



Polycopié Pédagogique

Titre

ANALYSE ET PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Cours destiné aux étudiants de :

Troisième année licence écologie et environnement

Nom : BERKANI

Prénom : Cherifa

Grade : Maître de conférences classe B

Année : 2022

Avant propos

Ce cours est destiné aux étudiants de la 3ème année licence en écologie et environnement. Il est conforme au programme agréé par le ministre de l'enseignement supérieure et la recherche scientifique.

Ce polycopié est le fruit de la lecture de nombreux ouvrages dont la plupart sont cités dans la liste des références bibliographiques. L'objectif de ce cours est de familiariser les étudiants avec les différentes analyses environnementales (physico-chimiques et biologiques) utilisées pour évaluer et surveiller la qualité de l'environnement. Le présent module donne aussi aux étudiants un aperçu des principaux textes législatifs algériens (lois, décrets, arrêtés..) relatifs à la protection et la préservation de différents compartiments de l'environnement.

Semestre : 5

Unité d'enseignement Fondamentale 2 (UEF 3.1.2) : Pathologies des écosystèmes

Matière : Analyse et protection de l'environnement

Enseignant responsable de la matière : BERKANI. Ch

Crédits : 4

Coefficient : 2

Objectifs de l'enseignement

Le contenu de cette matière permet à l'étudiant de s'imprégner des méthodes d'analyses physico-chimiques et biologiques des différents compartiments dans le contexte de l'évaluation, de la surveillance de la qualité et de la protection de l'environnement.

Connaissances préalables recommandées

Différents types d'écosystèmes, compartiments de la biosphère (eau, sol, atmosphère), faune, flore, chimie différents types d'écosystèmes, compartiments de la biosphère (eau, sol, atmosphère), faune, flore, chimie.

Contenu de la matière Analyse et protection de l'environnement

Chapitre 1 : Analyses physico-chimiques

1- Objectifs des analyses environnementales

2- Les matrices analysées

2.1- Eaux

2.2- Sédiments

2.3- Sols, boues et composts

2.4- Echantillons biologiques

2.5- Echantillons atmosphériques

3- Les paramètres déterminés

3.1- Paramètres physico-chimiques

3.2- Paramètres inorganiques

3.3- Formes chimiques métalliques

3.4- Paramètres organiques

3.5- Exemples de substances réglementées

4- Les types de méthodes

4.1- Méthodes primaires

4.2- Méthodes relatives

4.3- Méthodes comparatives

Chapitre 2 : Analyses biologiques

Relations des organismes aux conditions du milieu

1.1- Notions de bioindicateurs.

1.2- Méthodes biologiques et bioindicateurs

Principaux types de méthodes biologiques actuellement utilisées

2.1- Méthodes biologiques (Méth. Biochimiques, Ecotoxicologiques, Biocénétiques)

2.2- Méthodes indiciaires

Utilisant les peuplements végétaux (Ex : Indice diatomique)

Utilisant les peuplements animaux (Ex : Indice biotique basé sur les macroinvertébrés benthiques)

Chapitre 3 : Protection de l'environnement : Réglementation algérienne

1. Législation environnementale : définition et étendue

2. Statut juridique actuel en matière de protection et gestion de l'environnement (étude des différentes lois relatives à la protection de l'environnement, protection des ressources naturelles...etc.).

Mode d'évaluation

Examen semestriel

Table des matières**Introduction****Chapitre 1****Analyses physico-chimiques**

1.1.	Définitions et principaux concepts.....	01
1.2.	Objectifs des analyses environnementales.....	02
1.2.1.	Le système anthropique (SA).....	02
1.2.2.	Le système environnemental (SE)	03
1.3.	Les matrices analysées	03
1.3.1.	L'Eaux	04
1.3.2.	Les sédiments	04
1.3.3.	Sols, boues et composts	04
1.3.4.	Echantillons atmosphériques.....	05
1.3.5.	Echantillon biologique	08
1.4.	Paramètres déterminés.....	10
1.4.1.	Paramètres physico-chimiques.....	10
1.4.2.	Les paramètres organoleptiques.....	13
1.4.3.	Paramètres inorganiques	17
1.4.4.	Les éléments traces métalliques (ETM)	21
1.4.5.	Les paramètres organiques.....	24
1.5.	Les types de méthodes analytiques.....	25
1.5.1.	Méthodes d'analyse de l'eau	25
1.5.2.	Principales Méthodes analytiques : primitives, relatives et comparatives.....	29

Chapitre 2**Analyses biologiques**

2.1.	Relation des organismes aux conditions du milieu.....	34
2.1.1.	Notions de bioindicateurs.....	34
2.2.	Principaux types de méthodes biologiques actuellement utilisées	36
2.2.1.	Méthodes biologiques.....	36
2.2.2.	Les méthodes éco-toxicologiques.....	36
2.2.3.	Les méthodes biocénétiques.....	37
2.2.4.	Méthodes indicielles.....	38
2.3.	Principaux indices biologiques de la qualité des écosystèmes aquatiques.....	39
2.3.1.	Les végétaux.....	39
2.3.2.	Les animaux.....	40
2.4.	Principaux indices biologiques de la qualité de l'air.....	41
2.5.	Principaux indices biologiques de la qualité du sol.....	44
2.6.	L'être humain comme bio-indicateur.....	45
2.7.	Synthèse sur les bioindicateurs.....	46

Chapitre 3

Protection de l'environnement ; réglementation Algérienne

3.1.	Législation environnementale : définition et étendue.....	47
3.1.1.	Définition de l'environnement.....	47
3.1.2.	Définition juridique.....	47
3.1.3.	La législation environnementale.....	48
3.1.4.	Bref historique de la législation environnementale Algérienne.....	48
3.2.	Analyse de la situation environnementale en Algérie.....	49
3.3.	Description des mécanismes économiques de protection de l'environnement.....	50
3.4.	Statut juridique actuel en matière de protection et gestion de l'environnement.....	51
3.4.1.	Contexte de prise en charge de la protection de l'environnement.....	51
3.4.2.	Etude des différentes lois relatives à la protection de l'environnement.....	53

Références bibliographiques

Introduction

L'eau, l'air et sol sont des éléments clés qui permettent la vie sur terre. Il est communément admis par tout le monde que la qualité de l'air que nous respirons, tout comme la qualité de l'eau que nous consommons, est d'une importance capitale. En dehors de la consommation de l'eau en tant que boisson, elle est au centre de nombreuses productions et activités humaines. Elle joue un rôle dans la plupart de nos activités économiques, dans notre production alimentaire, dans le transport de déchets, dans la production d'énergie, dans le secteur sanitaire, etc.

L'appréciation de la qualité de l'eau, sol et air se base sur la mesure de paramètres physico-chimiques, ainsi que sur la présence ou l'absence d'organismes et de microorganismes aquatiques ou terrestre, indicateurs d'une plus ou moins bonne qualité de l'environnement.

La qualité de l'environnement étant une préoccupation de plus en plus présente. Ce cours permet d'acquérir les connaissances nécessaires à la mise en œuvre de l'analyse de la qualité de l'environnement en basant sur des différents paramètres et de principales techniques et méthodes des différents compartiments.

L'objectif principal est d'évaluer et surveiller la qualité et de protection de l'environnement.

La protection de l'environnement consiste à prendre des mesures pour limiter ou supprimer l'impact négatif des activités de l'homme sur son environnement.

Au-delà de la simple conservation de la nature, il s'agit de comprendre le fonctionnement systémique, et éventuellement planétaire de l'environnement ; d'identifier les actions humaines qui l'endommagent et de mettre en place les actions de correction.

Chapitre 1 : Analyses physico-chimiques

Introduction

La qualité environnementale est un concept universel qui regroupe pour des choix de société concrets (urbanisme, logement, moyens de transport, énergie, industrie...) des normes, des objectifs de respect de l'environnement et de développement durable. Ainsi que des critères plus subjectifs comme la qualité de l'air.

On peut considérer que la qualité environnementale se mesure grossièrement par le rapport entre les bienfaits économiques et sociaux du choix de la société considérée et les Conséquences écologiques, sanitaires et en qualité de vie, pondéré pour la capacité de faire durer ce choix dans le temps (développement durable).

1. 1. Définitions et principaux concepts

Avant de réaliser l'analyse de nos impacts environnementaux, il est utile de rappeler des définitions clé :

a. Organisme

Compagnie, société, firme, entreprise, autorité ou institution, ou partie ou combinaison de celles-ci, à responsabilité limitée ou d'un autre statut, de droit public ou privé, qui a sa propre structure fonctionnelle et administrative.

b. Environnement

Milieu dans lequel un organisme fonctionne, incluant l'air, l'eau, le sol, les ressources naturelles, la flore, la faune, les êtres humains et leurs interrelations. Le milieu peut s'étendre de l'intérieur de l'organisme au système local, régional et mondial. Le milieu peut être décrit en termes de biodiversité, d'écosystèmes, de climat ou autres caractéristique.

c. Aspect environnemental

Elément des activités, produits ou services d'un organisme interagissant ou susceptible d'interactions avec l'environnement.

Un AE peut causer un ou plusieurs impacts environnementaux. Un aspect environnemental significatif est un aspect environnemental qui a ou peut avoir un ou plusieurs impacts environnementaux significatifs. Les aspects environnementaux significatifs sont déterminés par l'organisme en utilisant un ou plusieurs critères.

d. Impact environnemental

Modification de l'environnement, négative ou bénéfique, résultant totalement ou partiellement des aspects environnementaux d'un organisme.

e. Les impacts bénéfiques

Il est utile de signaler qu'il existe très peu d'impacts environnementaux réellement bénéfiques qui causent des modifications à l'environnement bénéfique, résultant totalement ou partiellement des activités, produits ou services d'un organisme.

Exemple des activités de productions des gaz (oxygène, azote,..) leur procédé aspirent l'air ambiant, le filtre et en rejettent une partie à l'atmosphère. L'air rejeté ainsi plus pur que l'air aspiré.

f. Un écosystème

Unité écologique de base formée par deux éléments indissociables ; le milieu (biotope) et la communauté d'être vivants qui y vivent (biocénose). Exemple d'écosystème : Forêt, montagne, lac,.....

g. Facteur écologique

Tout élément du milieu pouvant agir directement sur les êtres vivants :

***Facteurs abiotiques**

Représentent l'ensemble des facteurs physico-chimiques du milieu ayant une influence sur une biocénose donnée. C'est l'action du non-vivant sur le vivant :

***Les facteurs édaphiques**

La structure du sol, la granulométrie ; la teneur en sels minéraux ; la teneur en humus ; la salinité; Le développement des espèces est variable en fonction de la structure, de la composition, de la teneur en humus et de la richesse en vie microbienne des sols. Par exemple, les plantes halophiles se développent en milieu salé, les orties sur sols riches en nitrates.

***Les facteurs climatiques**

La température, la culière, le vent, la pluviosité.

h. Facteurs biotiques

Ensemble des interactions qui existent entre des individus de la même espèce ou d'espèces différentes : prédation, parasitisme, compétition, symbiose, commensalisme, ...etc.

1. 2. Objectifs de l'analyse environnementale

Pour définir l'analyse environnementale, il faut tenir compte de deux systèmes qui interagissent l'un sur l'autre.

1.2.1. Le système anthropique (SA)

Il est relatif à l'homme, à son existence ainsi qu'aux activités qu'il génère. Ce sont essentiellement:

L'activité de production ; L'activité de transformation

L'activité de consommation; L'activité d'élimination

1.2.2. Le système environnemental (SE)

Il est constitué par tous les milieux naturels qui constituent l'environnement dans lequel vit et existe l'homme. Ce sont: les milieux physiques, les milieux vivants, l'écosystème, l'environnement sonore, l'environnement visuel et l'environnement socioculturel. L'analyse environnementale est une analyse préliminaire approfondie des problèmes, de l'impact et des résultats en matière d'environnement liés aux activités menées sur le site.

Elle couvre les impacts relatifs à : L'eau, l'air et les déchets. Elle traite les aspects liés à :

- L'organisation environnementale du site,
- La conception des procédés et produits,
- Aux pratiques et résultats en matière d'environnement de ses sous-traitants et fournisseurs.

Les objectifs environnementaux constituent la déclinaison opérationnelle de la définition de l'état souhaité des milieux. A ce titre, ils représentent les premiers éléments quadrants des politiques publiques qui seront menées en application du futur programme de mesures du plan d'action pour l'environnement. Les objectifs environnementaux représentent une pièce centrale du plan d'action pour les écosystèmes. Ils sont construits sur la base de l'évaluation initiale, description de l'état actuel des différents types des milieux, et de la définition du bon état écologique. Leur mise en œuvre concrète sera ensuite l'objet du programme de mesures du plan.

Les objectifs environnementaux peuvent être de différentes natures. Ils peuvent être:

Des objectifs d'état, liés aux éléments servant à caractériser les milieux (caractéristiques physiques, chimiques et biologiques),

- des objectifs liés aux pressions exercées sur le milieu (niveau acceptable d'une pression),
- des objectifs d'impact (niveau acceptable d'un impact sur les caractéristiques du milieu),
- des objectifs opérationnels, liés aux types de mesures pouvant être envisagés pour permettre leur réalisation.

1.3 Les matrices analysées

Le plan de suivi de l'environnement s'effectue à ces trois milieux :

Le milieu physique (climat, air, sol et sous-sol, eau),

Le milieu biologique (faune et flore),

Le milieu humain (architecture et paysage, niveaux sonores et vibratoires).

Son objectif est de détecter toute situation anormale afin d'en localiser et d'en identifier les causes, de manière à mettre en œuvre les mesures correctives adaptées.

1.3.1. L'Eaux

Si vers types d'eaux sont analysées pour le contrôle de la qualité de l'environnement ou des eaux pour la consommation.

La directive cadre sur l'eau intègre la surveillance d'eaux :

- a.** l'eau de rivières, les eaux lacustres, les eaux d'estuaires, eau côtières
- b.** L'eau souterraine: pour leur état environnemental mais leur utilisation, comme la consommation humaine brutes ou prélevées en sortie de canalisation.
- c.** les eaux résiduaires : avant et après traitement
- d.** les eaux de pluies : sont analysées pour évaluer l'impact des pluies acides pour l'environnement dans le cadre de programmes internationaux et pour évaluer l'impact toxique de retombées atmosphériques (par exemple, composés alkyles du plomb).

1.3.2. Les sédiments

Les matrices sédimentaires varient d'un écosystème à un autre qu'il soit d'origine lacustre, rivière, d'estuaire ou marine, et présent dans des zones non contaminés ou sujettes à des pollutions au photogéniques (par exemple zones portuaires)

Les sédiments sont souvent analysés dans le cadre des programmes de surveillance de l'environnement. Ils fournissent une histoire des contaminations dans leur structure stratigraphique (analyse de « carottes ») leur analyse est également nécessaire pour la connaissance de la charge totale de polluants provenant des rivières et les risques associés (par exemple lors de dragages et rejets de boues de dragages) car la plupart des contaminants inorganiques et organiques sont adsorbés aux particules solides.

1.3.3. Sols, boues et composts

Les boues résiduaires et les sols sont constitués d'un nombre important de phases solides, différente en fonction de leurs propriétés morphologiques, physiques et chimiques la forme géométrique des particules varie entre les différentes matrices on rencontre :

Des fibres d'un diamètre de quelque micron mais d'une longueur de quelques centaines de microns.

Des fines plaquettes (par exemple kaolinite, mica ect)

Des grains de silice

Des particules rhomboédriques de calcite

Toutes ayant des densités et des comportements physico-chimiques différents. Il y a des sols calcaires, des sols siliceux et des teneurs en matières organiques différents en fonction des quantités de boues utilisés dans les amendements (d'origine urbaine ou industrielle)

Les sols et les boues résiduaires (pouvant être utilisées pour l'épandage de sols) sont analysés par de nombreuses organisations en soutien à divers objectifs par exemples :

Etudes agronomiques: - assimilation par plantes

-déficience des sols

Evaluation de risques environnementaux : ex mobilité des contaminants contenus dans les sols contaminés. La détermination de teneurs totales d'éléments traces ou de composés organiques dans le cadre d'établissement de cartes.

NB : les teneurs extractibles de métaux lourds ou de composés organiques sont déterminés pour l'évaluation des risques liés à leur mobilisation (diffusion et leur assimilation par les plantes idem pour les boues résiduaires). Utilisées pour l'amendement des sols agricoles.

NB : de nombreuses analyses sont réalisées sur des échantillons de composts à divers degrés de maturité afin d'évaluer les risques potentiels de contamination lors d'amendement de sol ou connaître, les apports en éléments essentiels.

1.3.4. Echantillons atmosphériques

L'air demeure un élément fondamental et indispensable pour les êtres vivants. Chaque jour, nous inspirons environ 20 m³ d'air. Celui-ci se compose originellement d'un ensemble de gaz et de particules dont la présence et les concentrations sont telles que la vie est possible.

