

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université DjiIaLi BOUNAAMA Khemis Miliana
Faculté des Sciences de la Matière et de l'Informatique
Département de Chimie



Cours

Chimie de l'environnement et lutte contre la pollution

2^{ème} année master Chimie pharmaceutique

Dr. CHERIFI Souad

Année Universitaire: 2025/2026

Avant propos



Ce cours de chimie de l'environnement et lutte contre la pollution s'adresse aux étudiants du Master 2 "Chimie pharmaceutique" de la faculté des sciences de la matière et de l'Informatique. A travers ce cours les étudiants vont maîtriser les notions fondamentales en rapport avec l'environnement et comprendre comment une communauté d'êtres vivants peut être influencée ou perturbée.

Ce cours vise à fournir aux futurs cadres de l'industrie pharmaceutique une expertise solide et opérationnelle concernant l'impact environnemental des activités industrielles, et plus spécifiquement celles liées à leur secteur. L'objectif principal est de permettre aux apprenants de maîtriser les concepts fondamentaux liés aux écosystèmes ainsi que les propriétés physico-chimiques des substances, afin de mieux appréhender leur devenir et leurs interactions dans l'environnement. Ce cours a également pour but de former à l'analyse et au contrôle rigoureux de la qualité de l'eau, en familiarisant les participants avec les paramètres réglementaires critiques (nitrates, métaux, pesticides) et les technologies de traitement (coagulation, désinfection). Concernant l'air, il s'agira de comprendre l'origine, la réglementation et les méthodes de traitement des polluants atmosphériques majeurs, en accordant une attention particulière à l'impact des composés chimiques sur l'ozone stratosphérique et aux solutions de substitution. Ce module s'articule sur quatre chapitres.

Le premier chapitre traite des notions fondamentales de l'écologie, de la chimie environnementale et des impacts anthropiques. Ce chapitre présente également les interactions entre biotope et biocénose.

Le deuxième chapitre est dédié à une étude complète de l'eau sous tous ses aspects : sa répartition sur terre, son cycle naturel, ses caractéristiques chimiques, les normes qui définissent sa qualité, les méthodes pour l'analyser, les différentes sources de pollution et les stratégies pour la protéger.

Le troisième chapitre offre une introduction complète et structurée à l'atmosphère terrestre, abordant tant ses caractéristiques fondamentales que les enjeux cruciaux de sa pollution.

Le dernier chapitre explique les fonctions écologiques et l'importance du sol. Analyser les causes, les conséquences et les solutions liées à la pollution des sols.

Table des matières

Avant-Propos

Table des matières

Chapitre 1 : Généralités : concepts et définitions

1.1. Ecologie.....	01
1.2. Systèmes.....	01
1.2.1. Le biotope.....	01
1.2.2. La biocénose.....	01
1.3. Environnement.....	02
1.3.1. L'atmosphère.....	03
1.3.2. L'hydrosphère.....	04
1.3.3. La lithosphère (ou Géosphère).....	04
1.3.4. La biosphère.....	04
1.4. Interdépendance.....	04
1.5. Chimie de l'environnement.....	04
1.6. L'homme et l'environnement.....	05
1.6.1. La transformation des terres et des paysages.....	05
1.6.2. L'exploitation et l'épuisement des ressources.....	06
1.6.3. La pollution : Altérer la qualité des milieux.....	07
1.6.4. Les modifications biologiques directes.....	08
1.6.5. L'impact global et indirect : Le changement climatique	09
1.6.6. Des actions favorables.....	09
1.7. Impact et pollution de l'environnement.....	10
1.7.1. Impact.....	10
1.7.2. Pollution.....	11
1.8. Les substances présentes dans l'environnement.....	12
1.8.1. Notions de base.....	12
1.8.2. Propriétés physiques et chimiques.....	14
1.8.3. Transport, dispersion.....	15
1.8.4. Persistance.....	15
1.8.5. Décomposition.....	16
1.8.6. Accumulation.....	16
1.8.7. Durée de vie des substances.....	16
1.8.8. Ecotoxicologie.....	17

Chapitre 2 : Eau

2.1. Les ressource en eaux.....	18
2.2. Importance de l'eau.....	19
2.3. Les eaux naturelles.....	19
2.3.1. Eaux souterraines.....	19
2.3.2. Eaux de surface.....	20

Table des matières

2.3.3. Eaux des mers et océans.....	20
2.4. Cycle de l'eau.....	21
2.4.1. L'évaporation et la transpiration des végétaux.....	21
2.4.2. La condensation.....	22
2.4.3. Les précipitations.....	22
2.4.4. Le ruissellement ou l'infiltration.....	22
2.5. Compositions chimique de l'eau.....	23
2.6. Normes et qualité de l'eau.....	23
2.6.1. Qualité de l'eau.....	23
2.6.2. Normes de qualité des eaux.....	29
2.7. Analyse de l'eau.....	31
2.7.1. L'échantillonnage.....	31
2.7.2. Méthodes d'analyse.....	32
2.7.3. Interprétation des résultats.....	32
2.8. Pollution de l'eau.....	33
2.8.1. Définition des eaux usées.....	33
2.8.2. Les sources de pollutions des eaux.....	34
2.8.3. Origines des eaux usées.....	34
2.8.4. Conséquences de la pollution.....	35
2.8.5. La Lutte contre la pollution de l'eau.....	37
Chapitre 3 : Air	
3.1. Définition de l'atmosphère.....	42
3.2. L'importance de l'atmosphère.....	42
3.3. Composition et propriétés de l'atmosphère.....	42
3.3.1. Couches de l'atmosphère.....	42
3.3.2. Composition de l'atmosphère.....	44
3.4. La qualité de l'air.....	45
3.5. Pollution de l'atmosphère.....	46
3.5.1. Définition de la pollution atmosphérique.....	46
3.5.2. Polluant atmosphérique.....	46
3.5.3. Classification des polluants.....	46
3.5.4. Temps de mélange.....	47
3.5.5. Durée de vie atmosphérique.....	47
3.5.6. Temps de demi-vie.....	48
3.5.7. Puits.....	48
3.5.8. Sources.....	48
3.5.9. Emission, transmission et déposition.....	50
3.5.10. Effets de la pollution atmosphérique.....	51
3.5.11. Les procédés de dépollution de l'air pollué.....	55
Chapitre 4 : Sol	
4.1. Structure de la terre.....	58

Table des matières

4.1.1. La croûte terrestre.....	58
4.1.2. Le manteau.....	59
4.1.3. Le noyau.....	60
4.2. Le sol.....	60
4.2.1. Définition.....	60
4.2.2. Constituants du sol.....	60
4.2.3. Propriétés du sol.....	62
4.2.4. Importance et fonctions du sol.....	67
4.2.5. Pollution du sol.....	68

Références bibliographiques



Chapitre 1
Généralités
Concepts et définitions



Chapitre 1

Généralités : concepts et définitions



1.1. Ecologie :

C'est le biologiste allemand Ernst Haeckel (1834 – 1919) qui, en 1866, a proposé le terme d'« **écologie** » pour désigner une nouvelle science des relations des organismes avec leur environnement. L'écologie ne constitue qu'une partie de l'ensemble très vaste des sciences de l'environnement et n'en représente, en fait, que la part biologique.

C'est un terme provenant du grec "Oikos" et qui signifie maison (sciences de l'habitat) et logos qui signifie discours, science qui étudie les conditions d'existence des êtres vivants (animaux et végétaux) en fonction du milieu naturel où ils vivent.

Elle examine les interactions entre les organismes individuels, les populations, les communautés et les écosystèmes, ainsi que les processus écologiques qui régissent ces interactions. **L'objectif ultime** de l'écologie est de comprendre le fonctionnement des écosystèmes et d'aider à préserver et gérer durablement les ressources naturelles pour le bien-être des êtres vivants et de la planète dans son ensemble.

1.2. Système :

Un système (du grec systema, ensemble constitué de plusieurs parties regroupées et combinées) est un groupement comportant des parties, qui sont en interaction les unes avec les autres.

Par rapport à l'être vivant, on utilise souvent une autre notion : l'**écosystème** (système écologique). Il faut entendre par là une **unité naturelle** partiellement biologique et physico-chimique plus ou moins bien délimité au sein de l'ensemble des organismes et de leur espace de vie. Elle est composée de deux éléments en interaction constante :

1.2.1. Le biotope: Le milieu physique (sol, eau, air, climat) avec ses propriétés physico-chimiques.

1.2.2. La biocénose: L'ensemble des êtres vivants (plantes, animaux, micro-organismes) qui peuplent ce milieu.

Exemples:

Une forêt, un étang, un récif corallien et une prairie sont des types d'écosystèmes ou de biomes, qui se distinguent par leur environnement et les organismes qui y vivent. Les forêts et les prairies sont des écosystèmes terrestres, tandis que l'étang est un écosystème d'eau douce. Le récif corallien est un écosystème marin d'une grande biodiversité (**Fig. 1.1**).



Figure 1.1 : (A) Une forêt, (B) une prairie, (C) un récif corallien et (D) un étang.

Dans un écosystème, le biotope conditionne la biocénose, et la biocénose modifie le biotope (ex: les arbres influencent l'humidité et la composition du sol).

1.3. Environnement:

L'environnement définit l'ensemble des éléments naturels, physiques, chimiques, biologiques et sociaux qui entourent un organisme vivant ou une communauté. Il englobe l'ensemble des conditions et des influences externes qui attirent les êtres vivants, y compris les humains, ainsi que les interactions complexes entre ces éléments.

Les actions exercées sur les êtres vivants peuvent être réparties selon différents points de vue, par exemple :

- Influences dues à des facteurs abiotiques (sans vie telles que l'air, l'eau, le sol, le climat, la géologie) ou biotiques comprenant les organismes vivants, telles que les plantes, les animaux, les micro-organismes et les communautés écologiques.
- Influences naturelles ou anthropogéniques (Homme).
- Influences climatiques, chimiques, mécanique.

Souvent, on parle de **biosphère** (du grec bios, vie ; du latin sphaira, sphère, globe terrestre) à la place de l'environnement et on pense alors à l'ensemble des zones de la terre

peuplées par des organismes vivants, êtres humains, animaux, plantes, microorganismes, c'est-à-dire l'atmosphère jusqu'à environ 25 km d'altitude, les mers jusqu'à 10 km de profondeur et la croûte terrestre jusqu'à environ 3 km de profondeur. Mais quelles que soient les limites prises en compte, l'environnement est de toute façon un système complexe, dans lequel **le sol, l'eau, l'air, le monde des animaux et des plantes**, ainsi que **le climat** en sont les composants majeurs (**Fig. 1.2**).

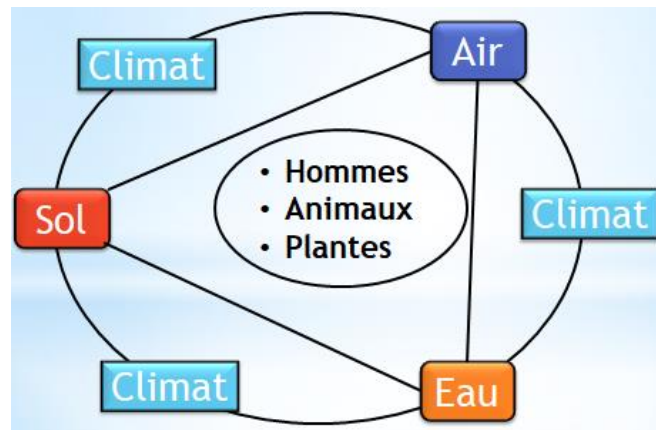


Figure 1.2 : Composants majeurs de l'environnement.

Les quatre sphères environnementales sont : l'hydrosphère (eau), l'atmosphère (air), la lithosphère (sol) et la biosphère (**Fig. 1.3**).

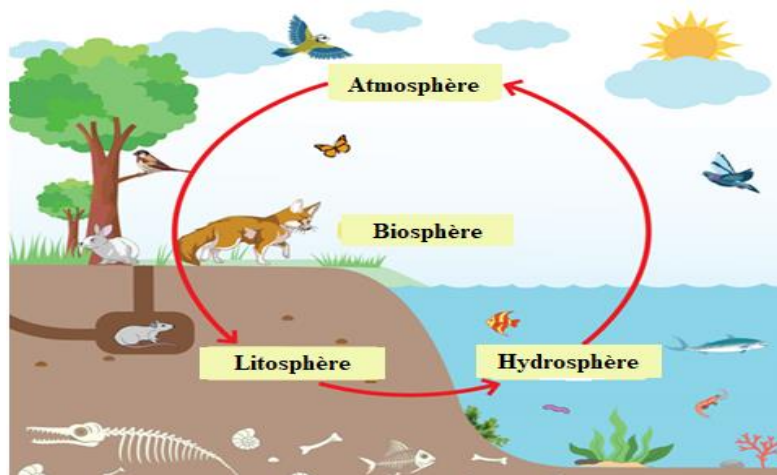


Figure 1.3 : Les quatre sphères environnementales.

1.3.1. L'atmosphère :

Est l'enveloppe gazeuse qui entoure la terre. Elle nous protège des rayons UV du soleil, régule la température de la planète (effet de serre), permet la respiration des êtres vivants et est le siège de la météo et du climat.

1.3.2. L'hydrosphère:

Est l'ensemble des réservoirs d'eau sur terre, sous toutes ses formes, tels que les océans, les mers, les lacs, les rivières, les glaciers (cryosphère), les eaux souterraines et la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Elle est essentielle à toute forme de vie, régule le climat, participe au cycle des nutriments et est le milieu de vie de nombreux écosystèmes.

1.3.3. La lithosphère (ou géosphère) :

Est la partie solide et rigide de la terre. Sa composition est la croûte terrestre et la partie supérieure du manteau. Elle comprend les roches, les minéraux, les sols (pédosphère), les montagnes et les fonds océaniques. Elle fournit les supports et les nutriments pour la vie végétale, les ressources minérales et énergétiques, et constitue la base physique des écosystèmes terrestres.

1.3.4. La biosphère :

Est l'ensemble des êtres vivants et des écosystèmes de la planète. Elle concerne tous les organismes : plantes, animaux, champignons, bactéries, etc., ainsi que les milieux qu'ils habitent (forêts, océans, etc.). Elle interagit avec les trois autres sphères pour créer et maintenir les conditions propices à la vie. Elle joue un rôle clé dans les cycles biogéochimiques (comme le cycle du carbone et de l'oxygène).

1.4. Interdépendance :

C'est le principe selon lequel tous les éléments d'un écosystème (vivants et non-vivants) sont liés et dépendent les uns des autres pour leur survie et leur équilibre. C'est le "moteur" de l'écosystème.

1.5. Chimie de l'environnement:

La chimie de l'environnement constitue une jeune discipline au sein de la chimie, c'est la science qui décrit les phénomènes chimiques de l'environnement. Elle étudie les sources, les réactions, le transport et les effets des espèces chimiques naturelles ou synthétiques dans l'air, l'eau et le sol. Elle étudie également l'influence de l'activité humaine sur l'ensemble de l'environnement. Au cœur de la chimie de l'environnement, on trouve donc les propriétés des composés, leur répartition dans l'environnement et les connaissances qu'on peut en déduire sur les processus complexes se situant entre origines et effets.

1.6. L'homme et l'environnement:

À l'origine, l'homme est un organisme vivant comme un autre, dépendant intégralement de son écosystème pour :

Sa subsistance: air, eau, nourriture.

Son bien-être: paysages, climat, ressources pour se loger et se vêtir.

Sa santé: de nombreux médicaments sont dérivés de plantes et d'organismes naturels.

Cette dépendance rappelle que l'homme n'est pas extérieur à la nature, mais en fait pleinement partie.

Il influence son environnement et réciproquement : l'homme utilise l'environnement et le transforme à travers l'économie, la technique, etc. ; ainsi il crée son espace vital et assure des besoins (**Fig. 1.4**).

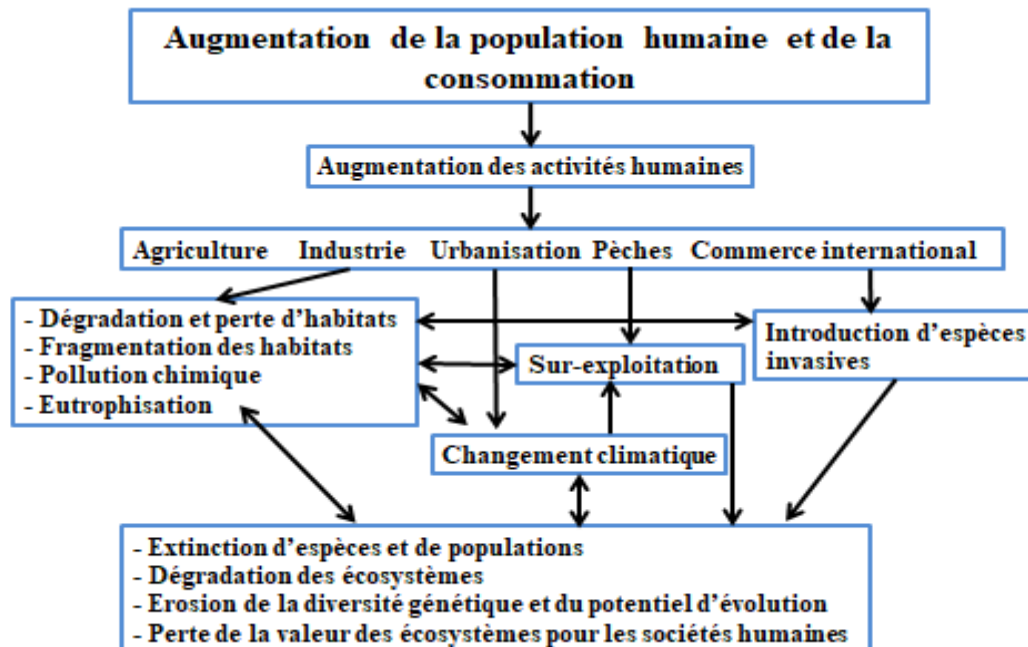


Figure 1. 4: Interactions entre l'homme et l'environnement.

En aménageant le territoire, l'homme modifie son environnement naturel : il détruit parfois des milieux de vie. L'action de l'homme sur son environnement est si profonde et multiforme qu'elle définit une nouvelle ère géologique : l'**Anthropocène**. Comment l'homme peut agir sur son environnement ?

1.6.1. La transformation des terres et des paysages:

C'est l'impact le plus visible et direct.

1.6.1.1. L'urbanisation et l'artificialisation des sols:

- **Comment?**

Construction de villes, de routes, de zones commerciales, de parkings. Ces surfaces imperméabilisées empêchent l'infiltration de l'eau, modifient le ruissellement et créent des "îlots de chaleur".

- **Conséquences:**

Perte d'habitats pour la faune et la flore, augmentation des risques d'inondation, fragmentation des écosystèmes qui ne peuvent plus fonctionner normalement.

1.6.1.2. L'agriculture intensive:

- **Comment ?**

Défrichement de vastes zones (déforestation), labour profond, monoculture, irrigation massive, drainage des zones humides.

- **Conséquences:**

- ✓ Érosion des sols : Les sols à nu sont emportés par le vent et la pluie.
- ✓ Appauvrissement et salinisation : Perte de fertilité et accumulation de sels due à une irrigation inadaptée.
- ✓ Pollution des nappes phréatiques : Par les engrais (nitrates) et les pesticides.

1.6.1.3. La déforestation :

- **Comment ?**

Coupe rase pour l'agriculture (soja, élevage bovin), l'exploitation du bois ou les plantations de palmiers à huile.

- **Conséquences:**

- ✓ Perte de biodiversité : Les forêts tropicales abritent une immense partie des espèces terrestres.
- ✓ Perturbation du cycle de l'eau : Les arbres contribuent à l'évapotranspiration qui forme les pluies.
- ✓ Aggravation du changement climatique : Les arbres absorbent du CO₂ ; leur destruction relâche ce CO₂ et réduit la capacité de la planète à l'absorber.

1.6.2. L'exploitation et l'épuisement des ressources:

L'homme puise dans les réserves naturelles plus vite qu'elles ne se renouvellent.

1.6.2.1. Les ressources en eau douce:

- **Comment ?**

Pompage intensif dans les nappes phréatiques pour l'agriculture, l'industrie et la consommation domestique. Construction de barrages qui modifient le débit des fleuves.

- **Conséquences:**

Assèchement de rivières et de lacs (ex: la mer d'Aral), affaissement des sols (subsidence), conflits d'usage pour l'eau (les demandes en eau dépassent les ressources disponibles).

1.6.2.2. Les ressources halieutiques:

- **Comment ?**

Surpêche par des techniques industrielles (chalutage de fond) qui ne laissent pas le temps aux populations de poissons de se reconstituer.

- **Conséquences :**

Effondrement des stocks de poissons, destruction des fonds marins, perturbation des chaînes alimentaires océaniques.

1.6.2.3. Les ressources minières et énergétiques fossiles:

- **Comment ?**

Extraction du charbon, du pétrole et du gaz par des mines à ciel ouvert, forages en mer, fracturation hydraulique (**la fracturation hydraulique** est une technique qui consiste à injecter un fluide à haute pression dans des roches profondes et peu perméables (comme le schiste) pour les fissurer (les fracturer) et ainsi libérer le gaz ou le pétrole qui y est piégé).

- **Conséquences :**

Destruction des paysages, pollution des sols et des eaux, émissions massives de gaz à effet de serre lors de la combustion.

1.6.3. La pollution : Altérer la qualité des milieux

L'homme rejette des substances nocives dans tous les compartiments de l'environnement.

1.6.3.1. La pollution de l'air :

- **Comment ?**

Émissions des industries, des centrales électriques et des véhicules (particules fines, oxydes d'azote, dioxyde de soufre). Émissions agricoles (ammoniac).

- **Conséquences :**

Pluies acides, smog urbain, problèmes respiratoires et cardiovasculaires chez les humains, changement climatique dû aux gaz à effet de serre (CO₂, méthane).

1.6.3.2. La pollution de l'eau :

- **Comment ?**

Rejets industriels (métaux lourds, solvants), rejets agricoles (nitrates, phosphates, pesticides), eaux usées domestiques, déversements de pétrole.

- **Conséquences :**

Eutrophisation (prolifération d'algues qui étouffent la vie aquatique), contamination de l'eau potable, mort de la faune et de la flore aquatiques.

1.6.3.3. La pollution des sols :

- **Comment ?**

Utilisation de pesticides et d'engrais de synthèse, infiltration de polluants de l'air et de l'eau, accumulation de déchets (décharges).

- **Conséquences :**

Stérilisation des sols, contamination de la chaîne alimentaire, perte de biodiversité souterraine (vers de terre, micro-organismes).

1.6.3.4. La pollution par les déchets :

- **Comment ?**

Production de déchets ménagers, industriels et électroniques. Rejet massif de plastiques dans l'environnement, notamment dans les océans.

- **Conséquences :**

"Continents" de plastique dans les océans, ingestion par les animaux marins qui en meurent, fragmentation en microplastiques qui contaminent toute la chaîne alimentaire.

1.6.4. Les modifications biologiques directes :

L'homme agit directement sur le vivant.

1.6.4.1. Introduction d'espèces invasives :

- **Comment ?**

Transport volontaire ou accidentel d'espèces hors de leur habitat naturel (ex: rat, chat, moustique-tigre, plante jacinthe d'eau).

- **Conséquences :**

Ces espèces, sans prédateurs naturels, prolifèrent et entrent en compétition avec les espèces locales, menaçant leur survie et déséquilibrant les écosystèmes.

1.6.4.2. La génétique et l'agriculture :

- **Comment ?**

Sélection génétique des plantes cultivées et des animaux d'élevage pour le rendement.

- **Conséquences :**

Appauvrissement de la diversité génétique (perte des variétés anciennes), rendant les cultures plus vulnérables aux maladies et aux changements climatiques.

1.6.4.3. La chasse et le braconnage :

- **Comment ?**

Surexploitation d'espèces sauvages au-delà de leur capacité de renouvellement.

- **Conséquences :**

Disparition d'espèces emblématiques (comme le dodo, le tigre de Tasmanie) et menace d'extinction pour beaucoup d'autres (éléphants, rhinocéros).

1.6.5. L'impact global et indirect : Le changement climatique

C'est la conséquence ultime et synergique de nombreuses actions précédentes.

- **Comment ?**

Les émissions massives de Gaz à Effet de Serre (GES) dues à la combustion des énergies fossiles, à la déforestation et à l'agriculture intensive modifient la composition de l'atmosphère.

