émis par la surface de la terre qui elle-même reçoit la lumière du soleil à travers des gaz présents dans la partie inférieure de l'atmosphère. En émettant un excès de gaz à effet de serre tels que le CO₂ et le méthane, l'humain accentue ce phénomène, ce qui conduit au réchauffement climatique. Il existe deux types d'effet de serre :

1.3.1.1. Effet de serre naturel :

Notre planète est entourée d'une enveloppe gazeuse (atmosphère), composée naturellement d'environ 77% d'azote, 20% d'oxygène, et de quelques traces de gaz de vapeur d'eau (H₂O), de méthane (CH₄), de protoxyde d'azote (N₂O), d'ozone (O₃) et du dioxyde de carbone (CO₂). Environ 50% de l'énergie émise par le soleil est reflétée par le sol vers l'atmosphère. Ces gaz bloquent le passage des rayons solaires, ce qui garde une température moyenne de + 15 °C au lieu de -18 °C sans effet de serre (**Fig 04**). Ce qui contribue au réchauffement global modéré de la planète, et fait de l'effet de serre naturel dans ce cas, un phénomène bénéfique responsable de la

douceur de notre climat.

1.3.1.2. Effet de serre additionnel :

Depuis la révolution industrielle (19^{ème} siècle), les croissances économiques et démographiques ont augmenté de manière exponentielle, ce qui a contribué à l'augmentation de la combustion d'énergie fossiles (charbon, pétrole, gaz...etc). L'accumulation de ces gaz à effet de serre (+85%), a provoqué « L'effet de serre additionnel », un phénomène qui ne cesse de menacer l'équilibre de la planète et met en danger toute vie existante. En effet, depuis 1980 jusqu'à 2010, la température de la terre a augmenté d'environ 0,85 °C et si le réchauffement climatique continuera à ce rythme, elle atteindra entre 1,8 à 4 °C en 2100. L'augmentation des températures de la surface des mers a également atteint 0,40 °C. Des prévisions indiquent que le niveau moyen des mers augmenterait d'environ 20 et 60 cm dans les années prochaines. Sous l'effet du réchauffement climatique, les rayons infrarouges seront difficilement renvoyés dans l'espace. On estime qu'une personne sur dix, habite dans une zone menacée par la hausse des températures et du niveau des mers sur la planète.

Sous ce rythme accéléré du réchauffement de l'atmosphère, la planète connaîtra une carence des ressources naturelles (Eau, biodiversitéetc), une dégradation du rendement des terrains agricoles et une augmentation des événements extrêmes (Canicules, cyclones, tremblements de terre, orages et inondations.....etc).

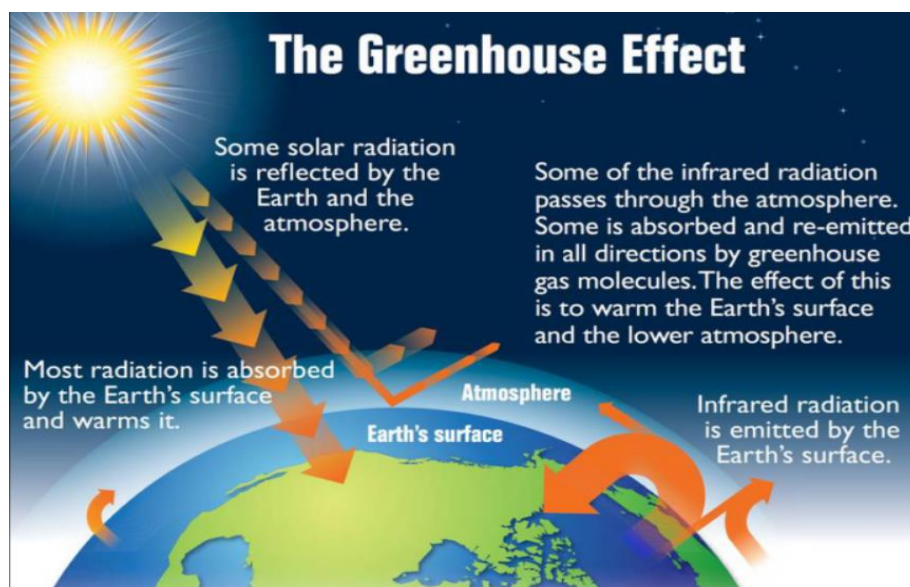


Figure 04. Effet de serre naturel et additionnel (Webographie 01)

1.3.2. Changement climatique et destruction de la couche d'ozone :

La couche d'ozone est une partie de l'atmosphère située à environ 500 km d'altitude de la terre (Une partie de la stratosphère). Son rôle est d'absorber les rayons solaires biologiquement dangereux (Ultraviolets) pour la vie des êtres vivants. Ces rayons solaires sont responsables de l'activation des molécules d'oxygène (O_2) au niveau de la stratosphère, pour se combiner avec les atomes libres (O), afin de former l'ozone (O_3), qui joue le rôle de filtre naturel pour la terre.

L'augmentation de la population mondiale et de l'activité industrielle ont élevé le taux des polluants à effet de serre dans l'atmosphère. Une fois atteinte la couche d'ozone, ces gaz provoqueront la dissociation de la molécule d'ozone en deux molécules d'(O_2) et O libre.

La destruction de la couche d'ozone, permettra aux rayons ultraviolets dangereux d'atteindre la terre, ce qui peut présenter une menace réelle pour toute vie existante (maladies et dégâts naturels...etc). La quantité d'oxygène cernée par l'enveloppe d'ozone va également diminuer par sa destruction.

1.3.3. Changement climatique et pluies acides :

Les pluies acides se produisent lorsque les précipitations contenant des particules acides tombent sur la surface de la terre, sous forme de pluie, de neige, de giboulée ou de grêle. Elles récoltent les particules d'acides et des gaz pour devenir acides à leur tour. Ces particules auront un niveau de pH inférieur à 5,6 et procèdent deux types de dépôt sur terre ; humide et sec. Les pluies acides sont des dépôts humides qui provoquent une érosion et endommagent les écosystèmes, tandis que les dépôts secs se forment lorsque de petites particules acides et des gaz se déposent sur la surface de la terre.

Ces deux types de polluants retombent sur la terre, dans l'eau et sur la végétation. Ils peuvent endommager : les lacs, les rivières, les forêts, les sols, les populations de poissons et d'espèces sauvages.

1.4. Notion de contamination :

La notion de contamination désigne l'envahissement d'un organisme vivant, d'un écosystème ou d'un compartiment de l'écosystème (eau, sol, air), par des micro-organismes pathogènes. Par extension, cette contamination comprend la pénétration de substances toxiques ou indésirables variables (**Tab 01**).

Tab 01 : Types de contaminants dans la nature

Types de contamination	Nature des contaminants
<i>Contamination physique</i>	- Contaminants radioactifs : plutonium, uranium, radon, particules radioactives, etc. - Contaminants thermiques : vapeur et eau chaude
<i>Contamination Biologique</i>	- Microorganismes : bactéries, virus et parasites - Toxines : substances toxiques produites généralement par des bactéries. - Matière organique morte.
<i>Contamination chimique</i>	- Oxydes : de soufre (SO ₂) et d'azote (NO et NO ₂) - Nitrates (NO ₃ ⁻) et phosphates (PO ₄ ³⁻) - Hydrocarbures - Produits organiques persistants (POP) : pesticides, solvants, produits nettoyants, produits de combustion, etc. - Matière inorganique : plomb, arsenic, mercure, phosphore

1.5. Notion d'Analyse de l'environnement :

L'évaluation de la qualité écologique des écosystèmes est mise en place pour l'élaboration des moyens adaptés, permettant de lutter contre la diminution massive de la biodiversité. Elle est réalisée par l'estimation d'ensemble des paramètres et d'indices (Physico-chimiques, organiques ou biologiques....etc), et ensuite leur comparaison à des normes référentielles dans le but de préciser le degré de pollution (Mauvaise qualité écologique) ou de la propreté (Bonne qualité écologique) des milieux.

C'est une estimation de la qualité d'un milieu (Eau, sol, atmosphère), afin d'évaluer son état écologique et sa diversité naturelle. Cela est réalisable par :

- La détermination des polluants (Pesticides, éléments traces...etc), par des analyses quantitatives et qualitatives selon plusieurs étapes (Extraction, dérivation, séparation des éléments.....etc.).
- L'adaptation des conventions internationales et des directives environnementales organisées par des commissions spécifiques, afin de pratiquer des réglementations protectrices de l'environnement.

1.5.1. Objectifs d'analyse de l'environnement :

Les objectifs des analyses environnementales se résument en :

- ❖ Evaluation de l'état du système environnemental à un moment donné (Suivi).
- ❖ Etude de l'effet des organisations étatiques ou des entreprises privées sur l'environnement.
- ❖ Impact du système anthropique sur le système environnemental.
- ❖ Etude et programmation des mesures pouvant diminuer les dangers signalés et la planification de leur réalisation.

1.5.2. Matrices analysées lors d'analyse de l'environnement :

L'échantillon à étudier peut subir des techniques variables sur la même analyse spécifique ou des techniques applicables sur plusieurs analyses sélectives. Le suivi environnemental peut s'effectuer en plusieurs milieux physiques (Eau, air, sol), selon des études chimiques, physiques ou biologiques, afin d'identifier toute anomalie naturelle et mettre en œuvre des mesures pour la corriger. Les milieux analysés peuvent être :

- **Des eaux :**

Divers types d'eau sont analysées pour le contrôle de la qualité de l'environnement : Eaux résiduaires, eaux de surface ou eaux souterraines. Les programmes de surveillance des eaux sont également entrepris dans le cadre des conventions internationales pour les eaux marines (Commission d'OSLO et de PARIS, OSPAR en 1992, d'HELSINK et HELCOM en 1974, convention de BARCELONE, 1976), ou des eaux fluviales.

Les eaux de pluies sont également analysées pour évaluer l'impact des pluies acides et de retombées atmosphériques (Composés alkyles du plomb) sur l'environnement dans le cadre des programmes internationaux.

- **Des sédiments :**

Ce sont les particules en suspension dans l'eau, l'atmosphère ou la glace, qui finissent par retomber sur les surfaces par force de gravité. L'analyse de ces sédiments est nécessaire pour le calcul de la charge des polluants. En effet, les contaminants (organiques et inorganiques) sont absorbés par ces particules dans les milieux pollués.

- **Des sols, des boues et des composts :**

Ces milieux peuvent faire l'objet des études agronomiques (Assimilation des plantes, déficiences des sols), ou des risques environnementaux (Positions des polluants dans le sol, détermination des teneurs en éléments ou des composés organiques).

La valeur fertilisante du compost peut être mesurée par des propriétés chimiques (pH, conductivité électrique, teneur en éléments etc).

- **Des échantillons biologiques :**

Il s'agit des espèces naturelles indicatrices de pollution comme : les mousses qui accumulent les métaux lourds dans leurs tissus, les lichens qui résistent les polluants atmosphériques, les diatomées (Algues), sensibles à la pollution, et certaines espèces de poissons qui accumulent les polluants des milieux marins dans leurs cuticules, et qui sont donc considérés comme de bons bio-indicateurs de la qualité du milieu aquatique.

- **Des échantillons atmosphériques :**

Les émissions atmosphériques sont souvent mesurées par des filtres de tunnels routiers. L'utilisation excessive du charbon dans les domaines de l'industrie et de l'économie provoque une réponse de contrôle environnemental, ainsi que de nombreux programmes d'analyse.

2. Paramètres déterminés lors d'analyse de l'environnement :

2.1. Définition d'un paramètre :

Un paramètre est un élément d'indication d'information, dont on analyse à la fois la présence (Identification) et la quantité (Quantification, dosage). Le seuil réglementaire de la présence des éléments dans la nature (norme) est représenté par une valeur chiffrée exprimée en concentration qui présente, généralement, une limite maximale à ne pas dépasser (Teneur). Un élément ou un facteur sont alors importants dans la nature lorsque la norme est respectée pour un paramètre donné. Au-delà de la norme, la présence de l'élément ou la valeur d'un facteur estimé exprimeront un déséquilibre écologique du milieu.

2.2. Paramètres physico-chimiques et normes (Milieux aquatiques) :

2.2.1. La température (T) :

C'est une grandeur physique et un facteur écologique important pour la survie des espèces. Elle joue un rôle primordial dans la solubilité et la dissociation des sels et des gaz (Oxygène). Son augmentation peut perturber la vie aquatique des espèces (Pollution thermique).

Une eau chaude peut accélérer la vie et l'activité des micro-organismes et des algues et avoir

une influence sur les autres paramètres physico-chimiques (pH, conductivité, teneur en oxygène....etc). La température est mesurée par thermomètre en degré Celsius (°C). Dans le sol, l'augmentation des températures peut avoir un effet sur la mobilité des métaux et sur l'accélération de l'activité bactérienne (**Tab 02**).

Tab 02 : Température et qualité d'eau (Masson, 1988)

Température (en °C)	Qualité de l'eau
≤ 20	Normale
20-22	Bonne
22-25	Moyenne
25-30	Médiocre
≥ 30	Mauvaise

2.2.2. Le potentiel d'hydrogène (pH) :

C'est une mesure chimique des concentrations d'ions d'hydrogène (H^+) dans l'eau ($pH = -\log [H^+]$). Les rejets industriels dans le sol ou les apports des eaux de ruissèlement dans les milieux aquatiques, peuvent être à l'origine de sa variété, qui est considérée comme indice important de la pollution naturelle (**Tab 03**). Des valeurs de pH acide ($pH < 7$) augmenteraient le risque de présence des métaux sous forme ionique toxique. Dans les milieux terrestres, ce déséquilibre peut être à l'origine de la salinisation des sols, un mécanisme qui participera à l'inhibition de l'activité bactérienne et à un ralentissement de la dégradation des matières organiques. Il est mesuré à l'aide d'un pH mètre et n'a pas d'unité. Sa valeur varie de 0 à 14 depuis un aspect acide à celui basique, en passant par un pH neutre ($pH=7$) :

- $[H^+] < [OH^-] \Rightarrow pH > 7$: l'eau est basique.
- $[H^+] > [OH^-] \Rightarrow pH < 7$: l'eau est acide.
- $[H^+] = [OH^-] \Rightarrow pH = 7$: l'eau est neutre

Tableau 03. pH et qualité d'eau (Arrignon, 1998)

pH	Qualité du milieu aquatique
pH < 5	Inférieur à la vie des espèces
5 < pH < 6	Tolérable par les espèces
6 < pH < 7.5	Optimale (Vie et reproduction)
7.5 < pH < 8.5	Optimale pour les planctons
pH > 8.5	Incapacité de vie des algues
pH > 9	Incapacité de survie des espèces

2.2.3. La conductivité électrique (CE) :

C'est la capacité d'une solution à conduire le courant électrique. Elle indique le degré de minéralisation de l'eau, dont les principaux sels sont : le Ca⁺² (Calcium), le Mg⁺² (Magnésium), le Na⁺ (Sodium), et le K⁺ (Potassium)etc. Plus l'eau est minéralisée, plus sa conductivité électrique est importante. En effet, les anions et les cations présents dans un milieu pollué participent à créer un champ magnétique apte à faire passer le courant électrique à travers ses éléments. Elle est mesurée par conductimètre en $\mu\text{s/cm}$. Les espèces aquatiques ne supportent pas généralement des variations importantes en sels dissous (**Tab 04**).

