



Ministry of Higher Education And Scientific Research  
University Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
People's Democratic Republic of Algeria

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم



3<sup>ème</sup> année Licence

Génie des Procédés

Polycopié de la matière

# Pollution Eau, Air, Sol

Réalisé par : Dr KHELLADI Malika  
Maître de conférences classe B

Expertisé par :  
Pr BENDRAOUA Abdelaziz  
Dr DRIOUCH Aoutef

Année Universitaire : 2023-2024

# Table des matières

Avant-propos	I
Résumés	II
Liste des figures	V
Liste des photos	V
Liste des tableaux	VI
Liste des abréviations	VII
INTRODUCTION GENERALE	1
<b>Chapitre : I</b>	
I.1. Introduction	4
I.2. Cycle de l'eau	4
I.3. Mesure de la qualité de l'eau	6
I.3.1. Le potentiel d'Hydrogène (pH)	6
I.3.2. Température de l'eau	7
I.3.3. La conductivité électrique	7
I.3.4. Le potentiel redox	7
I.3.5. L'oxygène dissous	8
I.3.6. Les matières en suspension (MES)	8
I.3.7. Les composés organiques	8
I.3.8. MatO (matières oxydables)	9
I.3.9. La turbidité	9
I.3.10. Les micropolluants	9
I.3.11. Test « coliformes fécaux »	9
I.3.12. Les composés azotés	9
I.4. Mécanisme et symptômes de la pollution des eaux courantes et des lacs	9
I.4.1. Définition de la pollution	9
I.4.2. Origine des eaux usées	10
I.4.2.1. Les eaux usées domestiques	10
I.4.2.2. Les eaux industrielles	10
I.4.2.3. Les eaux agricoles	10
I.4.2.4. Les eaux pluviales et de ruissellement	10
I.4.3. Mécanismes de la pollution	10
I.4.3.1. Pollution diffuse	10
I.4.3.2. Pollution ponctuelle	10

I.4.4. Les sources de pollution des eaux	11
I.4.4.1. Polluants mécaniques	11
I.4.4.2. Polluants thermiques	11
I.4.4.3. Polluants radioactifs	11
I.4.4.4. Pollution chimique organique	11
I.4.4.5. Polluants chimiques inorganiques	12
I.4.4.6. La pollution microbiologique	13
I.5. Influence de la pollution des eaux sur les êtres vivants	13
I.5.1. Sur la santé humaine	13
I.5.2. Impact sur la faune et la flore aquatiques	15
I.5.3. Impact sur les cultures	15
I.6. Oxygénation et désoxygénation	15
I.7. Eutrophisation	16
I.8. Notions sur les Traitements et l'Épuration des eaux usées	17
I.8.1. Prétraitement	17
I.8.1.1. Dégrillage et tamisage	17
I.8.1.2. Dessablage	18
I.8.1.3. Décantation	18
I.8.1.4. Déshuilage et dégraissage	18
I.8.1.5. Dilacération	18
I.8.2. Traitement physico-chimique	19
I.8.2.1. Neutralisation	19
I.8.2.2. Précipitation	19
I.8.2.3. Purification par adsorption (sur charbon actif)	19
I.8.2.4. Dégazage physique (stripping)	19
I.8.2.5. Techniques membranaires	19
I.8.2.6. Désinfection des eaux usées	19
I.8.3. Traitement biologique	20
I.9. Prévention de la pollution des eaux	21
Références bibliographiques	22
<b>Chapitre : II</b>	
II.1. Bases en sciences du sol	26
II.1.1. Généralités	26
II.1.2. Propriétés du sol	26
II.1.2.1. Propriétés physiques	26

II.1.2.2. Propriétés physico-chimiques	28
II.2. Causes et conséquences de la dégradation/pollution des sols	28
II.2.1. Définition de la pollution des sols	28
II.2.2. Causes de la pollution des sols	28
II.2.2.1. Les polluants agricoles	29
II.2.2.2. Le trafic routier	29
II.2.2.3. Exploitation des mines et carrières	29
II.2.2.4. Les déchets ménagers	29
II.2.2.5. L'industrie	30
II.2.2.6. L'urbanisation	30
II.2.2.7. Les déchets radioactifs	30
II.2.2.8. Le pétrole et ses dérivés	30
II.2.2.9. Les pluies acides	30
II.2.3. Les conséquences de la pollution des sols	31
II.2.3.1. Déclin de la biodiversité	31
II.2.3.2. Diminution de la fertilité du sol	31
II.2.3.3. Modification de la structure du sol	31
II.2.3.4. Contamination des eaux	31
II.2.3.5. Désertification	32
II.2.3.6. Risques sanitaires	32
II.3. Comportement des éléments traces dans le sol	32
II.3.1. Origine des éléments traces métalliques	32
II.3.2. Devenir des ETM	32
II.4. Comportement des polluants organiques dans le sol	33
II.4.1. La mobilité	34
II.4.2. La transformation et la dégradation	34
II.4.3. L'accumulation	34
II.5. Analyse de risques et législation	35
II.6. Techniques de décontamination et études de cas	38
II.6.1. Définition	38
II.6.2. Techniques de décontamination	38
II.6.2.1. Décontamination par lavage	38
II.6.2.2. Solidification et stabilisation	39
II.6.2.3. Vitrification	39
II.6.2.4. Biodégradation aérobie	39