- **Conséquences:**

- ✓ Réchauffement planétaire avec fonte des glaciers et des calottes polaires.
- ✓ Montée du niveau des mers, menaçant les populations côtières.
- ✓ Modification du régime des précipitations, entraînant sécheresses et inondations plus intenses.
- ✓ Acidification des océans due à l'absorption du CO₂, menaçant les organismes à coquille (coraux, plancton).

1.6.6. Des actions favorables :

1.6.6.1. La création de stations d'épuration :

Face aux dommages environnementaux causés par le rejet des déchets dans la nature, l'homme a construit des stations d'épuration pour traiter les eaux usées après leur utilisation.

Le traitement des eaux usées suit plusieurs étapes : les déchets solides sont d'abord éliminés par dégrillage (pour les matières les plus grossières), dessablage (pour les particules lourdes) et déshuilage (pour les matières légères). Ensuite, la pollution organique dissoute est éliminée grâce à l'action de bactéries spécialisées qui digèrent ces substances et les transforment en boues. Ces boues sont ensuite récupérées dans un décanteur pour être valorisées. Ce processus permet finalement de restituer à l'environnement une eau épurée.

1.6.6.2. Le recyclage des déchets solides :

Face aux enjeux environnementaux, la loi encadre strictement l'élimination des déchets dangereux pour les écosystèmes (sol, air, eau, faune et flore). Les déchets triés sont ainsi orientés vers des filières spécialisées où ils sont soit valorisés, soit traités de manière appropriée.

Le recyclage des déchets représente une double opportunité : il permet à la fois des économies substantielles de matières premières et une contribution active à la protection de l'environnement. Illustrons cette démarche par deux exemples concrets :

- ✓ Les batteries automobiles fournissent aujourd'hui près de la moitié du plomb recyclé.
- ✓ Les résidus agricoles issus de l'élagage et de l'entretien des espaces verts, qui représentent un volume considérable, sont transformés par broyage en compost naturel, utilisable comme fertilisant agricole.

1.6.6.3. La création de réserves naturelles :

Les forêts ont subi d'importantes modifications dues à l'action de l'homme. C'est pourquoi ont été créées des réserves naturelles. Ces territoires délimités sont réglementés en vue de la sauvegarde de l'ensemble des espèces animales et végétales qui y vivent. La chasse y est, bien sûr, interdite.

1.7. Impact et pollution de l'environnement :

1.7.1. Impact :

On entend par impact environnemental, l'ensemble de tous les facteurs qui perturbent l'environnement. De telles perturbations environnementales ont lieu, quand l'environnement naturel (l'état normal) est influencé par des interventions :

1.7.1.1. Physiques : comme le rayonnement (magnétique, énergétique...), la chaleur et le bruit.

1.7.1.2. Chimiques: comme les substances chimiques médicaments, pesticides, engrais, combustion....

1.7.1.3. Biologiques: comme la modification génétique (Organismes Génétiquement Modifiés OGM...).

1.7.1.4. Technologiques: comme les constructions (digue, barrage hydroélectriques...), l'extraction massive de matières premières (minéral, pétrole, gaz...) et transport.

1.7.2. Pollution :

La pollution peut être définie comme l'introduction de toute substance sous forme solide, liquide, gazeuse ou énergétique (son, chaleur ou radioactivité) dans l'environnement à un rythme plus rapide qu'elle ne peut être dispersée, diluée, décomposée, recyclée ou stockée sous une forme inoffensive. L'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) définit la pollution comme le rejet de substances et de chaleur dans des milieux environnementaux (air, eau ou terre) dont la nature, l'emplacement ou la quantité produisent des substances indésirables.

1.7.2.1. Causes actuelles de pollution :

- Pollution liée à la production et à l'utilisation d'énergie.
- Pollution d'origine industrielle.
- Les déchets solides.
- Pollutions d'origine agricole.

1.7.2.2. Classification des pollutions :

Les polluants appartenant à des classes différentes peuvent avoir des effets voisins. Il existe 3 grands groupes de polluants :

A. Les polluants de nature physique :

- La chaleur
- Pollution radioactive
- Le bruit
- La pollution lumineuse

B. Les polluants de nature chimique :

- Les hydrocarbures liquides
- Les détersifs et tensioactifs
- Les plastifiants
- Les phtalates
- Les pesticides

- Les matières eutrophisantes
- Les métaux lourds
- Les médicaments et cosmétiques

C. Les polluants de nature biologique :

- Toxines algales,
- Les germes pathogènes
- Les parasites.

1.8. Les substances présentes dans l'environnement :

1.8.1. Notions de base :

On définit les substances comme les éléments chimiques et leurs composés, qu'ils soient à l'état naturel ou obtenus par un procédé de production. Cette définition inclut les additifs nécessaires à la stabilité du produit, ainsi que les impuretés issues de la fabrication, mais exclut les solvants qui peuvent être séparés sans altérer la stabilité ou la composition de la substance. Les préparations, quant à elles, désignent des mélanges ou solutions constitués d'au moins deux substances.

Dans le domaine de l'environnement, les termes « substance » et « composé » sont souvent considérés comme synonymes. On parle ainsi indifféremment de substances ou de composés acceptables pour l'environnement. La notion de substance chimique englobe, elle, l'ensemble des composés issus de procédés chimiques, qu'ils aient été élaborés en laboratoire ou dans l'industrie.

Les pollutions environnementales peuvent être classées en trois catégories :

La pollution liée à la consommation de l'espace vital ;

La pollution physique ;

La pollution causée par des substances (**Fig. 1.5**).

Ces différentes formes de pollution peuvent se superposer et interagir partiellement.

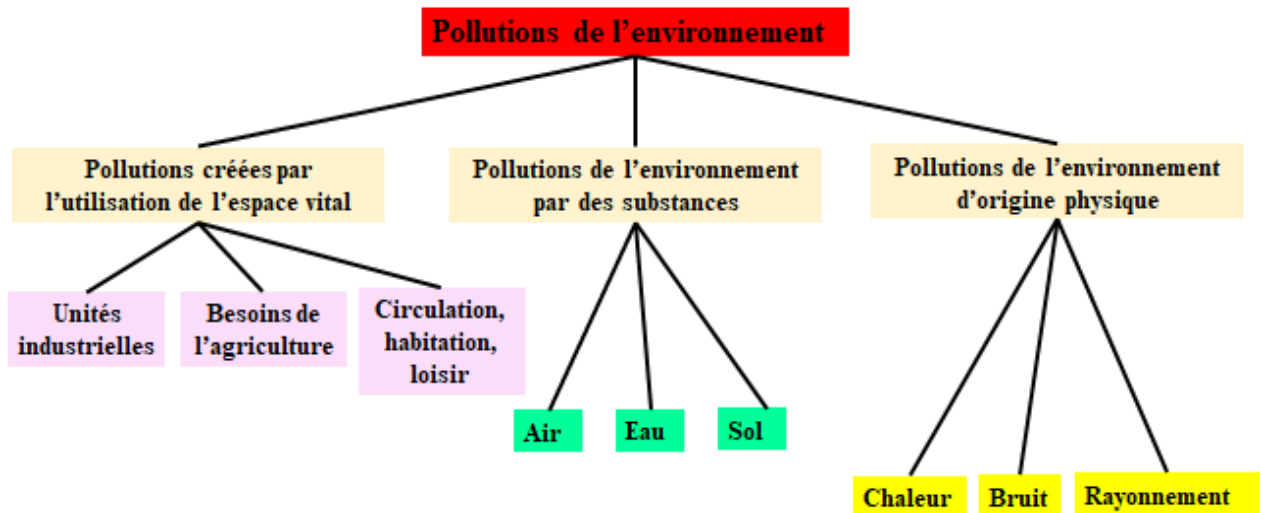


Figure 1. 5 : Systématique des pollutions de l'environnement.

L'impact d'une substance sur l'environnement dépend de plusieurs facteurs : sa quantité, les voies par lesquelles elle pénètre dans les différents milieux (air, eau, sol), et ses interactions avec les êtres vivants (humains, animaux, plantes, micro-organismes). Pour exercer cet impact, les substances doivent en effet se répartir entre ces milieux avant d'entrer en contact avec les organismes.

Le transfert des composés d'un compartiment environnemental à un autre s'effectue par divers processus physico-chimiques, tels que les précipitations, la dissolution, la vaporisation, l'adsorption et la désorption (Fig. 1.6).

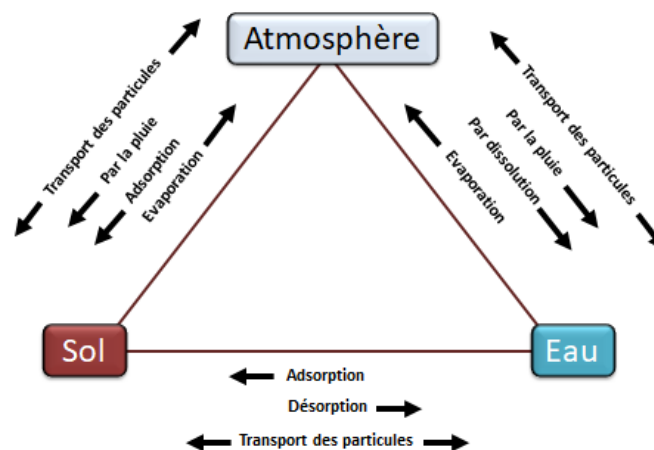


Figure 1.6 : Modèle simple concernant la répartition de substances entre les trois compartiments de l'environnement.

1.8.2. Propriétés physiques et chimiques :

1.8.2.1. Importance pour l'environnement :

Les propriétés physico-chimiques d'un composé permettent d'évaluer sa capacité à exercer un impact négatif sur l'environnement. Parmi celles-ci, la distribution de la substance entre les différents compartiments, air, eau, sol et êtres vivants, revêt une importance particulière, car elle conditionne directement sa nocivité potentielle. Cette distribution est déterminée à la fois par des paramètres intrinsèques au composé, tels que **sa solubilité** dans l'eau ou **sa pression de vapeur**, et par des caractéristiques des milieux environnants, comme **la température** ou **la structure du sol**.

1.8.2.2. Température, pression de vapeur :

La température et pression de vapeur parmi les propriétés physiques d'un composé, plusieurs paramètres thermiques sont déterminants pour évaluer son comportement dans l'environnement. Le premier d'entre eux est la température de fusion ou l'intervalle de fusion, remplacée dans certains cas par la température de ramollissement. D'autres grandeurs importantes sont également prises en compte, telles que : la température de congélation, la température d'ébullition, le domaine d'ébullition, le point d'ébullition initial et la température de sublimation.

La pression de vapeur est un autre paramètre essentiel, qui renseigne sur la mobilité d'une substance. Elle correspond à la pression exercée par la phase gazeuse en équilibre (état saturé) avec un solide ou un liquide. Elle reflète la tendance d'un composé à passer à l'état gazeux : plus la pression de vapeur est élevée, plus l'évaporation est rapide.

1.8.2.3. Solubilité, répartition :

La solubilité des substances, notamment dans l'eau et les matières grasses, joue un rôle essentiel dans leur mobilité environnementale.

On définit la solubilité dans l'eau (S) comme la concentration maximale d'une substance pouvant être dissoute dans l'eau distillée, à une température donnée. Elle s'exprime généralement en kg/m^3 , g/L, mg/kg ou $\mu\text{g/kg}$. Une autre grandeur importante est la constante de Henry (K_H), qui décrit la solubilité physique d'un gaz dans l'eau. Elle régit la relation :

$$C(X) = k_H \cdot p(X)$$

où $C(X)$ est la concentration du gaz X dans l'eau (en mol/L) et $p(X)$ sa pression partielle (en bar). Plus la constante de Henry est faible, plus le gaz est volatil. Ainsi, les gaz dont et qui n'interagissent pas chimiquement avec l'eau sont généralement très volatils. On les retrouve

donc en faible concentration dans les eaux de surface, car ils tendent à se disperser rapidement dans l'atmosphère.

1.8.2.4. Point d'éclair :

Le point d'éclair est une propriété physico-chimique essentielle pour évaluer le risque lié aux substances inflammables ou explosibles. Il correspond à la température la plus basse à laquelle un liquide émet suffisamment de vapeurs pour former, au contact de l'air, un mélange inflammable pouvant s'enflammer sous l'effet d'une source externe, telle qu'une flamme ou une étincelle. Ce paramètre est largement utilisé dans la réglementation relative au stockage et au transport des matières dangereuses.

1.8.3. Transport, dispersion :

Le transport environnemental des substances, également appelé dispersion ou mobilité, désigne leur déplacement depuis leur lieu d'émission initial vers d'autres compartiments de l'environnement. Ce processus conditionne leur propagation et leur impact potentiel. Les substances sont introduites soit de manière localisée (rejets industriels dans l'air ou eaux usées), soit de façon diffuse (émissions multiples comme les terpènes émis par les arbres ou le plomb issu des véhicules). Leur dispersion dépend essentiellement de leurs propriétés physico-chimiques, pression de vapeur, solubilité, points de changement d'état et de leur stabilité chimique. Les composés stables persistent suffisamment longtemps pour se propager largement, contrairement aux substances à durée de vie courte. Les principaux vecteurs de transport sont l'atmosphère et le cycle hydrologique (eaux de surface et souterraines), auxquels s'ajoutent le rôle des organismes vivants et des activités humaines. À l'inverse, le sol constitue un milieu peu propice au transport, agissant plutôt comme un réservoir.

1.8.4. Persistance :

La persistance désigne la capacité d'une substance à subsister dans l'environnement sans être dégradée par des processus naturels. Initialement appliquée aux pesticides, cette notion concerne particulièrement les composés organiques, bien que les substances inorganiques comme les sels de métaux lourds soient naturellement persistantes. On distingue une persistance volontaire, essentielle pour certaines applications (comme la longévité des peintures ou la stabilité des tensioactifs durant leur stockage), d'une persistance non souhaitée, lorsque la substance persiste au-delà de son utilité, comme dans le cas du DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane). Certains produits de dégradation, tels que le DDE

(dichlorodiphényldichloroéthène) issu du DDT, peuvent s'avérer plus toxiques et persistants que le composé initial, créant ainsi une persistance secondaire ou tertiaire. Cette distinction est fondamentale pour évaluer l'impact environnemental des substances et concevoir des composés à durée de vie contrôlée.

1.8.5. Décomposition :

La décomposition environnementale désigne la transformation des substances en composés plus simples par des processus biologiques, chimiques ou physiques. S'opposant directement à la notion de persistance, elle peut survenir via deux voies principales : la décomposition biologique, réalisée par des microorganismes et leurs enzymes lors de leur métabolisme, et la décomposition non biologique, incluant l'hydrolyse et diverses oxydations (avec O_2 , ozone ou radicaux $OH\cdot$). Lorsque la décomposition est complète et conduit à des composés inorganiques simples comme CO_2 , H_2O , NH_4^+ , NO_3^- , H_2S , PO_4^{3-} , on parle de minéralisation. La vitesse et les produits de décomposition dépendent de multiples facteurs : nature du composé, milieu environnemental, type d'énergie disponible (rayonnement UV, chaleur) et partenaires réactionnels. Ces mécanismes de décomposition jouent un rôle essentiel en agissant comme "puits" naturels pour de nombreuses substances dans l'environnement.

1.8.6. Accumulation :

L'accumulation environnementale désigne le processus par lequel des substances, qu'elles soient naturelles ou anthropiques, se concentrent dans certains compartiments de l'écosystème à des niveaux supérieurs à ceux de leur environnement immédiat ou de la nourriture. Ce phénomène survient lorsque les organismes, dépourvus de mécanismes d'élimination efficaces, absorbent et retiennent ces substances jusqu'à atteindre un état de saturation, un équilibre dynamique où absorption et désorption s'équilibrent. Le temps nécessaire pour atteindre cet équilibre varie considérablement, de quelques heures à plusieurs années, selon la substance et l'organisme concerné. On distingue principalement l'accumulation biologique (dans les organismes vivants) et géologique (dans les sols ou sédiments), auxquelles s'ajoute l'accumulation atmosphérique où les substances se fixent sur les poussières. À l'inverse, lorsque la concentration diminue dans un compartiment, on parle d'appauvrissement.

1.8.7. Durée de vie des substances :

Les différentes substances ont des durées de vie dans la biosphère qui sont extrêmement variables.

1.8.7.1. Les polluants primaires: sont directement émis par des sources de pollution : CH₄ : année, CO : mois, SO₂ : jours à mois, Ozone : quelques jours, COV: heures à jours, Aérosols : 1-10 µm : minute à jours, Aérosols : 1µm jours à semaines.

1.8.7.2. Les polluants secondaires : ne sont pas émis, mais qui résultent de la transformation physico-chimique des polluants primaires au cours de leur séjour dans l'atmosphère.

1.8.8. Ecotoxicologie :

L'écotoxicologie, qui est la science de la distribution des substances chimiques et de leurs effets sur les écosystèmes, dans le cas où il y a des dommages créés de façon directe ou indirecte. Elle étudie la nature et les mécanismes des effets nocifs (toxiques) des substances sur les êtres vivants.



Chapitre 2

Eau





Chapitre 2

Eau



2.1. Les ressources en eaux :

L'hydrosphère (du grec hydro : eau ; sphaira : boule, globe) est l'enveloppe aqueuse de la terre. La réserve totale d'eau sur terre est de 1409.10^6 km^3 . Sur la terre, l'eau existe dans les trois états : liquide, solide et gazeux, ce qui est dû aux conditions particulières de température et de pression qui règnent à sa surface. Elle recouvre 70 % de la surface de la terre. Sur le volume d'eau présent sur terre: Cependant, 97,5 % de cette quantité se trouve sous forme d'eau salée et 2,5 % sous forme d'eau douce, soit environ 35 millions de km^3 . 69,5 % de l'eau douce se présente sous forme de glace et de neige permanente, 30,1 % sous forme d'eau souterraine, 0,27 % sous forme d'eau dans les lacs et rivières, 0,13 % sous une autre forme (atmosphère, humidité dans le sol, marais, etc.). La plus petite quantité d'eau se trouve dans l'atmosphère essentiellement dans la basse troposphère ; il s'agit d'une petite quantité d'eau sous forme gazeuse mais ayant une fonction importante vis-à-vis du cycle de l'eau. La **Figure 2.1** ci-après récapitule cette répartition.

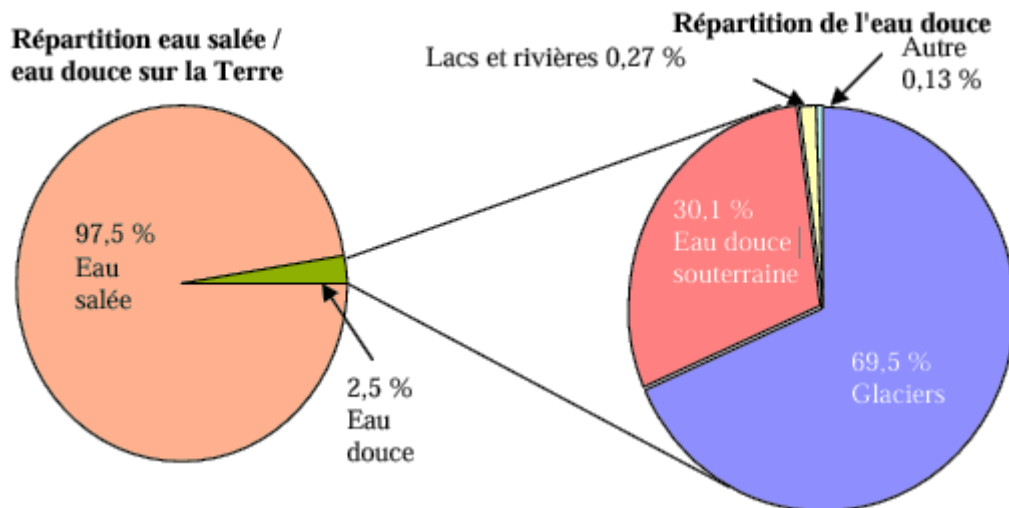


Figure 2.1 : Répartition eau salée/eau douce sur terre.

Dans le **Tableau 2.1**, sont reportées les valeurs des volumes d'eau et leur répartition par rapport aux différents réservoirs.

Tableau 2.1 : La réserve en eau de la terre.

Domaine de l'hydrosphère	Volume de l'eau (en 10^6 km^3)
Les mers	1370
La glace et la neige (pôle entre autre)	29
Les nappes phréatiques	9,5
Eaux de surface (lacs et fleuves)	0,13
Atmosphères	0,013
Biosphère	0,0006

2.2. Importance de l'eau :

L'eau revêt de nombreux aspects importants dans la vie des hommes.

- ✓ Elle est nécessaire à la vie et constitue un moyen de nettoyage. Dans l'industrie l'eau a de multiples fonctions, par exemple celle de fluide de refroidissement et de substance primaire (dans le domaine de la production) ou de solvant et de milieu réactionnel (par exemple dans l'industrie chimique).
- ✓ L'eau est utilisée comme moyen d'alimentation et d'évacuation (par exemple des substances polluantes sont transportées jusqu'à la mer par les cours d'eau), ainsi que pour la circulation et le transport.
- ✓ L'eau exerce une influence fondamentale sur le climat : c'est un régulateur de chaleur important pour l'atmosphère, car elle absorbe le rayonnement provenant du sol (terrestre).

2.3. Les eaux naturelles :

Les **eaux naturelles** sont toutes les eaux présentes dans l'environnement qui n'ont pas été modifiées de manière significative par les activités humaines. Elles se distinguent des eaux "artificielles" ou "traitées" comme l'eau du robinet ou l'eau purifiée industriellement.

Les eaux naturelles sont constituées des eaux souterraines (infiltrations, nappes), des eaux de surface retenues ou écoulement (barrage, lacs, rivières) et des eaux de mer.

2.3.1. Eaux souterraines :

De point de vue hydrogéologique les couches aquifères se divisent en :

2.3.1.1. Nappes phréatiques ou alluviales : Peu profondes et alimentées directement par les précipitations pluvieuses ou les écoulements d'eau en dessus.

2.3.1.2. Nappes captives : Plus profondes que les premières et séparées de la surface par une couche imperméable, l'alimentation de ces nappes est assurée par l'infiltration sur leurs bordures (**Fig. 2.2**).

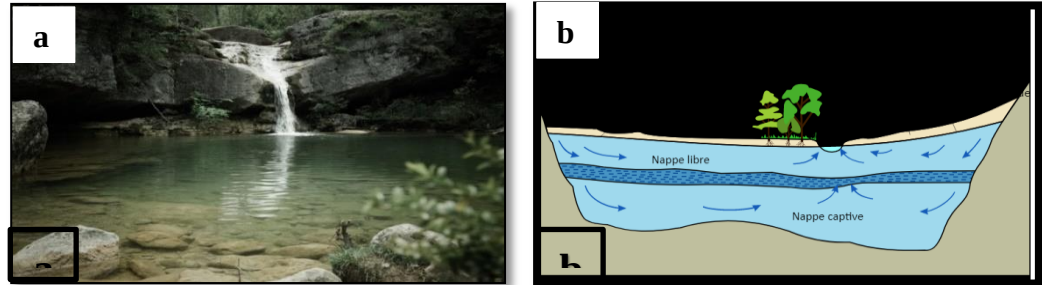


Figure 2.2 : Les eaux souterraines : a) nappes phréatique ; b) nappes captive.

La nature du terrain sous lequel se trouvent ces eaux est un déterminant de leurs compositions chimiques, cependant elles sont appelées aussi les eaux propres car ils répondent en général aux normes de potabilité. Pourtant, ces eaux sont moins sensibles aux pollutions accidentelles, elles perdent totalement leur pureté originale dans le cas de contamination par des polluants.

Quand une eau souterraine contient une concentration en certains minéraux dépassant les normes de potabilité, mais elle représente des propriétés thérapeutiques on la distribue en bouteilles avec parfois un traitement bien défini, ces eaux sont dites **eaux minérales**.

2.3.2. Eaux de surface :

Ce type des eaux englobe toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents (rivières, lacs, étangs, barrages,...). La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par ces eaux durant leurs parcours dans l'ensemble des bassins versants. Ces eaux sont le siège, dans la plupart des cas, d'un développement d'une vie microbienne à cause des déchets rejetés dedans et de l'importante surface de contact avec le milieu extérieur. C'est à cause de ça que ces eaux sont rarement potables sans aucun traitement.

2.3.3. Eaux des mers et océans :

Les mers et les océans constituent des énormes réservoirs d'eau, elles représentent près de 97,5 % du volume d'eau existant actuellement sur notre planète, le reste est la part des eaux continentales (eaux souterraines et superficielles). Les eaux de mers sont caractérisées

par une grande salinité (**Tableau 2.2**), elles sont dénommées aussi « eaux saumâtres », ce qui rend leur utilisation difficile, notamment leur coût très élevé pour leur traitement.