Tableau 04. Conductivité électrique et qualité d'eau (NALCO, 1983)

Conductivité ($\mu\text{s/cm}$)	Qualité de l'eau
50-400	Excellente
400-750	Bonne
750-1500	Médiocre
>1500	Minéralisation excessive (Pollution)

2.2.4. L'oxygène dissous (Saturation en oxygène) (OD) :

L'oxygène est un élément indispensable pour la vie des espèces aquatiques. Il provient de l'atmosphère ou de l'activité photosynthétique des algues. Sa teneur en milieu aquatique est variable selon la durée du jour (Température), et selon la profondeur du milieu marin (faible en profondeur). La concentration en oxygène dissous en eau est exprimée en mg /l. Concernant

la DCO (Demande chimique en oxygène) : C'est une mesure de la matière organique présente dans l'eau (Matière polluante), par l'estimation de la quantité d'oxygène nécessaire à la dégrader par voie chimique (En utilisant un oxydant spécifique).

Quant à la DBO5 (Demande biochimique en oxygène en 5 jours), elle correspond à la quantité d'oxygène nécessaire pour les micro-organismes du milieu aquatique, dans leur processus de dégradation (oxydation) d'une partie de la matière organique présente dans le milieu et cela pendant 5 jours. La quantité d'oxygène nécessaire pour ce mécanisme reflétera le degré d'accélération ou de diminution de l'activité bactérienne ainsi que le niveau de la pollution du milieu (**Tab 05**).

Tableau 05. DBO5 et qualité d'eau (Bremond et Vuichard, 1973)

DBO5 (mg/l) (O2)	Qualité de l'eau
<1	Excellente
2	Bonne
3	Moyenne
5	Moyennement polluée
>10	Eau polluée

2.2.5. Dureté de l'eau (TH):

C'est la somme des concentrations en cations métalliques: le Ca⁺⁺ (Calcium), et le Mg⁺⁺ (Magnésium). Leur présence peut réduire la toxicité des métaux. C'est donc un indice de pollution du milieu. La dureté total TH= [Ca²⁺] + [Mg²⁺]. Une valeur faible de la dureté d'une eau, indique un bon milieu vital pour les espèces.

Tableau 06. Dureté et qualité d'eau (Bremond et Vuichard, 1973)

Dureté (mg/l) (Caco3)	Qualité de l'eau
0-30	Très douce
31-60	Douce
61-120	Moyennement douce
121-180	Dure
>180	Très dure

2.2.6. Paramètres organoleptiques de l'eau :

Ce sont des facteurs qui s'indiquent lors de la consommation de l'eau (Couleur, gout, odeur....etc), et dont le cas de perturbation, présentent un risque pour la santé humaine :

a- Turbidité :

Elle indique le degré d'absorption ou de diffusion de lumière dans un milieu aquatique, qui est fonction de la présence ou l'absence de matières en suspension dans l'eau, comme : L'argile, le limons.....etc. Son augmentation permettra aux micro-organismes de se fixer sur les particules en suspension.

b- Couleur :

Elle change selon la composition de l'eau en matières (Micro-organismes) ou en éléments métalliques ; La présence de Fer par exemple donne une couleur rouille à l'eau, alors que la présence du manganèse lui donne une couleur foncée.

c-Gout-odeur :

Le gout et l'odeur d'un milieu aquatique changent grâce à la présence de substances volatils comme le chlore (Cl), le dioxyde de soufre (SO₂)....etc, ou à la présence de substances organiques comme : les esters et les alcools....etc. Le changement du gout des eaux potables peut être également fonction de l'activité microbienne (Bactéries).

2.2.7. Exercices sur les paramètres physico-chimiques des eaux :

❖ Exercice 01 :

Le tableau suivant présente les résultats des analyses physico-chimiques des eaux issues de trois stations de la région de Mila. Commentez le tableau.

Tableau 1 : Valeurs moyennes des paramètres physicochimiques des Trois stations

Sites	Station 01	Station 02	Station 03
T (°C)	28.3	20.5	21.5
pH	7.2	7.8	7.5
CE (µS/cm)	1292	1310	1232

❖ Correction de l'exercice 01 :

▪ La température :

Elle joue un rôle important dans la solubilité des gaz, dans la dissociation des sels dissous et dans la détermination du pH. Dans la zone d'étude, les valeurs de la température de l'eau mesurée au niveau de trois stations varient entre 20.5 (la plus basse mesurée au niveau de la station S3) et 28.3 (la plus élevée mesurée au niveau de la station S1).

Selon les tableaux des normes, les deux stations (S2 et S3) sont de bonne qualité pour la survie des espèces, par contre l'eau de la station (S1) est de qualité médiocre. La hausse de la température au niveau de cette station (S1) est due peut-être à la présence d'une source thermale aux environs de ce site.

▪ Le pH :

C'est une mesure du degré d'acidité ou d'alcalinité des écosystèmes aquatiques. Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques, et dépend de facteurs multiples, dont la température et l'origine de l'eau, il représente une indication importante en ce qui concerne l'agressivité de l'eau (aptitude à dissoudre le calcaire).

Un pH compris entre 6 et 8.5 permet un développement à peu près correct de la faune et de la flore aquatique.

Les valeurs du pH varient entre 7,2 et 7,8, donc tous les échantillons étudiés ont des pH faiblement légèrement alcalins (basiques).

▪ La conductivité électrique :

Elle est étroitement liée à la concentration des substances dissoutes et à leur nature. Les valeurs de ce paramètre varient entre 1310 et 1232 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Donc ces valeurs dépassent les normes autorisées, ce qui reflète que les eaux de ces 3 stations présentent une qualité médiocre. Cette augmentation serait liée, soit aux rejets domestiques, soit à la présence des champs agricoles (utilisation de fertilisants).

❖ Exercice 02 :

Le tableau (02), représente les résultats des analyses physico-chimiques des eaux issues de cinq stations des eaux usées.

1-Interprétez les valeurs du tableau

2-Classer les stations depuis la plus polluée jusqu'à la moins polluée.

Tableau 02. Paramètres physicochimiques des eaux usées brutes de quelques stations en Algérie :

Stations	S01	S02	S03	S04	S05
pH	7.1	7.9	8.2	7.5	7.8
CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	529	2140	3103	2435	2066
(DBO5)(mg/l)	1.2	3	5	7.2	8

❖ **Correction de l'exercice 02 :**

▪ **Le pH :**

Les valeurs du pH des eaux usées évacuées par ces rejets varient de 7.1 à 8.2, elles sont donc relativement neutres. Les valeurs du pH mesurées sont acceptables selon les normes de qualité des eaux usées destinées à l'irrigation. Comme ces valeurs sont comprises entre 6,5 et 8,5, elles sont considérées comme répondant aux valeurs limites de rejets directs dans le milieu récepteur. La qualité d'eau est optimale pour les espèces dans les stations S01 et S04, et optimale pour le plancton pour le reste des stations (S02, S03 et S05).

▪ **La conductivité électrique :**

La conductivité électrique représente la capacité de l'eau à faire passer un courant électrique. La valeur de la conductivité est affectée par la présence des matières solides dissoutes (sodium, chlorure, sulfates, calcium, bicarbonate, nitrates, phosphates, fer, magnésium). La conductivité traduit donc la charge minérale de l'eau. Les valeurs de la conductivité électrique (CE) obtenues pour Les stations : S02, S03, S04 et S05 mettent en évidence la minéralisation très importante des eaux usées, avec la valeur la plus élevée de 3103 $\mu\text{s}/\text{cm}$ pour la S03.

La seule station caractérisée par une eau de bonne qualité (eau relativement pure) est celle de la station S0. Le reste des stations (S02, S03, S04 et S05) sont caractérisées par une mauvaise qualité d'eau (Médiocre à polluée).

▪ **La DBO 5 :**

Concernant les valeurs de la demande biochimique en oxygène pendant 5 jours, on remarque que l'eau usée de toutes les stations est de mauvaise qualité. D'autre part, l'eau de station S01 une bonne activité par litre. La valeur de 1,2 mg/l indique une bonne présence microbienne et une absence des polluants organiques. Le reste des stations (S02, S03, S04 et S 05) sont caractérisées par une qualité d'eau moyenne à moyennement polluée.

❖ Conclusion :

Les analyses des paramètres physico-chimiques des eaux des différentes stations étudiées indiquent que la station 01 est la station la moins polluée et que les stations 03 et 05 sont les plus polluées.

2.2. Paramètres inorganiques (Composition chimique métallique) :

2.2.1. Définition d'un élément chimique :

Un élément chimique est une classe d'atomes dont le noyau compte un même nombre de protons. Ce nombre, noté Z , est le numéro atomique de l'élément, qui détermine la configuration électronique des atomes correspondants. Au total, 118 éléments chimiques ont été observés à ce jour, de numéro atomique 1 à 118. Parmi eux, 94 éléments ont été identifiés sur terre dans le milieu naturel.

2.2.2. Définition de la géochimie :

C'est la discipline qui étudie l'origine, l'évolution et la distribution des éléments chimiques dans les milieux naturels. Son objectif est d'évaluer les processus chimiques qui régissent la composition des roches, de l'eau et des sols, ainsi que de suivre les cycles de matière et d'énergie transportant les composants chimiques des sols jusqu'aux milieux atmosphériques et aquatiques.

Les éléments chimiques métalliques sont présents dans les écosystèmes naturels, sous différentes formes (Eléments majeurs, éléments mineurs, éléments traces, éléments assimilables, éléments toxiques, éléments terre rares, oligo-éléments....etc) (**Fig 05**).

2.2.3. Eléments majeurs :

Des principaux éléments chimiques qui constituent les roches et les minéraux. Les 12 éléments majeurs existants dans la nature représentent environ 99,4% du total des éléments. Ils sont importants pour les plantes mais leur présence au-delà du seuil tolérable par la nature (Teneur), peut être à l'origine de la pollution des milieux (émissions agricoles et industrielles). Les principaux éléments majeurs des écosystèmes naturels sont :

❖ L'Aluminium (Al):

C'est un élément toxique, présent sous forme d'ion (Al^{+3}) dans les eaux acides, sa présence en concentrations supérieures à 0.2 mg/l provoque une toxicité détectée chez les consommateurs.

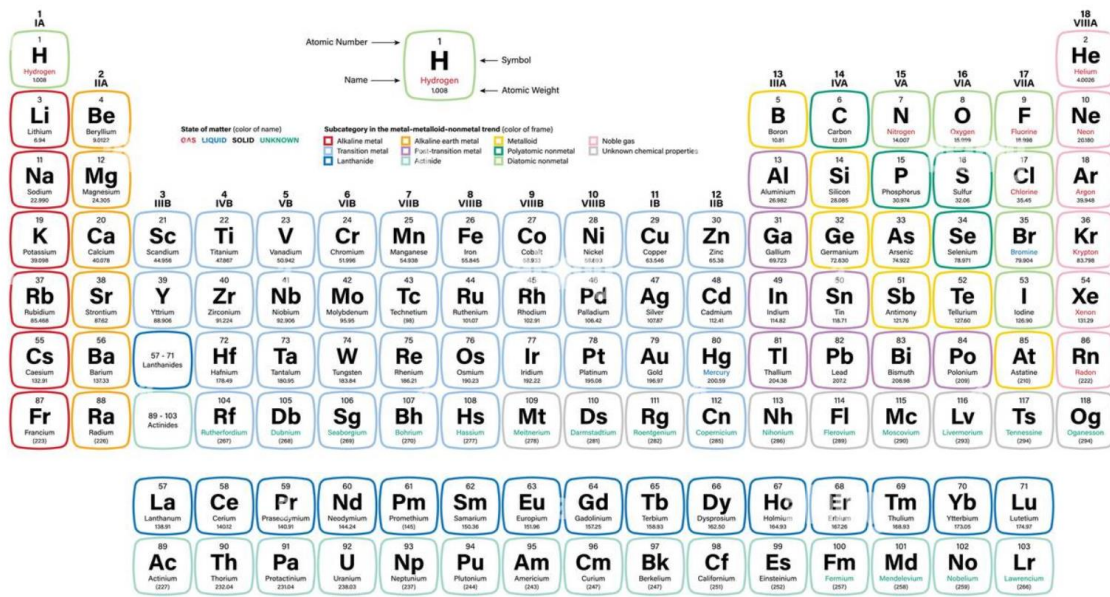


Figure 05. Différents éléments chimiques dans la nature (Webographie 02)

❖ **L'Azote (N):**

Son cycle présente un important équilibre entre les processus de la fixation d'azote atmosphérique (N₂) et la dénitrification (production de N₂). Les concentrations en nitrates des eaux souterraines doivent rester inférieures à 1 mg/l.

❖ **Le Calcium (Ca):**

Responsable de la dureté de l'eau, où il représente l'élément le plus dominant. Les eaux potables, de bonne qualité renferment de 100 à 140 mg/l de calcium.

❖ **Le Magnésium (Mg) :**

Il provient de la dissolution des formations carbonatées. Au même titre que le calcium, il constitue un élément significatif de la dureté de l'eau. Sa teneur dépasse rarement 15mg/l.

❖ **Le Phosphore (P) :**

Issu du lessivage des zones agricoles fertilisées par les engrais phosphatés, il joue un rôle primordial dans le développement des algues, ce qui contribue dans le cas de pollution des milieux aquatiques au phénomène d'eutrophisation.

❖ **Le Potassium (K) :**

Il provient de l'altération des formations silicatées, des argiles potassiques, des rejets industriels et de la dissolution des engrais chimiques. Il est présent dans l'eau à des teneurs supérieures à 20 mg/l.

2.2.3.1. Eléments majeurs et métabolisme végétal :

Les végétaux prélèvent les éléments nutritifs du sol. Il est donc nécessaire de maintenir sa fertilité en reconstituant ses réserves par des apports de matières minérales adaptés, variables en fonction de la richesse du milieu et des besoins des plantes. Les analyses annuelles des sols, permettront, de connaître leur teneur en éléments majeurs et oligo-éléments. Il sera alors possible de corriger ces carences en apportant les compléments dont ils ont besoin.

D'autre part l'usage intensifié des engrais chimiques et des produits phytosanitaires (**Fig 06**) sur les plantes ou les sols en raison d'améliorer leur rendement annuel, mène à leur ruissellement puis leur infiltration jusqu'à atteindre et contaminer respectivement les sols, les eaux de surface, les eaux souterraines, la faune, la flore, les chaînes alimentaires et la santé humaine. Cette minéralisation excessive est à l'origine de la présence et la persistance de ces éléments à des teneurs et des taux qui dépassent les normes naturelles, ce qui provoque une dégradation massive de la fertilité des sols, et d'où la nécessité d'appliquer des processus de rotation sur ces terrains agricoles.

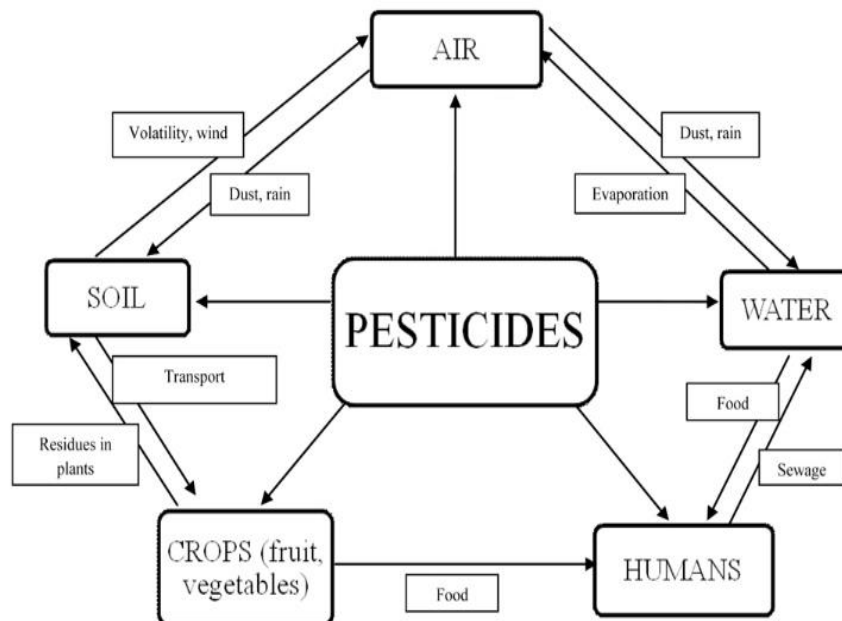


Figure 06. Cycle de pesticides dans la nature (Fenik et al., 2011)

2.2.4. Eléments traces :

Les éléments traces sont toxiques pour les organismes vivants à de relatives faibles concentrations. On compte environ 80 éléments traces dans la nature, et qui ne présentent en réalité qu'environ 0,6% de l'ensemble des éléments existants. Parmi les éléments métalliques

traces, on peut citer :

❖ **L'Arsenic (As) :**

Employé dans la métallurgie (alliages), l'électronique (semi-conducteurs), la fabrication de peinture, et la coloration des verres

❖ **Le Bore (B) :**

Utilisé comme antiseptique, dans l'industrie de verre, de la céramique, la fabrication des cosmétiques, de peinture et des produits phytosanitaires.