Gaz constituants Concentration volumique (%)

Gaz principaux

Azote (N₂) 78,09

Oxygène (O₂) 20,95

Argon (A) 0,93

Anhydride carbonique (CO₂) 0,035

Gaz traces

Néon (Ne) 1,8. 10⁻³

Hélium (He) 5,24. 10⁻⁴

Méthane (CH₄) 1,7. 10⁻⁴

Krypton (Kr) 1,0.10⁻⁴

Hydrogène (H₂) 5,0.10⁻⁵

Xénon (Xe) 8,0.10⁻⁶

Ozone (O₃) 1,0.10⁻⁶

La connaissance de la composition de l'air reste hors de portée ; C'est un milieu dynamique : ses multiples constituants sont en perpétuelle transformation, par suite des conditions

météorologiques, des flux atmosphériques et des réactions chimiques. Ainsi, les variations temporelles sont considérables.

Ces indices prennent en compte les polluants les plus problématiques des grandes villes dont le dioxyde d'azote (NO₂), l'ozone (O₃) et les particules (PM). L'appréciation de la qualité de l'air se base sur les réglementations pour les épisodes de pollution et sur les valeurs limites à ne pas dépasser.

A) Air

La qualité de l'Air est directement mesurée à l'aide de capteurs qui analyse divers paramètre en continu et sont utilisés comme alarme, au de la de seuils définis par les réglementations (par exemple concernant la qualité de l'air en milieu urbain). La qualité de l'air peut également être mesurée à long terme à l'aide d'analyse plus fines effectuée sur des poussières atmosphériques.

B) Les poussières

Les émissions provoquées par le trafic routier sont fréquemment mesurées à l'aide de poussières collectées dans des filtres de tunnels routiers. Les analyses effectuées concernent les composés organo-plombiques, et plus récemment le platine et les éléments du même groupe (par exemple palladium, rhodium, qui ont pour origine les pots catalytiques, les analyses sont compliquées du fait de la nature hétérogène des échantillons (diverses phases composées de débris et de poussières) et des faibles teneurs rencontrées.

Exemple: un cas particulier concerné les poussières collectées dans le milieu du travail (milieu professionnelle « exposition professionnelle ») pour tester le risque sanitaire, c'est le cas par exemple pour la surveillance des teneurs en chrome (CrIV) pour les sondeurs qui peuvent disposer, d'un filtre portable piégeant des poussières analysées à intervalles réguliers.

C) Charbons et cendres volantes

L'augmentation considérable de l'utilisation de charbon dans les années 80 a suscité une réponse en termes de protection et surveillance de d'environnement et de nombreux programmes. L'analyse d'échantillons de charbon, poussières et cendres volantes. Les sources de pollution par émissions industrielles par combustion de charbon sont révélées, en effet, particulièrement nocives (par exemple, pollution par le mercure, le chlore le fluor, le soufre, etc) et génératrices de problèmes de corrosion des brûleurs. Les échantillons de charbon posent souvent des difficultés analytiques en raison de leur composition en plusieurs phases (de différentes densités). Provoquant des risques de ségrégation des particules en fonction de la teneur en cendres.

Les cendres volantes issues par exemple de la combustion de déchets municipaux ou de faux accidentels sont généralement composées de particules de 1 à 100 µm. Dans les incinérateurs les particules sont piégées dans les gaz de combustions par précipitation électrostatique ou dans des filtres. Malgré l'efficacité des méthodes de piégeage (98-99%), les particules les plus fines (les plus fortement contaminée) sont souvent rejetée dans l'environnement. De plus, les cendres sont souvent utilisées dans les matériaux de construction (ciment, bitume, etc) et les risques de toxicité liés aux teneurs en divers contaminants (métaux lourds, dioxines, etc). Doivent être évalués.

D) Les matrices biologiques

a. Plantes

Les plantes aquatiques (par exemple algues, mousses etc.) Sont utilisées dans les programmes de surveillance de l'environnement pour identifier les sources de pollution, d'étudier les tendances à long terme.

Les algues du type *Lagorosiphon major* ou *Ulva lactuca* (Laitue de mer) sont présentes dans la plupart des eaux de surface et présentent un bon outil pour la comparaison de résultats à grande échelle. Les mousses aquatiques ont la capacité de concentrer les métaux lourds présents dans les eaux.

* Les plantes terrestres (feuilles d'arbres, aiguilles de sapins, etc). Sont utilisées pour établir les niveaux de concentration naturelles, établir des cartes, faire des recherches sur l'effet des pluies acides, et pour l'étude des contaminations à long terme.

* Les lichens sont utilisés pour surveiller les pollutions atmosphériques grâce à leur capacité d'accumulation de contaminants de l'air et sont donc considérés comme d'excellents bioindicateurs.

* Des herbacées pour la nourriture animale (herbe, blé, trèfle etc.) peuvent également être utilisées dans le but, mais également pour étudier leur qualité nutritive (analyse d'éléments essentiel tels que le calcium, magnésium, potassium, etc). et les risques toxiques potentiels (analyses d'éléments tels que le cadmium, le mercure etc).

Les matrices de plantes peuvent poser des problèmes et des difficultés liées aux fortes teneurs en carbone (acide humiques, fulviques). Dans certains cas (par exemple feuilles d'oléagineuse), des acides gras entraînent des difficultés de séchage des échantillons. La présence de particules minérales (en particulier alumino-silicate) provenant des poussières atmosphériques (par exemple dans les lichens), de matières en suspensions (dans les algues) ou de particules de sol (par exemple dans les herbes), doit être prise en compte lors de l'étape

de minéralisation des échantillons (une digestion faible n'étant pas suffisante pour obtenir un recouvrement total des éléments déterminés).

b. Biota

De nombreux organismes biologiques sont inclus dans les programmes de surveillance de l'environnement comme indicateurs des milieux concernés. C'est le cas des poissons (thon, morue, etc) qui sont utilisés pour le contrôle des risques alimentaires et comme bioindicateurs pour le contrôle de la pollution de l'environnement marin les échantillons sont analysés sous forme lyophilisée (pour les éléments traces et les espèces chimiques) ou sous forme d'huiles (par exemple huile de foie de morue ou de maquereau pour les analyses de composés organochlorés).

* Des échantillons de phyto et zooplancton sont également analysés pour l'étude du transfert ou de l'accumulation d'éléments toxiques dans la chaîne alimentaire pour définir le rôle de ces organismes dans les cycles biogéochimiques et comme bioindicateur de la qualité de l'eau.

* Des graisses animales sont analysées pour contrôler les limites établies par les réglementations, identifier sources de pollution (par exemple denrée alimentaire d'étudier l'évolution des contaminations).

* le lait et les produits laitiers sont également analysés dans le cadre des programmes d'évaluation des risques environnementaux, en soutien à la législation contrôlant l'exposition aux éléments toxiques (métaux lourds, composés organochlorés, dioxines, etc). Et pour des études de nutrition (éléments majeurs essentiels).

1.3.5. Echantillon biologique

Les échantillons biologiques humains sont d'origines diverses (soin, don, échantillons collectés pour les besoins d'une recherche biomédicale...), et sont définis comme des "tissus et cellules issus du corps humain et leurs dérivés, des organes, du sang, de ses composants et de ses produits dérivés"

a. Autres matrices biologiques

D'autres types de matériaux biologiques sont utilisés pour contrôler l'exposition humaine aux éléments toxiques (index d'absorption d'éléments toxiques de l'environnement), par exemple:

Les cheveux humains.

Les phanères.

Les difficultés analytiques rencontrés sont surtout dus à la Co-extraction de lipides qui nécessitent des étapes de prétraitement (nettoyage des extraits, dans le cas des échantillons de plancton, le mélange de particules biogéniques et sédimentaires crée des problèmes de

recouvrement de certains éléments (nécessitant des attaquent acides « forts » du type acide fluorhydrique).

b. Autres types de matrices

Divers déchets sont régulièrement analysés pour évaluer les risques de contamination à la source par exemple, les vidanges d'huiles minérales contenant de fortes concentrations en biphénylespolychlorés, dioxines, hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Matériaux de contact : sont tous les emballages contenant, matériaux de stockage qui servent à la préparation ou au stockage des denrées alimentaires et dont la surface entre en contact avec des aliments, la constitution des ces matériaux doit suivre des règles spécifiques pour éviter de contaminer les contenus (aliments, eau) les matériaux au contact des aliments sont omniprésent dans les emballages, pots, boites différents types de matériaux:

- matière plastique.
- céramique.
- caoutchoucs.
- silicones.
- aciers inoxydables.
- aluminium.

Chaque réglementation spécifique comprend notamment des listes de substances autorisées pour leur fabrication, des conditions et restrictions d'emploi et des critères de pureté. L'étain est volontairement utilisé dans la fabrication des boites de conserve en fer blanc pour ses propriétés anticorrosives ; les teneurs maximales réglementées en étain inorganique sont de 100 mg/kg dans les boissons en boites (y compris les jus de fruits ou de légumes) et de 200 mg/kg dans les autres aliments en conserve.

Certains métaux comme le plomb et le Cd sont présent dans des pigments qui servent dans les glaçures des poteries et des encres d'impression, les nitrosamines sont présent dans certaines cires enrobant les fruits, dans les tétines pour les biberons, aussi que dans les tubulures et joints en caoutchoucs des appareils utilisés dans l'industries alimentaires, beaucoup de récipient et d'emballage sont en aluminium et ce dernier se dissout au milieu acide. Deux produits de migration des emballages sont fréquemment présents ; le bisphénol A et les palatales. Ils sont considérés comme des perturbateurs endocriniens, pour le bisphénol, la limite de migration spécifique est de 0,6 mg/kg depuis 2004 (elle était 3 mg/kg en 2002). Selon la directive 2002/72) CE, qui concerne les matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec les denrées alimentaire le principal phtalate est le DEHP (diéthylphtalate) présent dans les récipients en

plastiques et qui migre principalement dans les produits laitiers, les aliments pour bébés. Les viandes et l'huile d'olive.

1.4. Paramètres déterminés

I.4.1. Paramètres physico-chimiques

La pollution résulte de l'introduction dans un milieu de substances conduisant à son altération. Elle se traduit généralement par des modifications des caractéristiques physicochimiques du milieu récepteur. La mesure par analyse de ces derniers (au niveau du rejet, du milieu naturel ou du milieu pollué) permet de l'étudier.

A) La température

La température est un facteur écologique important du milieu. Son élévation peut perturber fortement la vie aquatique (pollution thermique). La température de l'eau influe sur beaucoup d'autres paramètres. C'est en premier lieu le cas pour l'oxygène dissous indispensable à la vie aquatique : Plus la température de l'eau s'élève, plus la quantité d'oxygène dissous diminue.

En période estivale, par forte température atmosphérique, le réchauffement brutal par le soleil des eaux en mauvais état d'une rivière peu oxygénée peut aboutir à un choc thermique entraînant une mortalité piscicole spectaculaire. Les bordures boisées des cours d'eau (ripisylves) limitent l'échauffement des eaux.

Le rapport entre la température de la surface du sol et celle de l'air est fonction des caractéristiques de la surface et du temps, plus particulièrement la quantité de rayonnement solaire.

La température agit, comme un facteur physiologique, sur le métabolisme de croissance des microorganismes vivants dans l'eau. Elle joue un rôle important dans la solubilité des sels et surtout des gaz (en particulier l'O₂) dans l'eau, ainsi que la détermination du pH et la vitesse des réactions chimiques. Des hausses minimales de la température des sols sont favorables pour l'activité microbienne. En présence de matière organique, la température peut avoir un rôle indirect, par exemple en augmentant sa dégradation, ce qui peut produire des substances acides.

La pollution thermique peut avoir pour origine des rejets d'eaux chaudes urbains ou industriels dans le cours d'eau. En période estivale, par forte température atmosphérique, le réchauffement brutal par le soleil des eaux en mauvais état d'une rivière peu oxygénée peut aboutir à un choc thermique entraînant une mortalité piscicole spectaculaire. Les bordures boisées des cours d'eau (ripisylves) limitent l'échauffement des eaux.

Concernant le sol, la température (entre 10 et 30 °C) n'a qu'un effet direct négligeable sur la mobilité des métaux. Mais, en présence de matière organique, elle peut avoir un rôle indirect, par exemple en augmentant sa dégradation, ce qui peut produire des substances acides. Elle peut aussi jouer sur l'activité bactérienne. L'action des micro-organismes peut aller dans le sens de la sensibilisation (production d'acide et de composés complexant) ou de l'insolubilisation (formation de sulfure métallique insoluble, bioaccumulation et bio sorption par les micro-organismes des métaux lourds).

Tableau 1 : la qualité de l'eau en fonction de la température

Température (en °C)	Qualité d'eau
Inférieur à 20	Normale
20-22	Bonne
22-25	Moyenne
25-30	Médiocre
Supérieur à 30	Mauvaise

B) Turbidité

C'est un paramètre, qui varie en fonction des composés colloïdaux (argiles) ou aux acides humiques (dégradation des végétaux) mais aussi pollutions qui troublent l'eau. On mesure la résistance qu'elle oppose par l'eau au passage de la lumière pour lui donner une valeur ; on mesure la turbidité par la méthode de spectrométrie, c'est à dire mesure de l'absorption de la lumière par l'eau.

- NTU < 5 => eau claire
- NTU < 30 => eau légèrement trouble
- NTU > 50 => Eau trouble.

Une importante turbidité de l'eau entraîne une réduction de sa transparence qui réduit la pénétration du rayonnement solaire utile à la vie aquatique (photosynthèse).

C) La conductivité

La mesure de la conductivité est un moyen assez simple de détection d'une anomalie indiquant la présence probable d'une pollution, par comparaison de la valeur mesurée avec celle que l'on était en droit d'attendre.

La mesure de la conductivité est une méthode extrêmement répandue et utile, tout particulièrement dans des applications de contrôle de la qualité. Voici quelques exemples de

ce qu'offre la mesure de la conductivité : surveillance de la pureté des eaux, contrôle des eaux potables et des eaux utilisées dans la fabrication de produits, estimation du nombre total d'ions dans une solution ou encore mesure directe des composants.

La conductivité est la capacité d'une solution, d'un métal ou d'un gaz – autrement dit de tous les matériaux – à faire passer un courant électrique. Elle fournit une indication précise sur la teneur en sels dissous (salinité de l'eau) dont les principaux sont le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le sodium (Na^+), le potassium (K^+), les bicarbonates (HCO_3^-), les sulfates (SO_4^{2-}) et les chlorures (Cl^-). Dans une solution, ce sont les anions et les cations qui transportent le courant alors que dans un métal ce sont les électrons. Un certain nombre de facteurs entre en jeu pour qu'une solution conduise l'électricité :

- la concentration
- la mobilité des ions
- la valence des ions
- la température

Tableau 2: la qualité de l'eau en fonction de la conductivité électrique

Conductivité électrique (en $\mu\text{S}/\text{cm}$)	Qualité de l'eau
De 50 à 400	Qualité excellent
De 400 à 750	Bonne qualité
De 750 à 1500	Qualité médiocre mais eau utilisable
>1500	Minéralisation excessive

D) Les matières en suspension (MES)

Les matières en suspension (MES) comprennent toutes les matières minérales de type sable ou organiques de type mucilagineux, qui ne sont pas solubles dans l'eau. Elles donnent un aspect trouble à l'eau, (turbidité) est s'opposent à la pénétration de la lumière nécessaire à la vie aquatique. En trop grande quantité elles constituent donc une pollution solide des eaux. La teneur en matières en suspension est obtenue par la pesée après filtration ou centrifugation et séchage à 105°C . Elles sont exprimées en milligramme par litre (mg/l).

E) Le Potentiel d'hydrogène (pH)

Le potentiel d'hydrogène (pH) est la mesure de la concentration des ions H^+ contenus dans l'eau. Il est donné par la formule : $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$. Le pH varie entre 0 et 14 ; $\text{pH}=7$ correspondant à la neutralité. Une eau est acide lorsque son pH est inférieur à 7 et alcaline lorsque son pH est supérieur à 7. Il joue un rôle très important dans la mobilité des métaux

dans le sol. Un pH acide entraîne la mise en solution des sels métalliques, la mise en solution des phases de rétention, la désorption des cations et l'adsorption des anions.

Le pH conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques, et dépend de facteurs multiples dont la température et l'origine de l'eau. En milieu côtier et estuarien, certains rejets industriels ou les apports d'eaux de ruissellement sont la cause de variation du pH qui s'avère être, dans ce cas, un indice de pollution.