Tableau 2.2 : Salinité des eaux de quelques océans et mers.

Mer ou Océan	Concentration (mg/l)
Mer rouge	43000
Golfe arabique	43000
Mer méditerranée	39400
Océan atlantique	36000
Océan indien	33800
Océan pacifique	33000
Mer adriatique	25000
Mer noire	13000
Mer baltique	7000

2.4. Cycle de l'eau :

Le cycle de l'eau, appelé aussi cycle hydrologique, est l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau. Ces mouvements, accompagnés de changements d'état, peuvent s'effectuer dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sous-sol.

L'eau circule sans arrêt sur la terre. Elle s'évapore des océans et y revient sous forme de pluie. Le soleil fait s'évaporer l'eau des rivières, des lacs, des mers, des océans en de fines gouttelettes. En se regroupant, elles forment des nuages qui, poussés par le vent, rencontrent des masses d'air froid et donnent naissance à la pluie. L'eau de pluie s'infiltre dans le sol et rejoint les nappes phréatiques, les sources, les rivières, les fleuves, pour recommencer sans fin le même voyage.

Dans la nature, l'eau suit toujours le même parcours en formant une sorte de boucle. C'est ce que l'on appelle le cycle naturel de l'eau (**Fig. 2.3**). Ce parcours se compose de 4 étapes principales : évaporation, condensation, précipitations, et ruissellement.

2.4.1. L'évaporation et la transpiration des végétaux :

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

d'eau qui s'élève dans l'atmosphère sous la forme de nuages. L'action du vent déplace les nuages au-dessus des terres. Cela va donner lieu aux étapes suivantes :

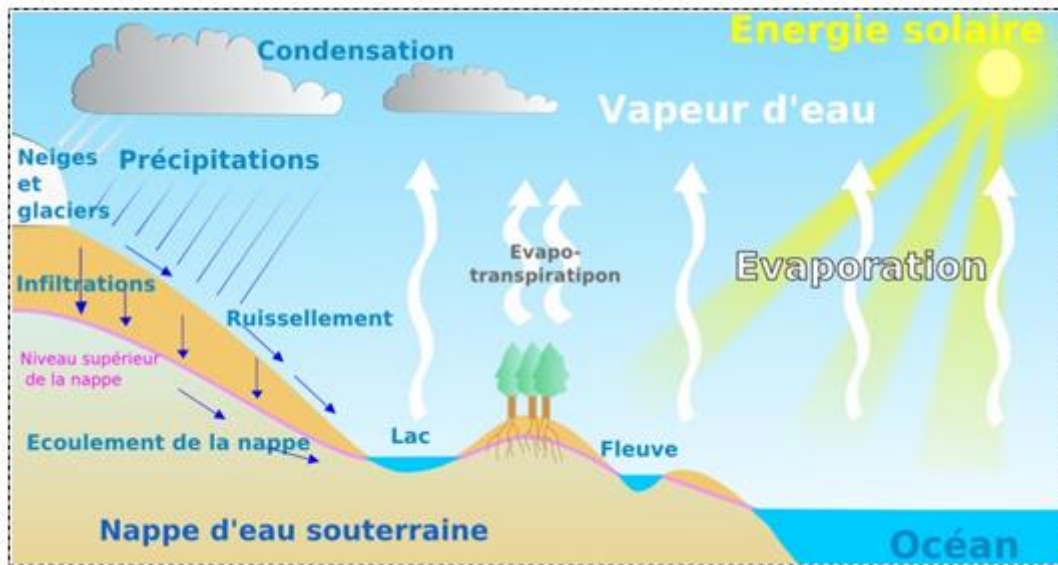


Figure 2.3 : Cycle de l'eau.

2.4.2. La condensation :

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

2.4.3. Les précipitations :

Transportés par la circulation atmosphérique, les nuages se déplacent et, sous l'effet de la gravité, l'eau retombe sur le sol sous forme de pluie, de neige ou de grêle (à l'état liquide ou solide).

2.4.4. Le ruissellement ou l'infiltration :

L'eau qui n'est pas absorbée par le sol, ruisselle le long des pentes jusqu'à se déverser dans les rivières, les fleuves et les lacs. Elle sera ensuite transportée jusqu'aux mers et océans, ce sont les « cours d'eau de drainage ». L'eau de pluie s'écoule lorsqu'elle rencontre un sol imperméable et pénètre dans les sols perméables. En s'infiltrant dans un sol perméable, l'eau peut parfois remplir une poche souterraine (grotte) et former un véritable réservoir d'eau. L'eau contenue dans ce réservoir (nappe d'eau ou nappe phréatique) trouve parfois un chemin naturel vers l'extérieur

2.5. Compositions chimique de l'eau :

À l'état naturel, la composition chimique d'une eau est entièrement dictée par les milieux qu'elle traverse (atmosphère, biosphère, sols et roches). Cette composition évolue radicalement tout au long de son cycle. Ainsi, les précipitations, très faiblement minéralisées (de l'ordre du $\mu\text{g/L}$ à mg/L), contiennent principalement des ions sodium (Na^+), chlorure (Cl^-) et sulfate (SO_4^{2-}). En revanche, après interaction avec les sols et les roches, les eaux continentales (rivières et nappes souterraines) voient leur minéralisation s'élever notablement (de 10 à 10^2 mg/L) et leur composition devenir dominée par les ions calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}) et bicarbonate (HCO_3^-).

Les eaux d'origine fluviale, une fois déversées dans les océans, voient leur concentration augmenter par évaporation. La teneur en sels dissous des océans atteint 35 g/L et leur composition est chlorurée-sodique (87 % de NaCl), car les minéraux les moins solubles, comme les carbonates précipitent. Il reste alors en solution dans l'eau de mer les minéraux les plus solubles, comme le sel NaCl (**Tableau 2.3**).

Tableau 2.3 : Moyennes mondiales (mg/L) des concentrations des eaux de pluies et de rivières et des marines en éléments majeurs.

	SiO_2	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	CID	COD
Précipitations atmosphériques	0,3	0,31	0,26	1,46	0,135	2,6	1,37	0,20	1,93
Fleuves et rivières	10,4	13,5	3,6	7,4	1,35	9,6	8,7	10,2	5,37
Océans	4,24	400	1336	11500	390	19775	2784	25,1	0,94

SiO_2 : silice dissoute, Ca^{2+} : calcium, Mg^{2+} : magnésium, Na^+ : sodium, K^+ : potassium, Cl^- : chlorures, SO_4^{2-} : sulfates, CID : carbone inorganique dissous, COD : carbone organique dissous

2.6. Normes et qualité de l'eau :

2.6.1. Qualité de l'eau :

L'étude des eaux a pour objet de déterminer leurs possibilités d'utilisation. Elle comporte une analyse physico-chimique et un examen bactériologique. Grace à ces analyses, on détermine les limites d'utilisation d'une eau soit :

- à usage domestique ;

- à usage industriel (réfrigération, fabrication).

L'analyse physico-chimique de l'eau permet d'identifier les eaux susceptibles d'être agressives pour les canalisations et de déterminer les traitements de potabilisation nécessaires.

L'examen bactériologique permet de déterminer la qualité microbiologique de l'eau, notamment en vue de son emploi comme eau potable.

2.6.1.1. Les caractéristiques organoleptiques :

Les paramètres organoleptiques (couleur, saveur et odeur) constituent souvent les premiers signaux d'alerte d'une pollution pouvant présenter un risque pour la santé. Pour être de bonne qualité organoleptique, l'eau doit donc être agréable à boire : claire, fraîche et inodore.

A. Couleur : Pour l'eau potable, la couleur maximale acceptable est de 15 mg Pt/L. Cette coloration peut provenir d'impuretés minérales (comme le fer) ou de matières organiques (acides humiques ou fulviques).

B. Odeur : Une odeur anormale est un indicateur sensoriel de pollution, souvent liée à la décomposition de matières organiques ou à la présence de composés chimiques spécifiques. Ce paramètre organoleptique est particulièrement sensible, car il peut révéler la présence de certaines substances à des niveaux inférieurs aux seuils de détection des analyses standards.

C. Goût et saveur : Pour l'eau de consommation, le goût désigne l'impression sensorielle globale, qui doit être agréable. Cette impression naît notamment des saveurs fondamentales perçues par la langue (salé, sucré, acide, amer), elles-mêmes induites par les sels et les gaz dissous dans l'eau.

Turbidité :

C'est un paramètre qui varie en fonction des composés colloïdaux (argiles, débris de roche, micro-organismes,...) ou aux acides humiques (dégradation des végétaux) mais aussi pollutions qui troublent l'eau. La turbidité d'une eau est l'inverse de sa transparence ; L'eau de boisson ne doit présenter une turbidité supérieure à 5NTU (**Tableau 2.5**).

Tableau 2.5 : Classification des eaux en fonction de leur turbidité.

Turbidité (NTU)	Qualité de l'eau
< 5	Eau claire
5 < Turbidité < 30	Eau légèrement trouble
Turbidité > 50	Eau trouble
Turbidité > 200	eau de surface "Africaine"

2.6.1.2. Les caractéristiques physicochimiques :

A. Température :

La température d'une eau potable devrait être inférieure en été et supérieure en hiver à la température de l'air. L'eau potable doit être désaltérante et sa température doit situer entre 8 et 15°C.

B. pH (potentiel d'hydrogène) :

Le pH exprime l'acidité ou l'alcalinité de l'eau. Le pH est indissociable de la température, de l'oxygène dissous et de la minéralisation totale.

pH < 7 : eau acide

pH > 7 : eau alcaline

Le pH des eaux naturelles peut varier de 6,5 à 8,5 selon leur origine, la nature géologique des terrains traversés, mais aussi le niveau de pollution (**Tableau 2.4**).

Tableau 2.4 : Classification des eaux d'après leur pH

pH < 5	Acidité forte → présence d'acides minéraux ou organiques dans les eaux naturelles
pH = 7	pH neutre
7 < pH < 8	Neutralité approchée → majorité des eaux de surface
5,5 < pH < 8	Majorité des eaux souterraines
pH = 8	Alcalinité forte, évaporation intense

C. Oxygène dissous : L'oxygène dissous (OD), exprimé en mg/L, est une grandeur fondamentale pour l'écologie des milieux aquatiques, car il est essentiel à la respiration des organismes hétérotrophes. Il provient principalement des échanges avec l'atmosphère et de la photosynthèse des plantes et algues aquatiques. Sa concentration dans l'eau est limitée par sa solubilité (environ 9 mg/L à 20°C) et dépend de facteurs tels que la température, la salinité et la pression atmosphérique.

Une eau de bonne qualité présente généralement une teneur comprise entre **4 et 6 mg/L**. Lorsque cette teneur chute à un niveau critique de 1 à 2 mg/L, elle révèle une pollution organique sévère où la consommation d'oxygène par la décomposition excède les apports ; cet état critique n'est pas irréversible si la source de pollution est traitée.

En deçà de 1 mg/L, le milieu devient anoxique (anaérobie) : la vie aérobie disparaît, laissant place à des micro-organismes qui produisent des gaz comme le méthane (CH₄) ou le sulfure d'hydrogène (H₂S) lors de la décomposition de la matière organique.

D. Dioxyde de carbone dissout (ppm):

- Un surplus de dioxyde de carbone dissout dans l'eau peut augmenter l'acidité du cours d'eau en sa transformation en acide carbonique.

E. Conductivité électrique :

La conductivité est exprimée en micro-Siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$) et varie proportionnellement avec la minéralisation. La mesure de la conductivité permet d'évaluer rapidement mais très approximativement la minéralisation globale de l'eau (sels dissous dans l'eau) (**Tableau 2.6**).

Tableau 2.6 : Classification des eaux en fonction de leur conductivité électrique.

Nature de l'eau	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Eau très pure	Inférieure à 50
Eau douce peu minéralisée	100 à 200
Eau de minéralisation moyenne	250 à 500
Eau très minéralisée	1000 à 2500

F. Le taux de sels dissous (TDS):

Le TDS mesure la somme des solides dissous dans un volume donné d'eau. La mesure du TDS est généralement exprimée en parties par million (ppm), indiquant le nombre de particules dissoutes présentes dans un million de particules d'eau. Ces solides, invisibles à l'œil nu, peuvent provenir de diverses sources telles que les minéraux naturels, les sels, les métaux lourds, les engrais chimiques ou les polluants industriels. Une concentration élevée de TDS peut affecter le goût, l'odeur et la qualité générale de l'eau. Le tableau 2.7 représente la salinité de différents types d'eau.

Tableau 2.7 : Classification des eaux en fonction de leur salinité.

Type d'eau	Partie par million de sels dissous
Eau douce	< 1000
Eau légèrement salée	1000 – 3000
Eau modérément salée	3000 – 10000
Eau très salée	10000 – 35000
Eau de mer	~ 35000

G. Dureté totale :

La dureté de l'eau (ou titre hydrotimétrique) TH, est l'indicateur de la minéralisation de l'eau. Elle est surtout due aux ions calcium Ca^{2+} et magnésium Mg^{2+} . La dureté s'exprime en

°TH (degré hydrotimétrique) également appelé degré français (symbole :°F) en France. 1 degré français correspond à 4 milligrammes de Ca^{2+} et à 2,4 milligrammes de Mg^{2+} et 10 mg de CaCO_3 par litre d'eau.

Les valeurs de TH de différentes eaux sont regroupées dans le tableau 2.8.

Tableau 2.8 : Plage de valeurs pour le titre hydrotimétrique.

TH (°F)	0 à 5	5 à 10	10 à 20	20 à 30	30 et plus
Eau	Très douce	douce	Modérément douce	dure	Très dure

H. L'alcalinité:

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence des hydrogénocarbonates, carbonates et hydroxydes.

Le titre alcalimétrique (**TA**) mesure la teneur de l'eau en alcalis libre et en carbonates caustiques.

Le titre alcalimétrique complet (**TAC**) mesure la teneur de l'eau en alcalis libres, carbonates et hydrogénocarbonates.

I. Calcium :

Le calcium, est un métal alcalino-terreux très abondant dans la nature, notamment sous forme de carbonates dans les roches calcaires. Il est le principal composant de la dureté de l'eau et constitue généralement l'élément minéral dominant dans les eaux destinées à la consommation.

J. Magnésium :

Le magnésium est un élément indispensable à la croissance, servant à la fois de composant structurel (élément plastique) dans la formation des os et de régulateur actif (élément dynamique) au cœur des systèmes enzymatiques et hormonaux.

K. Sodium :

L'absorption de quantités relativement importantes de sodium ne présente pas de risque, sauf pour les personnes souffrant d'hypertension.

L. Sulfates:

À fortes concentrations, les sulfates (SO_4^{2-}) peuvent provoquer des troubles gastro-intestinaux, notamment chez les enfants, et donner à l'eau un goût désagréable.

M. Chlorures:

Les chlorures sont présents dans toutes les eaux à des concentrations variables, pouvant provenir d'activités humaines ou industrielles. Un excès de chlorures dans l'eau potable la rend corrosive pour les réseaux de distribution et peut être nocif pour les plantes.

N. Nitrate :

Les nitrates (NO_3^-), que l'on trouve dans les sols, les eaux de surface et les eaux souterraines, résultent de la décomposition naturelle de matières organiques azotées, telles que les protéines animales ou végétales et les déjections animales, par l'action de micro-organismes.

O. Nitrites :

Les nitrites (NO_2^-) proviennent principalement soit d'une oxydation incomplète de l'ammoniac, soit de la réduction des nitrates.

P. Phosphates:

Les phosphates présents dans les eaux de surface ou les nappes phréatiques peuvent avoir une origine naturelle, comme la décomposition de la matière organique, mais aussi provenir de rejets industriels (notamment agroalimentaires), domestiques (phosphates des détergents) ou agricoles (engrais et pesticides). Dans les eaux naturelles potables, les phosphates ne sont généralement présents qu'à l'état de traces en conditions anaérobies (absence d'oxygène).

Q. Fer :

Le fer présent dans l'eau peut provenir des terrains traversés ou de pollutions industrielles. Dans les réseaux de distribution, il résulte le plus souvent de la corrosion des canalisations. Son excès altère les qualités organoleptiques de l'eau (goût métallique, coloration).

R. La demande chimique en oxygène DCO :

La demande chimique en oxygène est un paramètre indicateur de pollution. Elle correspond à la quantité d'oxygène consommée par les matières existant dans l'eau et oxydables dans des conditions opératoires définies. En fait la mesure correspond à une estimation des matières oxydables présentes dans l'eau, quelle que soit leur origine organique ou minérale (fer ferreux, nitrites, ammonium, sulfures et chlorures). On exprime la DCO par la quantité d'oxygène fournie par le bichromate de potassium en milieu acide et en présence

de sulfate de mercure nécessaire à l'oxydation des substances organiques totales présentes dans l'eau.

S. La demande biochimique en oxygène DBO_5 :

La DBO_5 ou Demande Biologique 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. La mesure de la DBO_5 est très utilisée pour surveiller les rejets et le fonctionnement des stations d'épuration. (Elle est trop peu précise pour qualifier les eaux naturelles –**Tableau 2.8**)).

Tableau 2.8 : Qualité de l'eau en fonction de la DBO_5

DBO_5 (mg/L d' O_2)	Qualité de l'eau
< 1	Excellente qualité
2	Bonne qualité
3	Qualité moyenne
5	Eau moyennement polluée
> 10	Eau polluée

2.6.1.3. Les caractéristiques bactériologiques :

L'analyse biologique complémentaire de l'analyse chimique, fait apparaître différentes espèces de micro-organismes tels que les bactéries, les virus les planctons et les champignons. On distingue deux types de micro-organismes :

- Ceux qui sont pathogènes et provoquent des maladies ;
- Ceux qui sont saprophytes c.à.d. qui n'ont pas un effet sur la santé de l'être humain.

Rien n'est plus important que la qualité microbiologique d'une eau, car toutes sortes de maladies (fièvres, typhoïde, choléra, maladie entérovirale gastro-intestinales...), peuvent être transmises par l'eau. D'une façon idéale l'eau potable ne devra contenir aucun micro-organisme pathogène et être exempte de toute bactérie indiquant une pollution fécale.

2.6.2. Normes de qualité des eaux :

Une norme de qualité pour l'eau potable est établie en fixant une Concentration Maximale Admissible (CMA) pour chaque polluant. Ces valeurs limites ne sont pas arbitraires; elles sont scientifiquement dérivées, principalement sur la base des recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). L'OMS détermine, grâce à des études médicales et toxicologiques, la dose quotidienne d'une substance qu'un individu peut ingérer sans risque pour sa santé tout au long de sa vie. La CMA traduit cette dose

sécuritaire en une concentration maximale dans l'eau. L'eau potable doit répondre à des critères stricts de pureté. Elle doit être :

- Exempte de matières en suspension (pour être claire et limpide).
- Exempte de micro-organismes pathogènes (pour éviter les risques microbiologiques).
- Exempte de produits chimiques toxiques (pour prévenir les intoxications à long terme).

Il existe plusieurs normes telles que les normes de l'organisation mondiale de la santé (OMS), les normes européennes, les normes algériennes ...ect).

Réglementation Algérienne: La réglementation Algérienne en matière d'eau potable, notamment définie par un texte cadre publié dans le Journal Officiel de la République Algérienne (JORA), établit des normes de qualité contraignantes en fixant des valeurs limites pour des paramètres physico-chimiques et bactériologiques. L'objectif fondamental de ce cadre réglementaire est de garantir la santé publique en établissant une relation scientifique directe entre la qualité de l'eau consommée et l'état de santé de la population, ce qui permet de déterminer des seuils sanitaires (**Tableau 2.9**).

Tableau 2.9 : Normes Algériennes des paramètres physico-chimique pour l'eau potable JORA (2014).

Groupe de paramètres	Paramètres	Unités	Valeurs indicatives
Paramètres Organoleptiques	couleur	mg/L platine	15
	Turbidité	NTU	5
	Odeur à 25 °C	Taux dilution	4
	Saveur à 25 °C	Taux dilution	4
Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux	Température	°C	25
	Conductivité à 20 °C	µS/cm	2800
	Alcalinité	mg/L CaCO ₃	65 pour les eaux dessalées ou déminéralisées (valeur minimale)
	Calcium	mg/L	200
	Chlorure	mg/L	500
	Concentration en ions hydrogène	pH	≥ 6,5 et ≤ 9
	Dureté (TH)	mg/L CaCO ₃	500
	Fer total	mg/L	0,3
	Manganèse	mg/L	50
	Phosphore	mg/L	5
	Potassium	mg/L	12
	Sodium	mg/L	200
	Sulfates	mg/L	400

2.7. Analyse de l'eau :

Les études de qualité des eaux naturelles comportent trois étapes (**Fig. 2.4**):

- L'échantillonnage ;
- L'analyse ;
- L'interprétation.

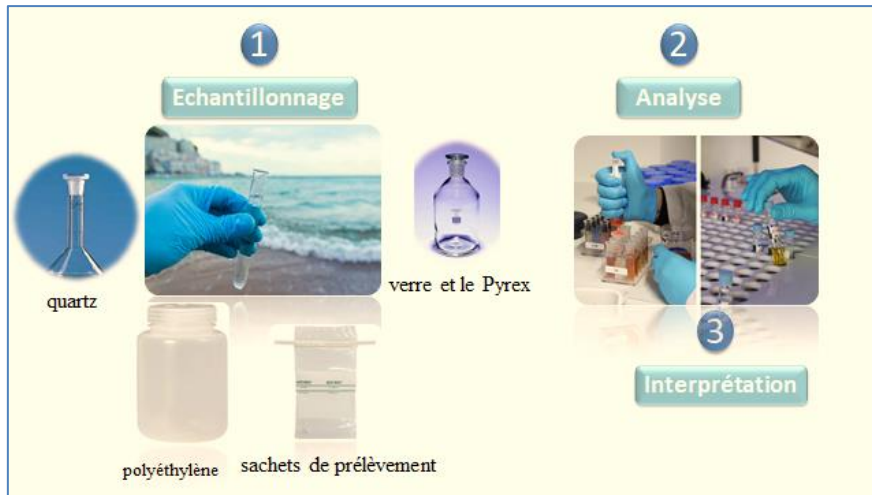


Figure 2.4 : Les étapes de l'analyse de l'eau.

2.7.1. 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 fermés hermétiquement sans laisser de bulles d'air dans le flacon.

La nature du matériau du récipient de prélèvement est importante, car celui-ci ne doit pas entrer en réaction avec l'eau à analyser. En effet, il faut éviter que des éléments chimiques constituant le flacon ne passent en solution, ou, à l'inverse, que certains ions présents dans l'eau ne se fixent sur les parois du récipient.

Cependant, le matériel idéal n'existe pas et l'emploi de tel produit plutôt que tel autre dépend de la nature des éléments à doser :

- ❖ **Le quartz** est le matériau le plus adapté pour la bonne conservation des échantillons mais s'avère très fragile.
- ❖ **Le verre ou 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 pour le verre et le bore pour le 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 échantillons fortement chargés en gaz (la diffusion est lente).

- ❖ **Les sachets du chlorure de 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.

Informations de base sur l'eau à analyser :

1. Identité du préleveur.
2. Date et heure du prélèvement.
3. Particulier ou autorité demandant l'analyse.
4. Motif de la demande (analyse initiale, contrôle périodique, pollution intoxication, épidémie...).
5. Usage de l'eau (boisson, lavage, abreuvement, industrie...).
6. Ville ou établissement que l'eau alimente.
7. Nom du point d'eau et localisation précise.
8. Origine de l'eau (source, puit, forage, rivière...).
9. Température de l'eau et celle de l'atmosphère (conditions météorologiques).
10. Débit approximatif (litre/minute).
11. Nature géologique des terrains traversés.

2.7.2. Méthodes d'analyse :

La température, le pH, la conductivité, l'alcalinité et d'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 titration), 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....).

2.7.3. Interprétation des résultats :

Les unités de mesure diffèrent souvent d'un type d'analyse à l'autre et aussi d'un fournisseur ou d'un distributeur à l'autre, entretenant ainsi la confusion.

Unités :

- ❖ **Milligramme par litre** : Le milligramme par litre est l'unité de mesure standard, utilisée par exemple dans les laboratoires d'analyse d'eau potable.

❖ Partie par million

- 1 ppm (partie par million) = 1mg/L.

❖ **Degré Français :** Un degré français correspond à la dureté d'une solution contenant 10 mg/L de carbonate de calcium (CaCO_3) qui correspond également à une solution contenant 0,0001 mol/L de CaCO_3 (puisque la masse molaire de CaCO_3 vaut 100,1 g/mol).