❖ **Le Brome (Br) :**

Il est présent dans les mers ou dans les minerais, où il peut se trouver sous forme de bromures dans les espaces pollués.

❖ **Le Cadmium (Cd) :**

Il provient des matières en plastique, des huiles de moteurs, des piles, des produits de soudure et des engrais naturels.

❖ **Le Chrome (Cr) :**

Il se retrouve dans les roches basiques avec des teneurs plus importantes, et sous forme de traces dans les silicates. Son origine industrielle est liée à la galvanoplastie, la tannerie, la raffinerie, la métallurgie, ainsi que la production des colorants.

❖ **Le Mercure (Hg) :**

Utilisé principalement dans la métallurgie, la médecine, les cosmétiques, ou l'alchimie. Il est hautement toxique pour l'homme et l'environnement.

2.2.4.1. Toxicité des éléments métalliques traces (ETM) :

Les éléments métalliques traces sont présents, naturellement, sous forme de minerais inertes, mais deviennent dangereux lorsqu'ils sont mis en circulation dans l'environnement suite aux activités humaines. Les ETM sont toxiques pour les êtres vivants (microorganismes, plantes, animaux et Homme) en fonction de la dose et du niveau d'exposition. Ils peuvent être transmis des sols et des eaux d'irrigation contaminés aux produits agro-alimentaires et provoquent de nombreux troubles de santé chez l'homme et l'animal (Respiratoires et cancérigènes....etc).

2.2.4.2. Différentes analyses de la qualité écologique des sols :

L'analyse de sol est couramment pratiquée dans le but de connaître les potentialités d'exploitation durable des terrains, de façon à économiser et gérer les pertes d'érosion de l'environnement. Pour procéder à des analyses complètes de la qualité des sols, on doit passer par plusieurs aspects structuraux :

- **Analyses physiques :**

Des analyses qui puissent nous rendre compte sur la texture (granulométrie), la structure, les capacités de rétention de l'eau et de la circulation d'oxygène dans un milieu terrestre. Il s'agit de la proportion des constituants selon 3 composantes :

- Les argiles (inférieurs à 2 mm)
- Les limons (entre 2 et 50 mm)
- Les sables (plus de 50 mm).

- **Analyses physico-chimiques :**

Ces informations sont cruciales pour comprendre la fertilité du sol, sa capacité à retenir l'eau, et d'autres propriétés importantes pour la croissance des plantes. Elles indiquent l'état des paramètres physiques et chimiques du sol (Acidité, pH, humidité, conductivité électrique, taux de CaCO_3 total et actifetc).

- **Analyses biologiques :**

L'analyse biologique permet d'évaluer l'évolution du statut organique du sol. L'étude écologique de la pédofaune (champignons et bactéries.....etc) terrestre, en plus de l'estimation de la vitesse de décomposition des matières en dégradation, renseignent sur la qualité des sols. Un indicateur de la fertilité du sol est exprimé par le rapport C/N (carbone total sur azote total du sol) :

- Si le C/N de l'amendement est supérieur à 25, il y a trop de carbone par rapport à l'azote. Les micro-organismes vont puiser dans les réserves du sol au lieu d'en libérer. C'est le phénomène de faim d'azote ou du manque d'azote dans le sol ce qui indique un ralentissement de la dégradation de la matière organique ou de l'activité microbienne dans le sol.
- A l'inverse, si le C/N est inférieur à 25, les micro-organismes vont libérer l'azote en excès, à disposition des plantes, ce qui peut être interprété par une activité importante et accélérée des bactéries du sol.

- **Fond géochimique du sol :**

C'est l'étude de la composition chimique et du taux des éléments majeurs et éléments métalliques traces d'un sol (teneurs), dans le but de déterminer la qualité de la flore et de la faune qu'il abrite. Elle est composée du « fond géochimique naturel » (résultant de

l'évolution des roches-mères et des apports naturels), et du « fond d'origine anthropique » qui exprime le taux des éléments introduits dans le milieu par des activités humaines (Agriculture et industrie).

2.3. Paramètres organiques :

2.3.1. Définition de la matière organique :

C'est la matière qui compose les tissus des êtres vivants, elle est principalement formée de la biomasse vivante et morte, dans un cycle continu de décomposition et de biosynthèse (**Fig 03**). Elle existe dans des composants de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, de faibles quantités d'azote, de phosphore, de potassium, et de soufre....etc. La matière organique peut exister sous deux formes principales :

- **Des substances humiques (Humus) :**

Ce sont des substances à caractère acide et hydrophile, issues de la dégradation biologique et de l'oxydation chimique des déchets animaux et végétaux (macromolécules). Elles représentent environ 30 à 50% du carbone organique.

- **Des substances non humiques :**

Des formes de protéines, de peptides, d'acides aminés, des graisses et des molécules de petite taille dégradées à travers des enzymes secrétés par des microorganismes.

2.3.2. Production de la matière organique

La première fonction des végétaux est de produire la matière organique par photosynthèse. Un processus qui se déroule chez les organismes autotrophes, qui utilisent la lumière comme source d'énergie, le dioxyde d'azote ainsi que des éléments inorganiques dissous (Eléments minéraux) afin de synthétiser la matière organique vivante. Elle peut également être transportée aux écosystèmes aquatiques et terrestres sous forme de feuilles, de fruits et de divers débris organiques (végétaux et animaux) qui tombent dans l'eau ou les sols, où ils seront dégradés par les microorganismes décomposeurs (**Fig 07**).

2.3.3. Dégradation de la matière organique :

La matière organique des organismes morts est dégradée, sous forme de composés organiques ou inorganiques, solubles ou particulaires. Ces processus utilisent le dioxygène dissous et aboutissent à la reminéralisation des éléments nutritifs, qui seront à nouveau absorbés par les

organismes autotrophes (C'est la transformation inverse de matière organique en éléments inertes). La dégradation de la matière est un phénomène qui participe à la production d'énergie nécessaire pour d'autres mécanismes physiologiques telle que la respiration des espèces naturelles.

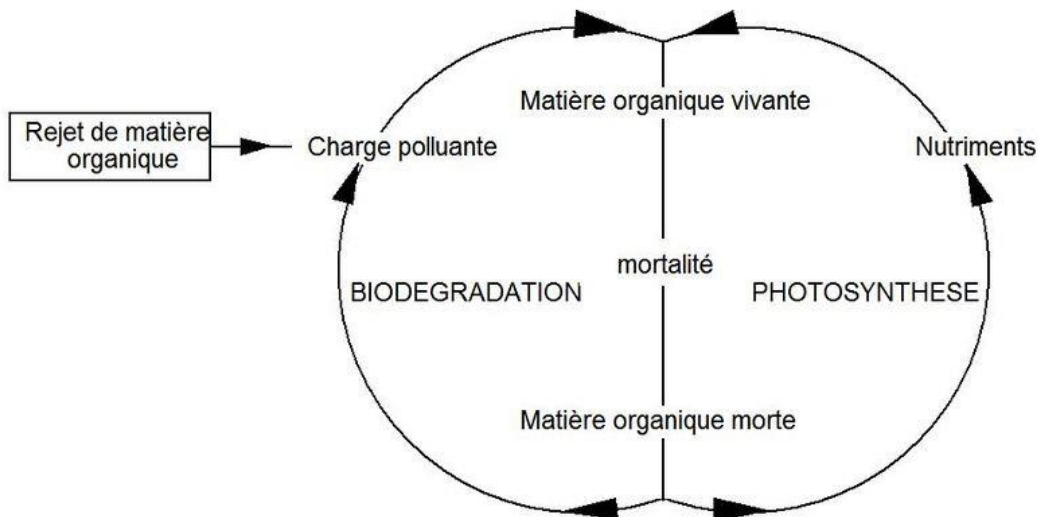


Figure 07. Cycle de la Matière organique entre photosynthèse et Biodégradation
(Webographie 03)

2.3.4. Différentes étapes de dégradation de la matière organique :

La biodégradation des matières organiques dans les milieux naturels joue un rôle important dans plusieurs cycles biogéochimiques concernant des éléments majeurs (en particulier carbone, azote et phosphore). L'ensemble des processus impliqués dans la biodégradation varie en fonction de la quantité d'oxygène présente dans le milieu. Ce processus passe par les étapes suivantes :

❖ La lixiviation :

Les flux d'eau des pluies qui traversent les litières et le sol et dégradent la matière organique, peuvent entraîner des ions et de la matière soluble (lixiviation de carbone organique dissous).

❖ La fragmentation :

Les débris de grande taille sont dégradés par les organismes de la faune du sol (Macroorganismes). Ces organismes se nourrissent en ingérant et en assimilant partiellement des fragments de matière morte, qu'ils découpent avec leurs pièces buccales et les déplacent

dans le sol « matières organiques particulières ».

❖ **L'incorporation :**

Les vers de terre anéciques, les termites et les fourmis, ont un impact majeur sur le déplacement des matières particulières issues des premiers horizons. Ces ingénieurs du sol participent à l'incorporation des matières organiques des surfaces, dans les couches les plus profondes.

❖ **Le catabolisme enzymatique :**

Les matières organiques particulières sont également la source d'énergie pour les microorganismes décomposeurs (bactéries, champignons, archées) (**Tab 06**), qui produisent des enzymes extracellulaires capables de lyser certaines liaisons chimiques des matières organiques, et donc d'en détacher des sucres solubles. La libération des molécules inorganiques (CO₂, des ions nutritifs comme l'ammonium, les phosphates...etc) est appelée « minéralisation »

❖ **La stabilisation :**

C'est l'étape qui indique la fin de la décomposition des matières organiques. Certaines molécules s'adsorbent sur les minéraux du sol, et une fois adsorbées, elles sont moins sensibles à la dégradation enzymatique. On parle alors de stabilisation physico-chimique de la matière organique.

2.3.5. Pollution organique :

Les polluants organiques persistants sont des composés des écosystèmes aquatiques, qui peuvent être bio- accumulés dans les tissus adipeux des organismes marins et qui peuvent causer de sérieux dommages aux écosystèmes. Les bio-indicateurs de la contamination organique doivent soit avoir la capacité de bio- accumuler ces éléments et de résister fortement à leurs effets néfastes, ou présenter une grande sensibilité face à leur contamination, qui se traduit par des symptômes physiologiques, morphologiques, par la diminution de leur abondance, ou par leur disparition.

Tableau 07. Principaux décomposeurs de la matière organiques dans la nature

Groupe	Différents types selon leur nature
<p>Décomposeurs</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="630 427 826 465">□ <u>Microflore</u> <p data-bbox="579 517 1525 667">Bactéries et champignons, décomposeurs primaires principaux ; capables de digérer des matières organiques complexes et de les transformer en substances plus simples.</p> <li data-bbox="630 719 839 757">□ <u>Microfaune</u> <p data-bbox="579 808 1525 902">Certains types de protozoaires et de nématodes qui se nourrissent de tissus microbiens ou les assimilent et excrètent des nutriments minéraux.</p> <li data-bbox="630 954 831 992">□ <u>Mésofaune</u> <p data-bbox="579 1043 1525 1193">Allant des petits arthropodes acariens (Acari) et les collemboles (Collembola) et des Enchytraeidae ; qui désagrègent les résidus végétaux, et de la matière morte et se nourrissent de décomposeurs primaires.</p> <li data-bbox="630 1245 847 1283">□ <u>Macrofaune</u> <p data-bbox="579 1335 1525 1541">Fourmis, termites, mille-pattes et vers de terre qui contribuent à la décomposition des matières organiques en désagrégeant les détritux végétaux et les déplaçant dans le profil de sol, améliorant ainsi la disponibilité des ressources pour la microflore.</p>

2.3.6. Évaluation de la matière organique d'un milieu naturel :

Une estimation globale de la matière organique d'un milieu naturel est possible en utilisant comme référence la quantité d'oxygène nécessaire à les oxyder ou la mesure du carbone organique présent dans le milieu. Beaucoup d'indices naturels peuvent permettre cette estimation :

- La DCO ou demande chimique en oxygène (exprimée en mg O₂/l) pour les eaux chargées.
- La DTO ou demande totale en oxygène (exprimée en mg O₂/l).
- La DBO5 ou demande biochimique en oxygène sur 5 jours (exprimée en mg O₂/l).
- Les matières oxydables ou MOX (exprimées en mg O₂/l).
- Le COT ou carbone organique total.
- Le COD ou carbone organique dissous.
- Le rapport C/N ou carbone total sur azote total du sol.

2.3.7. Techniques d'analyse des composants d'un milieu naturel :

Contrairement aux paramètres physico-chimiques qui sont évalués par des mesures sur les lieux à analyser, l'évaluation des paramètres organiques et inorganiques (éléments chimiques) nécessite un déplacement des échantillons, des écosystèmes pollués aux différents laboratoires d'analyses ainsi que l'utilisation du matériel et des techniques spécifiques (**Fig 08**).



Figure 08. Etape d'évaluation de la qualité des écosystèmes naturels (Schéma personnel)

La sensibilité et le choix de la méthode d'analyse dépendent principalement de la qualité du milieu naturel, du type d'échantillon et de la différence de concentration des éléments au sein du milieu. Il existe plusieurs techniques d'évaluation des composants chimiques d'un milieu naturels :

2.3.7.1. Techniques de gravimétrie :

Elle est basée sur la détermination de la masse d'un composé pur, auquel l'analyse est apparentée chimiquement, son principe est la séparation de l'échantillon sous une forme qui peut être pesée. Beaucoup de substances organiques sont dosées par gravimétrie et cela par plusieurs procédures :

➤ **Gravimétrie par précipitation :**

C'est la technique d'analyse qui permet de séparer les ions d'une solution, grâce à une réaction de précipitation et l'ajout d'un réactif. Le composé est converti en un précipité qui sera par la suite filtré, lavé et enfin pesé.

➤ **Gravimétrie par volatilisation :**

Dans ce cas, le composé est volatilisé à une température appropriée. Le produit volatil est ensuite pesé, la masse de l'analyte peut être déterminée à partir de la perte de masse des échantillons.

2.3.7.2. Techniques de Titrimétrie :

C'est la technique de dosage utilisée pour déterminer la concentration d'un composé chimique depuis sa réaction avec un réactif. Le titrage met en œuvre une réaction chimique ou biochimique entre un composé à doser et un réactif, dont la concentration est déjà connue et qui est ajouté par incrément. La titrimétrie peut être réalisée selon plusieurs méthodes :

➤ **Titration volumétrique :**

Ajouter graduellement un volume de réactif dont la concentration est déjà connue, jusqu'à terminer la réaction chimique.