Tableau 3 : pH et la vie aquatique

PH <5	L'unité inférieure à la survie des espèces
5 < pH <9	Tolérance pour la plupart des espèces
6 < pH <7.5	Zone optimale pour la reproduction de la plupart des espèces
7.5 < pH <8.5	Zone optimale pour le plancton
< 8.5	Destruction de certaines algues et prolifération des autres
> 9	Seuil létal de nombreuses espèces

1.4.2. Les paramètres organoleptiques

A) La couleur

La couleur des effluents industriels peut être forte. Cette coloration due à la présence des matières organiques dissoutes ou des colloïdes par des composés chimiques solubles qui sont colorés.

La coloration des eaux peut être due à certaines impuretés telles que le fer (couleur rouille) et le manganèse (couleur noire) mais également à certaines matières organiques en particulier provenant de la dégradation de végétaux (substances humiques, tannins, lignine).

B) Les odeurs

Les odeurs proviennent généralement des substances volatiles. Un changement anormal ou une apparition d'une odeur sont la caractéristique d'une dégradation de la qualité qui est souvent le précurseur d'une pollution. Les paramètres d'odeurs disposent d'une référence de qualité pour les eaux d'alimentation et les eaux brutes. Les eaux usées industrielles se caractérisent par une odeur de moisi.

Dans le cas d'une eau potable, l'apparition ou le changement de goût et d'odeur peuvent être signe d'activité microbienne et de lacunes dans le traitement ou de contamination dans le réseau de distribution.

C) La dureté

Une eau est dite douce lorsqu'elle est peu chargée en calcium (Ca^{++}) et en magnésium (Mg^{++}). La somme des deux constitue le Titre Hydrotimétrique. La présence de ces deux cations dans l'eau tend souvent à réduire la toxicité des métaux.

La dureté calcique et la dureté magnésienne peuvent s'exprimer en mg/l de calcium et en mg/l de magnésium. Le tableau 1 montre la qualification de l'eau en fonction des valeurs de la dureté.

Tableau 4 : Qualité de l'eau en fonction de la dureté

Dureté (mg/l CaCO_3)	Qualification de l'eau
0-30	Très douce
31-60	Douce
61-120	Moyennement douce
121-180	Dure
>180	Très dure

Une eau très dure présente des inconvénients d'utilisation, tels que la diminution des propriétés détergentes des lessives et savons et les dépôts de tartre sur les parois des canalisations d'eau. Une eau trop douce est une eau corrosive. Elle attaque les parois des canalisations d'eau et contribue à la dégradation de la qualité de l'eau à la suite de la dissolution de métaux lourds tels que le plomb.

D) Oxygène dissous

La présence d'oxygène dans l'eau est indispensable à la respiration des êtres vivants aérobies. En dessous d'un certain seuil de concentration en oxygène c'est l'asphyxie des poissons (7 mg/l pour les salmonidés ; 3 mg/l pour les carpes). L'oxygène de l'eau permet également le processus d'oxydation des matières organiques, mais cette décomposition appauvrit le milieu aquatique en oxygène.

L'oxygénation de l'eau provient d'abord du contact de sa surface avec l'atmosphère. Elle est favorisée par les remous, les cascades et surtout la température de l'eau. Car plus l'eau s'échauffe, moins l'oxygène y est soluble.

La teneur en oxygène des eaux d'une rivière peut donc varier en cours de journée de plusieurs mg/l suivant la température et la présence ou non de végétaux aquatiques (jusqu'aux environs de 20mg/l en cas d'eutrophisation).

La teneur en oxygène des eaux d'une rivière varie aussi selon la profondeur : très faible en eau profonde, pouvant approcher le taux de saturation près de la surface.

Pour mesurer l'oxygène dissous d'un cours d'eau, il est possible d'utiliser un oxymètre, matériel disposant d'une sonde spéciale. Il existe aussi des trousse colorimétriques utilisant des réactifs chimiques. C'est un paramètre très important pour la vie dans la rivière.

E) Le potentiel redox (Eh)

Dans les systèmes aqueux, le potentiel redox (ou disponibilité en électrons) affecte les états d'oxydation des éléments (H, C, N, O, S, Fe...). Dans une eau bien oxygénée, les conditions d'oxydation dominent. Quand les concentrations d'oxygène diminuent, le milieu devient plus réducteur ce qui se traduit par une réduction du potentiel redox. Dans les eaux naturelles, des comparaisons relatives de l'évolution du potentiel redox peuvent être utiles pour suivre les degrés de changement du système aquatique. Le potentiel redox se mesure en mV.



Figure 1. Prélèvement et analyses physiques

F) La demande Biochimique en Oxygène pendant 5 jours (DBO5)

La DBO5 ou Demande Biochimique en Oxygène sur 5 jours, représente la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes pour oxyder (dégrader) l'ensemble de la matière organique présente dans un échantillon d'eau maintenu à 20°C, à l'obscurité, pendant 5 jours.

Cette technique permet de mesurer en laboratoire sur 5 jours (à 20° dans l'obscurité), la quantité d'oxygène consommée par le processus naturel de décomposition de la matière organique décomposable présente dans un litre d'eau. Le résultat est donné en mg/L.

La mesure de la DBO5 est très utilisée pour surveiller les rejets et le fonctionnement des stations d'épuration. Elle est trop peu précise pour qualifier les eaux naturelles. Plus la DBO5 est élevée, plus la quantité de matières organiques présentes dans l'échantillon est élevée.

Tableau 5 : Qualité de l'eau en fonction de la DBO5

DBO5(en mg/l d'O2)	Qualification de l'eau
< 1	Excellente qualité
2	Bonne qualité
3	Qualité moyenne
5	Eau moyennement polluée
> 10	Eau polluée

G) La demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité consommée par les matières oxydantes présentes dans l'eau quelles que soit leur origine organique ou minérale. La mesure de la DCO est surtout utilisée pour la surveillance des eaux usées urbaines et industrielles.

Contrairement à la DBO5, qui ne prend en compte que les matières organiques biodégradables, la DCO est une mesure globale des matières organiques et de certains sels minéraux oxydables (pollution organique totale) présents dans l'eau.

Le rapport DCO / DBO5 donne une indication sur l'origine de la pollution organique. Plus il se rapproche de 1, plus le rapport DCO / DBO5, indique la biodégradabilité d'un rejet d'eaux usées. Pour qu'une pollution soit dégradable le rapport doit être inférieur à 2,5.

$DCO/DBO5 < 3$ on a un effluent facilement biodégradable ;

$3 < DCO/DBO5 < 5$ on a un effluent moyennement biodégradable ;

$DCO/DBO5 > 5$ on a un effluent difficilement biodégradable voire non biodégradable.

Cependant, lorsque des composés toxiques sont présents, l'activité biologique est ralentie et, de ce fait, la quantité d'oxygène consommée après 5 jours est moindre. Ceci se traduit également par un rapport DCO/DBO5 élevé.

- **Coefficient de biodégradabilité**

La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité consommée par les matières oxydantes présentes dans l'eau quelles que soit leur origine organique ou minérale.

Le rapport DCO / DBO5 donne une indication sur l'origine de la pollution organique. Ainsi exemples de valeurs :

- une eau résiduaire brute : $2500 / 1000 = 2,5$

- une eau épurée : $450 : 40 = 11$

Plus il se rapproche de 1, plus le rapport DCO / DBO5, indique la biodégradabilité d'un rejet d'eaux usées :

- de 1,5 à 2 : effluents d'industries agroalimentaires (meilleure biodégradabilité).

- de 2 à 3 : effluent urbain domestique.

- >3 : effluent plus ou moins difficilement biodégradable (industrie).

Tableau 6 : Coefficient de biodégradabilité

Coefficient de biodégradabilité (R)	Indication
R=1	Toute la matière organique est biodégradable
$1 < R < 2.5$	L'épuration biologique s'effectue normalement
$2.5 < R < 3$	Traitement biologique associé à un traitement physicochimique
R>3	Un traitement physicochimique est envisagé, traitement biologique impossible

H) Carbone organique total (COT)

Le COT est la concentration en mg/l de carbone organique total dissous dans l'eau. On parle aussi parfois de COD, carbone organique dissous. La concentration du COT d'une eau de surface varie de 2 à 10 mg/l et de 0,5 à 1 mg/l pour une eau souterraine.

Certains composés organiques résistent à l'oxydation chimique et n'interviennent donc pas dans la DCO. Il faut une méthode encore plus énergique pour les oxyder complètement. On utilise actuellement des appareils dans lesquels les échantillons subissent une combustion totale à 950°C environ, et sous l'action de l'oxygène gazeux. L'analyse du COT est non spécifique, il indique la qualité d'une eau et sa teneur en composé organique, sans aucune indication sur la nature des composés organiques.

I) Chlorures (sels)

Ils ne sont pas nocifs, mais constituent un important indicateur d'arrivée de pollution. Ils ne sont pas éliminés par les stations d'épuration. Dans la nature ils sont souvent indicateurs d'arrivée d'effluents urbains. A titre indicatif, dans l'eau du robinet le maximum admis est de 250 mg/l de chlorures.

1. 4.3. Paramètres inorganiques

Les composés inorganiques sont les composés (molécules, polymères mono-, bi- ou tridimensionnels...), très généralement, ce sont des composés qui intègrent d'une manière ou d'une autre, un ou plusieurs atomes métalliques dans leur structure.

A) Phosphore

Le phosphore dissous (ou soluble) est présent dans l'eau et la solution du sol sous forme minérale ou organique

- formes minérales : ions ortho phosphates libres ou associés à de la matière organique ou non sous forme de colloïdes, les différents anions de l'acide phosphorique $H_2PO_4^-$ et HPO_4^{2-} et les poly phosphates ;

- formes organiques : trioses phosphates, acides nucléiques, phospholipides, acides phosphoriques de sucre et leurs formes dégradées.

D'après, Tate (1984) le phosphore particulaire regroupe toutes les formes de phosphore liées aux minéraux, à des débris divers ou incorporées dans les organismes. Les phytines ou phytates (inositols polyphosphates) constituent la principale forme de phosphore organique particulaire dans les sols. le phosphore microbien représenterait 2 à 24% du phosphore organique du sol.

Le phosphore particulaire minéral peut être lié au calcium (apatite), au fer (strengite), à l'aluminium (varis cite), ou encore aux argiles, mais il peut aussi être associé à un grand nombre de minéraux. Sa minéralogie est extrêmement complexe et encore peu connue : à part le phosphate tricalcique (apatite) dont la formule simplifiée est $Ca_3(PO_4)_2$, les autres associations du phosphore sont très complexes. C'est un élément dont la spéciation 3 solide est très mal connue, c'est pourquoi sa réactivité est difficile à évaluer.

Par ailleurs, les teneurs en phosphore ne sont pas toujours exprimées sous la même forme, ce qui rend les comparaisons parfois difficiles. En effet, le phosphore peut être évalué :

En P, dans les différents secteurs de l'activité humaine et en limnologie (étude des lacs et des eaux douces) ;

En PO_4^{3-} pour la forme "ortho" et libre dans l'eau réagissant directement au réactif de colorimétrie ; en P_2O_5 , l'anhydride orthophosphorique en agronomie ; en microatome-gramme en océanographie Ainsi les unités de phosphore (et / ou phosphates) changent, du bassin versant à la rivière, puis en mer.

Par contre, sa présence en excès provoque des perturbations des lacs et des cours d'eau, notamment dans les zones d'écoulement lent, qui peuvent affecter les usages de l'eau et avoir un impact sur la santé.

B) L'azote

L'azote se trouve naturellement dans l'environnement (air, eau et sol). Il joue un rôle primordial dans de nombreux processus biologiques, grâce à son cycle qui permet son assimilation par les producteurs primaires et sa régénération après dégradation par les bactéries hétérotrophes. Dans le milieu aquatique, l'azote est présent sous trois formes gazeuses, organiques et minérales. La forme gazeuse ou azote atmosphérique (N_2) provient principalement de l'atmosphère terrestre contenant 78% d'azote. L'azote atmosphérique ne

peut pas être utilisé par la plupart des organismes, seuls certaines bactéries et quelques algues unicellulaires sont capables de le fixer. Cette fixation permet de convertir l'azote atmosphérique en azote minéral (NH_4 , NH_3). L'azote minéral peut être également originaire de la décomposition de l'azote organique composé de protéines, de l'urée des acides humiques, etc... La minéralisation de l'azote organique donne lieu à la formation d'ammonium (NH_4^{4+}) qui sera transformé en nitrites (NO_2^-) et après en nitrates (NO_3^-). L'ammonium (NH_4^{4+}) est un bon traceur de la pollution domestique (rejets humains). Les nitrites (NO_2^-) est la forme intermédiaire entre l'ammonium et les nitrates, issus de processus de nitrification. Sa présence dans le milieu aquatique est à l'origine d'un déséquilibre d'oxygénation de la flore bactérienne dans le milieu aquatique, ou à des températures faibles ralentissant les processus bactériens.

C) Aluminium (Al)

C'est un élément toxique, il est présent sous forme d'ion Al^{+3} dans les eaux acides, il précipite sous forme d'hydroxyde $\text{Al}(\text{OH})_3$ lorsque le pH s'élève.

La présence d'aluminium à des concentrations supérieures à 0.2 mg/l provoque souvent des plaintes de la part des consommateurs, en raison de la floculation de l'hydroxyde d'aluminium dans les canalisations et d'une coloration de l'eau par le fer.

D) Calcium (Ca)

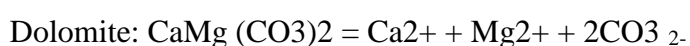
Composant majeur de la dureté de l'eau, le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables. Sa teneur varie essentiellement suivant la nature de terrains traversés. Il existe surtout à l'état l'hydrogénocarbonate et en quantité moindre, sous forme de sulfates, chlorures, etc. Les eaux potables, de bonne qualité, renferment de 100 à 140 mg/l de calcium soit 150 à 200mg/l en oxyde de calcium (CaO) ou 250 à 350 mg/l en carbonate de calcium (CaCO_3) (Rodier, 1976).

E) Chlore (Cl)

Du fait de son pouvoir oxydant rémanent, le chlore est le réactif le plus utilisé pour la décontamination de l'eau. Les teneurs en chlorures sont très variables dans les eaux en fonction du lessivage des sols, de pollutions (traitement des routes en hiver), d'infiltration d'eau de mer dans les nappes phréatiques, etc.

F) Magnésium (Mg)

Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite) Magnésite:



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

G) Manganèse (Mn)

La présence du manganèse est liée à la métallurgie, l'industrie électrique et l'industrie chimique (aciers, alliage, soudures, électrodes, piles sèches, catalyseurs, colorants, additifs dans les carburants, etc.) Certaines eaux souterraines ont des teneurs de l'ordre de 1mg/l en particulier lorsqu'il y a support en milieu réducteur, ou sous l'action de certaines bactéries.

H) Potassium (K)

Le potassium provient de l'altération des formations silicatées (gneiss, schistes), des argiles potassiques, de certains rejets industriels et de la dissolution des engrais chimiques (NPK). Il est beaucoup moins abondant que le sodium, et rarement présent dans l'eau à des teneurs supérieures à 20 mg/l

I) Silice (Si)

Dans les eaux, on retrouve la silice sous une forme soluble (ionique) et colloïdale. Combinée à de nombreux minéraux, cet élément forme des silicates qui peuvent provenir d'un traitement des eaux, associé ou non aux polyphosphates, car ils sont utilisés comme coagulants et inhibiteurs de la corrosion.

J) Sodium (Na)

Le sodium, sous forme de chlorure de sodium, est soit d'origine marine (évaporation progressive des marais salants) ou il est extrait à partir du sous-sol (sel gemme).

Indépendamment de lixiviation des formations géologiques, le sel peut provenir de la décomposition de sels minéraux (par exemple de silicate de sodium), de retombées d'origine marine, d'infiltration d'eaux salées dans les nappes aquifères, de son emploi pour faire fondre la neige sur les routes, d'usages industriels multiples.

K) Sulfates, sulfures (SO₄, SO₂)

Les sulfates ont pour origine la combustion des produits fossiles (charbon, fuel) et l'utilisation des hydrocarbures. Les sulfures sont susceptibles de provenir d'eaux usées ou de pollutions industrielles (usines chimiques, papeteries, raffineries, etc.) ou de la réduction des sulfates en milieu réducteur ; en milieu oxygéné, ils se transforment rapidement en sulfates.

D'une façon générale, la présence de sulfate dans des eaux naturelles "non polluées" invoque la présence de gypse ou de pyrite. Leur concentration est généralement comprise entre 2,2 et 58 mg/l. Les sulfates sont peu toxiques. Cependant ils sont laxatifs et diurétiques lorsque leur concentration est supérieure à 300 mg/l.