Un degré français équivaut donc à :

- ✓ 4 mg de calcium (et 6 mg de carbonate) par litre soit 0,0001 mol/L de calcium (de masse molaire 40,1 g/mol).
- ✓ 2,4 mg de magnésium par litre soit 0,0001 mol/L de magnésium (de masse molaire 24,3 g/mol).
- ✓ $1^\circ\text{F} = 10 \text{ mg/L de } \text{CaCO}_3$ (problème du tartre à analyser) or $10 \text{ mg/L } \text{CaCO}_3 = 0,2 \text{ meq/L}$

$$1^\circ\text{F} = 0,2 \text{ meq/L ou } 1 \text{ meq/L} = 5^\circ\text{F}$$

2.8. Pollution de l'eau :

La pollution ou la contamination de l'eau peut être définie comme la dégradation de celle-ci en modifiant ses propriétés physiques, chimiques et biologiques; par des déversements, rejets, dépôts directs ou indirects de corps étrangers ou de matières indésirables telles que les microorganismes, les produits toxiques, les déchets industriels.

2.8.1. Définition des eaux usées :

L'utilisation des eaux engendre un nouveau produit appelé effluent ou eau usée. Les eaux usées, aussi appelées eaux résiduaires, sont des eaux qui ont subi une détérioration de leurs caractéristiques naturelles (physique, chimique ou biologique) après usage lié de façon directe ou indirecte aux activités humaines. On appelle eaux usées les eaux issues des activités domestiques, agricoles et industrielles chargées en substances toxiques qui parviennent dans les canalisations d'assainissement. Celles-ci englobent également les eaux de pluies et leur charge polluante, elles engendrent au milieu récepteur toutes sortes de pollution et de nuisance.

Les eaux usées se divisent en deux grandes catégories : les eaux résiduaires urbaines (ERU) et les eaux résiduaires industrielles (ERI).

2.8.1.1. Les eaux résiduaires urbaines (ERU) :

Les ERU regroupent les eaux ménagères, les eaux vannes et les eaux de ruissellement. La composition et les caractéristiques d'une eau résiduaire urbaine sont peu variables par rapport aux eaux usées industrielles.

2.8.1.2. Les eaux résiduaires industrielles (ERI)

Les ERI sont des eaux chargées de polluants, solubles ou non, provenant essentiellement de l'activité humaine. Les caractéristiques des eaux usées industrielles varient, elles dépendent à une multitude de paramètres tels que, le type de l'industrie, production, nettoyage,..., les différentes étapes du procédé industriel, l'état des appareils,... Par ailleurs, il existe des caractéristiques communes entre les effluents de la même industrie.

En termes de volume et type de polluants, les effluents industriels présentent le plus souvent une charge importante et un risque de dysfonctionnement structurel et fonctionnel des réseaux d'assainissement et des dispositifs de traitement des eaux usées. Ces risques sont d'autant plus grands que les industries sont localisées en amont du réseau d'assainissement.

Les principaux polluants présents dans les eaux usées d'origine industrielle sont :

- ◆ Les métaux toxiques,
- ◆ Les toxines organiques,
- ◆ Les matières colorées,
- ◆ Les huiles et graisses,
- ◆ Les sels.

2.8.2. Les sources de pollutions des eaux :

Les sources de ces pollutions sont très diverses. Il peut s'agir de :

- ✓ **Rejets ponctuels** des stations d'épuration (STEP) ou des industries (acides, phénols, cyanures, détergents, hydrocarbures),
- ✓ **Rejets diffus** de polluants dus à l'agriculture intensive (engrais, biocides, produits phytosanitaires), de décharges sauvages, etc. Les pollutions les plus importantes des eaux sont souvent des conséquences directes et locales des activités agricoles ou industrielles.

2.8.3. Origine des eaux usées :

Suivant l'origine des substances polluantes, on distingue quatre catégories d'eaux usées.

2.8.3.1. Les eaux usées domestiques :

Les eaux usées domestiques (urbaines) comprennent des eaux grises et noires. Les eaux grises sont celles provenant, par exemple, des baignoires, douches, lavabos, éviers, machines à laver. Leur charge polluante est constituée de savons, de détergents, de graisses et aussi de phosphates issus de certaines lessives. Les eaux noires sont celles issues de toilettes et qui charrient les urines et matières fécales. Leur charge polluante est constituée des substances azotées (protéines de l'urée), de phosphore organique d'origine métabolique, et des résidus de médicaments (œstrogènes, antibiotiques, etc.)

2.8.3.2. Les eaux usées industrielles :

Les eaux usées industrielles proviennent principalement des activités anthropiques, qui sont de composition variable selon l'industrie. Ces dernières peuvent contenir une variété de métaux lourds (cadmium, zinc, plomb, chrome, mercure) et des composés organiques d'azote ou de phosphore, qui sont dans la plupart du temps nocifs pour l'environnement. Ces eaux peuvent avoir des propriétés majoritairement minérales (telles que la minéralurgie), des propriétés majoritairement organiques (pour les eaux usées de l'industrie agro-alimentaire, des abattoirs, des conserveries), des propriétés toxiques (pour certaines industries chimiques) ou aussi chaudes qu'une centrale électrique.

2.8.3.3. Les eaux usées pluviales :

Il s'agit ici des eaux claires collectées dans les réseaux d'assainissement. Elles constituent la cause d'une pollution importante des cours d'eau, notamment pendant les périodes orageuses. Les eaux pluviales sont chargées d'impuretés et au cours de leur trajet, elles transportent des résidus déposés sur les toits et les chaussées des villes (huiles de vidange, carburants, résidus de pneus et métaux lourds).

2.8.3.4. Les eaux usées agricoles :

Ces eaux usées proviennent des terres cultivées par lessivage et ruissellement. Ces eaux sont riches en éléments fertilisants (azote et phosphore) et polluants organiques (pesticides).

2.8.4. Conséquences de la pollution :

- Les matières organiques solubles abaissent la teneur en oxygène dans les cours d'eau, ce qui conduit à la réduction et à la mort de la faune aquatique.
- Les matières en suspension, s'accumulent au fond des cours d'eau, lacs et étangs et causent l'augmentation de la turbidité.

- Les acides sont toxiques à la vie aquatique et détériorent les réseaux d'égaux.
- Les huiles et les graisses flottants conduisent au colmatage des conduites et donnent un aspect esthétique indésirable.
- Les matières toxiques et métaux lourds sont toxiques à la vie aquatique.
- Le phosphore et l'azote conduit à l'eutrophisation des cours d'eau.
- Les coliformes fécaux et pathogènes participent à la contamination bactériologique des cours d'eau.

2.8.4.1. Conséquences de la pollution des eaux sur la santé des êtres vivants :

Les conséquences de la pollution des eaux sur la santé des êtres vivants peuvent être graves et variées, notamment :

A. Impacts sur la santé humaine :

- ✓ Augmentation des maladies liées à l'eau contaminée (ex : gastro-entérites, infections).
- ✓ Risques de maladies chroniques (ex : cancers, troubles endocriniens) dus à l'exposition à des substances toxiques.

B. Impacts sur la faune aquatique :

- ✓ Mortalité accrue chez les poissons et autres organismes aquatiques.
- ✓ Perturbation des chaînes alimentaires aquatiques.
- ✓ Modifications des populations et des espèces.
- ✓ Altération des écosystèmes aquatiques :
- ✓ Réduction de la biodiversité.
- ✓ Dégradation des habitats aquatiques.
- ✓ Perturbation des cycles naturels.

2.8.4.2. Effets économiques et sociaux :

- ✓ Coûts accrus pour le traitement de l'eau potable.
- ✓ Réduction des activités économiques liées à l'eau (pêche, tourisme).
- ✓ Impacts sur les communautés dépendantes des ressources aquatiques.

2.8.4.3. Impacts à long terme :

- ✓ Accumulation de polluants dans l'environnement.
- ✓ Effets persistants sur la santé et les écosystèmes.
- ✓ Défis pour la restauration des milieux aquatiques contaminés.

2.8.5. La Lutte contre la pollution de l'eau :

La réduction de la pollution des eaux passe essentiellement par l'application de bonnes pratiques par les usagers de l'eau et des milieux aquatiques sur tout le bassin versant. Les objectifs sont multiples :

- ✓ Privilégier les activités les moins polluantes,
- ✓ Améliorer les usages pour diminuer la quantité de substances utilisées ou rejetées, mais aussi intercepter les flux de polluants dans le bassin versant.

Les paramètres essentiels qui doivent être pris en compte pour le choix d'une technologie de traitement doivent tenir compte :

- ✓ Des exigences du milieu récepteur.
- ✓ Des caractéristiques des eaux usées, (demande biochimique en oxygène, demande chimique en oxygène, matières en suspension, etc.)
- ✓ Des conditions climatiques (température, évaporation, vent, etc.)
- ✓ De la disponibilité du site.
- ✓ Des conditions économiques (coût de réalisation et d'exploitation).
- ✓ Des facilités d'exploitations, de gestion et d'entretien.

2.8.5.1. Réaliser une épuration des eaux avant leur rejet direct :

Les eaux collectées dans les égouts doivent être traitées avant d'être rejetées dans la nature pour protéger la santé des individus et sauvegarder la qualité du milieu naturel.

Selon le degré d'élimination de la pollution et les procédés mis en œuvre, des niveaux de traitement sont définis (**Figs 2.5 et 2.6**).

- Un prétraitement
- Le traitement primaire
- Le traitement secondaire (traitement biologique)
- Le traitement tertiaire cela s'ajoute le traitement des boues.

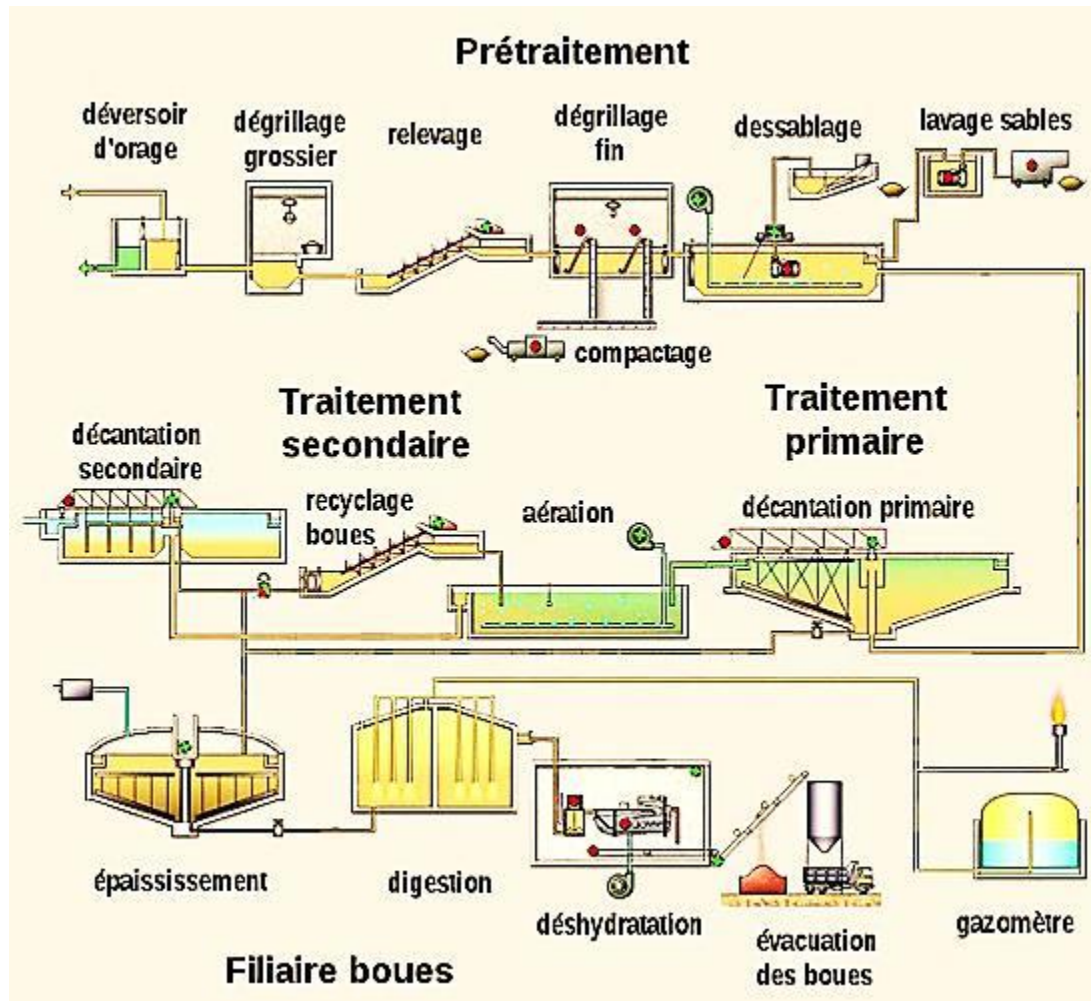


Figure 2.5 : Station d'épuration de l'eau.

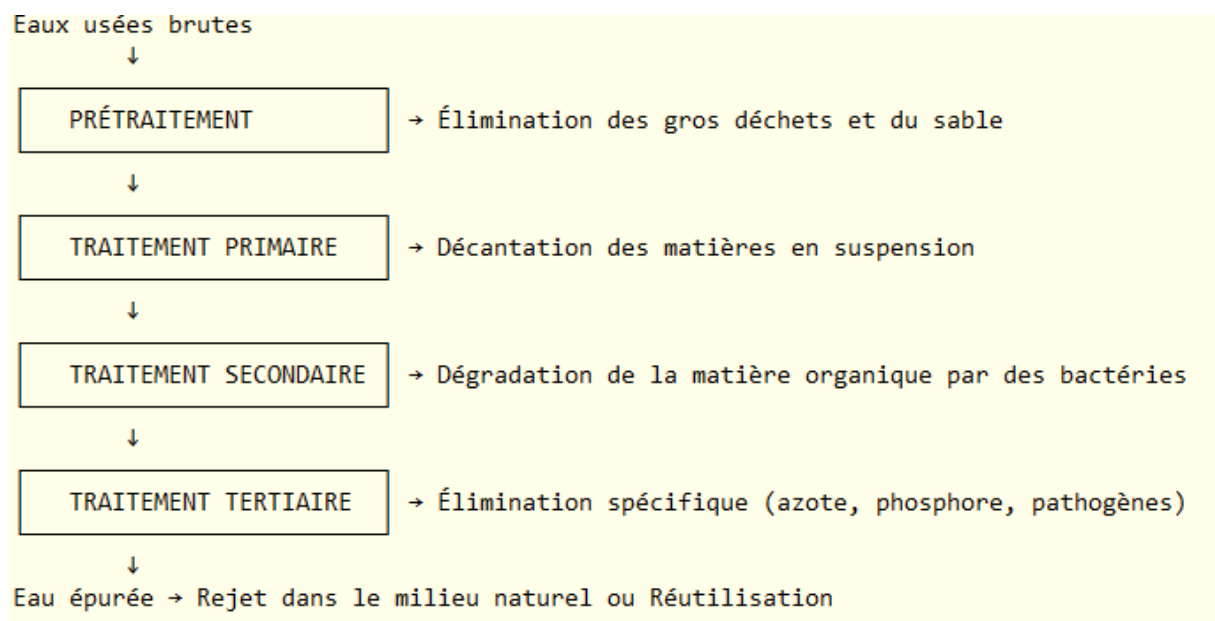


Figure 2.6: Etapes de traitement des eaux usées.

A. Le prétraitement:

Retirer les éléments solides les plus gros et les plus lourds qui pourraient endommager les équipements ou perturber les traitements suivants.

A.1. Dégrillage : Les eaux usées passent à travers des grilles (ou "cribles") de différentes tailles qui retiennent les gros déchets : plastiques, chiffons, bois, etc.

A.2. Dessablage : L'eau est ralentie dans un bassin pour permettre la sédimentation du sable, du gravier et des particules minérales lourdes.

A.3. Déshuilage / Dégraissage : À l'inverse, dans ce bassin, on remonte à la surface les graisses, les huiles et les hydrocarbures, qui sont ensuite raclés et éliminés.

B. Le traitement primaire : Éliminer une grande partie des matières en suspension (MES) par décantation physique. L'eau s'écoule très lentement dans de grands bassins circulaires ou rectangulaires appelés "clarificateurs". Les matières solides organiques (les "boues primaires") se déposent au fond sous l'effet de la gravité et sont raclées pour être évacuées.

C. Le traitement secondaire (ou biologique): Dégradation de la pollution organique dissoute et des particules fines restantes par l'action de micro-organismes (bactéries, protozoaires). C'est le cœur de la station d'épuration. Il existe plusieurs procédés :

C.1. Boues Activées (le plus courant) :

Bassin d'aération : Les eaux sont mélangées à un "lactobacille" (des bactéries en suspension). De l'air est insufflée pour fournir l'oxygène nécessaire aux bactéries, qui "mangent" la matière organique polluante.

Décantation secondaire : Le mélange est ensuite envoyé dans un autre clarificateur. Les bactéries, après avoir consommé les polluants, forment des floccs qui se déposent au fond. Ces "boues activées" sont en partie recyclées dans le bassin d'aération pour maintenir une population bactérienne active, et le surplus est évacué.

C.2. Lit bacterien : Les eaux sont ruisselées sur un support fixe (roches ou plastique) où est fixée une biomasse bactérienne qui dégrade les polluants au passage.

D. Le traitement tertiaire (ou avancé): "Polir" l'eau pour éliminer des polluants spécifiques résiduels avant le rejet. Ce traitement n'est pas systématique mais de plus en plus répandu.

- **Désinfection :** Pour éliminer les pathogènes (bactéries, virus). La désinfection se fait par :

- **Chlore :** Efficace, mais peut former des sous-produits indésirables.

- **Rayons Ultraviolets (UV)** : Très efficace et écologique, sans ajout de produit chimique.
- **Ozone** : Puissant désinfectant.
- **Élimination de l'azote et du phosphore** : Ces nutriments, responsables de l'eutrophisation (prolifération d'algues), sont éliminés par des processus biologiques spécifiques (nitrification/dénitrification) ou par précipitation chimique pour le phosphore.
- **Filtration fine** : Passage sur des filtres à sable ou des membranes (microfiltration) pour retenir les dernières particules en suspension.
- **Le traitement des boues résiduelles** : Les boues issues des décanteurs primaire et secondaire doivent également être traitées. C'est une partie cruciale du processus. Il est effectué par :
 - **Épaississement** : Réduire le volume d'eau dans les boues.
 - **Digestion (ou Stabilisation)** : Les boues sont maintenues dans des cuves fermées (digesteurs) pendant plusieurs semaines. Des bactéries anaérobies les décomposent, produisant du biogaz (mélange de méthane et de CO₂) qui peut être valorisé pour produire de l'électricité ou de la chaleur.
 - **Déshydratation** : Les boues stabilisées sont déshydratées (par centrifugation, filtres-presses, etc.) pour obtenir un "gâteau" de boues plus facile à transporter.
 - **Valorisation ou Élimination** : Les boues déshydratées sont généralement :
 - ✓ Épandues en agriculture comme engrais naturel (si leur qualité le permet).
 - ✓ Incinérées.
 - ✓ Mises en décharge.

2.8.5.2. Encadrer ou interdire l'usage de substances dangereuses :

Certaines substances sont particulièrement dangereuses pour les milieux et la santé, soit parce qu'elles ne sont pas biodégradables et s'accumulent, ou par exemple parce qu'elles sont cancérogènes. Il est alors préférable d'interdire leur production et leur usage pour protéger l'environnement et la santé.

2.8.5.3. Réduire l'utilisation de produits phytosanitaires :

La réduction des quantités de produits phytosanitaires utilisées est la première manière de lutter contre la pollution diffuse de l'eau. Pour protéger la santé des personnes et la qualité de l'eau, la réglementation réduit progressivement l'utilisation des pesticides par les collectivités et les particuliers.

Depuis 2017, leur emploi est interdit dans les espaces verts, et ils ne sont plus disponibles à l'achat en libre-service. A partir du 1^{er} janvier 2019, leur utilisation ne sera plus autorisée aux particuliers.

2.8.5.4. Réglementer la fertilisation des sols :

Afin de prévenir la pollution des milieux aquatiques par les nutriments, la réglementation encadre strictement l'utilisation des engrais, qu'ils soient organiques (effluents d'élevage comme le fumier ou le lisier) ou de synthèse.

L'objectif central est d'ajuster les apports en azote à la capacité d'absorption des sols, pour éviter tout excédent qui pourrait être drainé vers les cours d'eau et les nappes phréatiques.

Concrètement, cette gestion raisonnée se traduit par une planification préalable, via l'établissement d'un plan de fumure ou d'un plan d'épandage. Ces outils permettent de calculer les doses maximales à épandre en tenant compte de deux facteurs clés : la concentration en nutriments des engrais utilisés et la capacité naturelle du sol à retenir les nitrates.

2.8.5.5. Éviter les transferts aux milieux aquatiques :

La lutte contre la pollution diffuse passe par la limitation des transferts directs aux milieux aquatiques. C'est l'objet de certaines règles relatives à l'épandage : interdiction de traiter les fossés par exemple. Concernant les produits phytosanitaires, une zone non traitée doit être maintenue autour des points d'eau (ruisseau, rivière, plan d'eau, etc.). Sa largeur varie de 5 à 50 mètres, en fonction de divers paramètres - notamment la dangerosité des produits.

2.8.5.6. Protéger les captages d'eau :

Les captages d'eau sont les ouvrages de prélèvement qui exploitent une ressource en eau, superficielle (rivière, lac) ou souterraine (nappe phréatique).

L'eau prélevée - appelée eau brute - sert notamment à la production d'eau potable après une étape de potabilisation.

Pour protéger la santé humaine et limiter les coûts des traitements de potabilisation, l'eau brute doit être de la meilleure qualité possible, ce qui justifie la mise en place de protection des captages.



Chapitre 3

Air





3.1. Définition de l'atmosphère :

Sous le terme atmosphère (du grec atmos, vapeur, fumée ; du latin sphaira, boule, globe terrestre). L'atmosphère est la couche d'air qui entoure le globe terrestre.

3.2. L'importance de l'atmosphère :

L'atmosphère est un élément de grande importance :

- L'homme peut vivre sans nourriture au plus environs deux semaines et deux jours sans eau, mais pas plus de cinq minutes sans air. Environ 0,5 L d'air est emmagasiné à chaque inspiration. A raison de 16 inspirations par minute (dans le cas de respiration au repos) c'est un volume d'air de 11,5 m³ (soit environ 13,5 kg), qu'un homme respire quotidiennement ; cette quantité dépasse de loin celle de l'eau ou de la nourriture absorbée.
- Elle protège la planète des rayonnements nocifs du soleil, régule la température, et fournit l'air nécessaire à la respiration des êtres vivants.
- L'atmosphère est le compartiment le plus important par le transport des polluants. La pollution apparaît plus rapidement dans l'atmosphère que dans l'eau et le sol.

3.3. Composition et propriétés de l'atmosphère :

3.3.1. Couches de l'atmosphère :

L'atmosphère se compose de **5 couches distinctes** caractérisées par leur composition et leur température (**Fig. 3.1**):

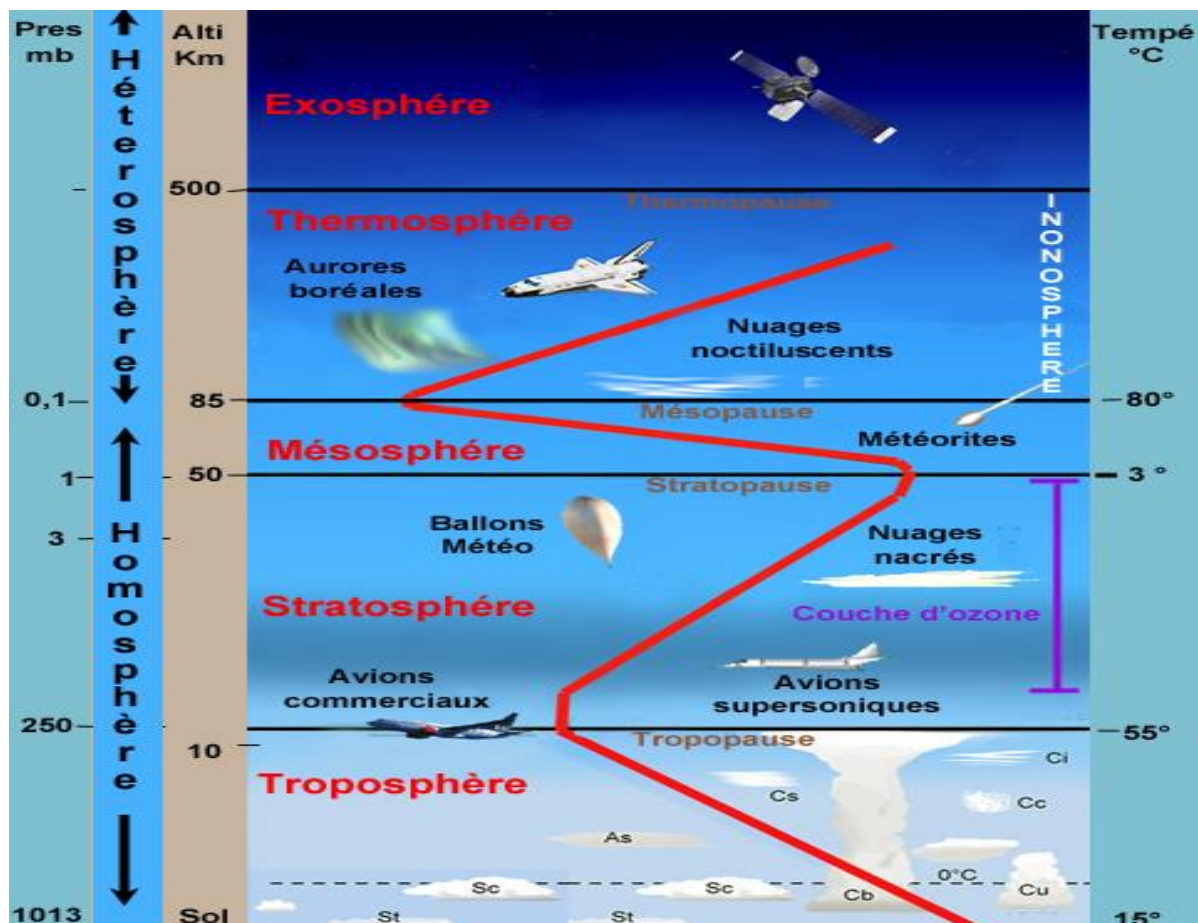


Figure 3.1 : Couches de l'atmosphère.