II.6.2.5. Traitement de confinement	40
II.6.2.6. La phytoremédiation	40
II.6.3. Etude de cas	41
Références bibliographiques	44
<b>Chapitre: III</b>	
III.1. Mise en situation	47
III.1.1. Environnement	47
III.1.2. Pollution	47
III.1.3. Développement durable	49
III.1.4. Energie	50
III.1.4.1. L'énergie primaire ou énergie brute	50
III.1.4.2. Les énergies secondaires	50
III.1.5. Consommation d'énergie primaire et émission de CO <sub>2</sub>	50
III.2. Notion fondamentales de l'atmosphère	51
III.3. Les paramètres météorologiques	52
III.3.1. Circulation atmosphérique	52
III.3.2. Le vent	52
III.3.3. Température	53
III.3.4. La pression	53
III.3.5. L'humidité	53
III.3.6. Les pluies	53
III.4. Evolution de la qualité de l'air	53
III.5. Effets sur les organismes	54
III.6. Composition chimique de l'atmosphère	55
III.7. Les polluants chimiques	56
III.7.1. Pollution par le NO <sub>2</sub>	58
III.8. Formation des polluants	58
III.8.1. Les polluants primaires	58
III.8.2. Les polluants secondaires	58
III.9. Quelques conséquences de la pollution de l'air	61
III.9.1. Le smog	61
III.9.2. Trou d'ozone	63
III.9.3. Effet de serre	65
Références bibliographiques	68

## **Avant –propos**

Le cours « pollution Eau, Air, Sol » est adressé aux étudiants de la troisième année licence « Génie des Procédés ».

Le manuscrit comporte trois chapitres :

- Chapitre I : pollution des eaux
- Chapitre II : pollution de l'air
- Chapitre III : pollution des sols.

Des notions de base sont données sur les différentes pollutions, leurs origines, les causes, leurs impacts sur les êtres vivants ainsi que certains traitements permettant de réduire la contamination.

Le contenu du cours « pollution Eau, Air, Sol » est une initiation pour certaines matières du programme de master Génie des Procédés de l'Environnement.

Ce manuscrit est le fruit de plusieurs années d'enseignement.

## الملخص

يمكن تعريف التلوث بأنه تدهور البيئة الطبيعية بسبب النفايات المنزلية أو الصناعية والمواد الكيميائية. يمكن أن تكون هذه المواد في صورة صلبة أو سائلة أو غازية ذات أصل فيزيائي أو بيولوجي أو كيميائي.

يمكن أن يؤثر التلوث على الهواء من خلال الأبخرة، وعلى التربة من خلال تصريف النفايات، رمي المواد السامة وعلى المياه من خلال تصريف مياه الصرف الصحي.

ويتميز تلوث الهواء بوجود العناصر الملوثة القادمة من الصناعة واستخدام السيارات والتعدين وإزالة الغابات والاستخدام المكثف للمبيدات الحشرية في الزراعة.

يؤدي تلوث الموارد المائية إلى وجود كائنات دقيقة أو مواد كيميائية أو مخلفات صناعية. يمكن أن يتعلق الأمر بالأنهار والمياه الجوفية والتلوج والجليد القطبي. الأسباب الرئيسية هي مياه الصرف الصحي المنزلية والتلوث الزراعي والصناعي وكذلك الانسكابات العرضية للمنتجات السامة في البيئة الطبيعية والتي من شأنها تعطيل النظم البيئية.

أما تلوث التربة فيعرف بأنه التغيرات التي تؤدي إلى تعديل و تغيير تركيبة التربة و سطح الأرض. ويحدث عن طريق التسلل أو الجريان السطحي للمياه الملوثة بالزيوت والكائنات الحية الدقيقة و المواد الكيميائية السامة أو المباني المهجورة. ولهذه التلوثات المختلفة تأثيرات سلبية على صحة الكائنات الحية مثل الأمراض وعلى البيئة مثل التغير المناخي والجفاف ونقص المياه وفقر التربة و تدهورها عبر الأزمنة و بالتالي تصبح غير صالحة للزراعة.