1.4.4. Les éléments traces métalliques (ETM)

Les éléments traces métalliques (ETM) sont des éléments naturellement présents dans les sols dont certains sont indispensables aux plantes. Les plus connus pour leur dangerosité par rapport aux organismes vivants sont le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le zinc (Zn), l'arsenic (As). Ces éléments sont très intéressants à étudier vue leur impact écologique et biologique. Toutefois, ils présentent des risques pour l'homme ainsi que pour l'environnement s'ils dépassent certains seuils. Ces éléments peuvent être d'origine naturelle : altération des roches, émissions volcaniques..., ou anthropiques : activités minières et métallurgiques, agricoles, urbaines. Les ETM sont présents dans les milieux aquatiques par le biais du ruissellement de l'eau et du lessivage des sols, ils peuvent être sous formes dissoute, colloïdale et particulaire. Leurs transferts dépendent des paramètres physicochimiques des milieux ainsi que de leur degré de mobilité, on distingue les groupes suivants:

- Les éléments très mobiles (As, Sb, Mo, Cd)
- Les éléments modérément mobiles (U, Co, Cu, Ni)
- Les éléments « non-mobiles » (Zn, Cr, V, Th, Pb)
- Les éléments les plus immobiles (Zr, Ti, Ta)

A) L'arsenic (As)

Il est présent naturellement dans les sols de par sa présence dans la composition de plus de 200 minéraux primaires provenant de l'altération des roches. Son caractère chalcophile facilite sa complexation au soufre pour former des sulfo-arséniures tel que l'arsénopyrite (FeAsS), le réalgar (AsS) ou l'orpiment (As_2S_3). L'érosion des roches, le lessivage des sols et les précipitations entraînent une redistribution d'As vers les compartiments atmosphériques et aquatiques. L'activité volcanique et les feux de forêts sont aussi des sources naturelles d'émission. Cependant, son accumulation dans l'environnement est principalement liée aux diverses utilisations industrielles, minières et agricoles. Ainsi, la pollution des sols en As provient essentiellement de l'extraction minière et du traitement des sous-produits de l'extraction des minerais (Cu, Pb, Au, Ag). Les principaux effets aigus observés suite à l'ingestion d'arsenic inorganique sont gastro-intestinaux. Il est aussi source d'effets systémiques divers: effets sur la peau (hyperpigmentation), le système respiratoire (toux, laryngites), cardiovasculaire (arythmies, péricardites).

B) Le cadmium (Cd)

Le cadmium est obtenu comme sous-produit de raffinage de Pb, Zn et Cu. Son utilisation concerne la fabrication d'accumulateurs électriques, la photographie et l'industrie

électronique et chimique. La principale source d'émission dans l'air est l'activité industrielle mais le cadmium peut aussi être rejeté naturellement via des éruptions volcaniques. D'un point de vue toxicité, lors d'une intoxication au cadmium par ingestion, le système digestif est le premier touché, par inhalation, l'intoxication peut conduire à une pneumonie chimique. Chez l'homme, l'exposition chronique au cadmium peut conduire à une insuffisance rénale ou à une altération pulmonaire.

C) Le cobalt (Co)

Il est utilisé dans la composition de nombreux alliages avec des métaux comme Cr, Ni ou Cu, dans les industries électrique, aéronautique et automobile. Il est employé dans la fabrication d'aimants, de pigments pour le verre et les céramiques ou en chimie organique comme catalyseur. Les fumées des centrales thermiques et des incinérateurs, les échappements des véhicules sont les principales sources anthropiques tandis que les sources naturelles proviennent des feux de forêts et des éruptions volcaniques. Au niveau toxicité, le système respiratoire est la principale cible lors d'une exposition par inhalation.

D) Le chrome (Cr)

A l'heure actuelle, il est connu que plus de 40 minéraux contiennent du Cr. Son émission atmosphérique naturelle, par la remise en suspension de matière érodée, correspond entre 30 et 40% des émissions totales. Il peut prendre neuf états d'oxydation différents mais seuls le Cr trivalent Cr(III) et le Cr hexavalent Cr(VI) sont communs en milieu naturel.

Le Cr est principalement utilisé en métallurgie et en chimie, l'industrie manufacturière étant le principal émetteur, représentant 62,2% des émissions anthropiques.

F) Le cuivre (Cu)

Cu existe à l'état natif (mais pas dans le sol), c'est un oligoélément essentiel pour les plantes et les animaux en faibles quantités. Sa teneur dans les minerais varie de 0,5 % à 5 %. C'est l'un des métaux les plus utilisés pour ses propriétés physiques, notamment sa conductibilité électrique et thermique. Il est utilisé en métallurgie dans la fabrication de plusieurs alliages mais il est le plus employé dans la fabrication de matériels électriques, dans la plomberie et dans les équipements industriels. La contamination des sols est due au broyage des minerais de Cu, aux boues provenant des usines de traitement des eaux usées etc. Sa forte utilisation dans le secteur agricole en tant que composé principal de la bouillie bordelaise, produit phytosanitaire très utilisé en agriculture, peut être une source importante de contamination des sols en surface. Le cuivre peut avoir une action toxique par inhalation, ingestion, voies cutanée et oculaires.

G) Le nickel (Ni)

Ni est présent dans divers minerais tels que la chalcopryrite ou la pentlandite. Sa présence est aussi anthropique (combustion de charbon ou de fuel, incinération des déchets, épandage des boues d'épuration...) .Il est utilisé dans la production d'aciers inoxydables et d'aciers spéciaux, de batteries alcalines nickel-cadmium, de pièces de monnaie et comme catalyseur en chimie organique. Les études chez l'homme indiquent que le système respiratoire est la cible principale de la toxicité du nickel par inhalation, 20 à 30 % du nickel inhalé pouvant être transféré dans le système sanguin. Par voie cutanée, l'allergie au nickel est l'allergie de contact la plus fréquente chez les femmes.

H) Le vanadium (V)

Provient de minerais et de dérivés du pétrole, de déchets ou de produits usinés. Il est classé parmi les 22 éléments les plus répandus dans toute la lithosphère à des teneurs peu élevées. La réalisation d'alliage avec des métaux est la principale source de production de cet élément. Il se retrouve naturellement dans la houille et dans le pétrole à des concentrations parfois assez élevées (700 mg.kg-1). La pétrochimie, les centrales thermiques, les bitumes et goudrons sont les principales sources anthropiques. Chez l'homme, le vanadium induit essentiellement des effets locaux de type irritation des voies respiratoires et de la muqueuse oculaire.

I) Le plomb (Pb)

Pb est présent dans la croûte terrestre et dans tous les compartiments de la biosphère. Il est présent dans divers minéraux tels que la galène, la cérusite et l'anglésite (INERIS, 2003).L'utilisation de Pb concerne essentiellement les batteries électriques (70 %) tandis que le reste de la consommation touche des usages divers comme les munitions, les alliages, tuyaux, réservoirs et produits extrudés. Les rejets atmosphériques en Pb proviennent du trafic urbain et routier, rejets qui cependant ont été réduits depuis l'arrêt de la consommation d'essence plombée. L'ingestion ou l'inhalation du plomb peut avoir divers effets toxiques aigus (anémie, troubles digestifs) et chroniques (atteintes du système nerveux).

J) L'antimoine (Sb)

Sb est un sous-produit de fabrication des minerais de Pb et de Zn notamment et est utilisé dans la fabrication d'alliage, de plaques de plomb des batteries, des plombs de chasse, des piles thermo-électriques. Présent naturellement dans la croûte terrestre, les rejets d'Sb dans l'atmosphère sont aussi bien naturels (41 %) qu'anthropiques. La plus grande partie de Sb dispersé dans l'environnement est retrouvée dans les sols. L'ingestion par voie orale d'antimoine a entraîné des sensations de brûlures dans l'estomac, des nausées, des vomissements.

K) Le zinc (Zn)

Zn et ses composés se trouvent dans les roches magmatiques, les sédiments argileux et les schistes. Les principaux minerais du zinc sont les minerais sulfurés, carbonatés et silicatés. Les apports anthropiques dans l'environnement résultent des activités minières et industrielles (raffinage, piles électriques, construction de toitures et gouttières, peinture anti-rouille...), des épandages agricoles (engrais phosphatés, lisier) mais aussi de l'incinération d'ordures ménagères et des eaux d'épuration. Au même titre que le Cu, c'est un oligoélément essentiel pour les plantes et les animaux. L'ingestion de composés de zinc provoque des troubles du système digestif, des modifications hématologiques ainsi que des lésions du foie, du pancréas et des reins. L'inhalation engendre une irritation et une inflammation pulmonaire.

1.4.5. Les paramètres organiques

Le dosage des matières organiques est difficile à appréhender et est souvent estimé par la différence entre les résidus secs et les résidus calcinés, ainsi que par le dosage d'éléments de base comme le carbone et l'azote. La mesure du carbone organique total permet, au cours des traitements des effluents, une surveillance du procédé et facilite l'estimation de la demande en oxygène liée aux rejets.

A) Les matières organiques facilement décomposables

Ils correspondent aux débris d'origine végétale (résidus végétaux, exsudats) et d'origine animale (déjections, cadavres) liés aux activités de surface et au couvert végétal (forêt, prairies, culture). Ils sont composés de substances hydrocarbonées : sucres solubles, amidon, cellulose, lignine, matières grasses, résines, matières azotées surtout sous forme de protéines, minéraux libres : calcium (Ca), magnésium (Mg), potassium, sodium... Ces substances peuvent être faciles à décomposer et servent alors d'aliment énergétique aux bactéries : sucres, amidons, cellulose, protéines... ou elles peuvent être attaquées plus lentement et plus partiellement laissant d'importants résidus : lignine, matières grasses, tanins.

B) Les composés organiques stabilisés (« MO stable »)

Humus Ils comprennent les substances humiques (acides fulviques, acides humiques, et humines) d'une part, et les composés inertes d'autre part (charbon...). Les substances humiques représentent 70 à 90 % des matières organiques du sol.

C) La Capacité d'Echange en Cations

La Capacité d'Echange en Cations (CEC) est la quantité maximale de cations qu'un poids déterminé de sol peut retenir. Elle joue un rôle fondamental pour l'alimentation en éléments minéraux de la plante. La CEC dépend essentiellement du CAH du sol. La CEC sera élevée pour des sols argileux et/ou humifères et très basse pour des sols sableux. L'apport de MO

dans un sol sableux a pour but d'augmenter cette CEC. L'apport de matière organique dans un sol argileux vise à stabiliser les argiles, limiter le lessivage et augmenter la CEC.

D) Le rapport C/N

C'est un indicateur de l'activité biologique des sols. Il renseigne sur le degré d'évolution de la matière organique, l'activité biologique, le potentiel de fourniture d'azote par le sol (minéralisation).



Figure 2 : Analyses chimiques de l'eau

1.5. Les types de méthodes analytiques

1.5.1. Méthodes d'analyse de l'eau

Les études de qualité des eaux naturelles comportent trois étapes

L'échantillonnage,

L'analyse

L'interprétation.

A) L'échantillonnage

L'échantillonnage est primordial car il conditionne la pertinence de l'analyse. Il doit être de qualité mais également représentatif de ce que l'on veut analyser. Les échantillons d'eau doivent être prélevés dans des récipients propres, rincés plusieurs fois avec l'eau à analyser, puis fermés hermétiquement sans laisser de bulles d'air dans le flacon. Matériau de flaconnage La nature du matériau du récipient de prélèvement est importante, car celui-ci ne doit pas entrer en réaction avec l'eau à analyser => Passage en solution d'éléments chimiques entrant dans la composition du flacon ou fixation de certains ions de l'eau sur les parois du récipient...

Le matériau idéal n'existe pas et l'emploi de tel produit plutôt que tel autre dépend de la nature des éléments doser : à le quartz est le matériau le plus adapté pour la bonne conservation des échantillons mais s'avère très fragile. Le verre et le Pyrex peuvent être employés sans problème pour le dosage des ions majeurs. Cependant des oligo-éléments peuvent passer en solution dans l'eau (silice du verre et bore du Pyrex). le polyéthylène est souvent recommandé pour tout échantillonnage, surtout pour les prélèvements en vue de mesures d'éléments radioactifs. Relativement poreux vis-à-vis des gaz, on lui préfère cependant le verre pour le prélèvement et la conservation des eaux fortement chargées en gaz (la diffusion est cependant assez lente). Les sachets de prélèvement en polyvinyle présentent l'avantage de ne servir qu'une seule fois, mais ils ont l'inconvénient de libérer du chlore si ces sachets restent trop longtemps exposés à la lumière.

a) Modifications possibles de l'échantillon

Le fait de prélever un échantillon d'eau et de le séparer de son milieu naturel entraîne des modifications plus ou moins importantes selon les paramètres. Certains peuvent être considérés comme stables à l'échelle de temps à laquelle on travaille, mais d'autres varient très rapidement : la température, la conductivité, le pH et les gaz dissous, enfin les nitrates et les sulfates. Une variation de température entraîne une modification des constantes d'équilibres des éléments en suspension. Pour établir de nouveaux équilibres à la nouvelle température ambiante, diverses réactions chimiques se produisent qui peuvent entraîner la précipitation de sels, favoriser la mise en solution de gaz... Toutefois, une température basse (environ 4°C) bloque l'évolution des réactions. La mise en contact avec l'air et la décompression sont également responsable de changements au sein de la solution. Chaque espèce ionique participe à la conductivité totale d'une solution. Aussi, toute modification des équilibres chimiques, donc des proportions relatives des éléments dissous, entraîne un changement de conductivité. Le CO₂ en solution tend d'autant plus à s'échapper que la température de l'eau est plus élevée. Un départ de CO₂ peut provoquer la précipitation de carbonate, qui à son tour modifie le pH. Les nitrates et les sulfates peuvent être réduits par l'activité bactérienne.

b) Représentativité des échantillons

1) Puits et forages

Un prélèvement effectué sur une eau ayant longtemps stagné n'est pas représentatif de la nappe. En effet, l'eau a subi l'influence du matériau de tubage et des éléments extérieurs (pollution, pluie...). Pour obtenir un échantillon moyen de l'horizon capté, il est nécessaire de pomper suffisamment longtemps pour renouveler l'eau contenue dans le tubage / cuvelage. Si

l'ouvrage capte plusieurs horizons aquifères, l'échantillon sera un mélange des différentes eaux, dont les proportions sont directement liées aux transmissivités des différents niveaux. Pour obtenir des échantillons ponctuels à différentes profondeurs, il est possible d'utiliser des récipients lestés et munis d'un système de fermeture actionnable depuis la surface (hydrocapteurs). Pour limiter le brassage de l'eau lors de la prise d'échantillon, il est recommandé d'utiliser des hydrocapteurs dont le diamètre est très inférieur à celui du forage et de les manipuler avec une extrême lenteur. L'utilisation d'hydrocapteurs descendus en position ouverte permet de les rincer au fur et à mesure de leur descente.

2) Eaux superficielles

Les prélèvements doivent être effectués de façon à éviter au maximum les effets de bords (oxygénation trop près de la surface, mise en suspension des matières solides trop près du fond, eau stagnante trop près des rives...). Il peut être nécessaire de constituer un échantillon « moyen » en mêlant plusieurs prélèvements effectués en divers points d'une section de rivière, afin de mieux connaître la chimie moyenne de l'eau sur une section donnée. En revanche, il est indispensable d'effectuer différents prélèvements dans l'espace et dans le temps et de les traiter séparément pour étudier le fonctionnement d'une mare.

B) Mesures in situ

La température, le pH, la conductivité, l'alcalinité et l'oxygène dissous doivent être mesurés in situ. En effet, ces paramètres sont très sensibles aux conditions de milieu et susceptible de varier dans des proportions importantes s'ils ne sont pas mesurés sur site. L'idéal est d'effectuer les mesures en continu (sauf l'alcalinité qui se mesure par titrage), en plein courant s'il s'agit d'une rivière, ou dans un seau placé au refoulement de la pompe s'il s'agit d'eau souterraine. Il faut veiller à ne pas aérer l'eau (risque de précipitation d'éléments en solution, oxygénation...).

C) Méthodes d'analyse sur le terrain

Le matériel et les méthodes utilisées sur le terrain sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 7: Matériels et méthodes d'analyse de l'eau sur le terrain

Paramètre	Mesure par sonde portable électrochimique	Photométrie (spectrométrie)	Titration ou colorimétrie
pH	X		
Conductivité	X		
Chlorures	X	X	X
Alcalinité			X
Phosphate	X	X	X
Sulfates		X	X
Nitrates / Nitrites	Nitrates		
Ammoniac	X	X	X
Calcium	X	X	X
Magnésium	X	X	X
Sodium	X		
Potassium	X	X	X
Dureté		X	X
Fer		X	X
Manganèse		X	X
Fluorures	X	X	
Silice		X	X
Aluminium			X
Chlore			X
Hydrogène sulfuré		X	X
Oxygène	X		
Oxydabilité			X

Il faut cependant garder en mémoire le fait que :

- les analyses réalisées par colorimétrie et interprétées visuellement ne sont pas très précises ;
- les analyses faites par ionométrie, requérant l'emploi de sonde spécifique, sont simples à mettre en œuvre, mais les sondes sont fragiles et de durée de vie limitée (environ un an et onéreuses) ;

- Pour obtenir des analyses précises des éléments « majeurs », il est recommandé de s'adresser à un laboratoire, ce qui ne représente pas un coût excessif. De plus, cela permet de valider les analyses réalisées par l'équipement de terrain, qui pourra, le cas échéant, être utilisé de façon plus routinière ;
- L'utilisation de bandelette pour la mesure du pH donne des résultats approximatifs.