3.3.1.1. La troposphère (la couche diffuse):

La troposphère est la couche atmosphérique la plus proche du sol terrestre, et la plus dense ; elle représente 90% de la masse de l'atmosphère. Son épaisseur est variable : 7 kilomètres d'altitude au-dessus des pôles, 18 kilomètres au-dessus de l'équateur et environ 13 kilomètres selon les saisons dans les zones tempérées. C'est dans cette couche que se produisent la plupart des phénomènes météorologiques.

Au fur et à mesure qu'on s'élève dans la troposphère, la température décroît de façon régulière d'environ 6 degrés Celsius tous les 1000 mètres, pour atteindre -56 °C à la **tropopause** (zone qui sépare la troposphère de la stratosphère).

3.3.1.2. La stratosphère (couche d'ozone) :

La stratosphère se situe au-dessus de la troposphère. C'est dans cette couche que se trouve la couche d'ozone. Cette dernière est essentielle à la vie sur terre, car elle absorbe la majorité des rayons solaires ultraviolets, qui sont extrêmement nocifs pour tout être vivant. Cette absorption provoque un dégagement d'énergie sous forme de chaleur. C'est pourquoi la

température augmente lorsqu'on s'élève dans la stratosphère. La **stratopause** sépare la stratosphère de la mésosphère.

3.3.1.3. La mésosphère :

La mésosphère est au-dessus de la stratosphère. C'est une zone très froide et très instable, caractérisée par des mouvements verticaux. La température recommence à décroître avec l'altitude. Les gaz y sont ionisés et les météores s'enflamment lorsqu'ils entrent dans la mésosphère à cause de la friction de l'air. Ce phénomène nous apparaît sous la forme "d'étoiles filantes".

3.3.1.4. La thermosphère:

Est la couche de l'atmosphère d'une planète située au-dessus de la mésosphère. Elle se caractérise par une forte augmentation de la température avec l'altitude. La pression est y quasi nulle et les molécules d'air y sont extrêmement rares. Sur terre, la thermosphère s'étend entre 85 et 600 km d'altitude. Entre 100 et 150 km, le dioxygène moléculaire (O_2) absorbe le rayonnement ultraviolet solaire de très courte longueur d'onde (entre 100 et 200 nm). Cette absorption provoque une élévation de la température avec l'altitude, laquelle varie généralement entre 300 °C et 1600 °C selon l'activité solaire. Les températures sont élevées, mais la densité de matière est extrêmement faible.

3.3.1.5. L'exosphère:

La couche la plus haute est l'exosphère. Dans cette couche, la température continue à augmenter, l'exosphère atteint des milliers de kilomètres (> 500 km), d'altitude et disparaît graduellement dans l'espace. C'est la région la plus calme et il n'y a pas des réactions chimiques.

La séparation entre la troposphère et la stratosphère est appelée "**tropopause**". Celle entre la stratosphère et la mésosphère est appelée "**stratopause**". Celle entre la mésosphère et la thermosphère est appelée "**mésopause**". Celle entre la thermosphère et l'exosphère est appelée "**thermopause**".

3.3.2. Composition de l'atmosphère :

- l'air est inodore (sans odeur), incolore (sans couleur) et invisible (ne se voit pas).
- L'air a une masse environ 1,17 kilogramme par mètre cube (à 15°C, 1 bar).
- L'air de l'environnement terrestre est humide car il contient de vapeur d'eau.

La composition actuelle de l'atmosphère près de la surface (jusqu'à 10 km d'altitude) est représentée dans le **Tableau 3.1**.

Tableau 3.1 : Composition de l'air sec.

Gaz de l'atmosphère	Composition volumétrique (%)
Diazote (N ₂)	78,084
Dioxygène (O ₂)	20,946
Argon (Ar)	0,934
Dioxyde de carbone (CO ₂)	0,035
Néon (Ne)	0,001818
Hélium (He)	0,000524
Méthane (CH ₄)	0,0001745
Krypton (Kr)	0,000114
Dihydrogène (H ₂)	0,000053
Oxyde nitrique (N ₂ O)	0,000031
Xénon (Xe)	0,0000087
Ozone (O ₃)	Trace – 0,0008
Monoxide de Carbone (CO)	Trace – 0,000025
Dioxyde de soufre (SO ₂)	Trace – 0,00001
Dioxyde d'azote (NO ₂)	Trace – 0,000002
Ammoniac (NH ₃)	Trace – 0.0000003

Vapeur d'eau (H₂O) très variable : entre moins de 0,5 % et environ 5 %.

Il y'a d'autres gaz qui se trouvent en faibles quantités. L'atmosphère contient également des aérosols qui se composent de particules liquides ou/et solides en suspension. Ces particules peuvent être :

- Viables : bactéries, champignons, insectes, pollens, etc.
- Non viables : sables fins, poussières, etc.

3.4. La qualité de l'air :

La qualité de l'air est un critère fréquemment utilisé pour définir différentes zones géographiques. Cependant, les concepts employés manquent souvent d'homogénéité et de limites claires. Pour clarifier le propos, nous distinguerons trois types d'espaces :

- **Les zones polluées**, qui abritent les principales sources de pollution atmosphérique, qu'elles soient urbaines ou industrielles.
- **Les zones non polluées**, correspondant généralement aux régions rurales éloignées des foyers d'émission.
- **Les zones à air pur**, situées dans des régions très éloignées de toute activité humaine. Leur pollution, minime, provient exclusivement du transport naturel de polluants par le vent, les précipitations ou les poussières.

À proximité du sol, la composition de l'atmosphère varie considérablement entre une zone polluée et une zone rurale. Dans les zones polluées, la concentration des polluants, issus principalement de la circulation et des émissions anthropiques (dioxyde de soufre, oxydes d'azote, monoxyde de carbone, etc.) est accentuée par de faibles vitesses de vent, qui limitent la dispersion.

3.5. Pollution de l'atmosphère :

3.5.1. Définition de la pollution atmosphérique:

Selon la loi n° 83-03 du 05-02-1983 relative à la protection de l'environnement (Algérie) : « On entend par pollution atmosphérique, au sens de la présente loi, l'émission dans l'atmosphère de gaz, de fumées ou de particules solides ou liquides, corrosifs, toxiques ou odorants, de nature à incommoder la population, à compromettre la santé ou la sécurité publique ou à nuire aux végétaux, à la production agricole et aux produits agro-alimentaires, à la conservation des constructions et monuments ou au caractère des sites »

3.5.2. Polluant atmosphérique :

Est défini comme un contaminant de l'air, d'origine naturel ou anthropique, solide liquide ou gazeux, qui peut à une certaine concentration provoquer des nuisances pour l'environnement et donc pour la santé humaine.

3.5.3. Classification des polluants :

Deux grandes familles de polluants sont distinguées : les polluants primaires (émis directement) et les polluants secondaires (qui se forment dans l'air).

3.5.3.1. Les polluants primaires : Les polluants primaires sont principalement émis dans l'atmosphère. Ils sont issus des sources de pollution comme le trafic routier, les industries, le chauffage, l'agriculture, etc.

Il s'agit par exemple :

- ✓ Des oxydes de carbone
- ✓ Des oxydes de soufre
- ✓ Des oxydes d'azote
- ✓ Des hydrocarbures légers
- ✓ Des composés organiques volatils (COV)
- ✓ Des particules (PM_{10} et $PM_{2,5}$) (particules en suspension dans l'air, PM_{10} : diamètre < 10 μm et $PM_{2,5}$: diamètre < 2.5 μm : particules fines)
- ✓ Des métaux (plomb, mercure, cadmium...).

3.5.3.2. Les polluants secondaires : Les polluants secondaires ne sont pas directement rejetés dans l'atmosphère, mais ils proviennent de réactions chimiques de gaz entre eux. C'est le cas notamment :

- ✓ Des particules secondaires
- ✓ De l'ozone (O_3)
- ✓ Du dioxyde d'azote...

Certains polluants comme le dioxyde d'azote et les particules sont à la fois des polluants primaires et secondaires.

3.5.4. Temps de mélange (ou temps d'homogénéisation):

Le temps de mélange est la durée nécessaire pour qu'un polluant émis dans l'atmosphère se répartisse de manière homogène (uniforme) dans un volume d'air donné.

Ce temps varie considérablement selon l'échelle spatiale considérée :

- **À l'échelle d'un hémisphère** (par exemple, tout l'hémisphère nord) : le temps de mélange est de l'ordre de 1 à 2 mois.
- **À l'échelle du globe entier** : ce processus est beaucoup plus lent et nécessite généralement 1 à 2 ans. Cela s'explique par la relative lenteur des échanges atmosphériques à grande échelle, comme ceux entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud.

Le temps de mélange permet de comprendre à quelle vitesse un polluant, une fois émis, peut devenir un problème non plus local, mais régional ou global.

3.5.5. Durée de vie atmosphérique :

La durée de vie d'un composé dans l'atmosphère est le temps moyen pendant lequel une molécule de ce composé y reste avant d'être éliminée ou transformée. L'élimination se fait principalement par :

- Des réactions chimiques (oxydation, photolyse...).
- Un dépôt (le polluant est "lavé" par la pluie ou capté par le sol et la végétation).

La durée de vie des gaz dans l'atmosphère est extrêmement variable, allant de :

- Quelques secondes ou minutes pour les espèces très réactives (ex. : les radicaux libres).
- À plusieurs dizaines de milliers d'années pour les gaz très stables (ex. : les gaz fluorés comme le SF_6 , ou certains gaz à effet de serre).

Remarque :

- Si la durée de vie d'un polluant est plus courte que le temps de mélange nécessaire pour atteindre une zone, il n'aura pas le temps de s'y répandre. Son impact sera donc local ou régional.
- Si sa durée de vie est plus longue que le temps de mélange global, il aura le temps de se répandre uniformément dans toute l'atmosphère terrestre. Son impact sera planétaire (ex. : le CO₂).

3.5.6. Temps de demi-vie ($t_{1/2}$) :

Le temps de demi-vie est une notion principalement utilisée en cinétique chimique. Il représente le temps nécessaire pour que la concentration initiale d'un composé diminue de moitié en raison d'un processus de dégradation spécifique (souvent une réaction chimique).

La durée de vie est une mesure de la persistance globale d'un polluant dans l'environnement, qui peut impliquer plusieurs processus d'élimination.

3.5.7. Puits :

Un puits est un domaine de l'environnement, d'où une substance est enlevée par « des processus de captation ». On entend par le terme de puits un processus, une activité ou un mécanisme, par lequel une substance est enlevée d'une partie de l'environnement. Dans un puits, un composé peut être :

- Adsorbé (par exemple un gaz ou un liquide sur une poussière) ;
- Absorbé (par exemple CO₂ dans les fleuves, les lacs ou dans les océans) ;
- Déposé (par exemple déposé sur les sédiments d'un fleuve) ;
- Biologiquement décomposé (par exemple l'absorption de CO₂ ou de H₂S par les plantes) ;
- Décomposé par des réactions chimiques (exemple : la transformation des hydrocarbures chlorofluorés en CO₂, HCl et HF).

On dit des composés gazeux que ce sont des gaz de puits, quand ils peuvent être enlevés de l'atmosphère par des processus naturels. Les gaz de puits sont en général solubles dans l'eau ; ils peuvent donc être entraînés hors de la troposphère par les précipitations et être ainsi déposés sur les sols

3.5.8. Sources :

Sous le terme de source, on entend une partie de l'environnement à partir de laquelle une substance est émise. On distingue deux types de sources :

3.5.8.1. Source naturelle: c'est l'ensemble des sources émettrices qui ne sont pas relatives à l'activité humaine et elles émettent des polluants naturels. Il existe plusieurs sources naturelles dont on cite les plus fréquents.

✓ **La forêt**

C'est la source de la majorité des polluants naturels dans l'atmosphère par les incendies accidentels. Ces feux de forêt émettent de larges quantités de polluant sous forme de fumés, CO₂, hydrocarbures imbrulés (combustion partielle), oxyde d'azote et les cendres.

Le tableau ci-dessous (**Tableau 3.2**) résume les sources naturelles de la pollution atmosphérique

Tableau 3.2 : Les sources naturelles de la pollution atmosphérique.

Source	Polluant
Bétail	CH ₄
Désert	Sable
Volcans	Cendre, H ₂ S, SO ₂ , CO, CO ₂ , HCl
Foudre	NO _x , HNO ₃

3.5.8.2. Sources anthropiques :

C'est l'ensemble des sources émettrices qui sont relatives à l'activité humaine, elles émettent des polluants naturels et/ou des polluants qui n'existent pas dans la nature et qui provoquent des perturbations à l'environnement.

Le tableau ci-dessous (**Tableau 3.3**) résume les sources anthropiques de la pollution atmosphérique

Tableau 3.3 : Les sources anthropiques de la pollution atmosphérique.

Source	Polluant
Industrie	CO ₂ , NO _x , SO _x , PVC, HFC, CFC
Domestique	CO ₂ , CO, etc.
Trafic automobile	CO ₂ , HAP, HAM, NO _x , SO _x
Combustion	Energie, cendres, CO ₂ , CO, etc.

PVC : polychlorure de vinyle

HFC : hydrofluorocarbure

CFC : chlorofluorocarbure

HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques

3.5.9. Emission, transmission et déposition :

Le mécanisme complet du devenir d'un polluant dans l'atmosphère s'articule en trois phases. Tout commence par son **émission**, c'est-à-dire son rejet dans l'air depuis une source précise, qu'elle soit industrielle, liée au transport ou naturelle. Une fois libéré, le polluant entre dans la phase de **transmission** : il est transporté et dilué par les vents, étalé par les mouvements turbulents de l'air, et peut subir des transformations chimiques pour donner naissance à d'autres polluants secondaires. Enfin, il quitte l'atmosphère par **dépôt**, soit de manière sèche (par sédimentation ou adsorption sur le sol et la végétation), soit de manière humide, en étant lessivé par les pluies, ce qui conduit à son retour à la surface et à ses impacts sur les écosystèmes et la santé (Fig. 3.2).

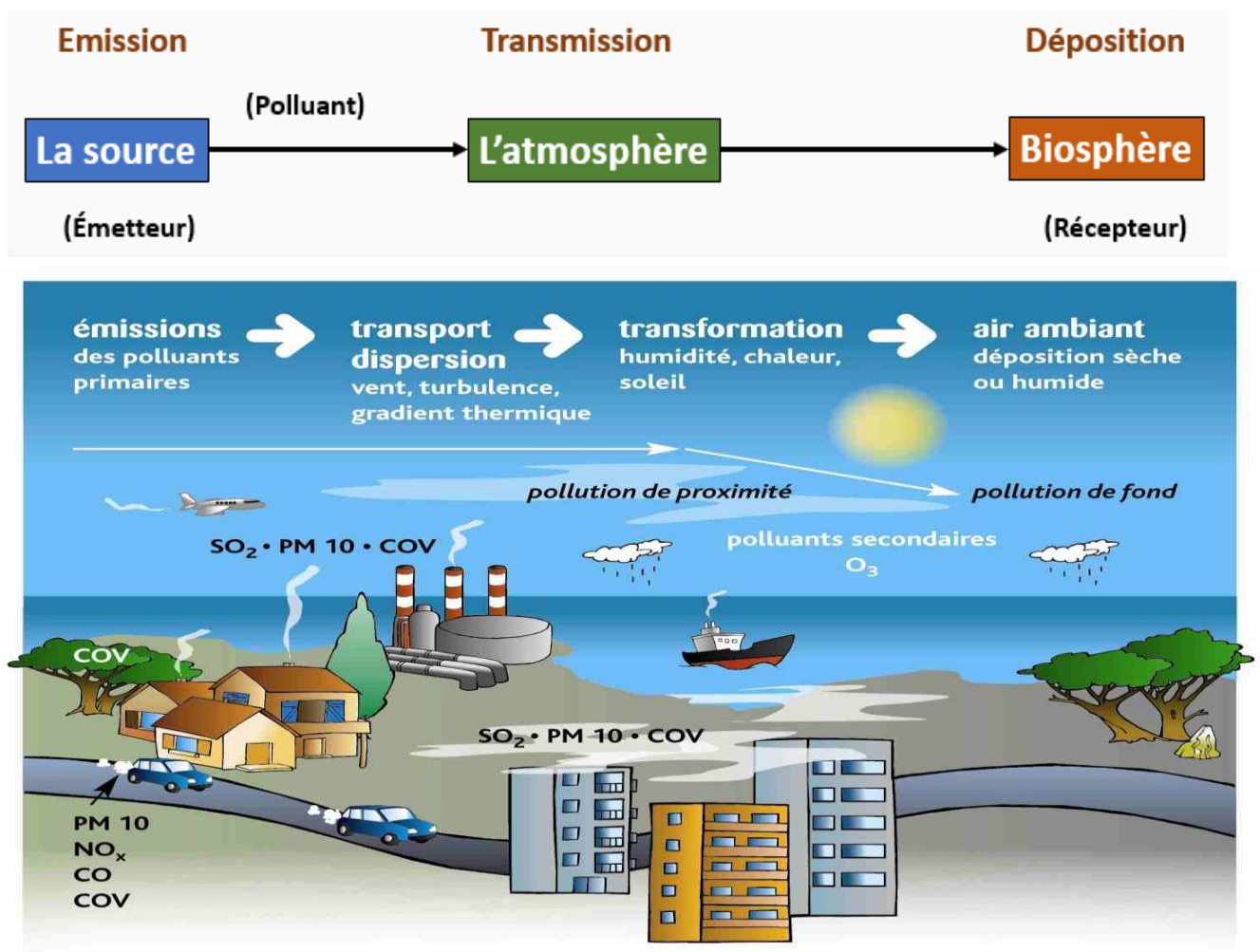


Figure 3.2 : Modèle simple pour l'émission, transmission et déposition des polluants dans l'atmosphère.

3.5.10. Effets de la pollution atmosphérique :

Les polluants atmosphériques peuvent exercer une influence néfaste (**Fig. 3.3**):

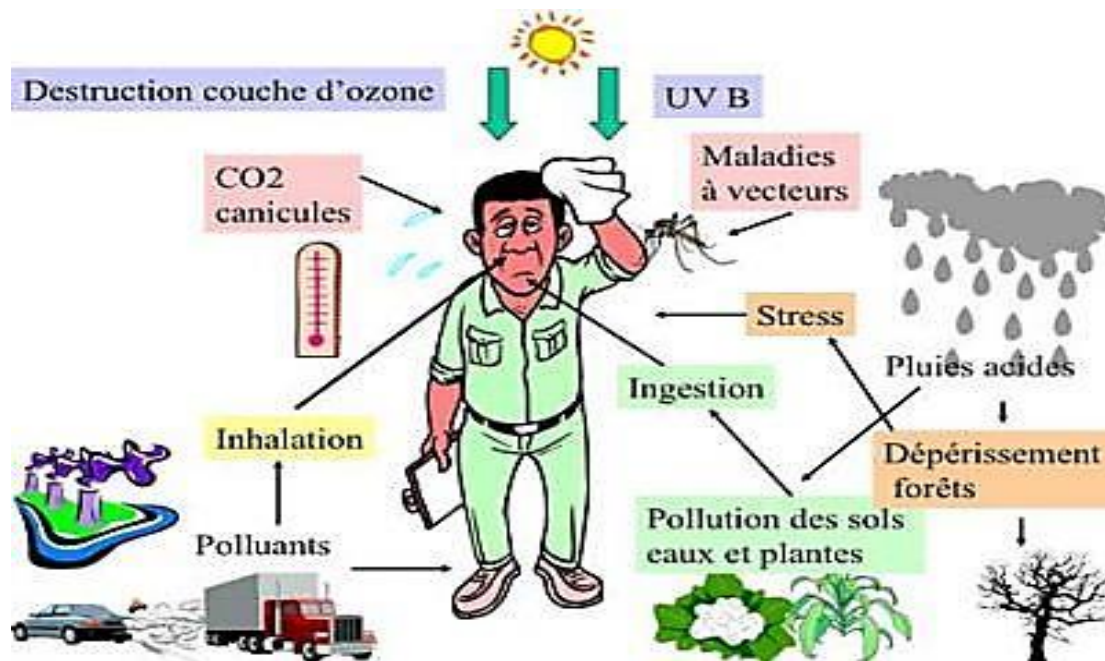


Figure 3.3 : Les principaux effets de la pollution atmosphérique.

3.5.10.1. Effet sur la santé :

La pollution affecte la santé d'une manière directe par inhalation et par exposition et d'une manière indirecte par nourriture et à travers l'eau. L'inhalation des polluants par l'homme provoque des maladies broncho-pulmonaires sévères, des cancers et divers cas d'allergie, selon la taille et la nature des particules polluantes, les grosses particules sont arrêter au niveau des voies respirations jusqu'aux alvéoles pulmonaires et les fines particules peuvent continue jusqu'au sang, et l'exposition de l'homme à l'air contenant les particules polluantes provoque une irritation de la peau. En effet, les enfants sont la partie la plus touchée des effets nocifs de la pollution atmosphérique.

3.5.10.2. Effet sur la végétation et sur les sols :

Le dépôt des polluants atmosphériques par voie sèche et humide peuvent affecter la qualité des sols et des végétaux.

- ✓ Boucher les pores des feuillages (ils empêchent la respiration de la plante) et même, il forme une couche qui empêche la photosynthèse.
- ✓ L'adsorption des polluants affectent la qualité des plantes en les rendant toxiques.
- ✓ Dépérissement (affaiblissement) des forêts.

- ✓ Les polluants affectent la qualité des sols (on ne peut pas cultiver les plantes).

3.5.10.3. Effet sur le climat :

Les particules atmosphériques affectent le climat directement en perturbant le transfert des rayonnements solaires (par absorption et diffusion de la lumière) à travers l'atmosphère, ce qui a pour effet potentiel de perturber le bilan radiatif à l'échelle planétaire. Cette perturbation peut provoquer un refroidissement ou un réchauffement de la planète et, par conséquent, les changements climatiques (sécheresse en hiver, neige en été, cyclones, etc.)

Deux phénomènes principaux de pollution ont été mis en évidence à cette échelle :

- **Le « trou dans la couche d'ozone »** : la destruction de l'ozone stratosphérique est due à l'action de certains composés chimiques à base de chlore et de brome, tels que les chlorofluorocarbones (CFC) ou les bromures de méthyle (CH_3Br), résultant des activités humaines. Des mesures sont prises afin de réduire les émissions de telles substances dans l'air comme l'arrêt total de la production de CFC depuis 1994 (protocole de Montréal).
- **Le réchauffement ou dérèglement climatique** dû à l'augmentation des concentrations de Gaz à Effet de Serre. Au cours du XXe siècle, un réchauffement général de la planète de $+ 0,5^\circ\text{C}$ a été observé. Si ce phénomène persiste et s'amplifie, le réchauffement de la planète pourrait entraîner la fonte totale des glaciers et une élévation du niveau moyen des mers.