**الكلمات المفتاحية:** تلوث الهواء، تلوث المياه، تلوث التربة، تغير المناخ، تدهور الأراضي

## **Abstract**

Pollution can be defined as the degradation of a natural environment due to household or industrial waste and chemical substances. These substances can be in solid, liquid or gaseous form of physical, biological or chemical origin.

Pollution can affect the air through fumes, the soil through, toxic materials the discharge of waste and the water through the discharge of wastewater.

Air pollution is characterized by the presence of polluting elements coming from industry, the use of automobiles, mining, deforestation and the intense use of pesticides in agriculture.

Pollution of water resources results in the presence of micro-organisms, chemical substances or industrial waste. It can concern rivers, groundwater, snow and polar ice. The main causes are domestic wastewater, agricultural and industrial pollution as well as accidental spills of toxic products into the natural environment which will disrupt ecosystems.

As for soil pollution, it is defined as changes that modify the composition of the earth's surface. It occurs by infiltration, by runoff or by abandoned buildings. These different pollutions have negative effects on the health of living beings such as diseases and on the environment such as climate change, drought, water shortage and soil impoverishment and degradation.

**Key-words:** air pollution, water pollution, soil pollution, climate change, land degradation



## **Résumé**

La pollution peut se définir comme étant la dégradation d'un milieu naturel à cause de déchets ménagers ou industriels et de substances chimiques. Ces substances peuvent être sous forme solide, liquide ou gazeuse d'origine physique, biologique ou chimique. La pollution peut affecter l'air par les fumées, les sols par le rejet des déchets, de matière toxiques et l'eau par le rejet des eaux usées.

La pollution atmosphérique se caractérise par la présence d'éléments polluants provenant de l'industrie, l'utilisation des automobiles, exploitation minière, la déforestation et l'utilisation intense des pesticides dans l'agriculture.

La pollution de la ressource en eau se traduit par la présence de micro-organismes, de substances chimiques ou de déchets industriels. Elle peut concerner les cours d'eau, les nappes phréatiques, la neige et la glace polaire. Les principales causes sont les eaux usées domestiques, la pollution agricole et industrielle ainsi que les déversements accidentels de produits toxiques dans le milieu naturel et qui vont perturber les écosystèmes.

Quant à la pollution du sol, elle se définit comme des changements qui modifient la composition de la surface de la terre. Elle se fait par infiltration, par ruissellement ou par les bâtiments abandonnés.

Ces différentes pollutions ont des effets négatifs sur la santé des êtres vivants comme les maladies et sur l'environnement tels que le changement climatique, la sécheresse, la pénurie d'eau et l'appauvrissement et dégradation des sols.

**Mots- clés :** Pollution atmosphérique, Pollution de l'eau, Pollution du sol, changement climatique, dégradation des sols.

## Liste des figures

Figure I .1	Cycle de l'eau	06
Figure I .2	Origine des métaux dans le sol	13
Figure I .3	Cycle hypothétique de la transmission de microorganismes infectants	14
Figure I .4	Carte représentant les zones en décroissance d'oxygène	16
Figure II.1	Caractéristiques biotiques et abiotiques du milieu influençant sur le devenir des polluants organiques	35
Figure II.2	Schéma synthétisant les différentes formes de phytoremédiation	41
Figure III.1	Origines des polluants atmosphériques	48
Figure III.2	Les processus subis par les polluants dans l'atmosphère	49
Figure III.3	Les différentes couches de l'atmosphère	52
Figure III.4	Composition chimique de l'atmosphère	55
Figure III.5	Echelle caractéristique de la pollution atmosphérique	57
Figure III.6	Cycle d'ozone	59
Figure III.7	Formation de smog photochimique	63
Figure III.8	La couche d'ozone	64
Figure III.9	Fonctionnement de l'effet de serre	66

## Liste des photos

Photo I.1	Système de déshuilage	18
Photo II.1	Site de Maatheide (Lommel) avant dépollution	42

## Liste des tableaux

Tableau I.1	Volume d'eau et temps de résidence de l'eau pour les différents réservoirs	05
Tableau II.1	Les différents types des déchets solides	28
Tableau II.2	Seuil de toxicité pour certains polluants	33
Tableau III.1	Composition de l'atmosphère basse terre (ppmv=partie par million ( $10^{-6}$ ) en volume)	56