D) Eléments d'interprétation

➤ Eaux souterraines

La caractérisation des eaux souterraines concerne essentiellement l'analyse des paramètres de base (pH, température et conductivité) des ions majeurs et d'éventuels éléments traces. Les analyses des isotopes ne sont pas évoquées ici. La conductivité, la température et le pH permettent de définir les caractéristiques fondamentales de l'eau. La recherche des contrastes de ces paramètres entre différents points de mesures facilite la mise en évidence de zones d'alimentation, de pollution ou de géologie différente.

➤ Eaux de surface

Le pH, la conductivité, l'oxygène dissous, la température et la turbidité sont mesurés in situ. Ils permettent une première estimation de la qualité du milieu. Les phosphates, l'ammoniac, les nitrates et le fer permettent d'apprécier l'impact de rejets polluants. Les analyses bactériologiques confirment, en général, la pollution microbienne de ces eaux de surface et permettent d'en fixer l'importance. Les indices biologiques sont surtout intéressants pour les eaux courantes. Les périodes et les stations d'études doivent être choisis pour cerner au mieux la variabilité spatiale et temporelle de la qualité du milieu.

1.5.2. Principales Méthodes analytiques : primitives, relatives et comparatives

Les méthodes analytiques se différencient selon plusieurs critères, le tableau 8 présente ces méthodes.

Tableau 8. Les principales méthodes analytiques

Elément	Méthode analytiques
Acides gras et résiniques - effluents pâtes et papiers	dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse après dérivation avec du BSTFA
Acide nitrilotriacétique - eau potable	dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse
Acidité - eaux usées	méthode titrimétrique automatisée
Alcalinité - effluents industriels	méthode titrimétrique automatisée
Alkylphénols - eaux usées	extraction liquide-solide, dérivation et dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un

	spectromètre de masse
Anions (chlorures, bromures, sulfates, nitrites, nitrates) - général	méthode par chromatographie ionique
Anions en faible concentration dans l'eau de consommation (bromates, bromures, chlorates, chlorites, nitrates et nitrites, chlorures :	méthode par chromatographie ionique
Anions (fluorure, chlorure et sulfate) - eau potable, etc	dosage par chromatographie ionique avec détecteur conductivimétrique
Azote total Kjeldahl - général	digestion acide - méthode colorimétrique automatisée
Azote total - eau potable, etc.	méthode colorimétrique automatisée
Azote ammoniacal - eau potable	méthode colorimétrique automatisée
Azote ammoniacal - général	général : méthode colorimétrique automatisée avec le salicylate de sodium
Bactéries hétérotrophes aérobies et anaérobies facultatives - général	méthode par incorporation à la gélose
Biphényles polychlorés - général	(BPC par congénères et groupe homologue)
Biphényles polychlorés - général	(BPC par congénères - haute résolution)
Biphényles polychlorés - eaux, eaux usées et effluents	(BPC par congénères)
Bromures - faible concentration dans l'eau de consommation - eau potable, etc.	méthode par chromatographie ionique
Capacité de neutralisation -général	solides : capacité de neutralisation des résidus solides
Carbone - sols	méthode par combustion et dosage par spectrophotométrie infrarouge
Carbone inorganique dissous -	méthode par détection infrarouge
Carbone organique dissous -général	méthode par détection infrarouge
Carbone organique total effluents industriels	effluents industriels : dosage par titrage
Carbone organique total -général	méthode par détection infrarouge
Carbone organique total - sols	dosage par titrage
Chlorates - faible concentration dans l'eau de consommation eau potable, etc	méthode par chromatographie ionique
Chlorites - faible concentration dans l'eau de consommation - eau potable	méthode par chromatographie ionique
Chlorobenzènes - général	dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à spectromètre de masse
Chlorobenzènes - eaux, eaux usées et effluents	extraction et purification sur phase solide (SPE) et dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse
Chlorophylle a - eaux de surface	méthode par fluorométrie
Chlorures - eau potable	dosage par chromatographie ionique avec détecteur conductivimétrique
Chlorures - général	méthode par chromatographie ionique
Coliformes thermotolérants (fécaux) - général	méthode par filtration sur membrane
Coliformes totaux - général	méthode par filtration sur membrane
Coliformes totaux et Escherichia coli - eau potable	méthode par filtration sur membrane
Coliformes totaux et Escherichia coli - général	méthode présence/absence
oliphages - général	méthode présence/absence
Composés organiques halogénés adsorbables	méthode de combustion avec une bombe calorimétrique, suivie d'un dosage par chromatographie ionique
Composés organiques semi-volatils (COSV) -	dosage par chromatographie en phase gazeuse

eau et sols	couplée à un spectromètre de masse (méthode non disponible)
Composés organiques volatils (COV) - eau potable, sols	dosage par "Purge and Trap" couplé à un chromatographe en phase gazeuse et à un spectromètre de masse
Composés phénoliques - généra	dosage par chromatographie en phase gazeuse couplé à un spectromètre de masse après dérivation avec l'anhydride acétique
Composés phénoliques - eaux usées	méthode colorimétrique automatisée avec l' amino-4-antipyrine
Conductivité - effluents industriels	méthode électrométrique
Conductivité - eau potable, etc.	méthode avec un titrateur automatique
Corrosivité - déchets	méthode gravimétrique
Couleur vraie - général	méthode par spectrométrie UV-visible avec le platino-cobalt
Cyanates - effluents industriels	méthode par chromatographie ionique
Cyanures - général	méthode colorimétrique automatisée avec l'acide isonicotinique et l'acide barbiturique - distillation manuelle
Demande biochimique en oxygène - effluents industriels	méthode électrométrique
Demande chimique en oxygène	méthode de reflux en système fermé suivi d'un dosage par colorimétrie avec le bichromate de potassium
Dioxines et furanes	dosage par chromatographie en phase gazeuse couplé à un spectromètre de masse
Diquat et paraquat	dosage par chromatographie en phase liquide
Entérocoques - général	méthode par filtration sur membrane
Escherichia coli thermotolérant - eau naturelle, eaux usées	méthode par filtration sur membrane utilisant le milieu de culture mFc-BCIG
Escherichia coli thermotolérants - échantillons solides ou semi-solides	méthode par filtration sur membrane utilisant le milieu de culture mFC-BCIG
Éthylène glycol	méthode colorimétrique à l'aide du MBH
Fluorures - eau potable	dosage par chromatographie ionique avec détecteur conductivimétrique
Fluorures - général	méthode colorimétrique après distillation
formaldéhyde	méthode colorimétrique avec l'acide chromotrope
Glyphosate - eaux	dosage par chromatographie en phase gazeuse liquide; dérivation postcolonne et détection en fluorescence
Granulométrie - déchets, sédiments, sols	détermination de la granulométrie
Halogènes adsorbables - général	méthode de combustion avec une bombe calorimétrique, suivie d'un dosage par chromatographie ionique
Halogènes organiques totaux - général	méthode de combustion avec une bombe calorimétrique, suivie d'un dosage par chromatographie ionique
Halogènes totaux - général	méthode de combustion avec une bombe calorimétrique, suivie d'un dosage par chromatographie ionique
Hydrazine - général	méthode colorimétrique
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	dosage par chromatographie en phase gazeuse

- général	couplée à un spectromètre de masse
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) - eaux, eaux usées et effluents	extraction et purification sur phase solide (SPE) et dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse
Hydrocarbures - huile et graisses ou C10-C50 - (hydrocarbures pétroliers - matières liquides aqueuses, organiques, solides, dangereuses)	dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme
Hydrocarbures - huile et graisses ou C10-C50 - (huiles, graisses totales et minérales - eaux usées, eau potable et de surface	méthode gravimétrique
Hydrocarbures - huile et graisses ou C10-C50 - (huiles et graisses totales - matières solides, matières liquides organiques)	méthode gravimétrique
Liquide libre - sols	présence de liquide libre dans les résidus solides
Lixiviation générale - solides	protocole de lixiviation pour les espèces inorganiques
Mercure - eau potable, etc	méthode par spectrométrie de masse couplée à une source d'émission au plasma d'argon (ICP- MS)
Mercure - eaux naturelles	méthode par spectrométrie d'émission au plasma d'argon et détection par spectrométrie de masse
Mercure - général	méthode par spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon
Mercure - état de trace dans l'eau	méthode par spectrométrie d'émission au plasma d'argon et détection par spectrométrie de masse
Mercure - tissus biologiques et sédiments	dosage par photométrie UV
Métaux - eaux naturelles	méthode par spectrométrie d'émission au plasma d'argon
Métaux - général	méthode par spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon
Métaux - eaux naturelles	méthode par spectrométrie de masse couplée à une source d'émission au plasma d'argon (ICP- MS)
Métaux à l'état de trace (conditions propres) - eaux naturelles	méthode par spectrométrie d'émission au plasma d'argon et détection par spectrométrie de masse
Métaux à l'état de trace - eaux naturelles	méthode par spectrométrie d'émission au plasma d'argon et détection par spectrométrie de masse couplé au système SC-FAST
Métaux assimilables - solides	méthode par spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon
Métaux extractibles à l'état de trace (conditions propres) - eaux naturelles	méthode par spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon
Nitrates - faible concentration dans l'eau de consommation - eau potable, etc.	méthode par chromatographie ionique
Nitrates - général	méthode par chromatographie ionique
Nitrates et nitrites - eau potable, etc	méthode colorimétrique automatisée
Nitrites - faible concentration dans l'eau de consommation - eau potable, etc	méthode par chromatographie ionique
Nitrites - général	méthode par chromatographie ionique
Nitrates et nitrites - général	méthode colorimétrique automatisée avec le sulfate d'hydrazine et le N.E.D
Orthophosphates - eau potable, etc.	méthode colorimétrique automatisée à l'acide ascorbique
Particules - rejets atmosphériques	méthode gravimétrique

Pesticides aryloxyacides	extraction avec C-18 suivie d'une estérification : dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse
Pesticides organochlorés - eaux de surface et eau potable	dosage par chromatographie en phase liquide; dérivation post-colonne et détection en fluorescence
Pesticides type organophosphoré, triazine, carbamate et urée substituée - eaux souterraines, eaux de surface et eau potable: extraction avec C-18;	dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse
pH - eau potable, etc.	méthode avec un titrateur automatique
pH - général	méthode électrométrique
Phosphore assimilable - solides	méthode par spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon
Phosphore inorganique total - général	méthode colorimétrique automatisée avec le molybdate d'ammonium
Phosphore total - eau potable, etc.	méthode colorimétrique automatisée et procédures adaptées pour le phosphore de faible concentration et à l'état de trace
Phosphore total - effluents industriels	digestion à l'autoclave avec persulfate - méthode colorimétrique automatisée
Phosphore total - général : digestion acide	méthode colorimétrique automatisée
Point d'éclair - déchets	selon la technique Pensky-Martens (vase clos)
Potentiel acidogène d'un solide	déchets, solides, sols
Pouvoir calorifique - déchets	méthode de combustion avec une bombe calorimétrique
Silice réactive dans l'eau - eaux naturelles, eau potable	méthode par spectrophotométrie UV-visible
Solides totaux - général	méthode gravimétrique
Solides totaux volatils - général	méthode gravimétrique
Solides en suspension totaux - eau potable, eaux de surface, eaux souterraines et eaux usées	méthode gravimétrique
Solides en suspension totaux - effluents industriels	méthode gravimétrique
Solides en suspension volatils - effluents industriels	méthode gravimétrique
Soufre - déchets	méthode de combustion avec une bombe calorimétrique, suivie d'un dosage par chromatographie ionique
Soufre - sols	méthode par combustion et dosage par spectrophotométrie infrarouge
Sulfates - eau potable, etc.	dosage par chromatographie ionique avec détecteur conductivimétrique
Sulfates - général	méthode par chromatographie ionique
Sulfures - général	méthode colorimétrique avec le chlorure ferrique et l'oxalate de N,N-diméthyle-p-phénylènediamine
Transmittance UV (%) - eau potable, etc.	méthode par spectrophotométrie UV-visible, lecture à 254 nm
Tritium - eau potable, etc.	méthode par scintillation liquide
Turbidité - eau potable, etc	méthode néphélométrique
Volatils - effluents industriels	méthode gravimétrique

Chapitre 2 : Analyses biologiques

2.1. Relation des organismes aux conditions du milieu

2.1.1. Notions de bio indicateurs

Introduction

Un écosystème est une unité écologique de base comportant une biocénose (communauté d'organismes vivants : animaux, végétaux, microorganismes) et son biotope (environnement, milieu abiotique d'habitats relativement stables), l'ensemble étant lié par un système d'interactions. Il s'agit donc d'un système unitaire vivant et fonctionnel, comportant de multiples composants ayant entre eux des relations de type dynamique.

L'analyse d'une matrice ne peut être complétée sans une évaluation de ses qualités en tant que systèmes vivant. Par exemple d'eau est un milieu de vie son analyse ne peut être complété si il est pris isolément. Il est souvent nécessaire de connaître la qualité non pas de l'eau uniquement mais du milieu aquatique dans son ensemble.

Ainsi, la notion d'intégrité biotique ou de santé des écosystèmes nécessite de prendre en compte simultanément les paramètres chimiques, physiques et biologiques.

- L'approche physico-chimique qui repose sur les méthodes primaires, Méthodes relatives et méthodes comparatives.

L'approche biocénotique ou biologique: Caractérisé les perturbations par leurs effets sur les communautés en place. Elle permet donc une appréciation globale de la qualité des systèmes par une mise en évidence et une évaluation des altérations des systèmes.

Les méthodes biologiques d'estimation de la qualité d'un milieu permettent aussi de détecter toute dégradation chimique ou physique du milieu (souvent causée par les activités humaines) ayant pour effet de dégradation de l'habitat des peuplements de ce milieu et par conséquent un changement de la composition des peuplements.

Le but est donc de pouvoir déduire les caractéristiques des milieux à partir de la composition des peuplements qu'ils hébergent, le principe étant d'utiliser les organismes vivants (animaux ou végétaux) comme témoins de la capacité du milieu à maintenir et entretenir la vie.

« Les organismes utilisés sont appelés indicateurs biologiques, ou bio indicateurs ».

Selon Iserentant et de shoover (1976)

Ils sont définis comme étant « tout organisme ou système biologique utilisé pour apprécier une modification généralement une détérioration de la qualité du milieu quel que soit son niveau d'organisation et l'usage qui en est fait ».

✚ Blandin (1986)

Définit l'indicateur biologique comme « une population ou un ensemble de population qui, par ses caractéristiques qualitatives ou quantitatives témoigne de l'état d'un système écologique et qui, par des variations de ces caractéristiques, permet de détecter d'éventuelles modifications du milieu ».

La gestion des ressources naturelles a recours aux bioindicateurs de tous types (biocénose, espèce, portion d'organisme...) à la fois pour surveiller l'état de l'écosystème, prévoir les conséquences d'actions éventuelles projetées et constater l'impact de ces actions.

✚ Niveau d'indication biologique

Un bio-indicateur est un organisme qui peut être situé à différents niveaux de complexité de l'édifice biologique. Il peut être utilisé de différentes façons.

-Avantages des indicateurs biologiques:

Par rapport à une analyse physico-chimique, les indicateurs biologiques présentent deux avantages principaux:

Ils intègrent le facteur temps: alors qu'un dosage chimique donne une image ponctuelle de la qualité de l'eau, souvent très variable, la présence d'un organisme vivant implique que ce dernier a pu accomplir son cycle de développement dans le milieu et donc témoigne d'une certaine qualité de ce milieu dans le passé.

Ils détectent toutes les influences quelles soient, y compris celles de substances ou phénomènes inconnus pour l'observateur, ou celle de facteurs autres que chimiques (aménagement...), dont l'évaluation directe est complexe.

Ainsi, toute anomalie de fonctionnement retentit sur les indicateurs biologiques. L'interprétation suppose alors une connaissance du fonctionnement naturel de l'écosystème non transformé (état de référence) pour être utilisables, les indicateurs biologiques devront répondre à certains critères, dont l'importance varie en fonction de l'objectif de leur utilisation:

Leur présence dans une vaste gamme de milieu garantit la possibilité de comparer des résultats issus de lieux différents (profils longitudinaux, réseau de surveillance,...).

Leur résistance relative à une dégradation permet d'obtenir des résultats dans des situations variables. Les techniques d'étude à mettre en œuvre (biochimie, taxonomie, microscopie, doivent pouvoir être routinières.