➤ **Titration gravimétrique :**

Pendant cette méthode de titrage, on mesure la masse du réactif nécessaire plutôt que son volume utilisé pour compléter l'opération.

➤ **Titration coulométrique :**

On ajoute graduellement des électrons à l'équipement jusqu'à atteindre la fin du titrage, on mesure ensuite le temps nécessaire pour réaliser la réaction électrochimique. La quantité des composants est déterminée à partir de l'intensité du courant.

2.3.7.3. Méthode de Potentiométrie :

Elle est réalisée à l'aide d'une électrode indicatrice et d'une électrode de référence. L'électrode indicatrice mesure la tension d'une solution en fonction de sa composition en éléments. Cette valeur est ensuite comparée aux résultats de l'électrode de référence.

2.3.7.4. Techniques de spectrophotométrie :

C'est la mesure de l'abondance ou de la densité optique d'une substance chimique. Son principe consiste à l'estimation de la différence entre la lumière incidente et celle transmise

par une solution. En effet, lorsqu'une lumière d'intensité précise passe à travers une solution, une partie de celle-ci sera absorbée par le soluté (les composants), et l'autre partie sera transmise avec une intensité inférieure. Il existe plusieurs méthodes de spectrométrie, parmi lesquelles, on peut citer :

➤ **Spectrométrie de masse :**

C'est une technique d'analyse qui consiste à identifier et quantifier les molécules d'une solution par mesure de leur masse. Son principe réside dans la séparation en phase gazeuse des molécules chargées en fonction de leur rapport (masse /charge).

➤ **Spectrométrie à fluorescence :**

Une technique d'analyse utilisée pour déterminer la composition chimique des échantillons solides, liquides, des boues ou de la poudre libre, par leur placement sous rayons X. Les atomes constituant l'échantillon passent de leur état fondamental à un état excité instable. Une fois revenir à leur premier état, ces atomes vont libérer de l'énergie sous forme de photons X qui seront par la suite émis une deuxième fois. L'analyse de rayonnement secondaire permet à la fois de connaître la nature des éléments chimiques dans un échantillon, ainsi que leur concentration massique.

➤ **Spectrométrie d'absorption atomique :**

Le principe de la méthode consiste à observer l'absorption atomique d'un rayonnement électromagnétique monochromatique de longueur d'onde égale à celle de la transition entre deux de ses niveaux électroniques. Le rayonnement est alors absorbé par un électron qui passe au niveau d'énergie supérieur. La diminution de l'intensité du rayonnement initial après interaction, traduira la concentration en atomes correspondants. Quand à la quantification des phénomènes, elle s'effectuera par la comparaison de ce taux d'absorption à celui des solutions étalons, à l'aide d'établissement d'une courbe d'étalonnage.

2.3.7.5. Méthodes d'activation neutronique :

Elle repose sur l'interaction entre un flux de neutrons thermiques (très lents) et les noyaux des atomes de la cible. Ceux-ci vont capturer ces neutrons pour former un noyau de masse plus élevée, qui se trouve dans un état instable (devient radioactif). Au bout d'un certain temps, ce noyau va revenir à son état fondamental, qui va être accompagné par l'émission d'un rayonnement électromagnétique de haute énergie : un rayonnement nommé « gamma » sera caractéristique du noyau qui lui a donné naissance, et qui sera mesuré en différé après la

première phase d'irradiation.

2.3.7.6. Méthodes chromatographiques :

Ce sont des méthodes utilisées pour la séparation, l'identification et le dosage des constituants chimiques d'un mélange. Leur principe est basé sur la migration des solutés d'un échantillon durant deux phases principales ; une phase stationnaire immobile et une phase mobile qui entraîne le passage des composants par un liquide ou un gaz (chromatographie en phase liquide ou chromatographie en phase gazeuse). Pour faciliter l'identification des constituants de mélanges complexes, notamment lorsqu'ils ne sont présents qu'à l'état de traces, on utilise fréquemment les couplages chromatographie/spectroscopie. Parmi les méthodes chromatographiques, les plus connues sont :

➤ Chromatographie sur colonne :

C'est une technique utilisée dans la purification en chimie organique. La séparation des composés est provoquée par l'écoulement continu d'un éluant passant dans une colonne. La phase stationnaire est donc maintenue dans un tube étroit et la phase mobile progresse par gravimétrie ou sous pression

➤ Chromatographie sur surface (planaire) :

Elle est utilisée pour séparer des composants dans un but d'analyse ou de purification, elle présente les avantages de ne nécessiter que peu de matériel et de donner des résultats facilement interprétables. La phase stationnaire est présente durant cette méthode à la surface d'un support plat (couche mince), ou sur une feuille en cellulose (papier). Quant à la phase mobile, elle se déplace par gravimétrie.

➤ Chromatographie en phase liquide à haute pression (HPCL) :

On fait passer le mélange d'échantillon avec un solvant liquide sous haute pression, à travers une colonne remplie d'un matériau adsorbant solide. La pression à l'intérieur du système est établie à l'aide de pompes. Le principe de fonctionnement est que chaque composé du mélange interagit légèrement avec le matériau adsorbant de la colonne, ce qui entraîne des débits variables pour les différents composants. Ceci conduira à une séparation des composants à mesure qu'ils sortent de la colonne. Le matériau adsorbant utilisé est généralement granulaire et est constitué de particules solides, telles que la silice, qui constitue la " phase stationnaire ". Le liquide maintenu à pression est un mélange de solvants, tels que l'eau ou les liquides organiques (méthanol et de l'acétonitrile) qui constituent la " phase mobile ".

Il existe d'autres techniques et d'autres méthodes d'analyse ayant principalement pour but l'évaluation de la qualité des milieux terrestres ou aquatiques et l'estimation de leur taux de pollution. Cela est réalisable par l'identification et la quantification de leurs différents composants organiques, inorganiques et métalliques.

Chapitre 02 : Analyses biologiques de l'environnement



Introduction :

Dans un écosystème équilibré, chaque organisme présente des exigences particulières. La modification de l'un des caractéristiques de cet environnement peut perturber son équilibre habituel. Il est également possible de prouver l'existence des pollutions à partir de l'étude des communautés animales et végétales. Cela est appelé : étude biologique pour détermination de la qualité de l'environnement.

1. Notions fondamentales :

1.1. Notion d'écotoxicologie :

En 1977, Ramade donnait la définition suivante de l'écotoxicologie : « c'est l'étude des modalités de contamination de l'environnement par les agents polluants naturels ou artificiels produits par l'activité humaine ainsi que de leurs mécanismes d'action et d'effets sur les êtres vivants qui peuplent la biosphère ». Par la suite Newman en 2015 a défini la notion de l'écotoxicologie comme « la science des contaminants et leurs effets sur les constituants de la biosphère, incluant les humains ».

1.2. Notion de bio-indicateur :

Un bioindicateur peut se définir comme une espèce ou un groupe d'espèces végétales ou animales dont la présence ou l'absence, l'abondance, la biomasse ou autres caractéristiques biologiques renseignent sur l'état écologique du milieu, et sur son niveau de dégradation. Les altérations morphologiques, comportementales, tissulaires ou physiologiques constituent également des variables observables et mesurables reflétant l'état de leur habitat. La bio-indication réfère donc la qualité des écosystèmes.

1.2.1. Rôles écologiques des bio-indicateurs :

Les bio-indicateurs (**Fig 09**) sont utilisés pour :

- ❖ Emettre des signaux précoces de problèmes environnementaux.
- ❖ Identifier les relations de cause à effet entre les facteurs d'altération et les effets biologiques.
- ❖ Evaluer l'état de stress global de l'environnement à travers différentes réponses d'organismes indicateurs.
- ❖ Développer l'efficacité de mesures réparatrices sur la santé des systèmes biologiques.

1.2.2. Critères des bio-indicateurs :

Les bio-indicateurs biologiques doivent répondre à quelques caractéristiques spécifiques nécessaires pour leur fiabilité et pour leurs analyses aux laboratoires :

- + Être connu scientifiquement (ubiquiste, abondant et sédentaire).
- + Être lié ou corrélé à des fonctions de l'écosystème.
- + Intégrer des propriétés ou des processus physiques, chimiques et biologiques.
- + Pouvoir prendre en compte différents aspects.
- + Présenter des qualités de mesure.
- + Echantillonnage facile, efficace et peu cher.
- + Élevage possible en laboratoire

1.2.3. Types de bio-indicateurs selon leurs réactions :

- **Bio-indicateurs d'accumulation :**

Ils désignent la capacité de certains organismes (végétaux, animaux, fongiques, microbiens) à absorber et concentrer dans une partie de leur organisme végétal (écorce ou le bois), ou animal (coquille ou corne), certaines substances chimiques, éventuellement rares dans l'environnement (oligo-éléments ou éléments toxiques), sans être influencés négativement.

- **Bio-indicateurs d'effet ou d'impact :**

Des organismes qui permettent de révéler des effets (fatigues, maladies, mortalité) lors de l'exposition à une ou plusieurs substances issues de leur environnement menacé de pollution agricole, ou de contamination industrielle...etc.

- **Bio-indicateurs sensibles à la pollution :**

Ce sont plutôt des espèces connues pour des conditions vitales déterminées et dont l'appariation, l'abondance ou la disparition saisonnière, indiquent la qualité écologique de leur milieu naturel (Présence ou absence des polluants).

1.3. Notion de bio-marqueur :

Il regroupe les paramètres biochimiques, cellulaires, physiologiques ou comportementaux mesurés dans les tissus ou les fluides d'un organisme, pour mettre en évidence l'effet de son exposition à un ou plusieurs contaminants. L'approche par biomarqueurs consiste à étudier les **réponses biologiques** sur des organismes de laboratoire, afin d'établir le diagnostic de la pollution de leur milieux naturels.

1.3.1. Niveaux d'étude des biomarqueurs :

Les bio-marqueurs peuvent être étudiés à plusieurs échelles :

- **L'échelle moléculaire et cellulaire** : pour une réponse sensible et rapide (alarme).
- **L'échelle tissulaire** : pour une évaluation des dommages sur les organes (histologie).
- **L'échelle de l'organisme entier** : pour une évaluation du potentiel de survie « marqueurs individuels ».

1.3.2. Types de bio-marqueurs :

▪ Les bio-marqueurs d'exposition (biomarqueurs de présence) :

Regroupent l'ensemble de mécanismes de régulation, d'adaptation et de défense face à un contaminant. Ils indiquent le degré de pénétration du polluant dans les tissus de l'organisme et ils sont utilisés dans le cas des contaminants difficiles à détecter par les analyses chimiques.

▪ Les biomarqueurs d'effet :

Traduisent les conséquences physio-pathologiques de l'exposition à un polluant, et diagnostiquent un dépassement des capacités de régulation de l'organisme pour constituer un signal d'alerte de perturbations du fonctionnement global de l'organisme, et de sa population.

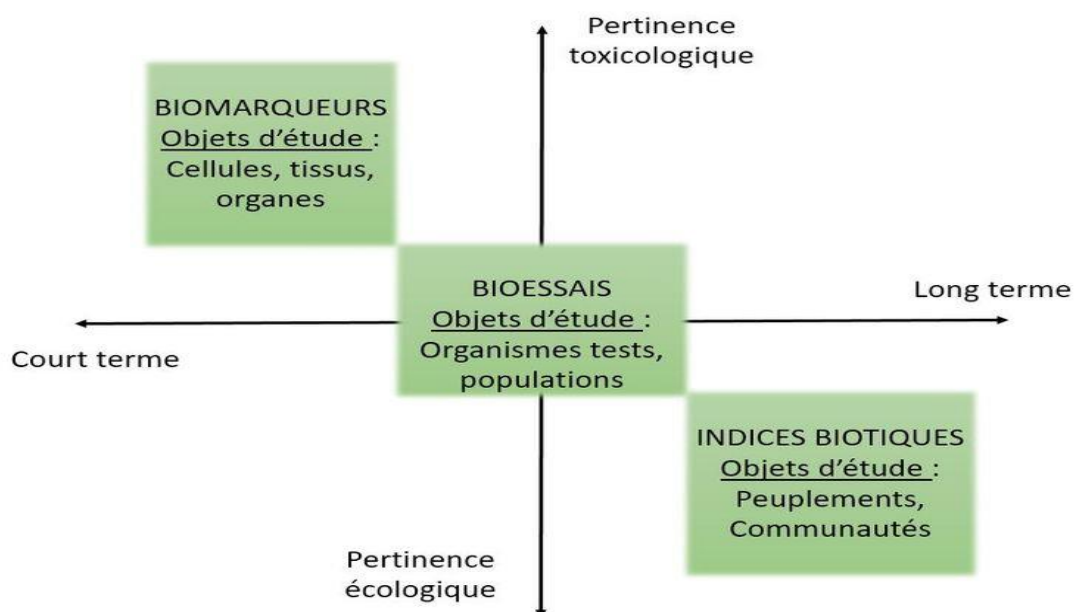


Figure 09. Position des types de bio-indicateurs dans le profil toxicologique des espèces (Khalanski and Souchon, 1994).

3. Méthodes biologiques évaluant la qualité des milieux :

3.1. Notion de biosurveillance :

Elle désigne l'ensemble des outils basés sur « l'utilisation du vivant (organisme ou ensemble d'organismes à tous les niveaux d'organisation biologique moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique, tissulaire, morphologique et écologique) pour surveiller l'évolution des modifications et des altérations, ou la stabilité de la qualité d'un milieu » selon des:

3.2. Méthodes biochimiques :

Elles indiquent l'évaluation des bio-marqueurs provoquant tout changement observé ou mesuré au niveau moléculaire (biochimique, cellulaire, physiologique ou comportemental) chez un individu, à cause de son exposition à une substance chimique toxique (Par altérations d'ADN- Synthèse des protéines ou des enzymes)

3.3. Méthodes éco-toxicologiques :

Un ensemble de tests toxicologiques d'une population d'organismes exposée à un polluant spécifique. Ces bio-essais peuvent avoir comme but :

- L'estimation des concentrations provoquant des effets toxiques (Baisse du niveau des activités physiologiques et de reproduction, mortalité des individusetc).
- La capacité de bioaccumulation sur les bio-accumulateurs qui captent et stockent ces polluants (Molécules toxiques, éléments traces, pesticides.....etc), elle est indiquée par un facteur de concentration (FBC).

$$\text{FBC} = \frac{\text{Concentration d'un composé dans l'être vivant}}{\text{Concentration du même composé dans un milieu environnant}}$$

3.4. Méthodes biocénétiques :

Qui permettent de suivre l'évolution des biocénoses (Population animale et végétale) dans un espace et un temps précis. Ces méthodes biocénétiques peuvent se réaliser par plusieurs procédures, parmi lesquelles on peut citer :

3.4.1. Zonation des cours d'eaux :

Quatre typologies communément admises décrivent, de l'amont vers l'aval la répartition théorique des espèces en l'absence de perturbation. Cette organisation des espèces correspond aux peuplements de référence observés dans les milieux non dégradés. Les types de zonation

des milieux aquatiques sont :

- **La zonation piscicole de Huet (1949) :**

« Dans un territoire biogéographique déterminé, des eaux courantes comparables en largeur, en profondeur et de pente de même ordre, présentent des caractères biologiques analogues, particulièrement pour les populations piscicoles. » (Règle des pentes ou « règle de Huet »).

- **La zonation de Illies et Botosaneanu (1963) :**

Illies et Botosaneanu ont classé les différentes zones d'un cours d'eau en prenant en compte les invertébrés benthiques. Ils décrivent alors trois zones « universelles » : Le crénon (zones des sources), le rhitron (cours supérieur, rapide) et le potamon (cours inférieur, lent). Chacune de ces zones abrite des peuplements qualitativement homogènes. Les limites entre ces différentes subdivisions se situent au niveau des confluences principales.