## Les abréviations

Cd	cadmium
Br	bore
CEC	Capacité d'échange cationique
CFC	Chlorofluorocarbone
CH <sub>4</sub>	Méthane
CMR	Cancérigène, mutagène, reprotoxique
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
Cu	Cuivre
UV	Ultras violet
DBO	Demande biochimique en oxygène
DCO	Demande chimique en oxygène
DDT	Dichlorodiphényltrichloroéthane
EMT	Elément trace métallique
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HCl	Acide chloridrique
H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	Ion hydronium
Hg	Mercure
H <sub>2</sub> S	Sulfure d'hydrogène
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Acide sulfurique
HNO <sub>3</sub>	Acide nitrique
Mn	Manganèse
MATO	Matière oxydable
MES	Matières en suspension
MP	Matière particulaire
NPA	Nitrates de peroxyacyle
OMM	Organisation météorologique mondiale
NH <sub>3</sub>	Ammoniac
NH <sub>2</sub>	Amine
NO	Oxyde d'azote
NO <sub>2</sub>	Dioxyde d'azote
O <sub>2</sub>	Oxygène
O <sub>3</sub>	Ozone
OMS	Organisation mondiale de la santé

PCB	Polychlorobiphényle
PCT	Polychloroterphényle
Pb	Plomb
POP	polluants organiques persistants
SO <sub>2</sub>	Dioxyde de soufre
SO <sub>3</sub>	Trioxyde de soufre
TEPP	tétraéthylepyrophosphate
Zn	zinc

## INTRODUCTION GENERALE

Les activités humaines, tout comme les processus naturels, modifient les milieux où ils se déroulent.

Trois d'entre eux sont touchés : l'eau, l'air et le sol avec échange entre ces trois milieux.

Les risques sont souvent présents à travers l'air et l'eau ; chaque jour un individu respire en moyenne quinze kilogrammes d'air dont il consomme près d'un kilogramme d'oxygène et il boit quelques litres d'eau et en consomme 200 litres par jour.

Plusieurs progrès ont été réalisés en matière de gestion des effluents, des déchets et des pollutions. Certaines pollutions comme les rejets industriels dont la source était bien identifiées, ont été sérieusement réglementées. Le traitement industriel à la source, concentration et confinement des déchets de production sont plus aisément accessibles.

Au moment où l'industrie commence par rassembler les matériaux pour fabriquer ses produits avant de les vendre et les disperser auprès de ses clients, le monde agricole travaille par épandage d'engrais et de pesticides avant de rassembler les récoltes et de redisperser les résidus biologiques.

Déchets, production et pollution vont s'y trouver étroitement imbriqués car les déchets sont à la fois les résidus de fabrication et les produits consommés et usés par les utilisateurs dispersés.

De tout temps, dispersion et dilution ont été pratiquées. Les difficultés qui apparaissent aujourd'hui sont largement liées aux déchets et pollution diffuses, quand le principe de dispersion dilution n'est plus naturellement efficace ou acceptable.

La collecte, le traitement à la source, ou la réglementation voire l'interdiction éventuelle des pratiques à l'origine de ces diffusions sont alors des enjeux considérables. Concernant ces dernières, les exemples abondent : abandon du pesticide DDT, des CFC qui sont responsable du trou de la couche d'ozone protégeant la terre des rayons UV, interdiction de la combustion individuelle de charbon ou de bois dans certaines villes pour protéger l'atmosphère, utilisation obligatoire de pots catalytiques sur les moteurs à combustion, limitations européennes à la production de certains types de piles et accumulateurs électriques à cause des métaux lourds contenus.

Il est désormais acquis en droit et dans les faits que les déchets et effluents ne peuvent plus être qualifiés par leur propriétaire de matières destinées à l'abandon, ni même de déchets ultimes sans devenir économique viable et organisé. Ce sont des matières gérables ou non avec les conséquences que cela comporte sur les pratiques qui en sont à l'origine.

## INTRODUCTION GENERALE

---

La forme de retour à la nature est un facteur important. Toutes les formes chimiques n'ont pas la même réactivité. Un déchet solide n'aura pas le même impact selon qu'il est stable, ou lessivable par les eaux de ruissellement ou de condensation qui l'environnent, ou qu'il sera protégé de la présence d'une circulation d'eau. Certains polluants sont rapidement détruits, d'autres sont persistants et s'accumulent.