Remarque:

« L'indicateur universel » ne peut donc pas exister. Utiliser un compartiment biologiques comme outil de diagnostic nécessite de le sélectionner de façon pertinente, selon le type d'informations recherchées et les caractéristiques fonctionnelles du milieu.

2. 2. Principaux types de méthodes biologiques actuellement utilisées

2.2.1. Méthodes biologiques

A) Les méthodes biochimiques

Niveau (cellule) et niveau (infra-individuel : bio-marqueurs).

Il s'agit le plus souvent de prélèvements d'organismes microscopiques vivant dans le milieu à étudier et d'évaluation en laboratoire de l'importance des organismes présents, ou du taux de prolifération. Les milieux les plus étudiés par ces techniques sont les plans d'eau. Parmi les méthodes utilisées, on peut citer La mesure de l'activité photosynthétique des algues par dosage de la chlorophylle, la mesure de la biomasse et de la production algale ...

✚ Définition d'un bio-marqueur

Les marqueurs biologiques peuvent être utilisés à la fois pour la surveillance biologique et la surveillance de la santé. Les marqueurs biologiques peuvent-être selon :

- McCarthy et shugart (1990), les marqueurs biologiques sont des mesures aux niveaux moléculaires biochimiques ou cellulaires réalisée soit ou des populations sauvages provenant d'habitats contaminés ou sur des organismes exposés expérimentalement aux polluants qui indiquent que l'organisme a été exposé à des toxiques chimiques ainsi que la magnitude de la réponse de l'organisme au contaminant.

✚ La définition a été généralisée par Depledge (1993)

Un bio-marqueur est « un changement biochimique cellulaire, physiologique ou comportemental qui peut être mesuré dans des tissus ou des fluides corporels ou au niveau de l'organismes entier qui met un évidence l'exposition à tous le effets d'un ou plusieurs polluants chimiques ».

- Lagadic *et al.* (1997) : « Un bio-marqueur est un changement observable et/ou mesurable au niveau moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique, qui révèle l'exposition présente ou passée d'un individu à au moins une substance chimique à caractère polluant ».

2.2.2. Les méthodes éco-toxicologiques

Niveau « organisme » appartient à ce niveau deux types d'approches:

-Les tests de toxicité et de bio essais: les tests de toxicité permettent la classification des produits selon leur degré de toxicité, pour l'établissement de réglementations (ex: test

Daphnies) ; les bio essais sont des méthodes standardisées de surveillance des sources de pollution et des milieux pollués.

Les bio-accumulateurs et bio-intégrateurs

Certains organismes enregistrent et intègrent toutes les modifications naturelles ou d'origine anthropique des facteurs abiotiques. Ce sont des organismes qui intègrent des micropolluants (le plus souvent toxiques : éléments traces, pesticides...) c'est-à-dire qu'ils captent et stockent les polluants en fonction de la qualité présente dans le milieu. L'intérêt est qu'ils mettent ainsi en évidence des contaminations qui ne peuvent être détectées chimiquement du fait des faibles teneurs présentes par exemple dans l'eau, mais aussi des pollutions exceptionnelles et sporadiques qui n'ont pas pu être détectée par les réseaux de surveillance habituels EXP : les bryophytes (mousses aquatiques) dans la détection de micropolluants métalliques, grâce à leur capacité d'accumulation rapide et régulière.

2.2.3. Les méthodes biocénétiques

Niveau peuplements ; basées sur l'étude de la structure, de la dynamiques et des propriétés de chaque biocénose, ces méthodes utilisent l'ensemble ou qu'une partie des espèces présentes dans un milieu donné, en quantifiant les variations de leur composition et de leur structure les variations sont alors considérées comme le reflet des altérations de l'habitats, généralement d'origine anthropique. Il existe trois voies d'approche pour ces méthodes:

A) L'analyse comparée des biocénoses

Elle permet le suivi de l'évolution des biocénoses dans l'espace ou dans le temps.

Ex : - Zonation biologique (Huet, 1949, Illie et Botosaneau, 1963...) milieu aquatique.

- biotypologie (verneaux, 1973) : Consiste en un découpage, d'un réseau aquatique en zones caractérisées par des groupements statistiques d'espèces, ou biocénotypes correspondant à des discontinuités écologiques.

B) L'analyse numérique et statistique des biocénoses

Dans ces méthodes, on fait abstraction de la valeur indicatrice que peuvent avoir certaines espèces par rapport aux conditions de milieu. Il s'agit ici de caractériser la structure du peuplement.

Ex : -indices de diversité, basés sur la modification de la diversité spécifique (nombre d'espèces et abondance relatives) en fonction des conditions écologique.

- indice de similarité, basés sur la mesure du degré de similarité entre des échantillons suite à des changements affectant les biocénoses:

C) Analyse multidimensionnelles

Méthodes statistiques permettant de dégager les relations pouvant exister entre les facteurs abiotiques du milieu et la composition spécifique des communautés qui y sont prélevées (analyse factorielle des correspondances, analyse en composantes principales, analyses canonique etc...).

✚ L'existence d'espèces indicatrices de conditions biologiques déterminées

Selon Hynes (1960), ce principe est fondé sur deux phénomènes qui se manifestent conjointement à l'aval d'un apport polluant:

Le développement des populations de certaines espèces présentant une affinité pour les composés introduits. La régression des populations d'autres espèces diversement résistantes aux modifications physico-chimiques de l'eau et des sédiments induites par les apports allogènes.

Remarque : Les données résultantes d'études biocénologiques sont traitées soit :

Par les spectres : ce sont des méthodes simples basées sur l'abondance relative des différentes espèces indicatrices prélevées dans le milieu. Les espèces dominantes d'indicatrices d'un même niveau de qualité ou de dégradation théorique indiquent le niveau de qualité ou de dégradation du milieu étudié.

- soit globalement par les méthodes indicielles.

2.2.4. Méthodes indicielles

ce sont des expressions chiffrées du niveau de qualité ou de dégradation du milieu, soit par rapport à sa qualité globale soit par rapport à la présence d'un polluant donné, ce type d'évaluation est basé sur la recherche d'indices, qui peuvent être la présence ou l'absence de certains taxons dits indicateurs, la structure des populations elles-mêmes ou, le plus souvent les deux critères combinés.

Basées soit :

- Sur liste d'espèces hiérarchisées en fonction de leur sensibilité à la pollution ;
- Sur l'abondance des individus de chaque espèce ;
- Sur la richesse spécifique des communautés (nombre d'espèces et non pas d'individus).

Les communautés sur lesquelles sont basées les méthodes indicielles sont Animales ou Végétales.

2.3. Principaux indices biologiques de la qualité des écosystèmes aquatiques

2.3.1. Les Végétaux

❖ Indices diatomiques

Les diatomées sont considérées comme les algues les plus sensibles. Sont des algues microscopiques de couleur brun-jaune à l'état vivant, pourvues d'un squelette siliceux sur lequel est basée toute la systématique. Apporte des informations sur le marnage, l'eutrophisation. Elles sont très sensibles aux contaminations azotées et phosphorées : à titre d'exemple, la composition des peuplements se modifie déjà sensiblement pour des teneurs de 30 $\mu\text{g-P/l}$.

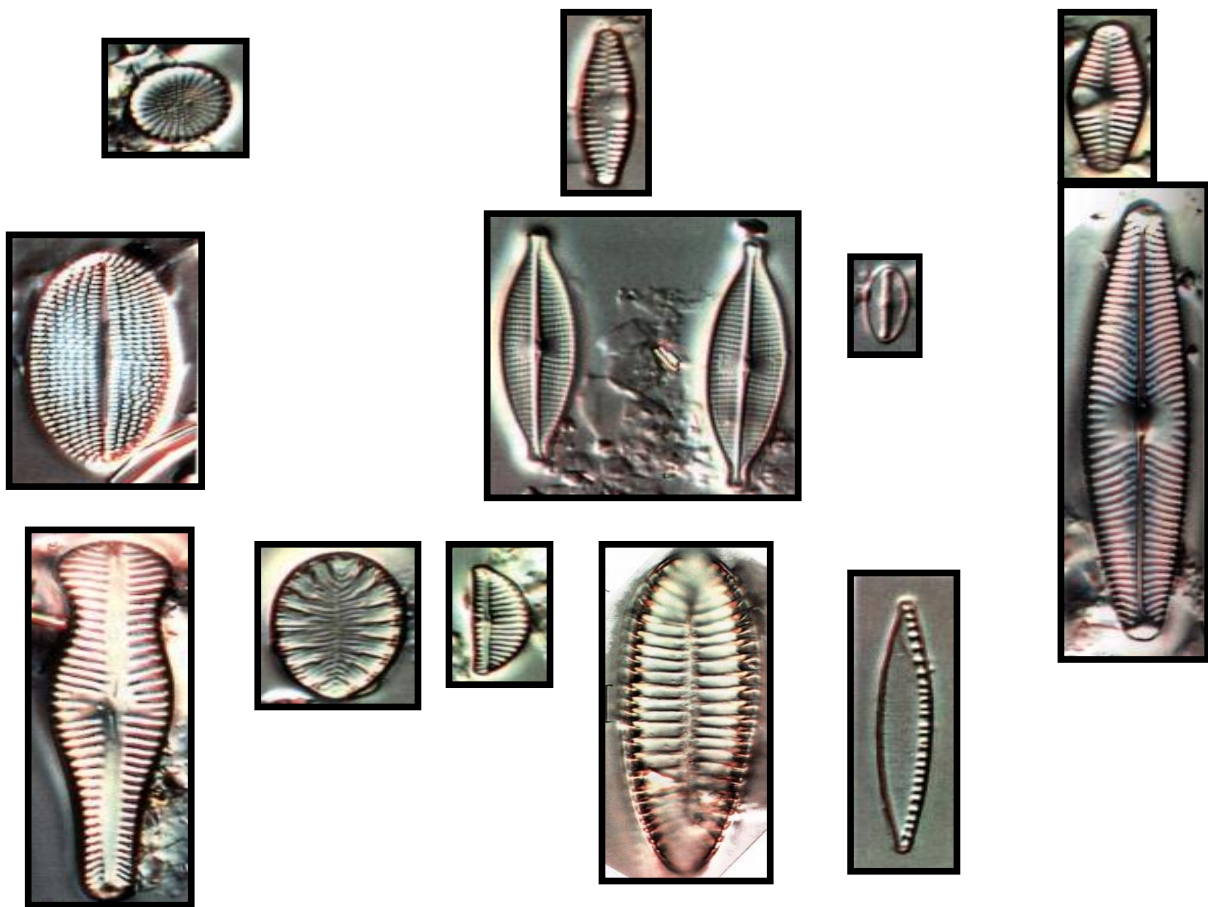


Figure 3. Quelques formes des diatomées

❖ Indices macrophytiques

2 types :

a – critère présence/absence d'espèces indicatrices

b – indices de perturbations basés sur la comparaison situation observée /situation de référence

2.3.2. Les Animaux

Indices de saprobie (1908, n'est plus utilisé en France)

Utilise tous les groupes d'organismes mais est basé sur les espèces indicatrices de la richesse en Matière Organique. Nécessite la détermination jusqu'à l'espèce.

❖ Indices biotiques « macroinvertébrés »

Les plus utilisés pour les petits et moyens cours d'eau. Basé sur la présence / absence de groupes macroinvertébrés indicateurs.

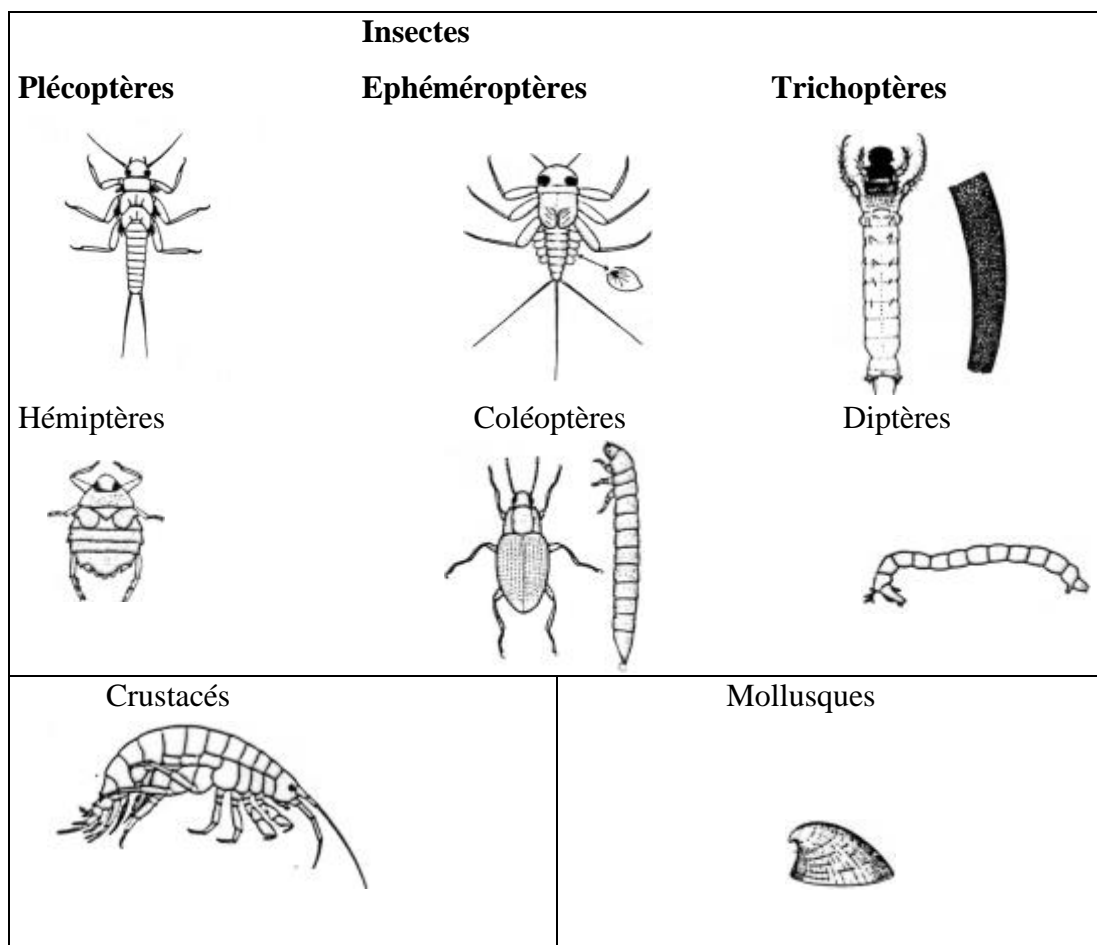
❖ Indices basé sur groupes spécifiques de macroinvertébrés

Indice Oligochètes

Pour les sédiments très fin, plans d'eau, enrichissement en MO.

Indice Chironomidés

Pour les grands lacs surtout, pollution organique



Vers segmentés

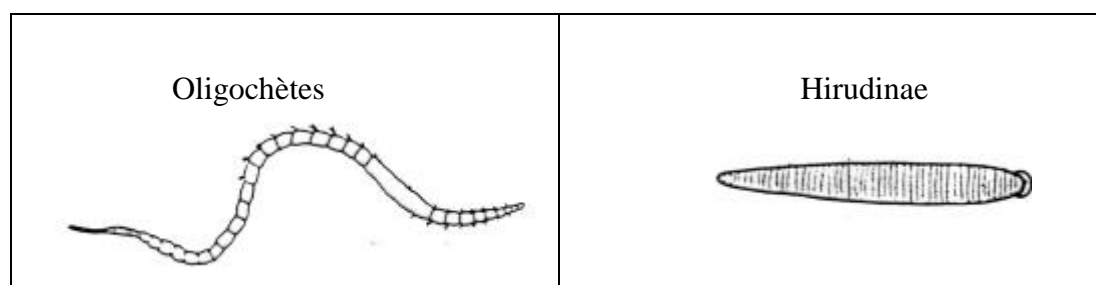


Figure 4. Bioindicateurs macroinvertébrés

❖ Indice Biologique Global Normalisé (I.B.G.N.)

Norme AFNOR Méthode indicielle basée sur les communautés de macroinvertébrés.
Evaluation de la qualité des cours d'eau de profondeur <1m (hypo-rhithron et épi-potamon)
Indices poissons Facile à déterminer, médiatique mais déplacement rapide
Indices Oiseaux Facile à déterminer, médiatique mais déplacement rapide.

2.4. Principaux indices biologiques de la qualité de l'air

La bio-indication relative à la qualité de l'air est l'utilisation d'organismes sensibles à un polluant donné présentant des effets visibles macroscopiquement ou microscopiquement, afin d'évaluer la qualité de l'air. Celle-ci fournit une information semi-quantitative sur la contamination atmosphérique et permet d'apprécier directement les impacts environnementaux des polluants. L'observation d'organismes bioindicateurs complète généralement les dispositifs de mesures automatiques ou orientent les choix de molécules à analyser.