3.5.10.4. Pluies acides :

Les pluies acides se forment lorsque les émissions industrielles et automobiles, principalement le dioxyde de soufre (SO_2) et les oxydes d'azote (NO_x), sont libérés dans l'atmosphère (**Fig. 3.4**). Ces polluants subissent alors des réactions chimiques complexes sous l'effet de la lumière solaire et de l'humidité, se transformant en acides sulfurique et nitrique. Transportés sur de longues distances par les vents, ces composés acides retombent finalement sur la terre sous forme humide (pluie, neige, brouillard) ou sous forme sèche (particules et gaz). Ce phénomène, dont l'acidité peut atteindre un pH très bas, entraîne des conséquences néfastes pour les écosystèmes aquatiques, les forêts, les sols et les constructions humaines.

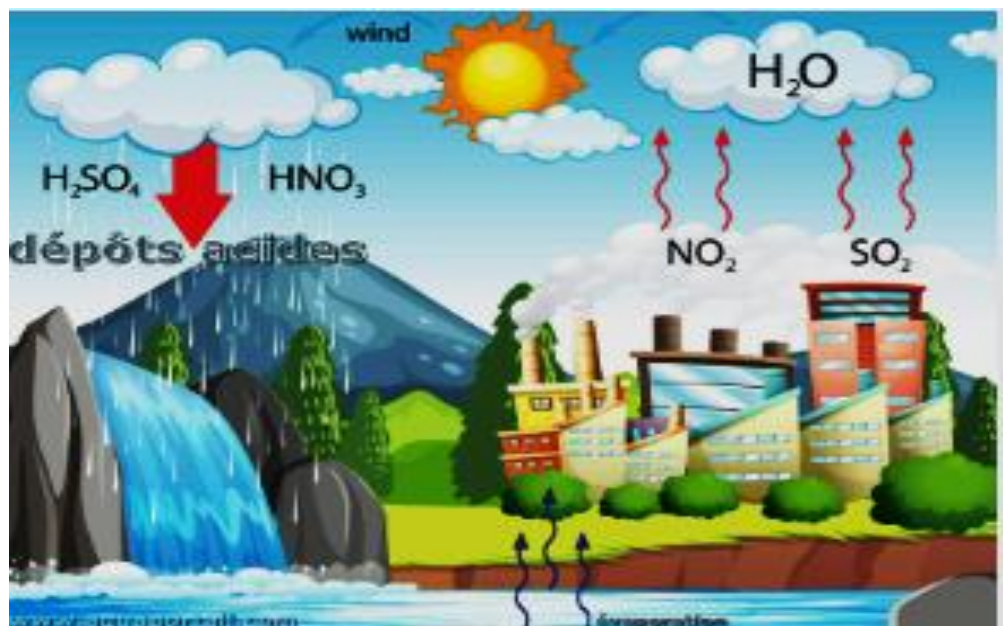


Figure 3.4 : Formation des pluies acides.

Le **tableau 3.4** présenté ci-après donne l'impact des polluants sur l'environnement, la santé humaine.

Tableau 3.4 : Effets des polluants sur la santé et l'environnement.

Polluants	Impact sur l'environnement	Impact sur la santé	Recommandations OMS
Oxyde d'azote (NO_x)	Rôle de précurseur dans la formation d'ozone dans la basse atmosphérique. Contribuent aux pluies acides qui affectent les végétaux et les sols. Contribuent à la concentration de nitrates dans les sols	NO₂ : gaz irritant pour les branches (augmente la fréquence et la gravité des crises chez les asthmatiques et favorise les infections pulmonaires infantiles) NO : non toxique pour l'homme aux concentrations environnementales.	40 µg/m³ (moyenne annuelle) 200 µg/m³ (moyenne horaire)
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et composés volatils (COV)	précurseur dans la formation de l'ozone. précurseur d'autres sous-produits à caractère oxydant (acide nitrique, aldéhydes...).	Effets divers selon les polluants dont l'irritation et diminution de la capacité respiratoire. Considérés pour certains comme cancérogènes pour l'homme (benzène, benzo-(a)pyrène	
Ozone (O₃)	Perturbe la photosynthèse et conduit à une baisse de rendement des cultures. Nécroses sur les feuilles et les aiguilles d'arbres forestiers. Oxydation de matériaux (caoutchoucs, textiles...) Contribue à l'effet de serre.	Gaz irritant pour l'appareil respiratoire et les yeux. Associé à une augmentation de la mortalité au moment des épisodes de pollution.	100 µg/m³ (moyenne sur 8 heures).
Particules ou poussières en suspension (PM)	Contribuent aux salissures des bâtiments et monuments.	Irritation et altération de la fonction respiratoire chez les personnes sensibles. Peuvent être combinées à	Pour les PM_{2.5} : 10 µg/m³ en moyenne par an et 25 µg/m³ en moyenne par jour.

		des substances toxiques voire cancérigènes comme les métaux lourds et des hydrocarbures. Associées à une augmentation de la mortalité pour causes respiratoires ou cardiovasculaires	Pour les PM10 : 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne par an et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne par jour.
Dioxyde de soufre (SO_2)	Contribue aux pluies acides qui affectent les végétaux et les sols. Dégrade la pierre (cristaux de gypse et croutes noires de micro particules cimentées.	Irritation des muqueuses de la peau et voies respiratoires supérieures (toux, gêne respiratoire, troubles asthmatiques)	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (moyenne sur 24 heures) 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (moyenne sur 10 minutes).
Monoxyde de carbone (CO)	Se transforme en gaz carbonique CO_2 et contribue ainsi à l'effet de serre.	Intoxication à fortes teneurs provoquant maux de tête et vertiges (voir le coma et la mort pour une exposition prolongée). Le CO_2 se fixe à la place de l'oxygène sur l'hémoglobine du sang.	10 mg/m^3 moyenne sur 8 heures. 30 mg/m^3 moyenne horaire.
Métaux lourds : plomb (Pb), mercure (Hg), arsenic (As), cadmium (Cd).	Contamination des sols et des aliments. S'accumulent dans les organismes vivants dont ils perturbent l'équilibre biologique.	S'accumulent dans l'organisme, effets toxiques à plus ou moins long terme. Affectent le système nerveux, les fonctions rénales hépatiques, respiratoires).	Pb 10 $\mu\text{g}/\text{L}$, Hg 1.0 $\mu\text{g}/\text{L}$, As 10 $\mu\text{g}/\text{L}$, Cd 3.0 $\mu\text{g}/\text{L}$.

3.5.11. Les procédés de dépollution de l'air pollué :

Les activités industrielles émettent des polluants atmosphériques nocifs pour l'homme, les écosystèmes et les matériaux. Outre les particules, les polluants gazeux, du fait de leur miscibilité avec l'air et de leur caractère parfois indétectable, constituent une menace diffuse. Ces émissions comprennent principalement : les COV, les SO_x (SO_2 , SO_3), les NO_x (NO , NO_2), les oxydes de carbone (CO , CO_2), les acides halogénés (HCl , HF), l'ozone (O_3), les dioxines/furanes et certains métaux lourds volatils.

Il existe deux moyens d'assainir un flux d'air pollué (**Fig. 3.5**): rendre les polluants inoffensifs (techniques destructives) ou les extraire (techniques séparatives).

3.5.11.1. Les techniques destructives : elles sont généralement non sélectives qui détruisent les molécules polluantes.

Exemple : L'oxydation thermique ou catalytique ; les traitements biologiques ; la photocatalyse ; les plasmas.

3.5.11.2. Les techniques séparatives (récupératives): ce sont des techniques qui permettent d'extraire du flux d'air de manière plus ou moins ciblée, les molécules polluantes en préservant leur intégrité.

Exemple : L'absorption, la condensation ; l'adsorption ; les techniques membranaires.

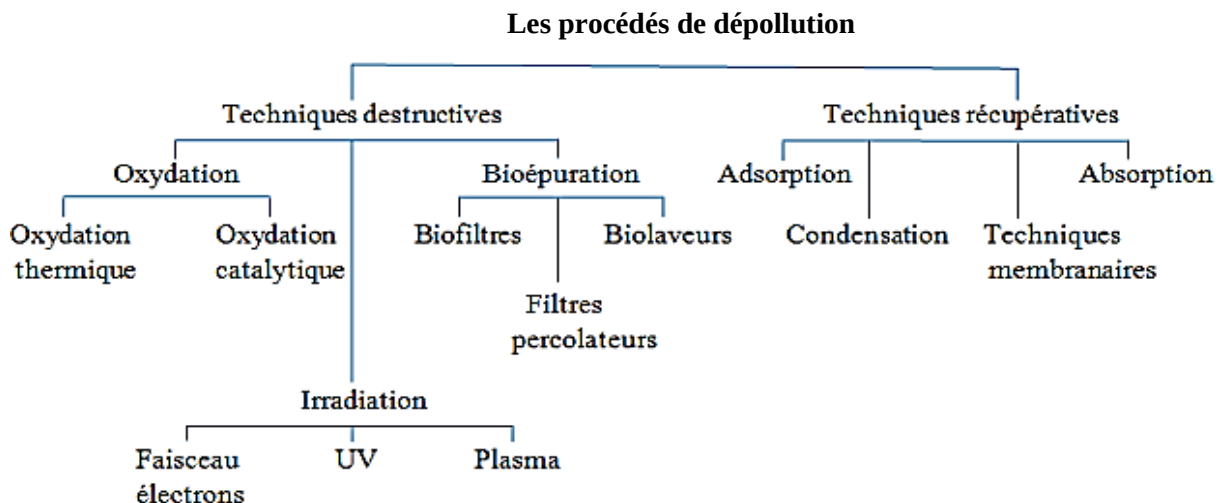


Figure 3.5 : Organigramme simplifié des principales techniques de dépollution de l'air pollué.

La récupération est techniquement possible lorsque le nombre de polluants est limité. Le procédé de récupération représente cependant des coûts d'investissement supérieurs ; il est économiquement intéressant lorsque la substance récupérée est valorisable. La faisabilité économique et technique des différents procédés d'épuration, en fonction de débit et de concentration à traiter peut se résumer par le schéma suivant (**Fig. 3.6**).

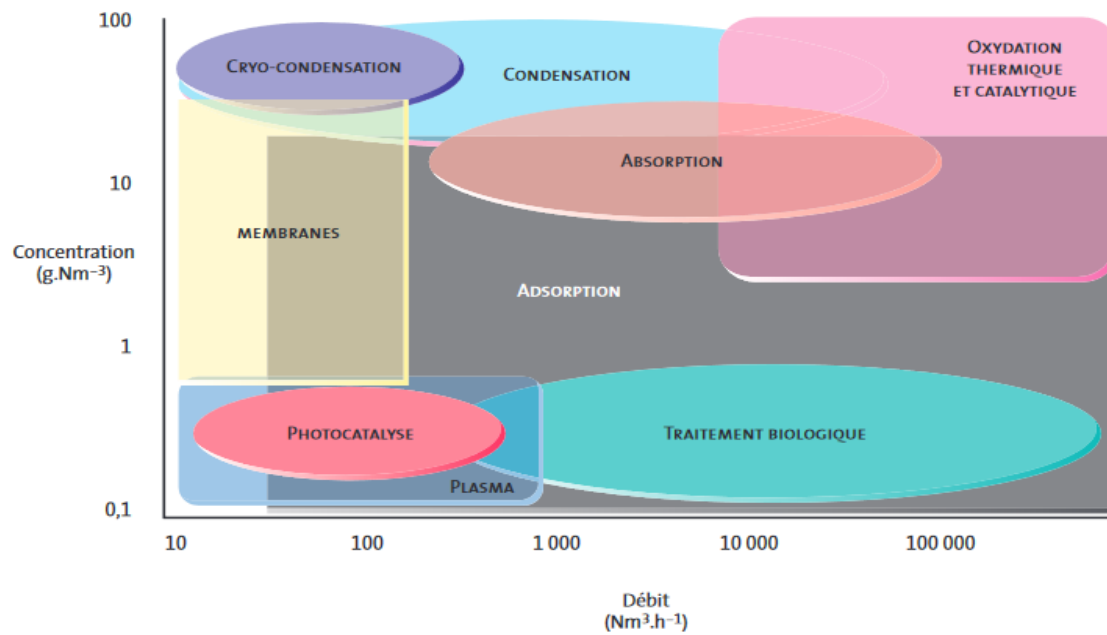


Figure 3.6 : Techniques d'épuration en fonction de la concentration et du débit.

g.N.m^{-3} (grammes par mètre cube normal) : Masse de polluant (en grammes) contenue dans 1 mètre cube d'air ramené aux conditions normales (0 °C, 1 atm).



Chapitre 4

Sol



Chapitre 4

Sol

4.1. Structure de la terre :

La terre est composée de couches concentriques distinctes, différenciées par leur composition chimique et leur état physique (solide, liquide, ductile). Ces couches sont, de l'extérieur vers l'intérieur (**Fig. 4.1**) :

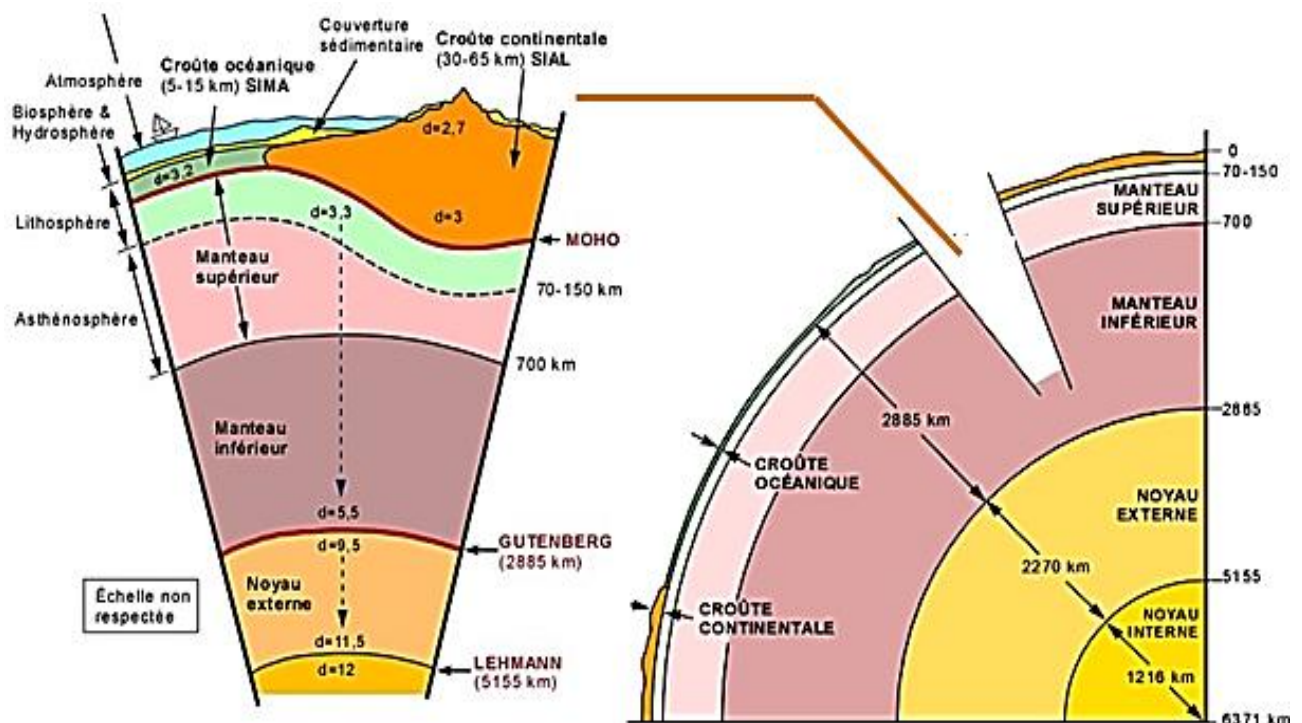


Figure 4.1 : Structure de la terre.

4.1.1. La croûte terrestre :

4.1.1.1. La croûte continentale:

La croûte continentale solide, épaisseur moyenne (30 à 70 km) essentiellement granitique et surmontée par endroits de roches sédimentaires. Elle est plus épaisse que la croûte océanique. Elle était anciennement appelée SIAL (Silicium + Aluminium).

4.1.1.2. La croûte océanique :

La croûte océanique est une couche solide et relativement fine, dont l'épaisseur varie entre 5 et 15 kilomètres. Elle est principalement constituée de roches basaltiques, une composition riche en silicium et magnésium qui lui vaut également le nom de SIMA.

4.1.2. Le manteau :

C'est la couche la plus épaisse, représentant 82% du volume de la terre, son épaisseur est de 2900 km. Il est principalement composé de roches silicatées riches en fer et magnésium (péridotite). Le manteau se divise en manteau inférieur solide et manteau supérieur principalement plastique

4.1.2.1. Le manteau supérieur :

Le manteau supérieur est principalement constitué de roches comme la péridotite. Bien que solide jusqu'à environ 700 km de profondeur, il est moins visqueux et plus ductile que le manteau inférieur, permettant des déformations lentes sur de vastes échelles de temps. Sa limite avec la croûte terrestre est marquée par **la discontinuité de Mohorovicic**.

4.1.2.2. Le manteau inférieur

Le manteau inférieur s'étend d'environ 700 km à 2900 km de profondeur. À l'état solide, sa composition diffère nettement de celle de la croûte continentale : il est peu riche en silice mais très riche en oxyde de magnésium (MgO). D'un point de vue chimique, on le qualifie donc de manteau SIMA (pour Silicium et Magnésium), par opposition au SIAL (Silicium et Aluminium) caractéristique de la croûte continentale.

a. La lithosphère : Il s'agit de l'enveloppe rigide externe de la terre. Elle comprend la croûte terrestre (divisée en plaques tectoniques) et la partie supérieure du manteau, jusqu'à une profondeur variant entre 100 et 200 km. C'est à cette limite que les roches mantelliques (péridotites) commencent à se ramollir sous l'effet de la température et de la pression. La lithosphère intègre notamment **la discontinuité de Mohorovicic**, qui marque la transition entre la croûte et le manteau.

b. L'asthénosphère : Située juste sous la lithosphère, cette couche du manteau supérieur est partiellement ductile et moins rigide. Elle permet, sur des échelles de temps géologiques, les mouvements lents de convection qui entraînent le déplacement des plaques lithosphériques.

4.1.3. Le noyau est composé de 2 couches très différentes : le noyau externe liquide et le noyau interne solide.

4.1.3.1. Le noyau externe : est la couche terrestre située entre environ 2900 et 5155 km de profondeur. Il est principalement à l'état liquide et composé d'environ 80 à 85 % de fer, de 5 % de nickel, ainsi que de 10 à 12 % d'un ou plusieurs éléments légers non encore clairement identifiés (soufre, oxygène, silicium ou carbone). Sa température moyenne atteint près de 4000 °C, sa densité est d'environ 10, et sa viscosité reste faible, estimée entre 1 et 100 fois celle de l'eau. Sa limite supérieure correspond à **la discontinuité de Gutenberg**, qui marque la transition entre le manteau et le noyau.

4.1.3.2. Le noyau interne (ou « graine ») est la sphère solide située au centre de la terre. Il est essentiellement composé d'un alliage métallique de fer (environ 80 %) et de nickel (environ 20 %), ce qui lui vaut l'appellation abrégée **NIFE**. Bien que sa température dépasse 6000 °C, une pression gigantesque d'environ 3,5 millions de bars (350 GPa) le maintient à l'état solide. Sa densité est d'environ 13. Il se forme par cristallisation progressive du fer présent dans le noyau externe liquide. Sa limite supérieure est marquée par **la discontinuité de Lehmann**, qui sépare le noyau interne solide du noyau externe liquide.

4.2. Le sol :

4.2.1. Définition :

La lithosphère (du grec lithos, pierre, et sphaira, sphère) est l'enveloppe rigide externe de la terre, d'une épaisseur moyenne d'environ 100 km. Elle est constituée de la croûte terrestre solide et de la partie supérieure du manteau.

Sa couche la plus superficielle forme le sol. Celui-ci correspond à la surface meuble de la croûte, d'une épaisseur variant de quelques décimètres à quelques mètres. Il s'agit d'une interface dynamique entre l'atmosphère, l'hydrosphère et la roche mère sous-jacente.

4.2.2. Constituants du sol :

Le sol n'est pas un simple matériau inerte, mais un système complexe et hétérogène, composé d'un mélange de substances minérales et organiques. Sa formation et son évolution résultent de l'interaction constante de facteurs climatiques, hydrologiques, biologiques (organismes et végétation) et géologiques. C'est dans cette fine pellicule que se concentre et se développe l'essentiel de la vie terrestre.

Le sol contient des composés de diverses sortes :

- Composés inorganiques (minéraux),
- Matière organique morte et en partie décomposée,
- Organismes de sols,
- Air contenu dans le sol et eau présente dans le sol, dans laquelle des composés inorganiques et organiques sont en partie dissous (appelée « solution du sol »).

Un sol modèle typique situé dans une zone verte contient environ **25% d'air** et **25% d'eau** par rapport à son volume ; **45% sont des composés minéraux** et **5% sont de nature organique**. Il existe des sols contenant plus de 30% de substances organiques (Fig. 4.2).

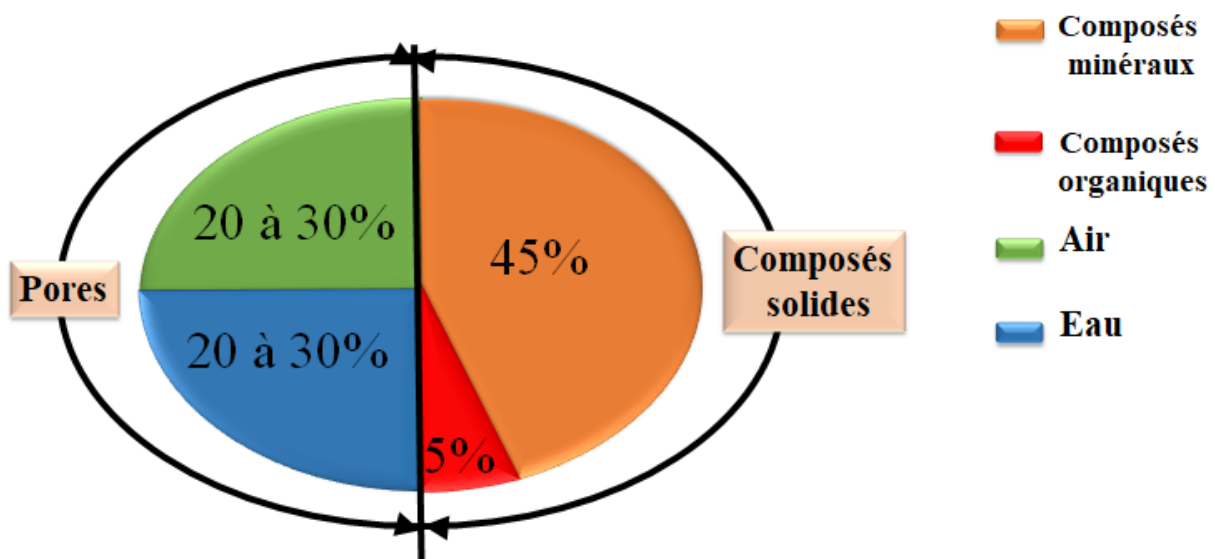


Figure 4.2 : Constituants du sol.

Le développement, la structure et la végétation d'un sol dépendent de plusieurs facteurs interdépendants (Fig. 4.3). Le climat détermine les apports en eau et en air à partir de l'atmosphère, ce qui conditionne directement la vie du sol. Dans les couches supérieures, l'air circule librement, offrant un milieu aérobie essentiel aux microorganismes, à la respiration des racines et aux champignons mycorhiziens qui vivent en symbiose avec les plantes. En revanche, plus on s'enfonce dans le sol, plus la teneur en oxygène diminue, créant un milieu anaérobie dans les profondeurs. Cette stratification verticale s'accompagne d'une évolution de la composition du sol : les éléments biotiques et l'humus prédominent en surface, tandis que les éléments minéraux deviennent majoritaires en profondeur.