En science de l'environnement, généralement le caractère interactif des polluants et des phénomènes naturels ne permet pas d'attribuer une seule cause à un effet observé. De plus, l'observation et la compréhension n'interviennent souvent qu'à posteriori et nombre d'impacts industriels ont été subis avant d'être évités ou maîtrisés. Les contraintes pesant sur l'environnement s'accroissent avec le développement démographique. Maintenant, une plus grande proportion de personnes vit dans les villes et les villages que dans les campagnes et cette tendance s'accroît. La concentration d'un grand nombre d'habitants en un même lieu conduit à celle de la demande énergétique et à celle de la production de déchets et de rejets. Grâce à une utilisation massive de l'électricité, qui peut être produite hors des villes, on évite la pollution qu'induirait une utilisation locale et diffuse de combustion solide et liquide. L'eau est également un problème crucial. Il faut environ 1 litre d'eau par personne et par jour pour survivre mais, dans les pays développés, des volumes bien plus considérables sont utilisés pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres cubes par habitant et par jour avec tous les usages individuels, industriels et agricoles de l'eau.

# **Chapitre I :**

## **Pollution des eaux**



### **I.1. Introduction**

L'eau sous sa forme liquide, constitue un milieu où les réactions et échanges chimiques et biochimiques sont facilités. En effet, l'écosystème aquatique représente le siège principal des premières étapes évolutives du monde vivant.

Ces dernières années, la demande en eau est en augmentation croissante. Cette augmentation s'explique par le développement des tissus urbains et des agglomérations rurales, l'extension de l'agriculture, l'amélioration du niveau de vie, le développement des activités industrielles (Projet Mor, 1986 ; Cadillon et Tremea, 1989).

Cette situation engendre un grand volume d'eau usée dans le milieu récepteur sans traitement préalable. En 2020, ce volume a atteint 900 millions de m<sup>3</sup>. Une grande partie de ces eaux usées est rejetée soit dans les mers et les océans, soit dans le réseau hydrographique, ou épandue sur le sol (Anonyme, 1999).

Les eaux de surface, considérées comme capable d'accepter sans dommage des volumes énormes de contaminants, reçoivent actuellement des quantités importantes de polluants à partir de plusieurs sources comme lessivage des sols et affluents urbains et industriels. Ces différentes sources de pollution représentent une atteinte à la santé par la qualité des polluants déversés et les proportions significatives de composés toxiques d'origine minérale telle que les métaux lourds ou organiques comme les pesticides. Le danger réside dans la chaîne trophique où la bioaccumulation des substances toxiques se fait au niveau des différents maillons et seront transmis à des teneurs élevées aux consommateurs.

En outre, la réutilisation non contrôlée des eaux usées est généralement à l'origine d'une augmentation de la prévalence de graves maladies hydriques (Choléra, typhoïde,...).

### **I.2. Cycle de l'eau**

L'eau est présente en trois états (liquide, gazeux, glace) dans trois grands réservoirs planétaires différents : l'atmosphère, le stock continental et le stock océanique.

-Le réservoir océanique est le plus volumineux avec 1 338 millions de kilomètres cubes. De l'océan à la terre, le cycle de l'eau est principalement lié à l'évaporation, celle-ci générant de la vapeur d'eau qui est transportée sur les continents sous forme de pluie. Le moteur de ce cycle est l'énergie solaire (L'Hôte, 1990).L'évaporation océanique est le seul flux sortant de ce réservoir avec 0,505 million de kilomètres cubes par an. En termes d'apport, les océans reçoivent 0,458 million de kilomètres cubes par an de précipitations et 0,047 million de kilomètres cubes d'écoulement depuis les continents.

Les stocks continentaux sont composés de 47,961 millions de kilomètres cubes, ce réservoir s'évapore dans l'atmosphère à raison de 0,072 millions de kilomètres cubes par an, et perd 0,047 million de kilomètres cubes d'eau par an d'écoulement dans les océans. Les précipitations continentales apportent 0,119 million de kilomètres cubes d'eau par an.

L'atmosphère est le moins volumineux de ces trois réservoirs avec 0,017 million de kilomètres cubes, néanmoins les quantités d'eau échangées y sont très importantes. L'évaporation apporte 0,505 million de kilomètres cubes d'eau par an depuis les océans et 0,072 million de kilomètres cubes depuis les continents. Les précipitations continentales se montent à 0,119 million de kilomètres cubes d'eau par an, les précipitations océaniques à 0,458 million de kilomètres cubes.