- **La biotypologie de Verneaux (1973) :**

La structuration biologique du cours d'eau (poissons et invertébrés) est définie en fonction de la température, de la dureté de l'eau, de la section mouillée à l'étiage, de la pente et de la largeur du cours d'eau.

- **Le River continuum concept (1980) :**

Le régime alimentaire des invertébrés conditionne leur répartition longitudinale. Quatre grands groupes fonctionnels sont identifiés :

- Les broyeurs qui se nourrissent de grosses particules encore peu décomposées (litière forestière) ou directement de macrophytes.
- Les collecteurs qui récupèrent des particules plus fines, issues d'une décomposition plus avancée de la matière, soit dans la colonne d'eau, soit piégées dans les sédiments.
- Les brouteurs qui se nourrissent de périphyton (organismes aquatiques fixés à la surface des substrats immergés qu'ils soient minéraux ou biologiques).
- Les prédateurs qui se nourrissent de proies.

3.4.2. Analyses numériques et indices écologiques de biodiversité :

La biodiversité naturelle signifie la variété totale des formes de vie sur terre, depuis la

diversité des gènes jusqu'à celle des écosystèmes. Pour l'estimer, on doit faire appel à plusieurs paramètres de mesure. La mesure de la biodiversité est basée sur des aspects phylogénétiques ou fonctionnels, qui se révèlent pertinents en biologie de la conservation. Parmi ces indices, les plus importants et les plus utilisés en écologie sont :

❖ **La richesse des espèces (S) :**

L'indice le plus courant en étude de la biodiversité est la richesse des espèces (S), c'est-à-dire le nombre d'espèces représentées en un lieu donné. Un inventaire simple peut donner une idée sur toutes les catégories des espèces présentes dans un milieu.

❖ **L'abondance spécifique (A):**

C'est le nombre des individus pour chaque espèce identifiée dans un milieu donné. L'abondance relative (A_r) est plutôt le pourcentage de la présence d'une espèce par rapport à la présence du peuplement :

$$A_r = A(i) \times 100 / A \text{ (total)}$$

❖ **L'équitabilité des espèces (J):**

L'équitabilité (J) désigne la distribution égale ou différente des individus au sein des espèces. En d'autres mots, elle renseigne sur l'abondance relative des différentes espèces et de leur régularité dans la population. Sa valeur se rapproche de **1**, lorsque le nombre d'individus par espèce dans un peuplement est presque le même.

$$J = H' / H_{\max}$$
$$H_{\max} = \text{Log}_2 (S)$$

Où :

H' : Indice de diversité

S: Nombre d'espèces

Log 2: Logarithme binaire

❖ **L'indice de Simpson (D):**

Appelé aussi indice de dominance, il combine la richesse et l'équitabilité des espèces. C'est

la probabilité que deux individus sélectionnés au hasard appartiennent à la même espèce dans un peuplement.

$$D = \sum ni (ni-1) / N(N-1)$$

Où :

ni : Nombre d'individus de l'espèce donnée.

N : Nombre

❖ **L'indice de Shannon Weaver (H')**:

Il permet d'exprimer la diversité spécifique d'un peuplement, de quantifier l'hétérogénéité de la biodiversité d'un milieu, et d'observer par conséquent l'évolution d'une population au cours du temps. Plus la valeur de l'indice de Shannon Weaver (H') est élevée, plus la diversité est importante (**Tab 07**).

$$H' = -\sum (ni/ N) \times Ln (ni/ N)$$

Où :

S : Nombre total d'espèces ;

ni/N: Abondance proportionnelle ou pourcentage d'importance de l'espèce ;

ni: Nombre d'individus d'une espèce dans l'échantillon ;

N : Nombre total d'individus de toutes les espèces ; dans l'échantillon ;

Ln : Logarithme népérien.

Tableau 08. Indice de Shannon (H') et diversité écologique d'un milieu naturel

Indice de Shannon (H')	Qualité du milieu
0-2,5	Milieu peu diversifié (Espèces dominantes)
2,6-3,9	Diversité moyenne (milieu riche en espèces)
4-5	Diversité élevée (milieu isotrope)

3.4.3. Exercices sur les analyses numériques des populations :

▪ Exercice 01 :

Le tableau suivant indique les valeurs d'abondance de cinq espèces différentes pendant les 4 saisons de l'année.

1- Calculer l'indice de Shannon-Weaver (H') pour chaque saison.

2-Indiquer la qualité écologique du milieu.

Tableau 01. Abondance de cinq espèces différentes pendant quatre saisons différentes

Espèces	Automne	Hiver	Printemps	Eté
E1	3	13	6	2
E2	3	20	20	5
E3	2	3	3	4
E4	0	4	1	2
E5	1	2	0	1

▪ Correction de l'exercice 01 :

Tableau 02. Valeurs de l'indice de diversité de Shannon –Weaver pour chaque saison

Espèces	Automne	Pi	ln pi	pi * ln pi
E1	3	0,33	-1,10	-0,36
E2	3	0,33	-1,10	-0,36
E3	2	0,22	-1,50	-0,33
E4	0			
E5	1	0,11	-2,20	-0,24
Totaux	9			H'=1,29

Espèces	Hiver	Pi	ln pi	pi * ln pi
E1	13	0,31	-1,17	-0,35
E2	20	0,48	-0,73	-0,35
E3	3	0,07	-2,65	-0,18
4	4	0,09	-2,40	-0,22
E5	2	0,05	-2,99	-0,14
Totaux	42			H'=1,24

Espèces	Printemps	Pi	ln pi	pi * ln pi
E1	6	0,20	-1,61	-0,32
E2	20	0,67	-0,41	-0,27
E3	3	0,10	-2,30	-0,23
E4	1	0,03	-3,40	-0,11
E5				
Totaux	30			H'=0,93

Espèces	Eté	Pi	ln pi	pi * ln pi
E1	2	0,14	-1,97	-0,27
E2	5	0,36	-1,02	-0,37
E3	4	0,28	-1,27	-0,35
E4	2	0,14	-1,97	-0,27
E5	1	0,07	-2,66	-0,19
Totaux	14			H'=1,45

La qualité écologique du milieu durant les quatre saisons est la suivante :

- **En Automne** : Milieu peu diversifié (Espèce dominante E 02 et E 01)
- **En Hiver** : Milieu peu diversifié (Espèce dominante E 02)
- **Au Printemps** : Milieu peu diversifié (Espèce dominante E 02)
- **En Été** : Milieu peu diversifié (Espèce dominante E 02)

4. Bioindicateurs et indices de pollution des milieux naturels :

4.1. Cas du milieu aquatique :

4.1.1. Pour les espèces végétales :

4.1.1.1. Indices diatomiques :

Les diatomées (**Fig 11**) sont des algues microscopiques unicellulaires des eaux douces ou salées, qui vivent en suspension dans l'eau ou attachées sur le fond des lacs et des rivières. Elles utilisent le phosphore et l'azote dissous dans l'eau pour leur croissance et sont surtout affectées par les métaux lourds et les pesticides.

L'ensemble des indices des diatomées permet l'évaluation des paramètres d'eutrophisation, d'acidification, de saprobie et de salinité des milieux marins.

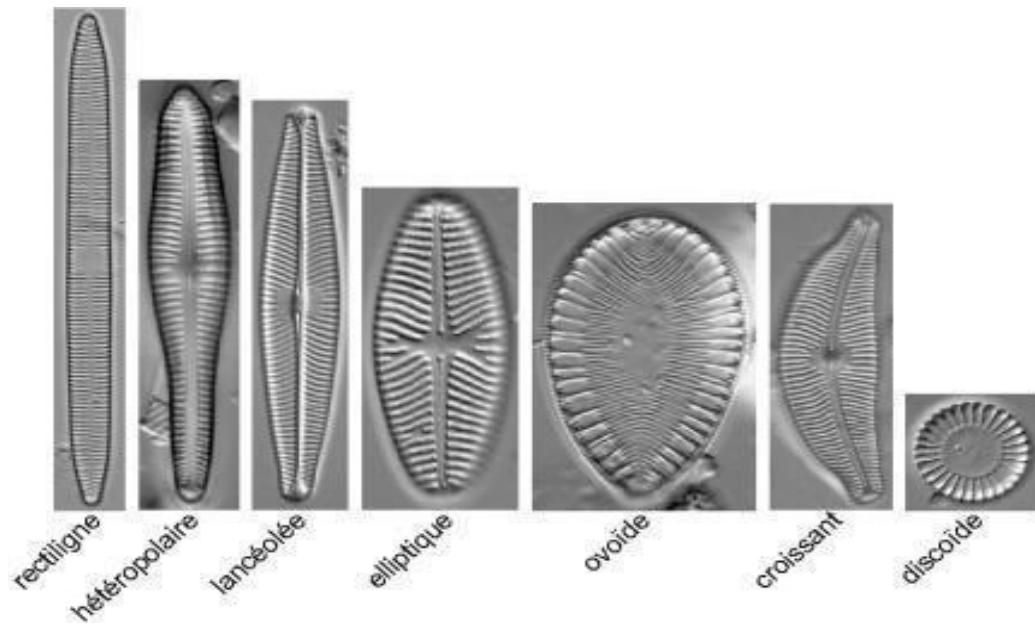


Figure 11. Différentes classes de diatomées des milieux aquatiques (Campeau et al., 2009)

Dans les milieux aquatiques, les diatomées sont fortement influencées par :

- Le pH du milieu
- Les nutriments (surtout l'azote et le phosphore)
- La présence de matières en dégradation
- Une faible oxygénation des eaux.

Parmi ces indices diatomiques, on peut citer :

❖ **Indice de polluo-sensibilité spécifique des diatomées IPS :**

C'est le taux de tolérance d'une espèce de diatomées envers une pollution organique dans le milieu aquatique (Présence du phosphore ou du nitrate), il est indiqué par l'équation suivante :

$$IPS1 = \frac{\sum(A_i \times S_i \times V_i)}{\sum(A_i \times V_i)}$$

Avec:

A_i: Abondance relative de l'espèce i

S_i: Valeur de sensibilité de l'espèce i (**Tab08**)

.V_i: Valeur indicatrice de l'espèce i (**Tab08**).

Tableau09. Sensibilité à la pollution (s) et valeurs indicatrices (v) de quelques espèces diatomiques (CEMAGREF, 1982)

Genres	Espèces	S	V
Achnanthes	<i>Achnanthes hungarica</i>	2	3
Amphora	<i>Amphora pediculus</i>	4	2
Craticula	<i>Craticula accomoda</i>	1	3
Cyclotella	<i>Cyclotella atomus</i>	2	1
Navicula	<i>Navicula lanceolata</i>	3	1
Neidium	<i>Neidium Iridis</i>	5	2
Melosira	<i>Melosira nummuloidea</i>	2	3
Sellaphora	<i>Sellaphora pupula</i>	2	2

Ensuite la valeur de IPS est estimée et classée (**Tab 09**), depuis la valeur de IPS1 comme suit

$$IPS = 4.75 \times IPS1 - 3.75$$

Tableau 10. IPS et qualité du milieu (ECOTOX, 2001)

Valeur de IPS	Classification de la pollution	Milieu écologique
$17 \leq IPS < 20$	Pollution ou eutrophisation nulle à faible	Très bon
$13 \leq IPS < 17$	Eutrophisation modérée	Bon
$9 \leq IPS < 13$	Pollution moyenne ou eutrophisation forte	Moyen
$5 \leq IPS < 9$	Pollution forte	Mauvais
$1 \leq IPS < 5$	Pollution ou eutrophisation très forte	Très mauvais

❖ **Indice biologique des diatomées (IBD) :**

Il permet l'évaluation de la qualité d'une station et de l'effet des perturbations écologiques sur les cours d'eau. L'IBD présente une évaluation à la fois du degré de trophie et de la charge organique de la masse d'eau. Il est basé sur l'étude de plusieurs taxons des diatomées (environ 209), pouvant être présents dans ces milieux aquatiques, en les fragmentant en 7 classes de qualité d'eau, comme suit :

$$F(i) = \frac{\sum_{x=1}^n A_x \times P_x(i) \times V_x}{\sum_{x=1}^n A_x \times V_x}$$

Où

A_x : Abondance du taxon x (exprimé en %) ;

$P_x(i)$: Probabilité de présence du taxon apparié x pour la classe de qualité de l'eau

i ; V_x : valeur écologique du taxon apparié x ;

n : Nombre de taxons appariés retenus après l'application des valeurs seuils de présence.

Les sept valeurs de $F(i)$ sont ainsi estimées. Un indice « B » est ensuite calculé selon la formule suivante :

$$B = 1 \times F(1) + 2 \times F(2) + 3 \times F(3) + 4 \times F(4) + 5 \times F(5) + 6 \times F(6) + 7 \times F(7)$$

La valeur d'IBD est enfin déduite (**Tab 10**) et classée (**Tab 11**) selon les tableaux suivants :

Tableau 11. Valeurs des IBD en fonction des valeurs de B (Rimet et al., 2006)

Valeur de B	> 2	2 à 6	≥ 6
BD	1	4.75×B-8.5	20

Tableau 12. IBD et qualité du milieu (DREAL, 2010)

IBD	≥ 17	17 > IBD ≥ 13	13 > IBD ≥ 9	9 > IBD ≥ 5	< 5
État écologique	Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais

4.1.2. Pour les espèces animales :

4.1.2.1. Indices de saprobie:

Une saprobie est un organisme aquatique vivant dans un milieu riche en matière organique morte ou en décomposition, et sur laquelle il se nourrit en manque d'oxygène. L'indice de saprobie (SI) reflète donc la tolérance des organismes envers la présence de cette matière et indique dans ce cas le taux de pollution organique du milieu.

4.1.2.2. Indices des invertébrés :

Les invertébrés marins sont des animaux multicellulaires dépourvus de colonne vertébrale et

vivant dans le milieu aquatique. Ils regroupent plusieurs taxons tels que les éponges, les cnidaires (méduses, coraux), les vers marins, les mollusques (escargots, limaces), les arthropodes (crabes, crevettes, homards) et les échinodermes (étoiles de mer, oursins de mer). Les macro-invertébrés peuvent indiquer la qualité des milieux aquatiques selon leurs différents groupes comme suit :

❖ **Les Oligichètes : indice Oligochètes de bioindication des sédiments (IOBS):**

C'est une sous classe de vers des annélides abondante dans les sédiments fins, sableux et grossiers des cours d'eau et des lacs. Ils sont connus pour leur sensibilité et leur résistance aux pollutions organiques. Leur indice est appelé indice Oligochètes de bioindication des sédiments (IOBS) (Tab 12). Il indique l'incidence écologique des micropolluants organiques métalliques (Fig 12).