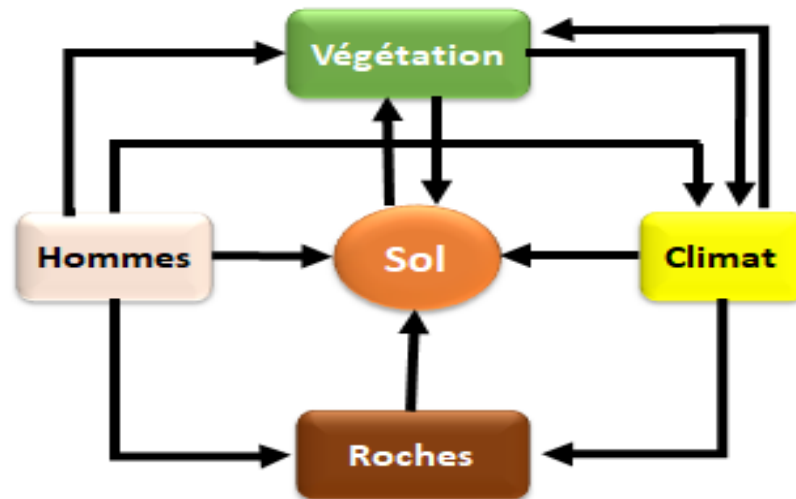


Figure 4.3 : Synergie entre quelques facteurs caractéristiques pour le développement des sols.

4.2.3. Propriétés du sol :

Le sol forme un volume complexe dont la compréhension nécessite une observation en profondeur. Une coupe dans le terrain, ou profil pédologique, révèle directement cette réalité : on y observe plusieurs couches superposées, distinctes par leur couleur et leur structure, appelées horizons.

L'horizon le plus profond correspond généralement à la roche mère, sur laquelle se sont formées et accumulées les couches supérieures au fil du temps. L'ensemble de ces horizons et leur agencement constitue précisément le profil du sol, dont les caractéristiques varient considérablement selon les types de sols.

Pour caractériser chaque horizon, les pédologues analysent un ensemble de propriétés morphologiques telles que :

- Sa composition (constituants),
- Sa texture,
- Sa structure,
- Sa couleur,
- Sa position relative par rapport aux autres horizons.

La combinaison de ces critères a permis de définir plus de 70 types d'horizons différents. Chacun est identifié par un code international de lettres, comme O, A, B, E, C ou R, selon sa nature et sa position dans le profil (**Fig. 4.4**).

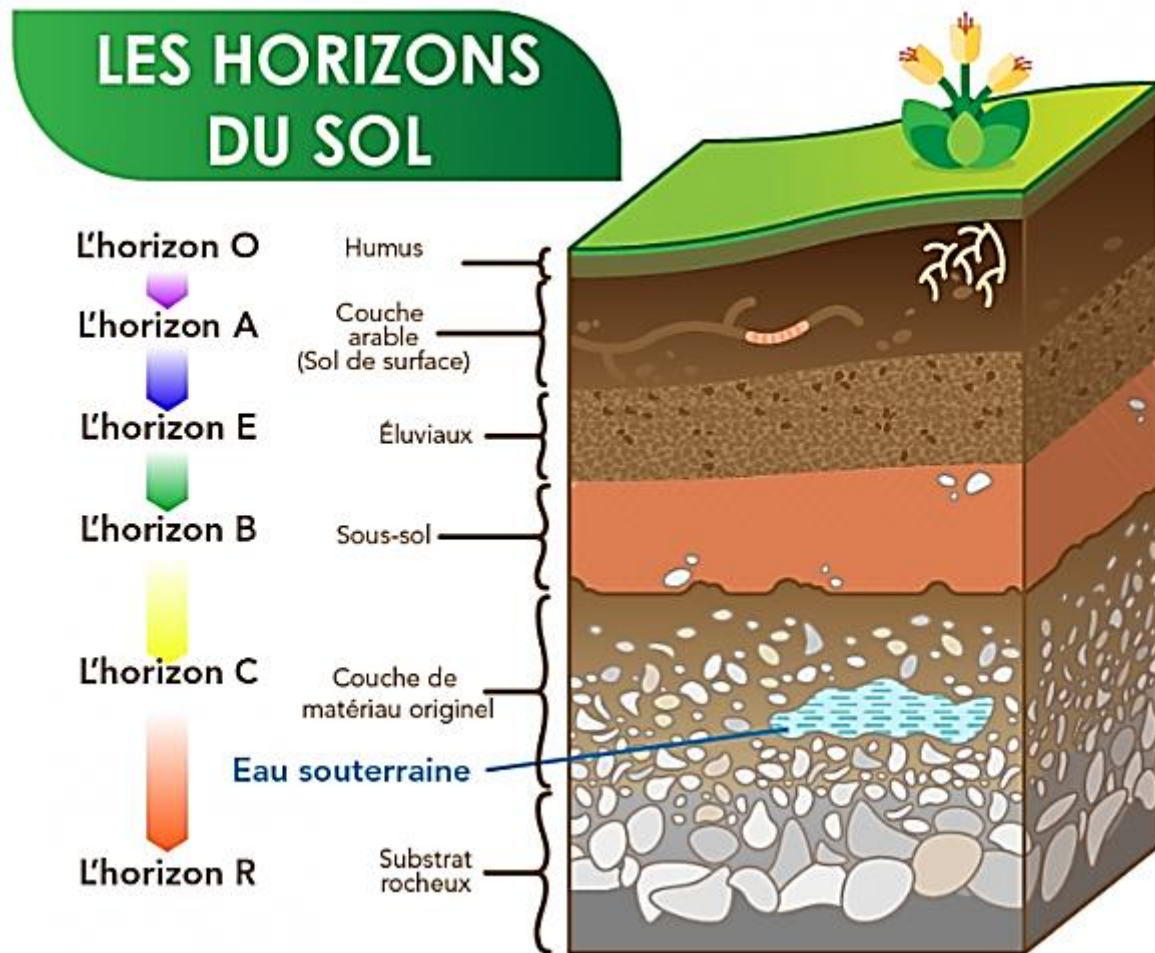


Figure 4.4 : Horizons et différenciation des sols.

Voici quelques-uns des horizons les plus courants:

- **L'horizon O (ou humus)** est essentiellement composé de matière organique, comme des feuilles ou des insectes en décomposition. En fonction du sol, la couche O peut être très épaisse ou inexistante.
- **L'horizon A (ou couche arable ou sol de surface)** est essentiellement constitué de minéraux et de matières organiques décomposées. C'est là que poussent la plupart des racines des végétaux.
- **L'horizon E est aussi appelé horizon éluvial.** L'argile, les minéraux et les matières organiques s'échappent de cette couche. Le sable et les particules de quartz du limon restent. On le trouve souvent dans les sols plus âgés et ceux des forêts.
- **L'horizon B (ou sous-sol)** est constitué d'argile et de dépôts minéraux ainsi que de matières organiques, mais en quantité moindre que les couches supérieures.

- **L'horizon C (ou couche de matériau originel)** est constitué de roches quasiment non altérées et de très peu de matière organique. C'est à partir de lui que le sol se développe. Aucune racine ne pousse dans cette couche.
- **L'horizon R (ou substrat rocheux)** est constitué d'une masse de roches comme le granit, le calcaire ou le grès.

4.2.3.1. Propriétés physiques :

A. Structure :

La structure constitue un critère de classification important pour les sols, car elle renseigne sur leur degré d'évolution.

On distingue plusieurs types de structures, classés ici par taille croissante des agrégats :

- Absence de structure (massive ou compacte)
- Structure pulvérulente (sol meuble et fin)
- Structure grumeleuse (agrégats arrondis de 1 mm à 1 cm)
- Structure polyédrique (agrégats anguleux de quelques centimètres)
- Structure prismatique (éléments allongés dépassant 15 cm)

Par ailleurs, la présence, l'abondance et l'état des éléments grossiers (graviers, concrétions) constituent un autre élément important. Leur observation permet d'évaluer l'avancement de l'altération du sol et donne des indications sur la nature de la roche mère d'origine.

B. Couleur :

La couleur de chaque horizon d'un sol est déterminée avec précision à l'aide d'une charte de couleur, en spécifiant si l'échantillon est observé à l'état humide ou sec. Cette caractéristique est fondamentale pour différencier les horizons et constitue un indicateur clé de plusieurs paramètres liés à la formation et à l'évolution du sol (par exemple, la présence de matière organique, d'oxydes de fer ou le degré d'hydromorphie).

C. Texture :

Les propriétés physiques d'un sol dépendent largement de la taille des particules minérales qui le composent. Ces particules sont classées en familles granulométriques distinctes (**Fig. 4.5**):

- **Argiles** : diamètre < 0.002 mm (< 2 μ m)
- **Limons (silts)** : diamètre entre 0.002 et 0.05 mm (2 - 50 μ m)
- **Sables fins** : diamètre entre 0.05 et 0.2 mm (50 - 200 μ m)

- **Sables grossiers:** diamètre entre 0.2 et 2 mm (200 - 2000 μm)
- **Éléments grossiers (graviers, cailloux) :** diamètre > 2 mm

La classe texturale d'un sol (ex. : argileux, limoneux, sableux) est définie par le pourcentage relatif de ces différentes fractions dans l'échantillon.

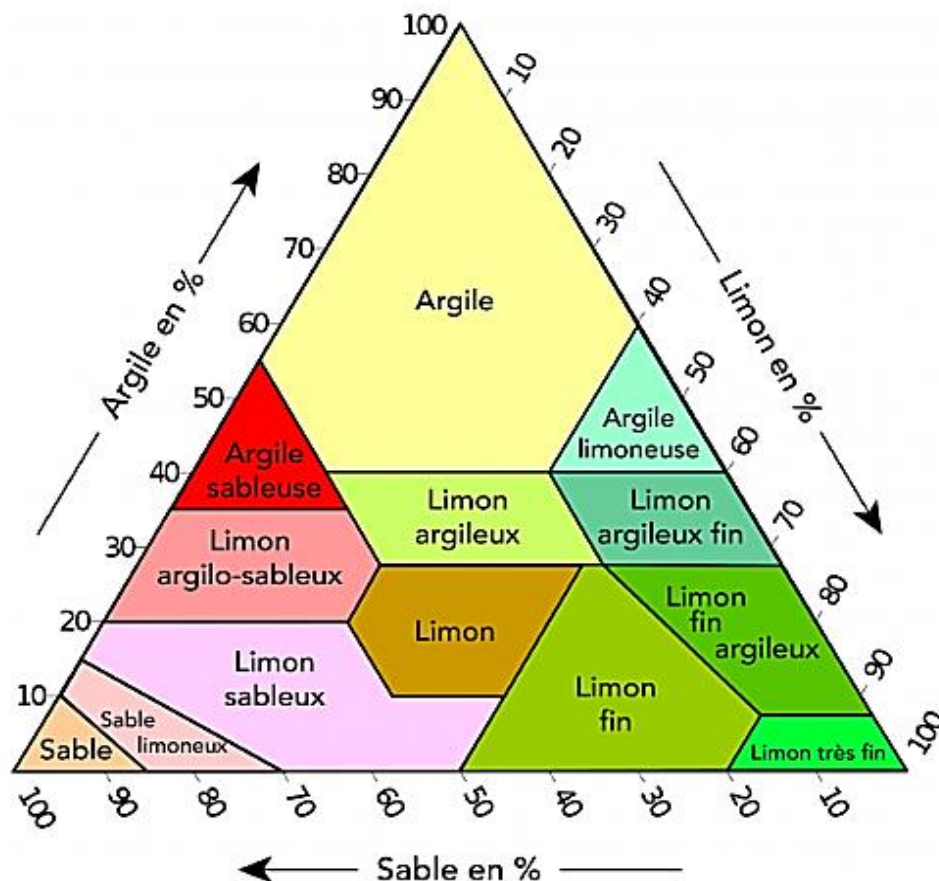


Figure 4.5 : Triangle de textures des sols.

D. Porosité : Il s'agit du volume des vides. Ils sont remplis d'air ou d'eau, en pourcentage du volume total. Les capacités d'écoulement et de rétention d'un substrat sont influencées par la porosité.

E. Perméabilité du sol : La perméabilité du sol désigne sa capacité à permettre à l'eau de pénétrer dans les couches inférieures ; elle varie en fonction de la texture et de la structure du sol

4.2.3.2. Propriétés chimiques :

A. Le pH : Le pH du sol est une mesure de son acidité ou de sa basicité, déterminée par la concentration d'ions d'hydrogène (H^+) dans le sol. Les valeurs de pH rencontrées pour les sols vont de 4,5 à 8,5.

Le pH du sol influence la disponibilité des nutriments pour les plantes. Certains éléments essentiels comme l'azote, le phosphore et le potassium sont mieux disponibles dans des plages de pH spécifiques. Par exemple, un pH légèrement acide à neutre est souvent optimal pour la plupart des plantes, car il favorise l'absorption des nutriments essentiels.

B. La capacité d'échange cationique (CEC) : La Capacité d'Échange Cationique (CEC) est une propriété chimique fondamentale du sol. Elle mesure la quantité totale de cations (ions positifs) que le sol peut retenir sur ses particules et échanger avec la solution du sol (l'eau contenue entre les particules). Les cations principaux incluent le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le potassium (K^+), le sodium (Na^+), ainsi que des ions hydrogène (H^+) et aluminium (Al^{3+}).

La valeur de la CEC dépend principalement de deux constituants du sol :

- ✓ La matière organique (notamment l'humus) : Possède une CEC très élevée en raison de sa grande surface et de ses nombreux sites chargés négativement.
- ✓ Les argiles : Leur structure en feuillets leur confère également une CEC élevée, bien que variable selon le type d'argile (ex : montmorillonite > kaolinite).

La mesure de la CEC est importante pour comprendre la capacité d'un sol à fournir des nutriments aux plantes et à maintenir sa fertilité (**Fig.4.6**).

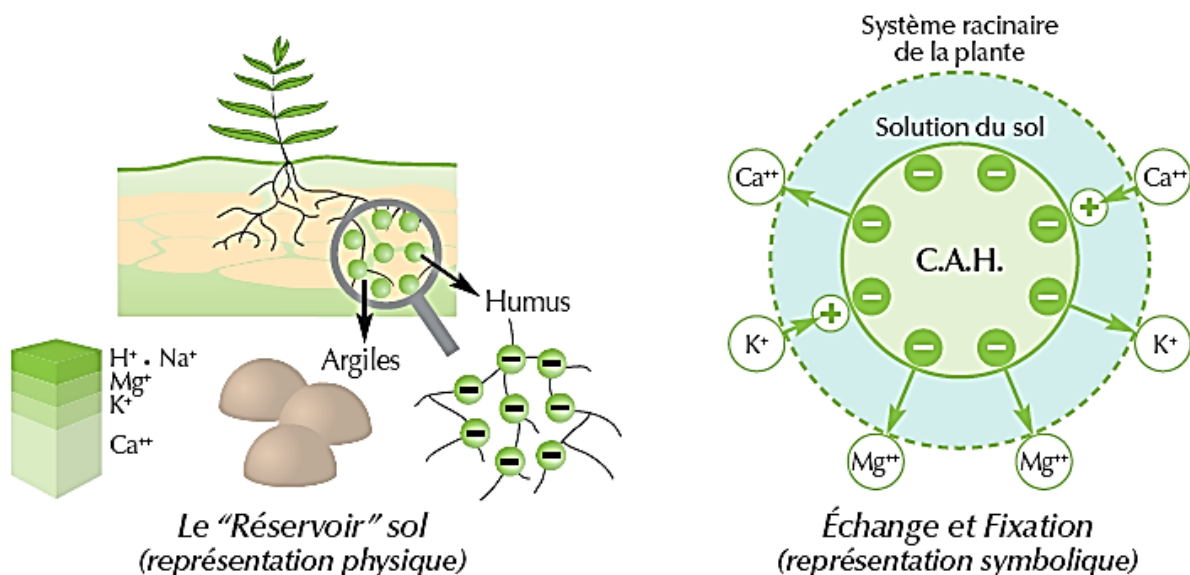


Figure 4.6 : Capacité d'échange cationique du sol.

Note : L'humus est une substance sombre et riche en éléments nutritifs qui améliore la structure du sol, sa rétention d'eau et sa capacité à fournir des nutriments aux plantes.

4.2.4. Importance et fonctions du sol :

Bien que d'une épaisseur infime à l'échelle de la terre, le sol est une enveloppe indispensable : il constitue l'espace vital et le fondement de l'existence pour les humains, les animaux, les plantes et les microorganismes. Cette couche fragile est donc un bien commun qui exige une protection absolue.

Le sol remplit, dans le cycle naturel, des fonctions vitales et multiples :

- Il est le support de la vie végétale et fournit les substances nutritives (organiques et minérales) essentielles. Le sol perd continuellement une partie de ces substances nutritives à travers les plantes, mais aussi par émission de gaz, par le lessivage avec l'eau, l'effritement ou l'érosion (**Fig. 4.7**). Ces pertes sont compensées par la minéralisation provenant des substances organiques mortes, par l'érosion des roches et par les apports de l'atmosphère (par exemples la fixation de l'azote). De plus les substances nutritives qui sont enlevées lors des récoltes souvent remplacées par les engrais.
- Il régule le cycle de l'eau : en contrôlant l'infiltration et l'écoulement des précipitations, il alimente les nappes phréatiques et influence l'évaporation vers l'atmosphère.
- Il agit comme un filtre et un épurateur naturel : il retient et dégrade biologiquement les substances organiques et les polluants, contribuant à la purification de l'eau qui rejoint les nappes souterraines.
- Il est un habitat et une base nutritive pour une immense biodiversité (microorganismes, faune), qui assure la décomposition de la matière organique et le recyclage des nutriments.
- Il sert de support à nos activités : il est le fondement de la production alimentaire et de la culture des matières premières renouvelables.
- Il joue un rôle crucial de tampon et de transformation face aux polluants issus de l'agriculture, de l'industrie, des transports et de l'habitat (**Fig. 4.8**).

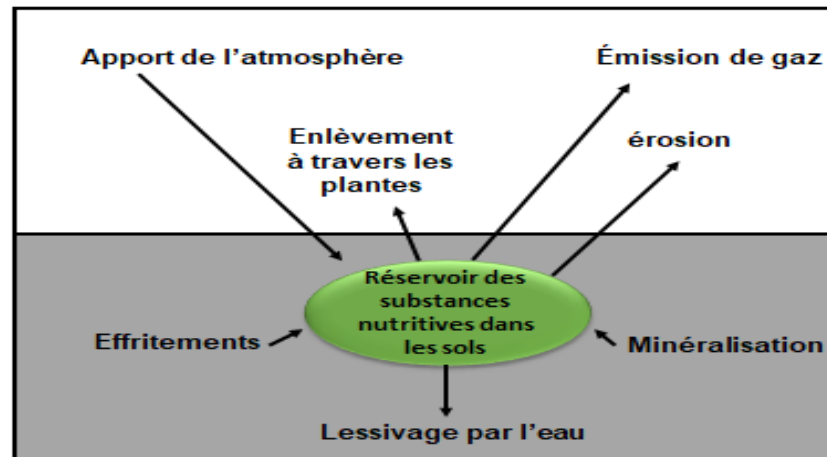


Figure 4.7 : Influence du stockage des substances nutritives dans le sol.

Trois groupes de polluants sont particulièrement nuisibles pour le sol :

- Des sources d'acide comme SO_2 ou NO_x : ils réduisent la capacité tampon des sols et accélèrent ainsi leur acidification ;
- Les métaux lourds : ils ne sont pas dégradables et se concentrent dans les sols ;
- De nombreux produits chimiques organiques, particulièrement ceux contenant du chlore : ils ne sont que très lentement dégradés.

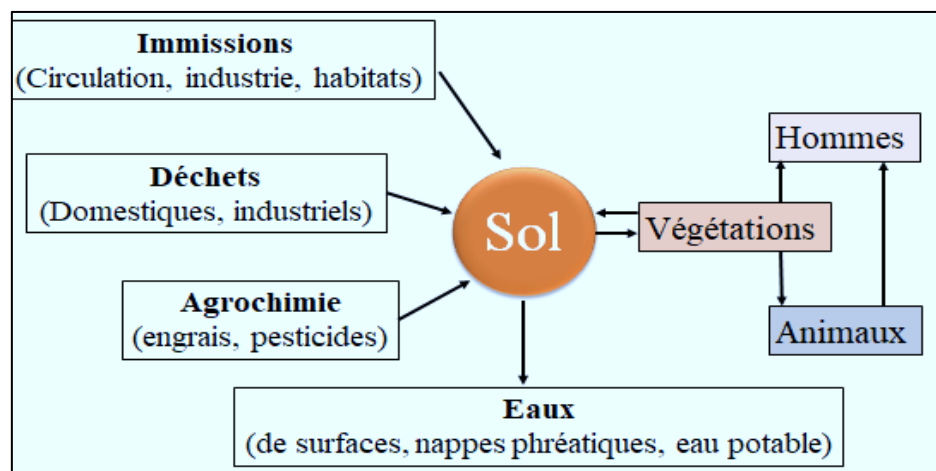


Figure 4.8 : Le sol en tant que réservoir, tampon et transformateur des polluants.

4.2.5. Pollution du sol :

La pollution des sols désigne l'altération des propriétés naturelles du sol par des substances chimiques, des déchets ou d'autres matériaux dangereux. Ces substances sont souvent le résultat d'activités humaines, comme l'industrie, l'agriculture ou l'urbanisation. Elles affectent la qualité du sol. Les polluants proviennent de sources diverses, notamment des déchets industriels, des produits phytosanitaires utilisés en agriculture, des métaux lourds,

ainsi que des produits chimiques libérés accidentellement ou intentionnellement dans l'environnement.

On dit qu'un sol est pollué lorsqu'il contient une concentration anormale de composés chimiques potentiellement dangereux pour la santé, des plantes ou des animaux.

La contamination se fait alors soit par voie digestive (consommation d'eau polluée par exemple), ou par voie respiratoire (poussières des sols pollués dans l'atmosphère).

4.2.5.1. Formes de pollution des sols :

En fonction de leur origine et de leur étendue spatiale, les pollutions du sol peuvent être classées en deux grandes catégories :

A. Pollutions diffuses : Ces pollutions se caractérisent par une dissémination sur de vastes surfaces, avec des concentrations généralement faibles mais continues. Elles résultent principalement de :

- L'utilisation agricole d'intrants (engrais, pesticides, lisiers) par épandage.
- Les retombées atmosphériques de polluants issus d'activités urbaines, industrielles ou du trafic routier.

Les pollutions diffuses par les pesticides sont particulièrement suivies en raison de leur impact sur les écosystèmes et la santé. La dispersion et l'accumulation lente de ces substances conduisent à une contamination homogène sur de grandes étendues, ce qui correspond à la notion de « sites uniformément contaminés » (norme NF ISO 11074-1, 1997).

B. Pollutions ponctuelles ou accidentelles : À l'inverse, ces pollutions sont localisées dans l'espace et dans le temps, souvent liées à un événement précis. Elles se manifestent par une forte concentration de substances dangereuses sur une surface restreinte. Leur origine est généralement :

- Un déversement ou une fuite accidentelle (ex. : hydrocarbures, produits chimiques).
- Un dépôt localisé de déchets (ancienne décharge, site industriel).

Ces situations génèrent des « sites localement contaminés » (norme NF ISO 11074-1, 1997), où la pollution est concentrée en un point précis du sol et du sous-sol.

4.2.5.2. Sources de pollution du sol :

A. Sources naturelles :

Plusieurs phénomènes naturels contribuent à la modification ou à la contamination de la composition des sols (**Fig. 4.9**):



Figure 4.9 : Sources naturelles de la pollution du sol.

- ✓ Le volcanisme ;
- ✓ La chute des météorites ;
- ✓ L'altération de la roche mère ;
- ✓ Les pluies acides ;
- ✓ Les incendies de forêts ;
- ✓ Érosion.

Ces sources sont généralement peu fréquentes et leurs impacts restent le plus souvent localisés. Il existe néanmoins des cas de sols naturellement concentrés en éléments polluants, par exemple en métaux lourds ou en hydrocarbures.

B. Sources anthropiques :

Les activités humaines constituent la principale cause de pollution des sols, avec des conséquences souvent plus graves et étendues. Cette pollution peut être **directe** (dépôt de substances sur ou dans le sol) ou **indirecte** (contamination via l'air ou l'eau).

Principaux vecteurs de pollution anthropique :

- ✓ Déversements ou fuites accidentels (hydrocarbures, produits chimiques) ;
- ✓ Infiltration de lixiviats provenant de décharges ou de sites de stockage de déchets ;
- ✓ Epandage excessif de produits agricoles (pesticides, herbicides, engrais) ;
- ✓ Décharges sauvages ou non contrôlées de déchets ménagers et industriels ;
- ✓ Percolation d'eaux souterraines ou de surface déjà contaminées ;
- ✓ Rupture de réservoirs de stockage enterrés (carburant, produits chimiques).

Cette pollution est particulièrement préoccupante car elle introduit dans l'environnement des quantités massives de substances, qu'il s'agisse :

- De produits biodégradables en quantités excédant la capacité d'auto-épuration du sol ;
 - De composés synthétiques à longue durée de vie (demi-vie élevée) ;
 - De produits persistants et non biodégradables (ex. : certains plastiques, métaux lourds)
- (Fig.4.10).