**Tableau I.1** : Volume d'eau et temps de résidence de l'eau pour les différents réservoirs (Pidwirny, 2006).

Réservoirs		Volume (10 <sup>6</sup> km <sup>3</sup> )	Pourcentage volume du total	Temps de résidence
Océans		1370	97,25	3200 ans
Calottes glaciaires et glaciers	Antarctique	29	2,05	20000 ans
	Glaciers			20 à 100 ans
Eau souterraines	peu profondes	9,5	0,68	100 à 200 ans
	profondes			10000 ans
Lacs		0,125	0,01	50 à 100 ans
Humidité des sols		0,065	0,005	1 à 2 mois
Atmosphère		0,013	0,001	9 jours
Fleuves et rivières		0,0017	0,0001	2 à 6 mois
Biosphère		0,0006	0,00004	-
Couverture de neige saisonnière		-	-	2 à 6 ans

Des échanges continus existent entre ces trois réservoirs.

Le cycle de l'eau ou cycle hydrologique correspond à l'ensemble des transferts d'eau (liquide, solide ou gazeuse) entre les réservoirs d'eau sur terre.

Lors de l'évaporation la quasi-totalité des minéraux restent dans l'océan. Ceci conduit à une concentration des éléments minéraux dans l'eau de mer.

L'eau retourne à l'océan en suivant deux voies :

- Les eaux de surface
- les eaux souterraines.

Les sols représentent une étape importante dans le processus de parcours de l'eau, car ils redirigent le flux d'eau dans trois directions :

- Une partie de l'eau va s'écouler en surface vers les rivières, ce phénomène s'appelle le ruissellement.
- Une autre partie va s'évaporer directement ou être absorbée par les plantes et ensuite libérée dans l'atmosphère par transpiration, le phénomène global est appelé évapotranspiration.
- L'eau résultante reste dans le sol et descend progressivement jusqu'aux eaux souterraines. Ce phénomène est appelé infiltration.

Ces trois phénomènes se produisent sur des échelles de temps très différentes.

Par l'intermédiaire des sols, le cycle de l'eau est distribué dans trois réservoirs qui sont l'atmosphère, eaux de surface et eaux souterraines (figure I.1).



Figure I.1 : Cycle de l'eau (selon John M. Evans, Howard Perlman 2013)

## I.3. Mesure de la qualité de l'eau

Des méthodes d'analyse normalisées permettent de caractériser une eau résiduaire et de connaître son niveau de contamination :

### I.3.1. Le potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH d'une eau est une indication de la tendance à être acide, neutre ou alcaline et il est fonction de l'activité des ions hydrogène  $H^+$  présents dans cette eau.

La détermination du pH constitue les mesures de la concentration des hydrogènes dans l'eau. Sa mesure est indispensable car le pH conditionne un grand nombre d'équilibre physico-chimique.

### **I.3.2. Température de l'eau**

La température est l'un des facteurs écologiques les plus importants parmi tous ceux qui agissent sur les organismes aquatiques. Elle joue un rôle primordial dans la distribution des espèces aussi bien par ses niveaux extrêmes que par ses variations diurnes ou saisonnières comme elle permet la solubilité des sels et des gaz. Elle se mesure sur place.

### **I.3.3. La conductivité électrique**

Elle est fonction de la concentration totale en ions, de leur valence, de leur concentration relative et de la température. Elle nous renseigne sur les variations de la composition d'origine naturelle ou anthropique d'une eau (Rodier, 1984).

L'unité de la conductivité est le siemens par mètre (S/m), mais dans le cas de l'eau, généralement le micro siemens par centimètre ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) qui est utilisé.

Les mesures de la conductivité sont basées sur le principe du pont de WHEATSTONE qui mesure la résistance R en (Ohms) d'une colonne d'eau avec :

S : section de la colonne en  $\text{cm}^2$

L : la longueur de la colonne en cm.

R étant connu.

A partir de la formule suivante, la résistivité électrique en (Ohms centimètre) est déduite.

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (\text{I.1})$$

La relation entre la résistivité et la conductivité à une température donnée est la suivante :

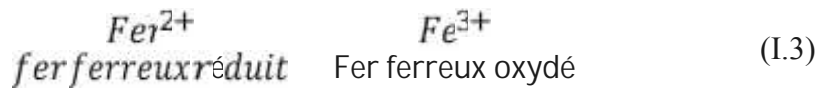
$$\text{Conductivité } (\mu\text{S}/\text{cm}) = 1000000 / \text{Résistivité } (\Omega \text{ cm}) \quad (\text{I.2})$$

La température de référence à laquelle sont exprimés les résultats est de 20°C.

### **I.3.4. Le potentiel redox (Eh)**

Le potentiel d'oxydoréduction est une des caractéristiques fondamentales des milieux aquatiques. Il est fonction de l'équilibre des formes réduites et oxydées des composés chimiques. L'oxydation est liée à un transfert d'électrons.