✚ Exemples

Les lichens (organisme résultant d'une symbiose algue-champignon) se développent sur divers substrats (sol, écorces, toits, pierres, etc.). Ils réagissent à des doses très faibles de certains polluants (acides notamment) bien avant les animaux et bien avant que les pierres des monuments ne soient dégradées. Chaque espèce de lichen résiste à un taux spécifique de pollution. Quelques espèces profitent d'un enrichissement de l'air en azote. L'observation de populations de lichens permet ainsi de suivre l'évolution de certaines pollutions au fil du temps. En forêt, la disparition des lichens peut indiquer des taux élevés de dioxyde de soufre, la présence de fongicides dans la pluie, ou de polluants à base de soufre et d'azote.

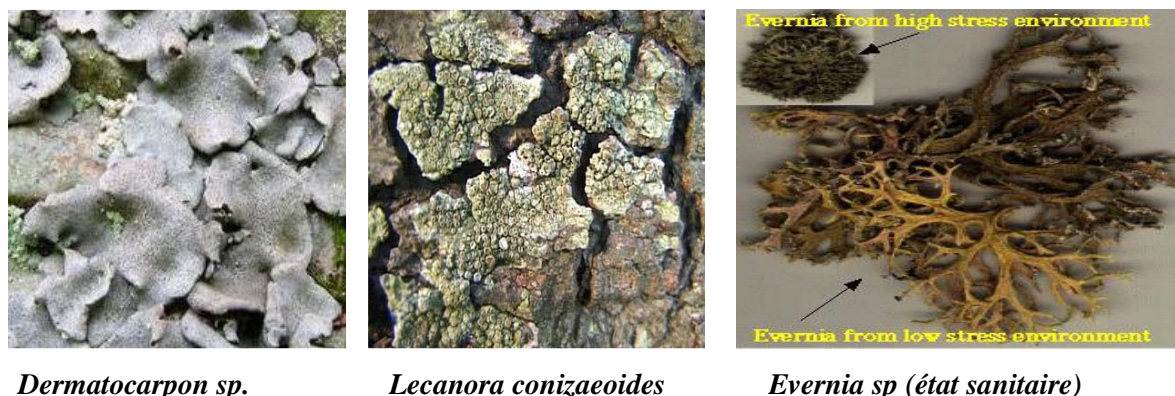


*Dermatocarpon sp.**Lecanora conizaeoides**Evernia sp* (état sanitaire)

Figure5. Forme des lichens

✚ Exemple d'indice lichénique

Tableau 9. Indice Biologique de Lichens Epiphytes (IBLE)

Richesse spécifique		Qualité biologique de l'air	
	élevée (28 sp.)		Qualité bonne (IBLE = 210)
	faible (2 sp.)		situation critique (IBLE = 11)

Les bryophytes (mousses) sont utilisés pour la biosurveillance en Europe des retombées métalliques ou radioactives, en tant qu'accumulateurs de métaux ou radionucléides, et pour étudier les niveaux dits de « fond », avec en France le dispositif BRAMM (*Biosurveillance des retombées atmosphériques métalliques par les mousses*), qui cartographie sur 15 ans au moins les évolutions de teneurs en éléments métalliques et azote en France métropolitaine, en milieu rural et forestier. Quatre campagnes (1996, 2000, 2006 et 2011) ont été menées, sur près de 500 sites de collecte. Une lacune de donnée pour le nord du pays est due à la régression des mousses utilisées par le protocole. Ce travail complète le réseau *Atmo* français de surveillance de l'air et s'inscrit dans le dispositif MERA (*MEsure des Retombées Atmosphériques*) qui est la part française du réseau européen *EMEP* (suivi des pollutions atmosphériques longue distance et trans-frontières). Il s'inscrit aussi dans un programme européen de suivi des métaux dans les mousses (UNECE-LRTAP) Programme International Concerté (PIC) relatif aux « effets de la pollution atmosphérique sur la végétation naturelle et les cultures » de la Commission économique pour l'Europe des Nations unies dans le cadre de la Convention de Genève.



Figure 6. Lunularia cruciata



Figure 7. Peltia epiphylla



Figure 8. Tortula-ruralis

Le trèfle et le tabac permettent de qualifier et quantifier la teneur de l'air en ozone.

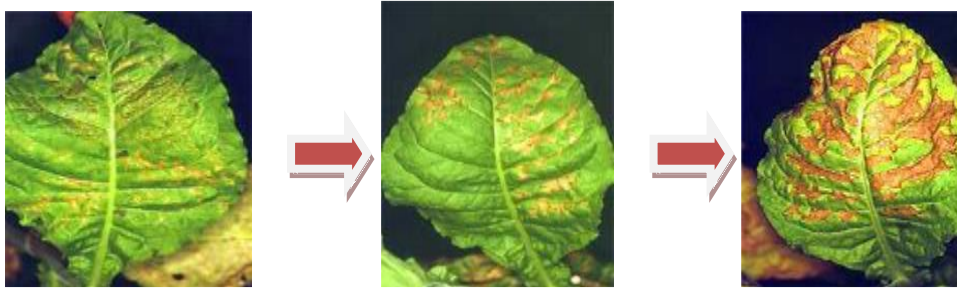


Figure 9. Dégradation progressive de feuilles de tabac (*Nicotiana tabacum* var. *Bel W3*) par l'O₃.

Les Pétunias peuvent servir de bioindicateurs de la quantité d'hydrocarbure dans l'air. *pétunia* est un genre de plantes herbacées vivaces ou annuelles de la famille des *Solanaceae*, originaires des régions tropicales d'Amérique du Sud. On dénombre une vingtaine d'espèces.

L'abeille est un bio-indicateur intéressant de l'environnement proche et périphérique, car elle butine dans un rayon de 3 km environ autour de sa ruche. L'abeille est utilisée depuis peu et a fait ses preuves en tant que bio-indicateur. Elle butine, se pose sur le sol et boit de l'eau, ce qui lui confère le rôle de témoin de la qualité environnementale globale. Une étude récente sur l'utilisation de l'abeille pour caractériser le niveau de contamination de l'environnement par les xénobiotiques a montré que les abeilles peuvent être utilisées pour caractériser le niveau de contamination de l'environnement et en particulier pour les métaux lourds, les HAP et les PCB. Elles ont également été utilisées lors d'accidents industriels, par exemple lors de l'accident de Tchernobyl, pour détecter la présence de radio-isotopes.



Figure 10. Abeille bioindicateurs de l'environnement

2.5. Principaux indices biologiques de la qualité du sol

A) Indices biologiques de la qualité du sol

L'Indice Biologique de Qualité des Sols (IBQS) est basé sur l'étude de l'ensemble des peuplements de macroinvertébrés du sol comme bioindicateurs de son état physique, chimique et écologique.

Bio-indicateur de la qualité des sols basés sur l'étude des peuplements de macroinvertébrés :

Les macroinvertébrés du sol sont composés d'une grande diversité d'organismes visibles à l'œil nu. Ils peuvent être groupés selon leur rôle principal dans l'écosystème.

Ces organismes participent activement au fonctionnement du sol en lui permettant de rendre un ensemble de services éco systémiques essentiels pour la planète tels que :

- l'infiltration et le stockage d'eau ;
- la séquestration de carbone ;
- la stimulation de la croissance des plantes ;
- le maintien de la biodiversité ou de l'activité microbienne ;
- le recyclage de la matière organique.

En leur absence, ces fonctions se trouvent fortement diminuées.

Les macroinvertébrés du sol sont en contact permanent avec ce milieu où ils vivent, se nourrissent et se reproduisent. Ils occupent une grande diversité d'habitats et possèdent des modes de vie très variés. De ce fait, ils sont capables d'intégrer les changements de l'environnement dans le temps et dans l'espace et d'y répondre avec un degré d'intensité variable dépendant de leur mode de vie. Ces changements peuvent être ressentis à différentes échelles et seront reflétés par des variations dans une ou plusieurs des unités (taxonomiques, fonctionnelles, écologiques) qui les composent. Faciles à échantillonner à l'aide d'une méthode standardisée (ISO 23611-51), les macroinvertébrés du sol constituent des excellents bioindicateurs de l'état du milieu et de l'impact des pratiques de gestion.

2.6. L'être humain comme bio-indicateur

L'homme, le spermatozoïde, la fertilité humaine, la durée moyenne de vie, le taux de cancers (et leur nature) ou le taux d'autres maladies peuvent faire partie des batteries d'indicateurs évaluant l'état de l'environnement.

2.7. Synthèse sur les bioindicateurs

Bio-indication: +++: très fiable; +: problématique; -: peu fiable	
Bioindicateurs de minéralisation naturelle	(niveaux trophiques)
-ensemble des végétaux	+++
-ensemble des animaux	+
Bioindicateurs du niveau d'oxygénation	
-ensemble des végétaux	-
-ensemble des animaux	+++
Bioindicateurs du type de substrat	
-végétaux microscopiques (algues)	-
-végétaux macroscopiques	++
-macroinvertébrés	+++
Bioindicateurs de pollution organique et d'hyper-trophisation	
-végétaux microscopiques (diatomées)	+++

-végétaux macroscopiques	+
-macroinvertébrés	+
Prélèvement représentatif	
-diatomées	très facile
-plantes supérieures	difficile
-macroinvertébrés	difficile
Identification des organismes	
-espèces de diatomées	difficile
-genres de diatomées	assez facile
espèces de plantes supérieures	assez difficile
-espèces de macro-invertébrés	très difficile (voir impossible)
-genres de macro-invertébrés	assez facile

Chapitre 3: Protection de l'environnement ; réglementation Algérienne**3.1. Législation environnementale : définition et étendue****3.1.1. Définition de l'environnement**

À l'origine, il s'agit d'un anglicisme signifiant milieu c'est à dire le milieu terrestre ou aquatique dans lequel évolue un être vivant. Le terme environnement désigne actuellement la composante écologique du cadre de vie de l'homme, et est associé de façon sous-jacente aux problèmes de dégradation de la biosphère par suite de l'action anthropique : pollution, modification du climat, surexploitation des ressources, désertification, déforestation. Les sciences de l'environnement peuvent se définir selon A. Buttler comme l'étude de l'impact de l'homme sur son environnement, et intègrent des disciplines comme l'écologie, la chimie-physique, l'économie l'éthique et la politique.

Selon F. Ramade, "les Sciences de l'environnement sont - à l'exception de l'Ecologie qui en constitue la pierre de voute - représentées par l'ensemble des disciplines non biologiques qui concerne l'étude aux diverses échelles spatio-temporelles des entités propres à l'écosphère".

Les problématiques de l'environnement font l'objet de travaux de recherche très étendus qui portent aussi bien sur le climat, les ressources naturelles, la pollution, les déchets et concernent aussi de grands secteurs comme l'énergie, l'industrie et la santé.

« L'environnement est défini comme l'ensemble des éléments qui entourent une espèce. Ces éléments contribuent pour certains à assurer les besoins naturels des espèces. L'environnement peut être également défini comme la composition de conditions naturelles physiques, chimiques ou biologiques qui agissent sur les organismes vivants et les activités humaines. »

3.1.2. Définition juridique

En 1967, une première directive européenne définissait juridiquement l'environnement comme étant: l'eau, l'air et le sol, ainsi que les rapports de ces éléments entre eux d'une part, et avec tout organisme vivant d'autre part. Actuellement, la définition suivante existe dans les textes juridiques: « ensemble des éléments qui dans la complexité de leurs relations constitue le cadre, le milieu et les conditions de vie de l'homme tels qu'ils sont ou qu'ils sont ressentis.»

En Algérie, la législation définit l'environnement dans la loi n° 03- 10 du 19 juillet 2003 comme suit : « les ressources naturelles abiotiques et biotiques telles que l'air, l'atmosphère, l'eau, le sol et le sous-sol, la faune et la flore y compris le patrimoine génétique, les interactions entre les dites ressources ainsi que les sites, les paysages et les monuments naturels ».

3.1.3 La législation environnementale**A) Définition du mot législation selon le dictionnaire Larousse**

Action par laquelle sont élaborées, adoptées et édictées les lois d'un pays. Ensemble des lois d'un pays, des dispositions législatives intéressant un domaine donné.

3.1.4. Bref historique de la législation environnementale Algérienne

L'Algérie, indépendante en 1962, a pendant longtemps encore reconduit la législation coloniale en matière de l'environnement. Par des textes souvent distincts de ceux de la métropole française, le législateur colonial a organisé les secteurs de la chasse, des parcs nationaux et des forêts. Ce n'est que dans les années quatre-vingt que débute une véritable politique de l'environnement en Algérie, avec notamment la promulgation de la loi du 5 février 1983, autour de laquelle s'articulent celles relatives à la chasse, aux forêts et aux eaux. La procédure de l'étude d'impact est considérée comme l'outil de base de la mise en œuvre de la protection de l'environnement. A l'époque cet aperçu de la législation Algérienne dénote de la part des pouvoirs publics un intérêt certain pour la protection de l'environnement. Pourtant, si les textes juridiques se distinguent par leur grande technicité et par leurs connaissances de la matière de l'environnement, leurs effets restent souvent suspendus, puisque les lois n'ont pas été suivies de décrets d'application dans des délais raisonnables.

Durant la décennie 2000, l'Algérie a déployé beaucoup d'efforts en matière de législation pour la protection de l'environnement, appuyé par un paysage institutionnel qui s'est développé. Une telle démarche, particulièrement pertinente, alliant économie, environnement et social, a permis d'instaurer les bonnes pratiques dans ce domaine et d'assurer une implication forte des pouvoirs publics, des entreprises, et des citoyens, ainsi qu'une évolution des mentalités et des changements de comportement de tous.

🚩 Loi n° 83-03 relative à la protection de l'environnement

Cette loi a pour objet la mise en œuvre d'une politique nationale de protection de l'environnement tendant à: la protection, la restructuration et la valorisation des ressources naturelles; la prévention et la lutte contre toute forme de pollution et nuisance; l'amélioration du cadre et de la qualité de la vie. Elle est formée par 140 articles répartis en 6 titres, à savoir: Dispositions générales (I); Protection de la faune (II); Protection des milieux récepteurs, atmosphère, eau, mer (III); Protection contre les nuisances, comprenant des dispositions relatives aux installations classées, aux déchets, à la radio-activité, aux substances chimiques et au bruit (IV); Etudes d'impact (V); Recherche et constatations des infractions (VI). Pour la mise en œuvre de cette loi il est créé des corps spécialisés chargés de la protection de l'environnement. Les collectivités locales viennent reconnues comme des institutions

essentielles pour son application. Les mesures de protection de la faune et de la flore portent sur la nature, les espèces animales et végétales, le maintien des équilibres biologiques et la conservation des ressources naturelles, la protection des terres contre la désertification, l'érosion et la remontée des sels dans les terres à vocation agricole, les différentes activités qui sont interdites. La loi renvoie à un décret pour déterminer les conditions dans lesquelles sont fixées: la liste des espèces protégées, la durée des interdictions et la partie du territoire sur laquelle elles s'appliquent, les modalités d'octroi de l'autorisation de capture. Par décret seront aussi prises les décisions de classement et de création des parcs nationaux et des réserves naturelles ainsi que d'éventuelles réserves intégrales. Le titre III porte les mesures de protection de l'atmosphère, de l'eau, de la mer. En matière de protection contre les nuisances, cette loi porte les dispositions relatives aux installations classées, aux déchets, à la radioactivité, aux substances chimiques. L'étude d'impact est reconnue comme un outil de base pour la mise en œuvre de la protection de l'environnement, nécessaire pour la réalisation de l'aménagement ou des ouvrages qui, par l'importance de leurs dimensions ou de leurs incidences sur le milieu naturel, peuvent porter atteinte à ce dernier.

3.2. Analyse de la situation environnementale en Algérie

Les problèmes environnementaux ont des impacts négatifs non seulement sur l'activité et l'efficacité économique, mais également sur la santé et la qualité de vie de la population et sur la résilience et la durabilité du capital naturel du pays.

Le recensement des problèmes fait apparaître:

Des ressources naturelles mal réparties, limitées, et fortement menacées

Des ressources en eau limitées et de faible qualité

Les pertes d'eau dans les réseaux de distribution

L'envasement des barrages.

Des ressources en sols et en couvert végétal en dégradation constante

La salinisation des terres : Ce phénomène touche principalement les plaines agricoles irriguées de l'Ouest du pays où certains sols, totalement stérilisés, ont atteint des niveaux de dégradation irréversibles une frange côtière en dégradation par l'érosion côtière, l'extraction de sable, l'envasement des ports et la surexploitation halieutique des pollutions industrielles et urbaines en progression sont à l'origine de sérieux problèmes de santé publique un cadre institutionnel et juridique déficient une explosion démographique une urbanisation accélérée : L'urbanisation accélérée, la croissance démographique, la densité de population et les changements de modes de consommation ont engendré une dégradation constante du cadre de vie (pollutions des ressources en eaux, pollutions de l'air, déchets solides, etc.)