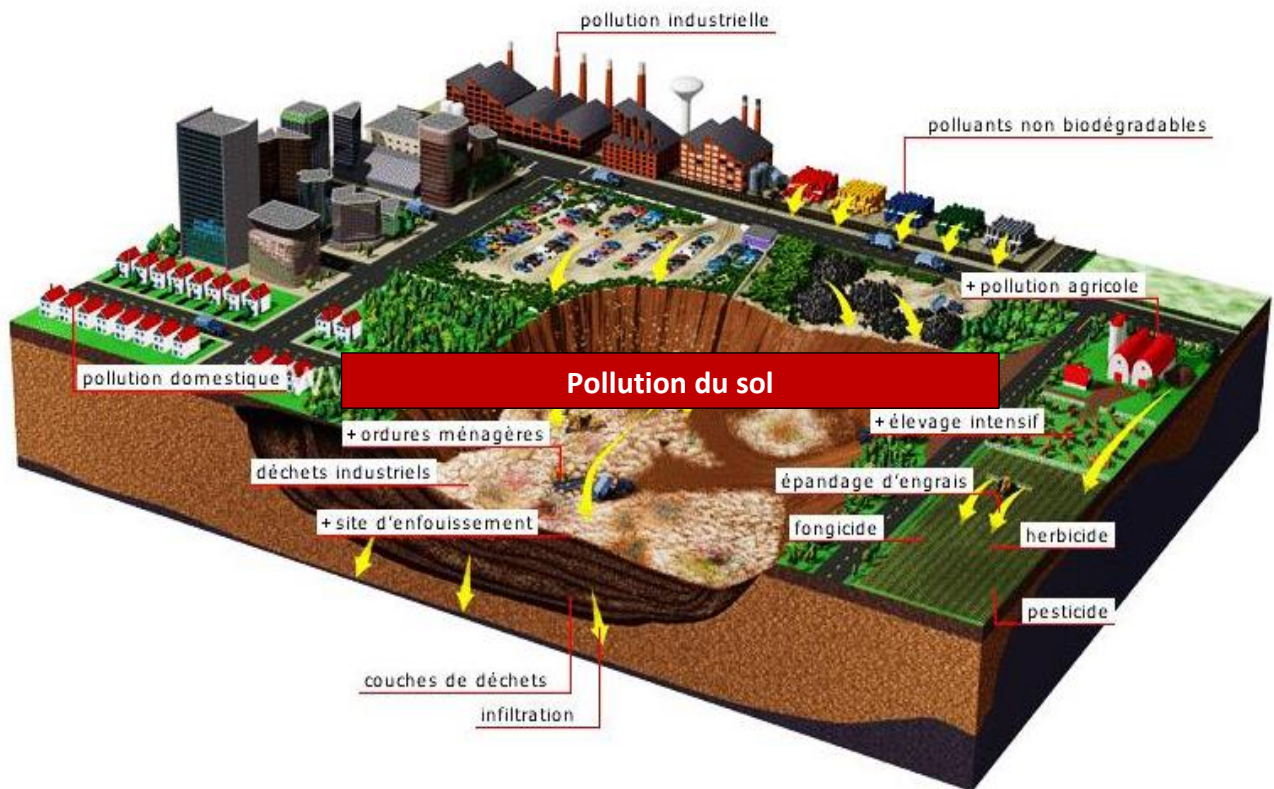


Figure 4.10 : Sources anthropiques de la pollution du sol.

4.2.5.3. Polluants présentés dans le sol :

Les polluants du sol les plus courants sont :

A. Polluants inorganiques (ou minéraux):

A.1. Métaux lourds et métalloïdes : Arsenic (As), cadmium (Cd), chrome (Cr), cuivre (Cu), mercure (Hg), nickel (Ni), plomb (Pb), zinc (Zn). Ils sont persistants, s'accumulent dans la chaîne alimentaire et sont souvent issus de l'industrie, des mines ou de certains produits agricoles.

A.2. Sels solubles : Chlorures, nitrates, sulfates. Une salinisation excessive (par irrigation ou remontée capillaire) nuit à la fertilité et à la structure du sol.

A.3. Nutriments en excès : Principalement les nitrates (NO_3^-) et les phosphates (PO_4^{3-}). Provenant des engrais et des effluents d'élevage, ils peuvent contaminer les eaux et déséquilibrer les écosystèmes (eutrophisation).

A.4. Acides : Issus des pluies acides ou de rejets industriels, ils modifient le pH et libèrent des éléments toxiques

B. Polluants organiques :

B.1. Hydrocarbures pétroliers : Essence, diesel, huiles, goudrons (famille des HAP - Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques-). Provenant des fuites de réservoirs, accidents industriels ou activités minières.

B.2. Solvants chlorés : Utilisés dans les dégraissants, nettoyage à sec (ex. : trichloréthylène, perchloroéthylène). Très mobiles et persistants dans les sols et les nappes.

B.3. Pesticides : Herbicides, insecticides, fongicides. Certains sont rémanents (ex. : DDT-dichlorodiphényltrichloroéthane-, atrazine, lindane) et peuvent être toxiques pour la faune du sol et les organismes non-cibles.

B.4. PCB (Polychlorobiphényles) et dioxines : Composés organiques chlorés très stables, utilisés autrefois dans les transformateurs électriques ou formés lors de combustions. Très toxiques et bioaccumulables.

B.5. Polluants organiques émergents : Résidus pharmaceutiques, hormones, produits de soins personnels, plastifiants (phtalates, bisphénols). Leur impact à long terme est encore mal connu.

C. Polluants physiques et autres :

C.1. Déchets solides : Plastiques, verre, métaux, gravats. Ils modifient la structure du sol et gênent son fonctionnement.

C.2. Polluants biologiques : Agents pathogènes (bactéries, virus, parasites) issus des déjections animales, des eaux usées ou des déchets mal compostés.

C.3. Substances radioactives : Césium-137, strontium-90, uranium, provenant d'accidents nucléaires, d'activités minières ou de déchets.

4.2.5.4. Effets de la pollution du sol :

A. Effets de la pollution des sols sur la santé humaine :

La pollution des sols constitue une menace insidieuse et majeure pour la santé publique. Les substances toxiques accumulées dans les sols ne s'y limitent pas ; elles

s'introduisent dans la chaîne alimentaire et l'environnement, exposant les populations à des risques graves et variés.

Les principaux mécanismes d'impact sur la santé sont les suivants :

- **Contamination de la chaîne alimentaire :** Les cultures absorbent les polluants (métaux lourds, hydrocarbures, produits chimiques persistants) présents dans le sol où elles poussent. La consommation régulière de ces aliments contaminés entraîne une bioaccumulation de toxines dans l'organisme humain. Cette exposition chronique est identifiée comme un facteur de risque contributif dans l'augmentation de l'incidence de certains cancers et de diverses maladies chroniques.
- **Altérations génétiques et maladies congénitales :** L'exposition prolongée à un mélange de polluants, notamment via l'eau ou les poussières contaminées, peut exercer des effets mutagènes ou tératogènes. Cela signifie qu'elle est susceptible d'affecter l'intégrité du matériel génétique, augmentant les risques de maladies congénitales et de troubles du développement chez les nouveau-nés.
- **Risques indirects et intoxication alimentaire :** Le bétail paissant sur des terres polluées ingère à son tour des substances nocives, qui se concentrent dans la viande, le lait ou les œufs. Cette voie constitue un vecteur d'exposition secondaire important pour l'homme. Par ailleurs, des agents pathogènes ou des toxines biologiques peuvent persister dans des sols dégradés, représentant un risque d'intoxication alimentaire sur le long terme.

B. Effets de la pollution des sols sur la croissance des plantes:

La pollution du sol perturbe profondément les conditions nécessaires à la croissance des plantes et à l'équilibre écologique, entraînant une cascade d'effets négatifs.

Altération des conditions de croissance et de la santé des plantes : La modification radicale et rapide de la composition chimique du sol dépasse les capacités d'adaptation de la plupart des végétaux. Cette perturbation se manifeste par :

- **Baisse de fertilité et de productivité :** Les sols contaminés voient leur rendement agricole diminuer. Les cultures qui y parviennent à pousser produisent souvent des fruits et légumes carenciels en nutriments essentiels et, plus grave, porteurs de substances toxiques (métaux lourds, résidus de pesticides), posant un risque direct pour la santé des consommateurs.
- **Dégradation de la structure physique :** La pollution affecte les organismes du sol, tels que les vers de terre, dont l'activité est cruciale pour l'aération, le drainage et la

structuration de la terre. Leur disparition entraîne un compactage du sol et une diminution de sa capacité à retenir l'eau et les nutriments.

C. Les conséquences économiques de la pollution des sols :

La pollution des sols dissémine ses répercussions financières, et le contrecoup économique prend différents aspects.

- **La dévaluation foncière** : la valeur des terres polluées chute et rend difficile leur vente ou leur utilisation à des fins industrielles ou résidentielles. Propriétaires fonciers, mais aussi collectivités locales, accusent une perte de leurs revenus issus de leur activité.
- **Les coûts de dépollution** : la réhabilitation des sites soumis aux pollutions nécessite des investissements lourds. Le nettoyage des terres demande des technologies sophistiquées, notamment le retrait des substances toxiques et la réhabilitation écologique des sols.
- **La baisse de productivité** : la piètre qualité des sols réduit les récoltes. Les sites aux fortes pollutions peuvent même ne plus être cultivables. Les agriculteurs accusent des pertes financières. L'importation de produits alimentaires pourrait pallier le manque, mais elle augmente les prix pour les consommateurs.
- **Les coûts de santé publique** : le traitement des maladies causées par la contamination de sols dès lors pollués, impose une charge sur les systèmes de santé. Les gouvernements doivent investir dans des campagnes de dépistage, des soins de santé pour les populations affectées, et des mesures de prévention contre les pollutions diverses.

4.2.5.5. Lutter contre la pollution des sols : des actions à tous les niveaux

La pollution des sols n'est pas une fatalité. Des solutions existent pour la prévenir et y remédier, grâce à l'action collective et individuelle.

A. Prévenir la contamination

- **Gestion durable des déchets** : Il est crucial d'améliorer le traitement des déchets domestiques, industriels et chimiques. Les déchets électroniques doivent être recyclés via des technologies modernes (filtration, valorisation énergétique de la biomasse) plutôt qu'exportés vers des décharges sauvages.
- **Agriculture plus verte** : Réduire l'usage des pesticides de synthèse en favorisant l'agriculture biologique et les pesticides naturels, comme le prévoit la stratégie Écophyto 2030, préserve la santé des sols.

- **Cadre réglementaire strict** : Le renforcement des lois pour limiter les rejets industriels et l'application rigoureuse du principe pollueur-payeur sont essentiels. Les entreprises doivent être responsables de la prévention et de la dépollution.

B. Remédier et surveiller

- **Réhabiliter les sites pollués** : Après une évaluation précise de la contamination, des techniques comme la bioremédiation (utilisation de plantes ou de microbes) permettent de purifier les sols.
- **Surveillance et transparence** : Des outils comme le Secteur d'Information sur les Sols (SIS) en France centralisent les données pour une surveillance efficace. La réglementation des installations classées (ICPE -Installation Classée pour la Protection de l'Environnement-) permet de gérer les risques.
- **Sensibilisation citoyenne** : Informer le public sur les impacts des polluants et promouvoir des gestes simples (tri, recyclage, sobriété) encourage des comportements responsables.

4.2.5.6. Les techniques de dépollution du sol :

Les techniques de dépollution du sol désignent l'ensemble des procédés visant à purifier ou à isoler un milieu affecté par une pollution durable, dans le but de le rendre à nouveau utilisable à des fins agricoles, industrielles ou de le réhabiliter en milieu naturel. Le choix de la technique employée dépend à la fois de la nature des polluants et du niveau de contamination.

A. Décontamination par lavage :

La technique de lavage des sols est applicable aux sols contenant plus de 30 % d'argile et de limons. Le processus consiste d'abord à excaver le sol pollué, puis à séparer mécaniquement les particules par tamisage. Les contaminants sont ensuite éliminés par un lavage abrasif à l'eau et à des additifs (comme des surfactants), qui les transfèrent dans une phase liquide en vue de leur concentration et de leur élimination. L'efficacité de cette méthode dépend principalement de la granulométrie du sol, de la force d'adsorption des polluants et de leur répartition dans les différentes fractions de particules.

B. Solidification et stabilisation :

Cette méthode, couramment employée pour les sols contaminés par des métaux, consiste à immobiliser les polluants en les incorporant dans une matrice solide. On utilise pour cela des liants minéraux comme le ciment, la chaux, des aluminosilicates ou des

phosphates, qui solidifient le sol et réduisent la solubilité et la mobilité des contaminants. Les polluants, notamment les métaux lourds non biodégradables, ne sont pas détruits, mais leur impact environnemental est considérablement limité.

C. Vitrification :

La vitrification est un procédé thermique appliqué in situ. Grâce à des électrodes enfoncées dans le sol, celui-ci est porté à une température très élevée (environ 2000 °C). Il se transforme alors en un matériau fondu qui, en refroidissant, se solidifie en un bloc de verre stable et chimiquement inerte, encapsulant définitivement les contaminants et réduisant considérablement tout risque de lixiviation. Les polluants organiques sont, quant à eux, volatilisés par la chaleur, puis captés et traités sous forme gazeuse.

D. Biodégradation aérobie :

Ce procédé utilise les micro-organismes naturellement présents dans le sol pour dégrader les polluants organiques. En présence d'oxygène, ces bactéries et champignons utilisent les contaminants comme source de nourriture, les transformant en dioxyde de carbone, en eau et en biomasse nouvelle. L'efficacité de cette dégradation complète dépend de plusieurs facteurs : une teneur suffisante en oxygène, un pH proche de la neutralité, une température adéquate et un taux d'humidité équilibré. Cette méthode est plus efficace et aboutit à une élimination plus totale des polluants que les processus anaérobies (sans oxygène).

E. Traitement de confinement :

Cette technique a pour objectif d'isoler les terres et les eaux polluées directement sur site, afin d'empêcher la propagation des contaminants vers les couches de sol saines ou les milieux environnants. Elle ne procède pas à l'élimination des polluants, mais vise à supprimer le risque de contamination par la mise en place de barrières étanches (physiques ou géochimiques) entre la source de pollution et l'environnement à protéger.

F. Phytoremédiation :

La phytoremédiation est une technique qui utilise des plantes pour dépolluer les sols, que ce soit des contaminants organiques ou inorganiques (comme les métaux lourds). Elle repose sur trois mécanismes principaux (**Fig.4.11**):

- **La phytoextraction :** Des plantes spécialisées absorbent et concentrent les polluants dans leurs parties aériennes, qui sont ensuite récoltées.

- **La phytostabilisation** : Des plantes permettent d'immobiliser les polluants dans le sol, réduisant ainsi leur dispersion et leur toxicité.
- **La rhizodégradation** : Les plantes stimulent, via leurs racines, l'activité des micro-organismes du sol qui dégradent alors les polluants organiques.
- **La phytovolatilisation** utilise des plantes à forte évapotranspiration pour absorber les polluants et les relâcher dans l'atmosphère sous une forme diluée et généralement inoffensive.
- **La phytodégradation** repose sur la capacité de certaines plantes à produire des enzymes qui dégradent les contaminants absorbés en substances non toxiques directement dans leurs tissus.
- **La phytomining** vise la récupération économique des métaux : les plantes accumulatrices sont récoltées et traitées en usine pour extraire et valoriser les métaux contenus dans leur biomasse.

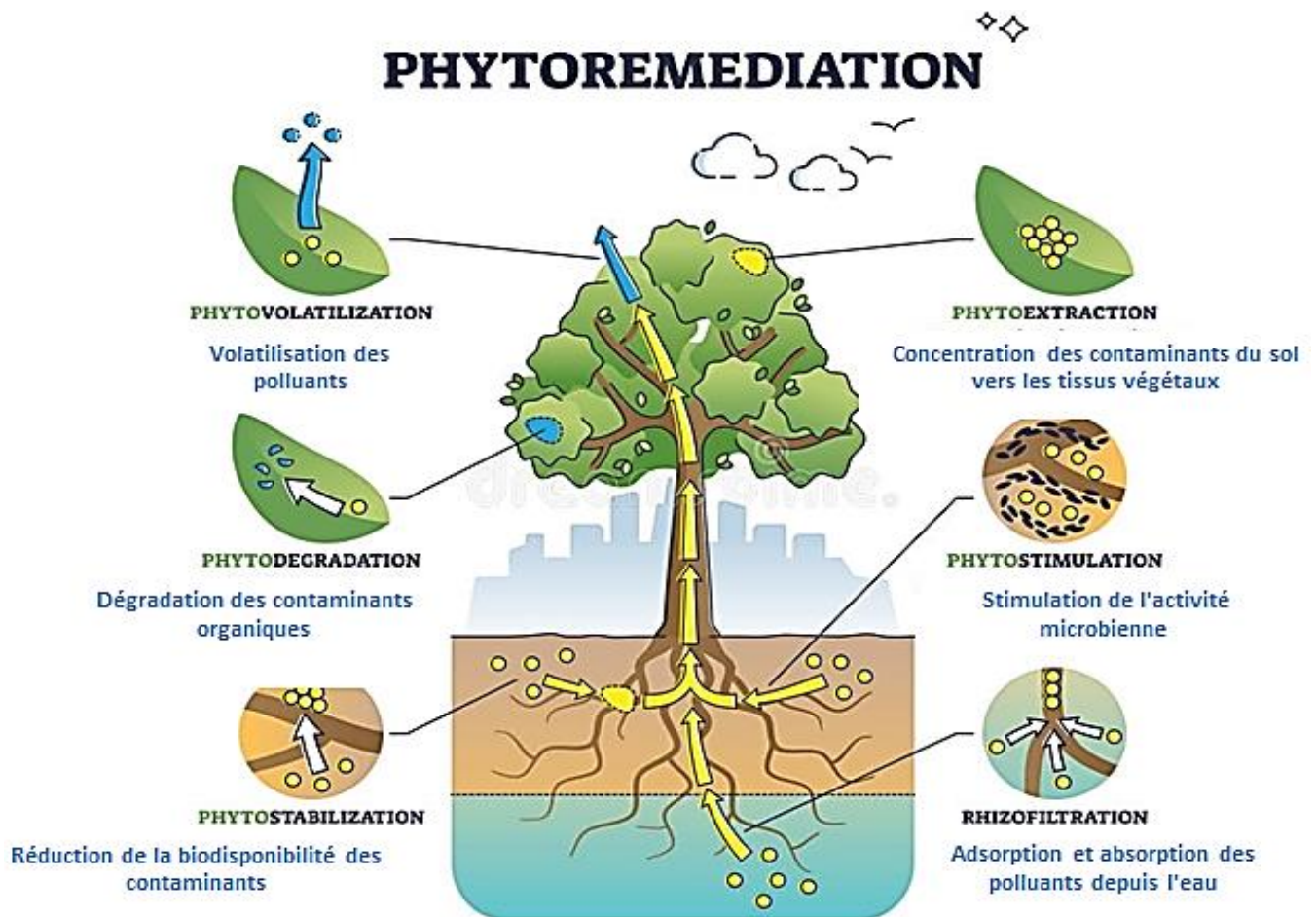


Figure 4.11 : Schéma synthétisant les différentes formes de phytoremédiation.

Références bibliographiques

- [1] BLIEFERT, C., PERRAUD, R. *Chimie de l'environnement : air, eau, sols, déchets*. Bruxelles : De Boeck Supérieur, 2007.
- [2] OLIVIER, M. *Chimie de l'environnement*. Paris : Lab Éditions, 2020.
- [3] FATIHA, B. *Polycopié de cours : Chimie de l'environnement – Atmosphère & Sols*. 2025.
- [4] MALIKA, K. *Pollution : Eau, Air, Sol*. 2024.
- [5] MERABET, N. *Polycopié de cours : Pollution Air, Eau, Sol*. 2020.
- [6] HENAUT, A. *Pollution de l'air et de l'eau*. Les dossiers de science et politiques, 2011.
- [7] FESTY, B., et al. Qualité de l'eau. *Environnement et santé publique – Fondements et pratiques*. 2003, p. 333-368.
- [8] ROBERT, M. *Le sol et l'environnement*. 2001.
- [9] HAYET LATIFA, B. *Protection de l'environnement*. 2024.
- [10] BENAMARA, F. Z. *Géologie*. 2022.
- [11] GOBAT, J.-M., ARAGNO, M., MATTHEY, W. *Le sol vivant : bases de pédologie, biologie des sols*. Vol. 14. Lausanne : EPFL Press, 2010.
- [12] DUCHAUFOUR, P. *Introduction à la science du sol : sol, végétation et environnement*. 6^e éd. Paris : Masson, 2001.
- [13] KOLLER, E. *Traitement des pollutions industrielles : eau, air, déchets, sols, boues*. Paris : Dunod, 2004.
- [14] PIEDRAFITA CARNICER, M.-V. *La pollution ponctuelle des sols : le cas des stations-service dans la Région de Bruxelles-Capitale*. Diplôme d'études spécialisées en gestion de l'environnement, Université Libre de Bruxelles, 2007, p. 154.
- [15] LACOUR, S. *Pollution atmosphérique*. École Nationale des Ponts et Chaussées, Centre d'Enseignement et de Recherche sur l'Environnement Atmosphérique, 2004, p. 6-8.
- [16] COUTURE, I. Principaux critères pour évaluer la qualité de l'eau en micro-irrigation. In : *Colloque sur l'irrigation : L'eau, Source de Qualité et de Rendement*, 2006, 13 p.
- [17] DE VILLERS, J., SQUILBIN, M., YOURASSOWSKY, C. *Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface : cadre général*. Fiche technique. Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE), Observatoire des données de l'environnement, novembre 2005, p. 1-16.

Références bibliographiques

- [18] BOUMAAZA, M. *Traitement et épuration des eaux*. 2020.
- [19] BERRADJ, O. *Cours et exercices d'hydrochimie*. 2020.
- [20] MOREL, J. *Les ressources en eau sur Terre : origine, utilisation et perspectives dans le contexte du changement climatique – un tour d'horizon de la littérature*. 2007.
- [21] MAREF, N. *Traitement et épuration des eaux : cours et exercices*. 2020.
- [22] YAHIAOUI, K. *Polycopié de cours : Qualité des eaux*. 2025.
- [23] BECHAC, J.-P., et al. *Traitements des eaux usées*. Paris : Eyrolles, 1987.
- [24] NDIAYÉ, M. *Impacts des eaux usées sur l'évolution chimique et microbiologique des sols : étude de cas à Pikine (Dakar – Sénégal)*. 2005, 110 p.
- [25] ALLAOUI, M., SAADALLAH, E. M. M., EL HARFI, A. Purifying performance of the STEP of Mrirt (Natural lagoon). *Moroccan Journal of Chemistry*, 2019, vol. 7, n° 1, p. 049-060.
- [26] KOUADRI, L. *Évaluation des métaux lourds au moyen de la technique XRF : application à l'étude de la pollution atmosphérique*. Thèse de doctorat, Université de Blida, 2020.

Université Djilali Bounaama, Khemis Miliana
Faculté des Sciences de la Matière et d'informatique
Conseil Scientifique de la Faculté



جامعة جيلالي بونعاما خميس مليانة
كلية علوم المادة والإعلام الآلي
المجلس العلمي للكلية

Ref: 02 08/CSF/ 2026

**EXTRAIT DU PV
DE LA REUNION ORDINAIRE DU CONSEIL SCIENTIFIQUE
Du 02/05/2026**

Objet : : Expertise de polycopié pédagogique

En l'an deux mille vingt-six (2026), le deux (02) mai 09 h 30, une réunion ordinaire du Conseil Scientifique de la Faculté des Sciences de la Matière et de l'Informatique s'est tenue dans la salle de réunion de la faculté (Bloc B).

Suite aux rapports favorables reçus de la part des experts cités ci-après concernant l'expertise du polycopié pédagogique, le CSF a prononcé favorablement pour la conformité du polycopié pédagogique en vue de préparer son habilitation.

- **Auteur du polycopié :** Dr. CHERIFI Souad (MCB)
- **Intitulé du polycopié :** Chimie de l'environnement et lutte contre la pollution (Cours)
- **Destiné aux étudiants de :** M2 Chimie Pharmaceutique
- **Experts du polycopié :**
 - TAHRAOUI Hassiba MCA EHB - Chlef
 - FIZIR Meriem MCA UDB - Khemis Miliana

**Président du
Conseil Scientifique de la Faculté SMI
Dr. BOUDERBALA Mihoub**