Exemple :



### I.3.5. L'oxygène dissous

La mesure de l'oxygène dissous est un test clé dans le contrôle de la pollution et le traitement des rejets liquides. Il donne une indication sur l'activité chimique, physique et biochimique du milieu aquatique. Les activités dépendent de la production ou de la consommation de l'oxygène suite à la réaction de l'oxydation de la matière organique de l'eau.

### I.3.6. Les matières en suspension (MES)

Elles correspondent à la pollution particulaire minérale ou organique biodégradable ou non, maintenue en suspension sous l'action de la turbulence de l'eau. C'est la totalité des particules solides véhiculées par les eaux résiduaires qui sont caractérisées par leur poids, leur volume et la nature des particules.

Elles sont exprimées en mg/L. Le taux des matières en suspension (MES) est déterminé par filtration d'un volume d'eau connu sur un filtre de porosité 0.45  $\mu\text{m}$  qui sera séché dans l'étuve à 105°C. Elles sont définies par la relation suivante :

$$MES = [(P_2 - P_1)/V]1000 \text{ en mg/L} \quad (I.4)$$

Avec :

$P_1$  : Poids du filtre avant filtration (en mg).

$P_2$  : Poids du filtre après filtration et séchage à 105°C pendant 2 heures (en mg).

$V$  : Volume d'eau filtré en mL.

### I.3.7. Les composés organiques

**-Demande biochimique en oxygène (DBO)** : elle permet de quantifier la matière organique, dissoute ou particulaire, pouvant être consommée par la biomasse dans un échantillon. Cette méthode d'analyse correspond à la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes contenus dans l'eau pour oxyder une partie des matières carbonées au bout d'une durée de 5 jours (DBO<sub>5</sub>) ou 21 jours (DBO<sub>21</sub>).



**-Demande chimique en oxygène (DCO)** : Cette mesure permet la quantification de l'ensemble des composés organiques, présents sous forme solide, colloïdale ou dissoute ainsi que celle des minéraux oxydables. Lorsque l'ensemble des composés est pris en considération, on parle de DCO totale (DCO<sub>T</sub>) et lorsque seuls les composés solubles sont

analysés, il s'agit de la DCO soluble ( $DCO_s$ ). La différence entre ces deux mesures constitue la DCO particulaire ( $DCO_p$ ).

### **I.3.8. MatO (matières oxydables)**

C'est un paramètre utilisé par les agences de l'eau pour caractériser la pollution organique de l'eau. Il se définit à partir de la  $DBO_5$  et de la DCO, selon la formule :

$$MatO = (2DBO_5 + DCO)/3 \quad (I.5)$$

### **I.3.9. La turbidité**

Elle se définit comme l'expression de la propriété optique qui fait que la lumière est dispersée et absorbée plutôt que transmise en ligne droite à travers un échantillon. Cette dispersion est provoquée par l'interaction de la lumière avec les particules en suspension et traduit la réduction de la transparence du milieu.

### **I.3.10. Les micropolluants**

Le terme désigne un ensemble de substances qui, en raison de leur toxicité, de leur persistance, de leur bioaccumulation, sont de nature à engendrer des nuisances même lorsqu'elles sont rejetées en très faibles quantités comme l'arsenic et le titane.

### **I.3.11. Test « coliformes fécaux »**

Le test est utilisé pour l'évaluation de la pollution microbienne des eaux usées.

### **I.3.12. Les composés azotés**

L'azote (exprimée en mg N/L) est présent dans les effluents sous différentes formes : azote organique ( $N_{org}$ ), azote ammoniacal (ammoniac  $NH_3$ ), ion ammonium  $NH_4^+$ , nitrates ( $NO_3^-$ ), nitrites ( $NO_2^-$ ).

## **I.4. Mécanisme et symptômes de la pollution des eaux courantes et des lacs**

### **I.4.1. Définition de la pollution**

Selon Leynaud et Verrel (1980), la notion de pollution ne se réfère pas à la pureté des eaux ni à leurs aptitudes, mais aux modifications de leurs caractéristiques dues aux actions humaines. Un cours d'eau est considéré comme étant pollué quand la composition ou l'état de ses eaux sont directement ou indirectement modifiées par l'action de l'homme dans une mesure telle que celles-ci se prêtent moins facilement à toutes les utilisations auxquelles elles pourraient servir à leur état naturel, ou à certaines d'entre elles.