L'érosion hydrique

L'érosion éolienne

La biodiversité : la diversité floristique, répartie dans les différents écosystèmes (forêts, steppes, zones sauvages, déserts, mer, massifs montagneux, etc.) est menacée par certaines pratiques agricoles, par la construction d'infrastructures, par l'urbanisation et par la déforestation. En termes de diversité faunistique, 47 espèces de mammifères sur 107 inventoriées sont menacées et protégées, et 68 espèces d'oiseaux sur 336 sont protégées; il en va de même pour 39 espèces de rapaces. Le recensement des reptiles n'existe pas, mais 8 espèces sont cependant protégées.

La dégradation du patrimoine archéologique et historique. Des atteintes naturelles et anthropiques entraînent la dégradation du patrimoine archéologique et historique.

Cas de la pollution industrielle : L'Algérie est confrontée à de sérieux problèmes de pollution industrielle. Le parc industriel est ancien, fréquemment inefficace et polluant. Le processus d'industrialisation s'est effectué jusqu'à récemment sans prendre en compte les nécessaires précautions environnementales. Les pollutions engendrées par le rejet d'eaux industrielles non traitées, les émissions de gaz et la production de déchets dangereux, dont la gestion n'a pas encore trouvé des solutions, posent de sérieux problèmes les 1 240 000 t/an, dont 40 % sont considérés comme toxiques et dangereux. La zone industrielle d'Es-Senia à Oran, par exemple, produit à elle seule 10 000 t/an de déchets solides et liquides, ainsi que des quantités considérables de produits toxiques qui, contenus dans les eaux résiduaires industrielles, sont rejetés vers le milieu naturel (mer, oueds...). Les déchets sont généralement stockés sur les lieux de production sans tenir compte des normes et règles environnementales nationales ou internationales. Au vu de cette situation, une analyse approfondie a été menée, pour proposer une stratégie d'amélioration de la gestion des déchets industriels.

Les analyses démontrent clairement que l'étendue et la gravité des problèmes environnementaux en Algérie affectent:

La santé et la qualité de vie de la population,

La productivité et la durabilité du capital naturel,

L'efficacité de l'utilisation des ressources et la compétitivité de l'économie en général et

L'environnement global.

3.3. Description des mécanismes économiques de protection de l'environnement

Sur le plan économique, différents instruments viennent compléter les actions réglementaires et institutionnelles tels que :

A/ Les taxes relatives à l'écologie : écotaxe et principe du pollueur-pollueur

Les taxes écologiques ont été instituées pour permettre de mieux appliquer le principe du «pollueur payeur». En effet, elles conduisent à mobiliser les ressources nécessaires pour financer les dommages causés à l'environnement par une activité polluante.

Il y a eu mise en place de bon nombre d'instruments financiers coercitifs et incitatifs destinés à induire des comportements plus rationnels et responsables de la part des différents agents économiques. Il s'agit notamment de :

-La Taxe forfaitaire affectée qui représente une taxe sur les activités polluantes ou dangereuses pour l'environnement (consolidée et élargie).

• Les Taxes écologiques d'orientation spécifiques telle que :

• La Taxe d'incitation au " déstockage" des déchets industriels.

• La Taxe d'incitation au déstockage des déchets liés aux activités de soins.

• La Taxe complémentaire sur la pollution atmosphérique d'origine industrielle.

• La Taxe relative aux activités polluantes ou dangereuses pour l'environnement (TAPD) A ces incitations strictement financières vient s'ajouter le fonds pour l'environnement et la dépollution (FEDEP) qui a pour principale mission d'inciter à la reconversion des installations existantes obsolètes et polluantes vers des technologies de production plus propre et d'encourager des projets d'investissement intégrant des procès qui tiennent compte de la protection de l'environnement. Le FEDEP a également pour objectif de financer la recherche d'applications et surtout de participer aux dépenses relatives aux interventions d'urgence en cas de pollution accidentelle. Il a également pour mission de financer des actions de dépollution urbaine, des actions urgentes en cas d'accident ou de pollution accidentelle.

B/Evaluation du cout- bénéfice

C /financement des projets écologiques

D/Permis d'émissions négociables

3.4. Statut juridique actuel en matière de protection et gestion de l'environnement

3.4.1. Contexte de prise en charge de la protection de l'environnement

✚ Analyse du cadre institutionnel

Sur le plan institutionnel, un certain nombre d'instruments ont été mis en place, ayant sur la base desquels un renforcement institutionnel a eu lieu par la création d'organismes sous tutelles présentés dans le tableau suivant:

Tableau 10 : Abréviations

ONEDD	Observatoire National de l'environnement et du développement durable
CNFE	Conservatoire National des Formations à l'Environnement
CNTPP	Centre national des technologies de production plus propre CNTPP
CNL	Commissariat National du Littoral
AND	Agence National des déchets
CNDRB	Centre National de Développement des Ressources Biologique
ANDRB	Agence Nationale des Changements Climatiques
ANAAT	Agence nationale de l'aménagement et l'attractivité du territoire
ON	Observatoire National du Territoire

Analyse sur le plan international

Un certain nombre de protocoles et de conventions ont vu le jour et dont les plus importants sont :

-Le Protocole d'Aarhus (Danemark, Juin 1988), entré en vigueur en Octobre 2003 ,son objectif est de contrôler, de réduire ou d'éliminer les rejets, les émissions et les pertes de polluants organiques persistants dans l'environnement. Les Pop's d'origine industrielle visés par ce texte sont les polychlorobiphényles (PCB), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les Dioxines/Furannes.

-La Convention de Stockholm (2001) est un traité mondial dont l'objectif est de protéger la santé humaine et l'environnement contre les Polluants Organiques Persistants (Pop's).

-Les directives de Londres applicables à l'échange de renseignements sur les produits chimiques qui font l'objet du commerce international.

-La convention de Bâle (1989) relative au contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination

Au plan national

Sur le plan réglementaire, un important arsenal juridique a été mis en place afin de permettre à l'Algérie de se mettre en conformité avec les engagements internationaux auxquels l'Algérie a souscrit afin d'assures la prise en charge des questions environnementales dans la perspective d'un développement durable.

Ainsi, les grands principes de droit environnemental en Algérie sont consacrés dans trois textes de loi :

La Loi n°01-19 du 12/12/2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, définit les principes de base qui conduisent à une gestion intégrée des déchets, de leur génération à leur élimination.

La Loi n°03-10 de la 19/07/2003 relative à la protection de l'environnement et au développement durable, consacre les principes généraux d'une gestion écologique rationnelle.

La loi n°04-20 du 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable, définit clairement les responsabilités de chacun des acteurs impliqués dans le domaine de la prévention au niveau des zones et des pôles industriels. En outre, des textes spécifiques relatifs aux PCB, Pesticides, Dioxines/Furannes ont été élaborés pour permettre leur gestion efficace et définitive.

3.4.2. Etude des différentes lois relatives à la protection de l'environnement

Un important arsenal juridique a été mis en place afin de permettre la prise en charge des questions environnementales dans la perspective d'un développement durable et de mettre le pays en conformité avec les engagements internationaux auxquels l'Algérie a souscrit.

L'ordonnance n°06-05 du 15 juillet 2006 relative à la protection et à la préservation de certaines espèces animales menacées de disparition.

La loi n°03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable. Elle se base sur les principes du nouveau droit de l'environnement adoptés au niveau international, notamment:

- le principe de préservation de la diversité biologique ;
- le principe de non dégradation des ressources naturelles ;
- le principe d'action préventive et de correction par priorité à la source ;
- le principe de précaution ; le principe du pollueur-payeur

Concernant la restauration, elle est prévue par les dispositions de l'article 100 pour le milieu aquatique et l'article 102 pour les installations classées.

Art 100 : le fait de jeter, déverser ou laisser couler dans les eaux superficielles ou souterraines ou les eaux de la mer dans la limite des eaux sous juridiction algérienne, directement ou indirectement, une ou des substances quelconques dont l'action ou les réactions entraînent, même provisoirement, des effets nuisibles sur la santé de l'homme ou des dommages à la flore ou à la faune « ... » est puni de deux (02) ans d'emprisonnement et de cinq cent mille dinars (500.000) d'amende. « ... ». Le tribunal peut également imposer au condamné de procéder à la restauration du milieu aquatique. « ... ».

Art 102 : le fait d'exploiter une installation sans l'autorisation requise à l'article 19 (qui peut présenter des dangers pour la santé, l'hygiène, la sécurité, l'agriculture, les écosystèmes, les ressources naturelles etc...) , est puni d'un (01) an d'emprisonnement et de cinq cent mille dinars (500.000) d'amende. « ... ». Le tribunal peut exiger la remise en état des lieux dans un délai qu'il détermine.

Loi n°01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets. La responsabilité des producteurs et détenteurs de chaque catégorie de déchets est clarifiée par cette loi qui fait obligation aux générateurs et/ou détenteurs des déchets inertes et des déchets spéciaux d'assurer ou de faire assurer l'élimination de leurs déchets dans des conditions qui ne risquent pas de porter atteinte à la santé publique et à l'environnement. Cette obligation, constitue le fondement du principe de la responsabilité du générateur de déchets et consacre le principe universel du pollueur-payeur.

Loi n°02-02 du 5 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral. Cette loi fixe les prescriptions générales et particulières relatives à la protection et à la valorisation du littoral. Pour certaines infractions, la juridiction compétente ordonne aux frais du condamné, soit la remise en état des lieux, soit l'exécution des travaux d'aménagement.

Loi n°84-12 du 23 juin 1984 portant régime général des forêts. Responsabilité claire vu les peines prévues mais pas de réparation.

Loi n°05-12 du 04 août 2005 relative à l'eau. Responsabilité claire vu les peines prévues mais pas de réparation.

Loi n°04-07 du 14 août 2004 relative à la chasse. Art 106 : la poursuite des infractions n'est pas exclusive des actions en réparation pouvant être intentées par l'administration chargée de la chasse ou les associations de chasseurs concernées à l'encontre des auteurs de l'infraction aux dispositions de la loi relative à la chasse.

Loi n°88-08 du 26 janvier 1988 relative aux activités de médecine vétérinaire et à la protection de la santé animale. Cette loi fixe, entre autre, les mesures générales de protection des animaux, de prévention et de lutte contre les maladies animales. Elle institue une autorité vétérinaire et un fonds pour la promotion de la protection zoo sanitaire destiné à soutenir les actions de protection de la santé animale (articles 2, 3, 4). Les infractions aux dispositions de cette loi sont punies d'emprisonnement et d'amendes, les dépenses encourues sont à la charge des assujettis contrevenants. Aucune demande de réparation n'est prévue dans cette loi.

Loi n°87-17 du 1^{er} août 1987 relative à la protection phytosanitaire. Cette loi a pour objet la mise en œuvre de la politique nationale en matière de la protection phytosanitaire. La lutte contre les ennemis des végétaux déclarés particulièrement nuisibles ou dangereux incombe

aux propriétaires et exploitants des biens-fonds, bâtiments, locaux et moyens de transports qui sont tenus de mettre en œuvre les mesures d'éradication (art 29). Lorsque l'infestation par les ennemies des végétaux représente un danger d'envergure mettant en péril les cultures et lui conférant un caractère de fléau national, des mesures particulières doivent être mises en œuvre. Le financement des campagnes de traitement phytosanitaire décidées est soit pris en charge par l'état, soit en partie par des fonds publics et en partie par les propriétaires et exploitants des terres affectées (art 30). Aucune demande de réparation n'est prévue dans cette loi.

Loi n° 01-11 du 3 Juillet 2001 relative à la pêche et à l'aquaculture : cette loi définit les règles générales de gestion et de développement de la pêche et de l'aquaculture, en conformité avec les engagements internationaux de l'Etat en matière d'exploitation, de conservation et de préservation des ressources biologiques des eaux sous juridiction nationale (art 3). La responsabilité des contrevenants est bien définie notamment par l'article 72. Il est également signalé qu'en cas de dommages subis par la collectivité du fait de l'infraction commise, l'administration compétente de la pêche se constitue partie civile et demande réparation au nom de l'état.

Décret présidentiel n°98-123 du 18 avril 1998 portant ratification du protocole de 1992, modifiant la convention internationale de 1969 sur la responsabilité civile pour les dommages dus à la pollution par les hydrocarbures ;

Décret présidentiel n°98-124 du 18 avril 1998 portant ratification du protocole de 1992, modifiant la convention internationale de 1971 portant créations d'un fonds international d'indemnisation pour les dommages dus à la pollution par les hydrocarbures.

Références bibliographiques

- Abboudi, A., Tabyaoui, H., El Hamichi, F., Benaabidate, L., Lahrach, A. (2014). Etude de la qualité physico-chimique et contamination métallique des eaux de surface du bassin versant de Guigou, Maroc. *European Scientific Journal*, 10(23), 176-190
- Albrecht, R. (2007). Co-compostage de boues de station d'épuration et de déchets verts: Nouvelle méthodologie du suivi des transformations de la matière organique. (Thèse de doctorat, Université Paul Cezanne) pp: 24-82-83-84-85.
- Ballot, A., Mawussi, G., Atakpama, W., Moita, M., Yangakola, M., Zinga, L., Silla, S. (2016). Caractérisation physico-chimique des sols en vue de l'amélioration de la productivité du manioc dans la région de Damara au centre sud du Centre-Afrique. *Agronomie africaine journal*, 28(1), 9-23
- Bonnard, R. (2001). Rapport final (Le risque biologique et la méthode d'évaluation du risque), Unité Evaluation des Risques Sanitaires Direction des Risques Chroniques, INERIS DRC-01- 25419-ERSA-RBn-383/microb6.doc, p38.
- Coste, M., Ayphassorho, H. (1991). Etude de la qualité des eaux du bassin Artois-Picardie à l'aide des communautés de diatomées benthiques : application des indices diatomiques. pp.227.
- Delaigue, O., Eveillé, F., Solène., F., Pont, D., Usseglio-Polatera, P. (2013). Milieux aquatiques : De nouveaux bioindicateurs, plus sensibles, plus précis. , ASTEE/EDP Sciences. pp : 14-16.
- Hennion, M. (2005). L'évolution des systèmes analytiques, impact sur les formations, Laboratoire Environnement et chimie Analytique, ESPCI, Paris, JOURNEES MIEC-JIREC
- JAffrezic-Renault, N. (2003). Développements analytiques: micro capteurs électrochimiques pour le suivi in-situ des contaminants, Laboratoire IFOS, Ecole Centrale de Lyon, 69134 ECULLY Cedex (France).
- Journal officiel de la république algérienne démocratique et populaire, Loi n° 83-03 relative à la protection de l'environnement. (Consulté le 26 Avril 2022).
- Kermarrec, L., (2012). Apport des outils de la biologie moléculaire pour l'utilisation des diatomées comme bioindicateurs de la qualité des écosystèmes aquatiques et pour l'étude de leur taxonomie. (Université de Grenoble). pp : 40-70.
- Léveque, Ch. (2013). L'écologie est elle encore scientifique. Edition Quae. pp : 144

- Mojtahid, M., (2007). Les foraminifères benthiques: bio-indicateurs d'eutrophisation naturelle et anthropique en milieu marin franc. (Thèse de doctorat, université d'Angers).pp : 70-110.
- Makhoukhou, M., Sbaa, M., Berrahou, A., Clooster, A-Van. (2001). Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'Oued Moulouya (Maroc orientale) Larhysse Journal. 9. 3
- Prygiel, J., Coste, M. (2020). Guide méthodologique pour la mise en œuvre de l'indice biologique diatomées NF T go-354 Agence de l'eau Artois Picardie. pp340.
- Ramade, F., 2010- Dictionnaire encyclopédique des pollutions : De l'environnement à l'homme. Ed. Dunod, Paris.
- Ramade, F. (2011). Introduction à l'écochimie - Les substances chimiques de l'écosphère à l'homme. Ed. Tec et Doc Lavoisier, Paris.
- Ramade., F. (1993). Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement.
- Rodier, J., Bazin, C., Broutin, J.P., Chambon, P., Champsaur, H., Rodier, L. (1996). L'Analyse de l'Eau. 8è édition. Dunod : Paris. 1384 pp.
- Rodier., J., et Coll. (2005). L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, Eaux résiduaires, Eau de mer. Ed. Dunod, Paris.
- Rodier, J., Legube, B., Merlet, N. (2009). L'Analyse de l'Eau. 9è édition. Dunod : Paris. 1579 pp. Les méthodes d'évaluation de l'état des eaux », sur eaufrance.fr (consulté le 30 Février 2022).