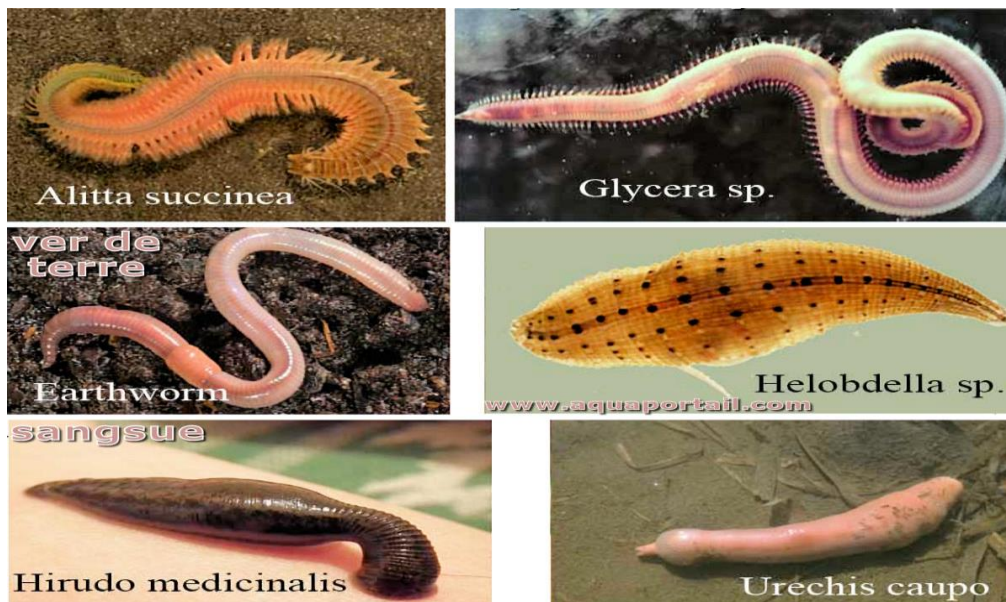


Figure 12. Exemples d'Oligochètes marins (Webographie 05)

La valeur de cet indice (IOBS) est indiquée par l'équation suivante :

$$IOBS = \frac{10 \times S}{T}$$

Avec :

S : Nombre total de taxons identifiés parmi les 100 oligochètes.

T : Pourcentage du groupe dominat

Tableau 13. IOBS et qualité du milieu (Lafont et al., 2002)

IOBS	Qualité biologique des sédiments
≥ 6	Très bon
$3 \leq \text{IOBS} \leq 6$	Bon
$2 \leq \text{IOBS} \leq 3$	Moyen
$1 \leq \text{IOBS} \leq 2$	Médiocre
$\text{IOBS} < 1$	Mauvais

❖ **Les Chironomidés : indice de qualité benthique des Chironomidés (IQBC) :**

C'est une famille des diptères nématocères, composée des insectes de petite taille apparentés aux Ceratopogonidae, aux Simuliidae, et aux Thaumaleidae, ressemblant beaucoup à des moustiques. En forme larvaire, l'espèce est très résistante à la pollution et présente un bon bio-indicateur de la qualité des milieux aquatiques (**Fig 13**). L'indice écologique des Chironomidés est nommé indice de qualité benthique des Chironomidés (IQBC). Il considère le nombre des individus de chaque groupe d'espèce indicatrice sur le nombre total des individus de toutes les espèces indicatrices.

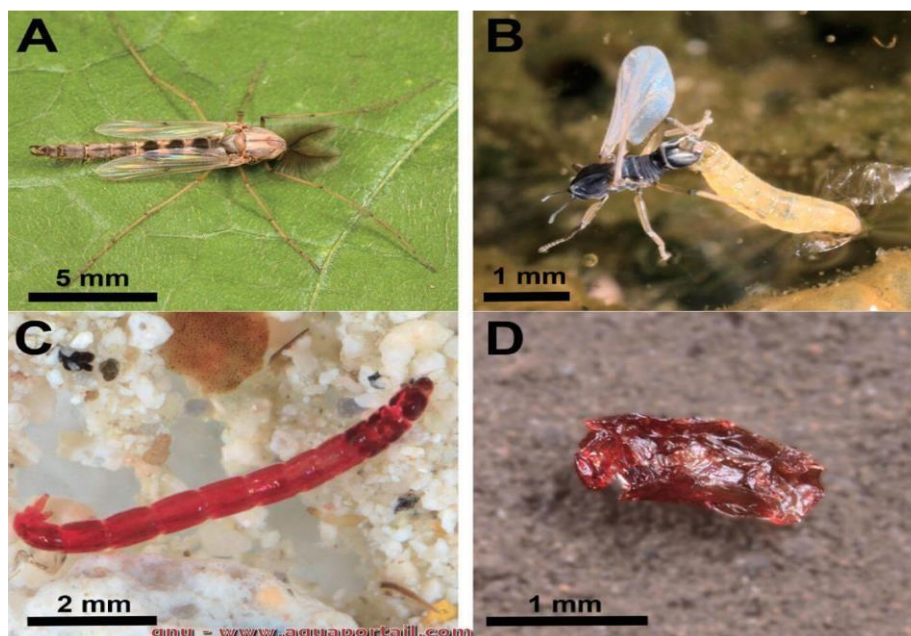


Figure 13. Cycle de vie des Chironomidés (A : Adulte ; B : Ponte ; C : Larve ; D : Nymphose) (Webographie 06)

La valeur de cet indice (IQBC) est indiquée par l'équation suivante :

$$IQBC = \frac{\sum_{i=0}^5 ki \times ni}{N}$$

Avec :

N : Nombre total d'individus de toutes les espèces indicatrices.

ni : Nombre d'individus du groupe d'espèce i

ki = 5 pour *Macropelopia spp.*, *Paracladopelma nigritula gr.* et *Heterotrissocladus spp.*,

ki = 4 pour *Micropsectra spp.* et *Paratendipes spp.*,

ki = 3 pour *Sergentia coracina*, *Stictoichonomus spp.*,

ki = 2 pour *Chironomus anthracinus* et *Tanytarsus spp.*,

ki = 1 pour *Chironomus plumosu*,

ki = 0 si les espèces indicatrices sont absentes

❖ **Les Mollusques : indice malacologique de qualité des systèmes lacustres (IMOL) :**

C'est un embranchement des lophozoaires qui colonisent les profondeurs du milieu aquatique (**Fig 14**). Ce sont des indicateurs du système lacustre selon l'indice malacologique de qualité des systèmes lacustres (IMOL), qui se base principalement sur le calcul des peuplements des mollusques des lacs de profondeur maximale.

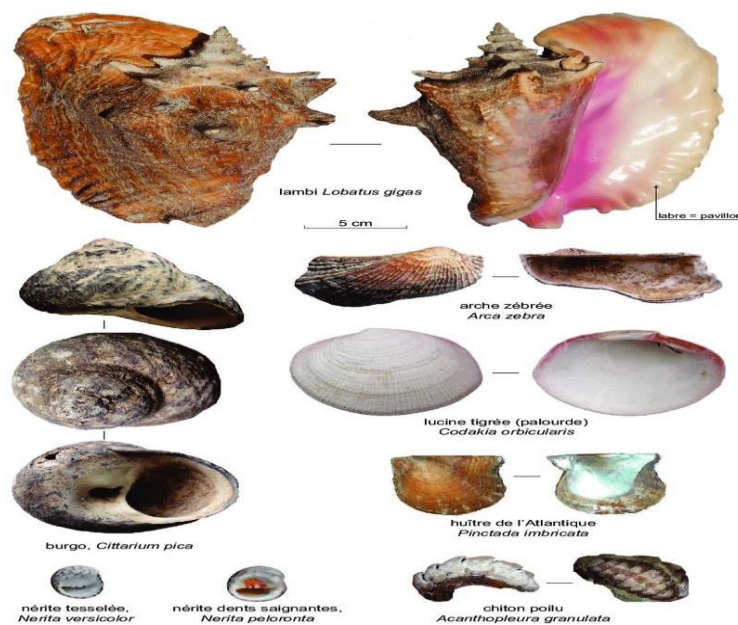


Figure 14. Des espèces de mollusques marins (Bonnissent et al., 2016)

Pour l'estimer on prélève les mollusques de trois profondeurs différentes :

- $Z_1 = 9/10 Z_{\max}$,
- $Z_2 = -10\text{m}$ et
- $Z_3 = -3\text{m}$.

Pour chaque espèce identifiée dans chaque profondeur précise, l'indice IMOL varie selon le tableau suivant (**Tab 13**)

Tableau 14. Valeurs standards de l'indice IMOL (Mouthon, 1991)

Niveau d'échantillonnage	Repères malacologiques	Indices
$Z_i = 9/10 Z_{\max}$	Gastéropodes et Bivalves présents	8
	Gastéropodes absents, Bivalves seuls présents	7
	Absence de mollusques en Z_i	
$z_2 = -10 \text{ m}$	Deux genres ou plus de deux genres de Gastéropodes présents	6
	Un seul genre de Gastéropode présent	5
	Gastéropodes absents, pisidies présentes avec plus d'un individu par benne	4
	Absence de mollusques en Z_2	
$z_3 = -3 \text{ m}$	Deux genres ou plus de deux genres de Gastéropodes présents	3
	Un seul genre de Gastéropode présent	2
	Gastéropodes absents, pisidies présentes avec plus d'un individu par benne	1
	Absence de mollusques	0

4.1.2.3. Indices des vertébrés :

Les vertébrés marins sont présentés par quatre grandes classes (Les mammifères, les oiseaux, les poissons et les reptiles). Parmi ces classes, les poissons (**Fig 15**) sont les espèces les plus résistantes à la pollution et sont les meilleurs marqueurs de la qualité d'eau par estimation de l'indice des poissons rivières (IPR) :

❖ Indice poissons rivières (IPR)

Il permet d'évaluer le niveau d'altération des peuplements piscicoles à partir de différentes caractéristiques sensibles à l'intensité des perturbations anthropiques, et détermine l'état du

milieu aquatique.

Les familles des Chaetodontidae, les poissons-papillon, et des Pomacentridae, les poissons-demoiselle, semblent l'être. L'assemblage de poissons reste sans doute le bioindicateur le plus utilisé en milieu aquatique en fonction de 7 paramètres :

- Nombre total d'espèces.
- Nombre d'espèces rhéophiles.
- Nombre d'espèces lithophiles.
- Densité d'individus tolérants.
- Densité d'individus insectivores.
- Densité d'individus omnivores.
- Densité totale d'individus.



Figure 15. Poissons de rivières indicateurs de pollution (Webographie 07)

L'IPR est obtenu par la somme des 7 valeurs de paramètres estimés. Il varie selon le tableau suivant (Tab14).

Tableau 15. IPR et qualité du milieu Belliard et Roset, 2006)

IPR	<7	7 à 16	16 à 25	25 à 36	>36
Classe de qualité	Excellente	Bonne	Médiocre	Mauvais	Très mauvais

4.2. Cas du milieu atmosphérique :

4.2.1. Pour les espèces végétales :

❖ Les lichens :

Ils sont formés d'une association entre un champignon et une algue, leurs caractéristiques biologiques les rendent fortement dépendants de la qualité de l'atmosphère. Ils sont donc sensibles aux polluants gazeux et peuvent même disparaître dans une atmosphère impactée (**Fig 16**). Ils sont très sensibles à la pollution atmosphérique grâce aux diverses caractéristiques anatomiques et physiologiques, particulièrement :

- Absence de cuticule, de stomates et de vaisseaux conducteurs,
- Présence d'un cortex riche en mucilages,
- Reviviscence, à activité photosynthétique toute l'année,
- Croissance lente.



Figure 16. Variété d'espèces de lichens (Brodo et al., 2001)

Parmi les indices indicateurs de la qualité des lichens et de leur environnement, on compte :

- **Indice de pureté atmosphérique (IPA) :**

C'est une approche quantitative basée sur un indice de pollution relatif à la flore lichénique, ainsi que le nombre et la fréquence de chaque espèce (**Tab 15**). Il est estimé par l'équation suivante :

$$IPA = \frac{1}{10} \times \sum_{i=1}^n (O_i \times F_i)$$

Avec :

i: Espèce lichénique

ni : Nombre d'espèces dans la station ;

O_i : Indice écologique de l'espèce i ;

F_i : Coefficient de recouvrement de l'espèce i (de 1, rare, à 5, abondante)

Tableau 16. IPA et qualité du milieu (Agnan, 2013)

IPA	0 à 15	15 à 30	30 à 45	45 à 60	> 60
Type de pollution Atmosphérique	Très élevée	Élevée	Moyenne	Faible	Très faible

4.2.2. Pour les espèces animales :

❖ Les abeilles :

Les abeilles pollinisent plus de 80% des plantes, et sont très sensibles aux traitements phytosanitaires des végétaux. Elles sont donc considérées comme de bons bio-indicateurs de la qualité de l'environnement et peuvent détecter la présence des molécules polluantes dans les milieux naturels (**Fig17**)



Figure 17. Abeilles indicatrices de la qualité des milieux atmosphériques (Webographie 08)

La présence d’ozone (O₃) à fortes concentrations dans l’atmosphère génère un état de stress oxydatif pour les abeilles. L’utilisation des produits phytosanitaires sur les plantes est à l’origine des dommages que subissent les espèces polinisatrices.

Les abeilles sont d’excellents indicateurs biologiques parce qu’elles signalent la dégradation chimique de l’environnement dans lequel elles vivent, et ce par le biais de deux signaux :

- Le degré de mortalité plus ou moins élevé renseigne après des analyses de laboratoires sur la qualité du milieu atmosphérique.
- La mortalité quotidienne naturelle pour des butineuses (Abeilles ouvrières chargées de la récolte du pollen sur les fleurs) est comprise entre 2.000 et 30.000 abeilles par jour. Une surmortalité de ces dernières peut révéler une pression liée à un déséquilibre de l’environnement.

4.3. Cas du milieu terrestre :

4.3.1. Pour les espèces végétales :

❖ Les plantes hyper-accumulatrices des métaux lourds :

Dans le milieu terrestre, les analyses se réalisent sur les feuilles prélevées des espèces représentatives de la communauté végétale des sols contaminés. Il s’agit de la phyto-disponibilité globale des contaminants métalliques des plantes indicatrices de pollution. D’autres plantes accumulatrices ont la capacité d’absorber des polluants du sol et de les stocker dans leurs tissus (Techniques de phyto-remédiation des sols pollués) (**Fig18**).



Figure 18. *Phyllanthus orbicularis* ; plante hyper-accumulatrice des métaux lourds (Webographie 09)

L'indice estimé pour les végétaux indicateurs de la qualité des sols est :

- **Indice CMT végétaux :**

Il est basé sur une comparaison des teneurs en éléments traces métalliques dans les échantillons contaminés (feuilles des plantes) avec celle d'échantillons témoins, caractéristiques de sites non contaminés (**Tab 16**).

Tableau 17. CMT-végétaux et qualité du sol (Le Guédard et al., 2017)

CMT	Qualité du milieu
0-5	Milieu non pollué
5-15	Moyennement pollué (Surveillance des zones)
> 15	Milieu pollué

4.3.2. Pour les espèces animales :

- ❖ **Les escargots :**

Les escargots (**Fig1 9**) se nourrissent des végétaux, de sol et d'humus. Leur capacité à accumuler des polluants comme les métaux a été utilisée pour révéler la contamination des milieux à l'interface sol-air- végétaux. Les escargots sont importants pour de nombreux consommateurs (vers luisant, oiseaux, hérisson et l'homme). Leur état peut être estimé par l'indice SET-Escargots :



Figure 19. Escargot Bio-indicateur Bio-accumulateur de pollution des milieux terrestres (Webographie 10)

- **Indice SET-Escargots :**

C'est un indicateur de la zoo-disponibilité des contaminants métalliques des sols. Il varie et influence la qualité du sol selon le tableau suivant (**Tab 17**).

Tableau 18. SET-Escargots et qualité du sol (Le Guédard et al., 2017)

SET-Escargots	Qualité du milieu
0-1	Milieu non pollué
1-5	Moyennement pollué (Surveillance des zones)
> 5	Milieu pollué

4.4. Exercices sur les Analyses biologiques de l'environnement :

❖ Exercice 01:

Le tableau suivant indique les valeurs d'abondance, les valeurs de sensibilité à la pollution et les valeurs indicatrices de quelques espèces des diatomées. Calculer l'indice de pollution-sensibilité spécifique (IPS), et indiquer la qualité du milieu.

Tableau 01. Abondance (ni), sensibilité à la pollution (s) et valeurs indicatrices (v) de quelques espèces diatomiques recensées dans une rivière

Genre	Espèce	ni	Si	vi
Achnanthes	A.hungaricaGrünow	13	2	3
Amphora	A. pediculusKützing	6	4	2
Craticula	C.accomoda(Hustedt)D.G. Mann	8	1	3
Cyclotella	C.atomusHustedt	23	2	1
Navícula	N.lanceolataAgardh(Ehr.)	43	3	1
Neidium	N.Iridis(her.) cleve	21	5	2
Melosira	M.nummuloides(Dillwyn) Agardh	17	2	3
Sellaphora	S. pupula(Kützing) MereschkowskiD.G. Mann	11	2	2

❖ Correction de l'exercice 01 :

$$IPS1 = \frac{\sum(Ai \times Si \times Vi)}{\sum(Ai \times Vi)}$$

Genre	Espèce	Ni	A	si	v	Axsi	Axvi
Achnanthes	A. hungarica Grünow	13	9,15	2	3	54,93	27,46
Amphora	A. pediculus Kützing	6	4,23	4	2	33,80	8,45
Craticula	C. accomoda (Hustedt) D.G. Mann	8	5,63	1	3	16,90	16,90
Cyclotella	C. atomus Hustedt	23	16,20	2	1	32,39	16,20
Navicula	N. lanceolata Agardh (Ehr.)	43	30,28	3	1	90,85	30,28
Neidium	N. Iridis (her.) Cleve	21	14,79	5	2	147,89	29,58
Melosira	M. nummuloides (Dillwyn) Agardh	17	11,97	2	3	71,83	35,92
Sellaphora	S. pupula (Kützing) Mereschkowski D. G. Mann	11	7,75	2	2	30,99	15,49
N		142				479,58	180,28

$$IPS = 4.75 \times IPS1 - 3.75$$

IPS1	2,66
IPS	8.89

- L'indice IPS est égal à 8.89
- La rivière présente une mauvaise qualité d'eau avec une forte pollution.

❖ Exercice 02 :

Les données du tableau suivant indiquent les valeurs de quelques indices biologiques des bio-indicateurs de plusieurs stations hydriques.

1-Classer les stations en fonction des différents indices.

Tableau 02. Valeurs de quelques indices biologiques de plusieurs stations

Stations Indices	Station 01	Station 02	Station 03	Station 04	Station 05
IPS	9,02	15,03	12,09	17,20	5,50
IBD	17,9	17,8	15	19,2	14,1
IOBS	3,02	3,59	1,30	15,35	2,08
IPR	7,30	6,6	123	6,9	36,6

❖ **Correction de l'Exercice 02 :**

IPS : Indice de polluo-sensibilité spécifique. Les valeurs d'IPS varient de 5,50 (S05) jusqu'à 17,20(S04). Le milieu est mauvais (S05), moyen (S01 et S03), bon (S02) et très bon (S04).

IBD : Indice biologique diatomique. Les valeurs d'IBD varient de 14,10 (S05) jusqu'à 19,2 (S04). Le milieu est bon (S03 et S05) et très bon (S01, S02 et S04).

IOBS : Indice Oligochètes de bioindication des sédiments. Les valeurs d'IOBS varient de 1,30 (S03) à 15,35 (S04). Le milieu est médiocre (S03), moyen (S05), bon (S01 et S02) et très bon (S04).

IPR : Indice poissons rivière. Les valeurs d'IPR varient de 6,6 (S02) à 123 (S03). Le milieu est très mauvais (S03 et S05), bon (S01) et excellent (S02 et S04).

Le classement des stations est le suivant :

De la station la moins polluée vers la plus polluée : S04-S02-S01-S03-S05.

❖ **Exercice 03 :**

Voici les valeurs d'indices biologiques des bio-indicateurs de plusieurs terrains agricoles. Interpréter le tableau en indiquant la qualité de chaque milieu terrestre.

Tableau 03. Valeurs de quelques indices biologiques de plusieurs terrains agricoles

Stations Indices	Site 01	Site 02	Site 03	Site 04	Site 05
CMT-Végétaux	36	6,9	22,1	3,4	7,2
SET- Escargots	17	5,3	2,5	0,9	1,6

❖ Correction de l'Exercice 03 :

1-CMT-Végétaux :

Il est basé sur une comparaison des teneurs en éléments traces métalliques dans les échantillons contaminés (feuilles des plantes) avec celle d'échantillons témoins, caractéristiques de sites non contaminés.

Sa valeur varie de 7,2 (S05) à 36 (S01). La qualité du sol est polluée (S01 et S03), moyennement polluée(S02 et S05) et bonne (Non polluée) (S04).

2-SET- Escargots :

C'est un indicateur de la zoo-disponibilité des contaminants métalliques des sols.

Sa valeur varie de 0,9 (S04) à 17 (S01). La qualité du sol est polluée (S01 et S02), moyennement polluée(S03 et S05) et bonne (Non polluée) (S04).

La station S04 est la moins polluée et la station S01 est la plus polluée.

5. Diagnostic écologique des milieux naturels :

L'évaluation de la qualité des milieux a pour objectif principal d'informer de l'état écologique d'un milieu naturel à un instant donné, en rendant compte de sa valeur patrimoniale, de son rôle dans le fonctionnement écologique local, mais aussi de ses dysfonctionnements et de son potentiel d'évolution. Il se réalise selon plusieurs étapes principales :

5.1. Analyse bibliographique et récolte des informations :

Bien appréhender l'état des connaissances et des données disponibles sur la biodiversité du territoire afin d'optimiser la nature et les efforts d'inventaires pour alimenter le diagnostic écologique. Avant de réaliser l'inventaire écologique, il est nécessaire de recueillir les informations existantes en rencontrant les acteurs du territoire et en s'aidant de cartographies ou des bases de données naturalistes.

5.2. Inventaires :

Les inventaires ne représentent qu'une liste d'espèces, mais ils contribuent plutôt à une compréhension du fonctionnement de l'écosystème. Les études des inventaires amèneront à clarifier les potentialités du site, ses fragilités, les enjeux, mais aussi les contraintes rencontrées. La durée des inventaires dépend essentiellement de la superficie et de la complexité du site. La saisonnalité des phénomènes naturels est très importante pour leur analyse, en effet, le printemps reste la meilleure saison pour effectuer ces études. Les inventaires écologiques présentent plusieurs objectifs :

- Identifier les espèces, notamment les espèces rares et protégées.
- Cartographier les habitats et repérer les milieux remarquables.
- Comprendre la dynamique des écosystèmes et leurs interactions.
- Repérer les zones de déplacements des animaux
- Évaluer l'incidence d'un projet ou d'un aménagement sur le milieu et le site.
- Disposer de connaissances sur le milieu pour envisager des mesures compensatoires.

5.3. Résultats des inventaires et récupération des données :

L'analyse des données recouvre un grand nombre de méthodes qui ont pour objectif de décrire, synthétiser, expliquer l'information contenue dans les tableaux de données (représentations graphiques et cartographiques, tests statistiques, etc.). Il est recommandé d'interpréter l'information en utilisant une approche fonctionnelle. Ainsi, des regroupements cohérents en termes écologiques peuvent être réalisés.

5.4. Valorisation des données :

Valoriser les données recueillies (bibliographie), récoltées (inventaires) et analysées notamment au travers de la cartographie, qui constitue un puissant vecteur visuel, afin d'avoir une vision d'ensemble des éléments de biodiversité. Rendre les données accessibles aux autres gestionnaires, scientifiques etc....., afin qu'elles puissent profiter à l'amélioration de la connaissance de la biodiversité et en faire progresser la conservation.

Après interprétation des résultats, une conclusion qui tente de confirmer ou éliminer les hypothèses écologiques doit être accompagnée de perspectives pour élargir le seuil de la recherche scientifique.

Chapitre 03 : Protection de l'environnement



Introduction :

La protection de l'environnement consiste à la conservation de la diversité des espèces animales et végétales qui le compose, ainsi que la conservation de l'intégrité écologique de leurs habitats naturels. Son intérêt principal est de maintenir des écosystèmes dans une bonne situation, ainsi que de prévenir les dégradations écologiques qu'ils pourraient subir et essayer de les éviter.

1. Protection de l'environnement et développement durable :

La dégradation continue des écosystèmes et de leur biodiversité, le niveau de pollution sur terre, dans l'air et les océans, ainsi que les conséquences du changement climatique, sont très inquiétants. L'enjeu environnemental du développement durable a pour objectif de mettre en œuvre des actions au quotidien pour réduire le gaspillage, limiter les pollutions, économiser les ressources, afin de conserver et de maintenir la vie sur terre. La protection de l'environnement requiert une volonté politique, une forte implication des entreprises, des pouvoirs du public et des citoyens, une évolution des mentalités et des changements des comportements humains.

1.1.Principaux axes du développement durable :

Les principaux axes du développement durable sont (**Fig20**) ; le développement économique, le développement social et la protection de l'environnement :

- **Croissance économique :**

Construire une économie forte et compétitive, en garantissant la disponibilité d'écosystèmes terrestres et de ressources naturelles suffisantes pour soutenir la croissance et les exigences modernes du développement durable.

- **Protection de l'environnement :**

Contribuer à la protection et à l'amélioration de notre environnement naturel, tout en aidant à améliorer la biodiversité, à utiliser les ressources naturelles raisonnablement, à minimiser les déchets et la pollution, à s'adapter à réduire le changement climatique, et notamment à passer à l'échelle mondiale vers une économie à faibles émissions de carbone.

- **Inclusion sociale :**

Soutenir des communautés fortes, actives et saines en répondant aux besoins humains et en protégeant les droits des générations futures (créer un développement de haute qualité, avec des services locaux accessibles tels que la santé, le bien-être social et culturel).



Figure 20. Principaux piliers du développement durable (Ministère de l'écologie et du développement durable)

1.2. Objectifs du développement durable :

Les Objectifs de développement durable (ODD) ont été adoptés par l'Organisation des Nations unies (ONU). 17 Objectifs qui couvrent l'intégralité des enjeux de développement dans tous les pays ont été fixés, tels que le climat, la biodiversité, l'énergie, l'eau, la pauvreté, l'égalité des genres, la prospérité économique ou encore la paix, l'agriculture, l'éducation, etc.



Figure 21. Les Objectifs du développement durable (RAPPORT ECLOSIA WAY 2023)

Ces exigences constituent l'Agenda 2030, qui associe à chaque objectif des cibles à atteindre à l'horizon 2030, en vue d'éradiquer la pauvreté, de protéger la planète et de garantir la prospérité pour toute l'humanité (Fig 21)

2. Protection de l'environnement et conservation de biodiversité :

Gérer les ressources naturelles consiste à inventorier, caractériser, évaluer, conserver, et restaurer la diversité des espèces animales, végétales et de tout écosystème écologique. Pour cela deux types de conservation de la biodiversité sont mis en application :

✓ Conservation *in situ*

Ce type de conservation consiste à maintenir la protection des organismes vivants dans leur milieu naturel. C'est la moins coûteuse et la plus répandue des procédures de conservation, et permet aux communautés animales et végétales de poursuivre leur évolution dans leurs conditions naturelles, en s'adaptant aux changements de l'environnement (Les parcs nationaux-Les parcs régionaux-Les aires protégées)

✓ Conservation *ex situ*

C'est la préservation des espèces en dehors de leur habitat naturel, dans des conditions contrôlées (Jardins zoologiques-Aquariums publics.....). Elle peut également se pratiquer dans des laboratoires de recherches, où certain matériel biologique (Embryons-cellules somatiques-ADNetc.) est prélevé à une phase de vie précise (In vitro), sur des animaux vivants et conservés à une température spécifique. C'est une préservation durable des ressources naturelles en dehors de leurs sites de collecte.

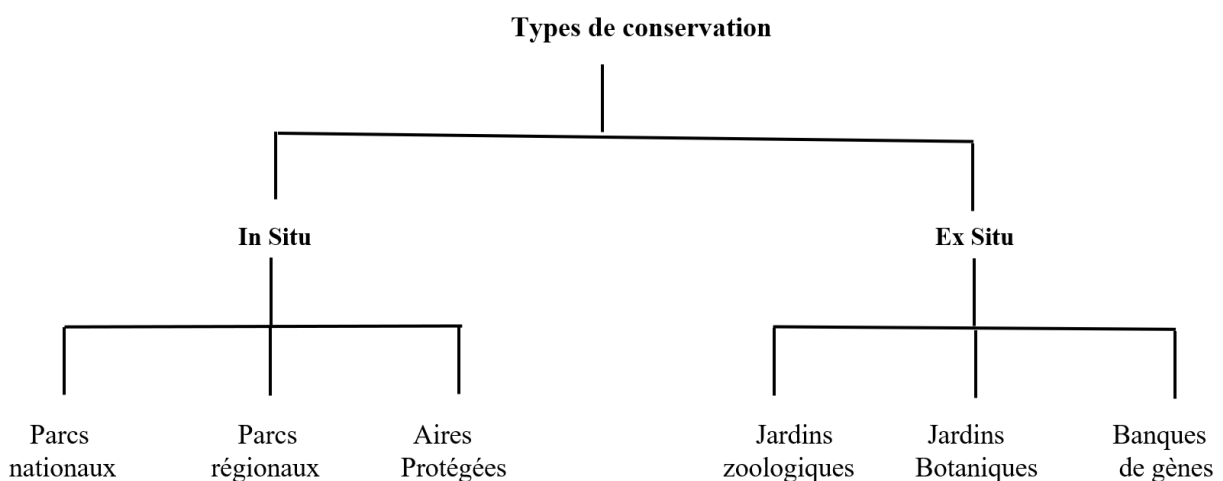


Figure 22. Conservation in-situ et ex-situ de la biodiversité de l'environnement (Schéma personnel)

3. D'autres pratiques pour la protection de l'environnement :

3.1. Restauration des habitats :

Il s'agit du processus d'aide à la récupération d'un écosystème dégradé, endommagé ou détruit pour refléter ses valeurs intrinsèques et fournir les biens et les services que les gens apprécient. L'objectif est de remettre l'écosystème dans l'état dans lequel il aurait été si la dégradation ne s'est pas produite, en prenant compte des changements anticipés. L'écologie de la restauration est l'étude scientifique de la réparation des écosystèmes perturbés par l'intervention humaine.

3.1.1. Objectifs de la restauration écologique :

De nombreux projets de restauration visent à établir des écosystèmes composés d'une espèce indigène ; d'autres projets tentent de restaurer, d'améliorer ou de créer des fonctions écosystémiques particulières, telles que la pollinisation ou le contrôle de l'érosion. Les projets de restauration comprennent :

❖ Végétalisation :

L'établissement de la végétation sur des sites où elle a été précédemment perdue, souvent avec le contrôle de l'érosion comme objectif principal.

❖ Amélioration de l'habitat :

Processus visant à accroître l'aptitude d'un site à servir d'habitat à certaines espèces spécifiques.

❖ Mitigation :

Fournir légalement des efforts de restauration en cas de perte d'espèces ou d'écosystèmes protégés.

3.2. Remédiation des écosystèmes :

La remédiation de l'environnement consiste à éliminer les contaminants ou la pollution du sol, des eaux souterraines, des sédiments, des eaux de surface ou à nettoyer après un déversement de pétrole. C'est l'action d'améliorer un écosystème existant ou d'en créer un nouveau dans le but d'en remplacer un autre détérioré ou détruit. L'objectif principal de la remédiation de l'environnement est de restaurer les sites ou les ressources contaminés afin de réduire l'impact négatif des polluants sur la santé humaine et naturelle. La réhabilitation des écosystèmes peut être :

• Bio-remédiation :

Processus de détoxification et de dégradation des métaux lourds à l'aide de micro-organismes (sols ou écosystèmes aquatiques).

- **Phyto-remédiation :**

La méthode qui aide à absorber les métaux lourds présents dans l'écosystème pollué en utilisant des plantes et des arbres pour assainir et nettoyer l'environnement.

3.3. Recyclage des ressources naturelles :

Le recyclage et la réutilisation des résidus réduisent la nécessité d'extraire et d'utiliser de nouveaux matériaux de la Terre. Cela réduit à son tour les perturbations et les dommages néfastes dans le monde naturel (moins de forêts abattues, de rivières détournées, d'animaux sauvages blessés ou déplacés et moins de pollution de l'eau, du sol et de l'air).

4. Législation de l'environnement :

C'est l'ensemble des dispositions, ou des directives qui limitent les principes fondamentaux de la gestion de l'environnement, en se basant sur la protection, la restructuration, et la valorisation des ressources naturelles, ainsi que la restauration des milieux endommagés afin de lutter contre toute forme de pollution et de nuisance naturelle.

4.1. Droit international de l'environnement :

Le droit international de l'environnement désigne les textes internationaux adoptés pour défendre et promouvoir l'environnement, sur un principe de solidarité. Il a apparu au cours des années 1970, à la suite d'une prise de conscience des effets anthropiques négatifs sur l'environnement.

Ce concept de droit international se construit progressivement avec l'apparition des conventions et traités internationaux. Il est majoritairement composé de principes et recommandations fondés sur des engagements volontaires, ce qui lui vaut le qualificatif de "droit mou" (moins pris au sérieux).

Quelques accords internationaux comme le Protocole de Kyoto de 1997 et Accord de Paris de 2015 - ont contribué à limiter les émissions de gaz à effet de serre, mais les objectifs sont encore loin d'être atteints.

4.2. Conventions internationales pour la protection de l'environnement :

4.2.1. Définition d'une convention internationale :

Elle représente un accord entre deux ou plusieurs états, ou organisations internationales, comportant l'octroi réciproque des droits et l'acceptation d'obligations. Cet accord intervenant entre les entités (États membres d'un État fédéral-provinces-départements) sur

l'ensemble des traités internationaux, juridiquement contraignant dans le principal but de la conservation de la diversité biologique.

4.2.2. Principales conventions internationales pour la protection de l'environnement :

❖ La convention de Ramsar :

Elle a eu comme objectifs, de conserver et de minimiser l'utilisation non rationnelle des zones humides par des actions locales et régionales dans le cadre de la coopération internationale, afin de réaliser et de maintenir le développement durable dans le monde entier. Elle a été signée dans la ville de « Ramsar » en 1971 en Iran.

❖ La convention de Londres :

Pour la conservation des eaux de mer contre la pollution par les hydrocarbures des navires. Elle a été Signée en 1973 en Angleterre et prescrit certains types de matériels ou certaines caractéristiques de conception pour les navires citernes. Elle interdit également d'autres formes de pollution comme les rejets en mer des déchets par immersion, traitées par la convention de Londres de 1972.

❖ La convention de Washington :

Réalisée en USA en 1973 contre le commerce international illégal des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction. Elle participe à empêcher les menaces de la survie des espèces à cause du commerce international et de la vente des animaux et des végétaux.

❖ Convention de Bonn :

Elle participe à protéger les espèces migratrices de faune sauvage ainsi que de leurs habitats naturels. Selon la convention, les pays d'où les espèces migratrices viennent et se déplacent vers, doivent assurer la protection stricte des espèces menacées et de leurs territoires. Cette dernière a été signée en Allemagne en 1979 et prise en considération depuis 1983.

❖ Convention de Montréal :

Elle assure la protection de la couche d'ozone par élimination graduelle à l'échelle mondiale des substances qui participent à son appauvrissement, et qui sont utilisés généralement en réfrigération, en climatisation, dans les aérosols, dans les solvants et dans d'autres applications. Elle a été signée en 1987 au Canada.

❖ **La convention de Rio :**

Elle a adapté des déclarations qui ont fait progresser le concept des droits et des responsabilités des pays dans le domaine de l'environnement. Sous le nom de « Sommet de la terre », Elle a insisté sur la reconnaissance des pays membres, que la terre est la raison de notre existence, et qu'en sujet de développement durable, les êtres humains doivent avoir une vie et doivent défendre la stabilité naturelle de tout existant. Elle a été signée au Brésil en 1992.

❖ **La convention de Bali :**

Elle a eu comme objectifs la planification d'un protocole sur les changements climatiques. Signée en Indonésie en 2007, elle vise la réduction les mouvements des déchets dangereux et de leur élimination afin de protéger la santé humaine et l'environnement. Selon les états participants, les pays développés doivent prendre des engagements ou des actions de limitation et de réduction des émissions des gaz à effet de serre.

4.3. Intervention de l'Algérie pour la protection de l'environnement :

Depuis l'indépendance, l'Algérie a ratifié une vingtaine de conventions et de protocoles internationaux conclus dans le domaine de la protection de la mer, des ressources biologiques naturelles, de l'atmosphère, de la lutte contre la désertification et du contrôle des déchets dangereux.

L'Algérie a connu, ces dernières années, des avancées en matière de prévention et de réduction de la pollution industrielle. Celles-ci sont dues à l'action de concertation avec les industriels dans un cadre participatif, qui a permis d'atteindre des objectifs en conciliation avec l'environnement. Parmi les engagements de notre pays dans le domaine de la protection de l'environnement, on peut citer :

- La participation aux travaux de la première Conférence Mondiale à Stockholm en 1972 sous l'égide des Nations Unies : l'Environnement est un problème Planétaire; toute politique à long terme n'est envisageable que dans un contexte international.
- La création du Comité National de l'Environnement (C.N.E) en 1974 : état consultatif qui a pour mission de proposer les éléments essentiels de la politique environnementale dans le cadre de l'aménagement du territoire et du développement économique et social.
- La création de l'Agence Nationale pour la Protection de l'Environnement (A.N.P.E.)

4.4. Législation algérienne pour la protection de l'environnement :

Sur le plan législatif et réglementaire Algérien, plusieurs lois pour la protection de l'environnement et des ressources naturelles ont été promulguées :

- Loi n° 83-03 Février 1983 ; relative à la protection de l'environnement
- Loi n°99-09 Juillet 1999 ; relative à la maîtrise de l'énergie.
- Loi n°01-14 Aout 2001 ; relative à la sécurité et à la prévention routière.
- Loi n° 01-19 Décembre 2001 ; relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
- Loi n°02-02 février 2002 ; relative à la protection et à la valorisation du littoral.
- Loi n° 03-10 Juillet 2003 ; en sujet de la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
- Loi n°04-09 Aout 2004 ; sur la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.
- Loi n°04-20 Décembre 2004 ; pour prévention et gestion des risques dans le cadre du développement durable.
- Loi n°08-16 Aout 2008 ; portant orientation agricole.
- Loi n°08-07 Février 2008 ; portant orientation de formation et l'enseignement professionnels.
- Loi n°09-03 Février 2009 ; relative à la protection du consommateur et à la répression des fraudes.

Références bibliographiques :

- **Aery N.C (2010).** Manual Of *Environmental Analysis*. Author, N.C. Aery. Publisher, Ane Books India, 2010. ISBN, 9380156219, 9789380156217. Length, 424 pages.
- **Agnan Y (2013).** Bioaccumulation et bioindication par les lichens de la pollution atmosphérique actuelle et passée en métaux et en azote en France : sources, mécanismes et facteurs d'influence. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, 307p.
- **Arrignon J. (1998).** Aménagement Piscicole des Eaux Douces (5ème édition). Lavoisier Tec. Doc: Paris. 598p.
- **Badraoui M ; Agbani M ; El Gharous M ; Karrou M and Souidi B (2000).** Normes d'interprétation des Séminaire 'Intensification agricole et qualité des sols et des eaux', analyses de sol pour les cultures de blé et de betterave en irrigué dans les Doukkala.
- **Belliard J., Roset N (2006).** L'indice poissons rivière (IPR). Notice de présentation et d'utilisation, 24p.
- **Bonnissent D., Serrand N., Bruxelles L., Fouéré P., Grouard S., Sellier-Ségard N., Stouvenot C (2016).** Archéoécologie des sociétés insulaires des Petites Antilles au Mésoindien L'enjeu des ressources à Saint-Martin. Paris, Société préhistorique française, 2016. (Séances de la Société préhistorique française, 6), p. 213-260 ISSN : 2263-3847 – ISBN : 2-913745-2-913745-65-2
- **Bremond R., Vuichard R (1973).** Paramètres de la qualité des eaux, OSPEPE, Paris, 123p.
- **Brodo I, Duran Sharnoff S, Sharnoff S 2001.** Lichens of North America. Yale University Press. 828 p.
- **Campeau S., Boissonneault Y., Grenier M (2009).** Présentation des documents fournis par les conférenciers de l'atelier. Les diatomées comme bioindicateurs. Le suivi de la qualité de l'eau des rivières à l'aide de l'Indice Diatomées de l'Est du Canada (IDEC). Pp 45.
- **CEMAGREF (1982).** Etude des méthodes biologiques quantitatives d'appréciation de la qualité des eaux. Rapport Q.E. Lyon - A.F.B. Rhône-Méditerranée-Corse, 218p
- **Chabot V.B (2014).** Les facteurs de sélection des bio-indicateurs de la qualité des écosystèmes aquatiques : Elaboration d'un outil d'aide à la décision. Thèse de Maître en environnement. Université de Sherbrooke. Pp 118.
- **DREAL (2010).** Note sur la qualité hydrobiologique (macro-invertébrés, macrophytes et diatomées) de la Loue-stations de Mouthier-Haute-Pierre et de la Piquette, 24p.
- **ECOTOX (2001).** Qualité actuelle de l'allondon et de ses affluents et évolution physico-chimique

et biologique. Service cantonal d'écotoxicologie. Rapport Février 2001, 28p

- **Fenik J., Tankiewicz M., Biziuk M (2011).** Properties and determination of pesticides in fruits and vegetables. Trends in Analytical Chemistry, Vol. 30, No. 6. Pp 814- 826.
- **Fritsch C (2010).** Utilisation intégrée de bioindicateurs pour la surveillance des sols et des écosystèmes terrestres. Ecologie, Environnement. Université de Franche-Comté, Français. Pp 353.
- **Khalanski, M. et Souchon, Y. (1994) :** Quelles variables biologiques pour quels objectifs de gestion ? ; Séminaire national : "Les variables biologiques : des indicateurs de l'état de santé des écosystèmes aquatiques" ; Ministère de l'environnement / GIP hydrosystèmes / AGHTM ; Paris ; pp. 49-101 ; novembre 1994.
- **Lafont M., Bernoud S., Rosso-Darmet A (2002)** Indice oligochètes de bioindication des sédiments (IOBS). Guide méthodologique. Études sur l'eau en France n°88, Ministère de l'écologie et du développement durable, Paris, 39p
- **Laperche V et Massmann JR (2004).** Fond géochimique naturel ou bruit de fond : Reflexions sur les applications possibles à la gestion des sites et des sols pollués en France. Rapport final. BRGM/RP-53344-FR. Pp 46.
- **Le Guédard M., Villenave C., Faure O., Nau G.F., Pauget B., Pérez G (2017).** Applicabilité à l'étude des sites pollués du biomarqueur lipidique des végétaux et du bio-indicateur nématofaune, 187 pages
- **Liu C.J (2015).** Strategic Environmental Analysis -Selected Tools- Master's Thesis. University of Linz. Pp 120.
- **Masson J. P., (1988).** Suivi de la qualité des eaux superficielles : l'expérience française. In : la qualità delle acque superficiali, criteria per una metodologia omogenea di valutazione, attidelconvegno interazione. Palazzo dei Congressi. 99-100.
- **Mouthon J (1991).** Un indice biologique lacustre basé sur l'examen des peuplements de mollusques. Bull. Fr. Pêche Piscic. 331: 397-406.
- **NALCO (1983).** Manuel de l'eau, TEC- DOC, Lavoisier, Paris, 48p
- **Orias F (2015).** Contribution à l'évaluation des risques éco toxicologiques des effluents hospitaliers. Bioconcentration, Bioaccumulation et bioamplification des résidus pharmaceutiques. Thèse de doctorat. Docteur de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat et de l'Université Claude Bernard Lyon 1. France. Pp 186.
- **Pavé A (1997).** Environnement et développement : approches scientifiques, structuration du domaine et coévolution des recherches. NATURES SCIENCES et SOCIÉTÉS Elsevier / NSS, vol. 5, n° 1, 50-63.

- **Quevauviller P (2006).** Métrologie en chimie de l'environnement. Tec & Doc Lavoisier, 277p. Rodier J (2005). L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 9ème édition, Ed. DUNOD. Paris, 1381p.
- **Ramade F., (2010).** Dictionnaire encyclopédique des pollutions : De l'environnement à l'homme. Ed. Dunod, Paris.
- **Reddy A.G.S (2020).** A Textbook on Water Chemistry: Sampling, Data Analysis and Interpretation. Analytical Chemistry and Microchemistry. SCI013010. 10.52305/RSNT9286. Pp 570.
- **Reeve R.N (1994)** Environmental Analysis (Analytical Chemistry by Open Learning) 1st Edition. ISBN 10: 0471938335 ISBN 13: 9780471938330.
- **Rimet F., Matte J.L., Mazuer P (2006).** Analyse de l'application de deux indices diatomées sur les cours d'eau lorrains: I.B.D. et I.P.S. Direction Régionale de l'Environnement, DIREN LORRAINE, 22p.
- **Rodier J. et Coll., 2005-** L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, Eaux résiduaires, Eau de mer. Ed. Dunod, Paris.
- **Varrault G . (2011).** Les contaminants dans les milieux récepteurs sous forte pression urbaine. Sciences de l'environnement. Université Paris-Est. Pp 90.
- **Viovy R (1978).** La notion d'élément chimique. Buletin de l'union des physiciens. ENS Saint claud Paris. Pp 901-910.

Sites d'internet :

- <https://ecotoxicologie.fr/>
- <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/analyses-dans-l-environnement-methodologies-42382210/>
- <https://www.lesagencesdeleau.fr/ressources/rencontre-avec-des-bioindicateurs>
- <https://chimactiv.agroparistech.fr/fr/methodologie/analyse-contaminant/mode-operatoire>
- <https://www.me.gov.dz/fr/reglementation/>

Références photos :

- **Webographie 01 :** https://energyeducation.ca/encyclopedia/Greenhouse_effect

- Webographie 02 : <https://www.alamyimages.fr/photo-image-tableau-periodique-des-elements-y-compris-l-illustration-2016-quatre-nouveaux-elements-nihonium-tennessine-oganesson-et-moscovium-145866509.html>
- Webographie 03 : http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Biod%C3%A9gradation_%28HU%29
- Webographie 04 : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Biomagnification>
- Webographie 05 : <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/432/annelide>
- Webographie 06 : <https://www.aquaportail.com/especes/taxonomie/genre/385/chironomus>
- Webographie 07 : <https://www.francebleu.fr/emissions/la-peche-au-fil-de-l-eau/la-rochelle/le-repeuplement-des-rivieres-0>
- Webographie 08 : <https://unrucheraujardin.blogspot.com/2018/02/apiculture-aujourd'hui.html>
- Webographie 09 : <https://www.ird.fr/de-nouvelles-especes-vegetales-accumulatrices-de-metaux>
- Webographie 10 : <https://lechodelaboucle.fr/2015/12/14/escargots-de-bourgogne-refusent-lappellation-escargot-de-bourgogne-franche-comte-bloqueront-de-nombreuses-routes-mardi-toute-region/>