Encore, d'après Gaujous (1993), la pollution résulte de l'introduction dans un milieu de substances conduisant à son altération.

## **I.4.2. Origine des eaux usées**

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

### **I.4.2.1. Les eaux usées domestiques**

Elles proviennent des différents usages domestiques de l'eau. Elles sont essentiellement porteuses de pollution organique. Elles se répartissent en eaux ménagères, qui ont pour origine les salles de bains et les cuisines, et sont généralement chargées de détergents, de graisses, de solvants, de débris organiques, et en eaux vannes ; il s'agit des rejets des toilettes chargés de diverses matières organiques azotées et de germes fécaux.

### **I.4.2.2. Les eaux industrielles**

L'eau résiduaire industrielle désigne l'eau qui provient des activités industrielles. Ses caractéristiques varient d'une industrie à l'autre. En plus de matières organiques, azotées ou phosphorées, elle peut également contenir des produits toxiques, des solvants, des métaux lourds, des micropolluants organiques, des hydrocarbures.

### **I.4.2.3. Les eaux agricoles**

Ce sont les eaux issues d'une utilisation en agriculture. 70% de l'eau tirée du milieu naturel est utilisées à des fins agricoles.

### **I.4.2.4. Les eaux pluviales et de ruissellement**

Les eaux de pluie contiennent des impuretés. Elles peuvent être polluées par la pollution de l'air (exemple : pluies acides). Arrivant au niveau des toits et des sols, elles ruissellent et emportent avec elles ce qu'elles croisent. Ainsi elles peuvent dégrader la qualité des cours d'eau.

## **I.4.3. Mécanismes de la pollution**

### **I.4.3.1. Pollution diffuse**

Une pollution diffuse est une pollution due aux rejets de substances polluantes dans le temps et dans l'espace. Elle est peu visible. Son mécanisme s'étale sur une longue période en affectant la totalité des écosystèmes et des eaux.

### **I.4.3.2. Pollution ponctuelle**

Elle se produit localement et ponctuellement. Elle est souvent massive.

## I.4.4. Les sources de pollution des eaux

### I.4.4.1. Polluants mécaniques

Ils sont dus aux effluents liquides rejetés par les usines. La décantation des particules minérales et organiques en suspension donne la formation d'une vase extrêmement pauvre en oxygène et impropre au développement de la flore aquatique.

### I.4.4.2. Polluants thermiques

La pollution thermique est représentée par les rejets d'eaux chaudes provenant des systèmes de refroidissement des centrales nucléaires et électriques, provoquant ainsi un réchauffement important des eaux (Bellan et Pérès, 1994). Cet échauffement modifie certaines propriétés physiques de l'eau et notamment une diminution de la densité.

L'élévation de température entraîne également une substitution de faunes et de flores : les espèces d'eau froide disparaissent au profit des espèces chaudes.

Le réchauffement des eaux conduit aussi à une baisse de la teneur en oxygène dissous et une exacerbation de la toxicité de certaines substances (Aubert, 1970).

### I.4.4.3. Polluants radioactifs

La source majeure réside dans les rejets chargés d'éléments radioactifs issus d'explosion d'armes nucléaires et des résidus des usines utilisant l'énergie atomique (Bellan et Pérès, 1994).

Les radioisotopes peuvent exercer leurs effets nocifs directement par le rayonnement ionisant. De ce fait, la pollution radioactive des eaux présente des dangers sérieux pour l'équilibre des écosystèmes et pour la santé humaine (Colas, 1976).

### I.4.4.4. Pollution chimique organique

Elle est généralement due aux rejets industriels riches en quantités importantes de substances chimiques. Comme elle peut avoir d'autres sources telles que :

- **Les détergents** : Ce sont des produits émulsionnants, moussants. Ils ont l'inconvénient de diminuer la capacité de réoxygénation des eaux de rivière et de produire des mousses.
- **Les hydrocarbures** : Les hydrocarbures sont un groupe diversifié de composés d'atomes d'hydrogène et de carbone. Ils peuvent être des gaz, des liquides et des solides, et sont généralement utilisés comme source de combustible. Les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) sont plus persistants dans les écosystèmes



aquatiques et s'accumulent dans les sédiments et dans certains organismes (Data Stream Initiative, 2021).

- **Les pesticides** : Les pesticides ou composés phytosanitaires, recouvrent un grand nombre de familles chimiques et de nombreuses propriétés insecticides, herbicides ou fongicides. De nombreux pesticides à usage répandu sont des composés organiques et sont souvent regroupés dans des catégories comme :
  - les organochlorés tel que le DDT,
  - les organophosphorés dont on retrouve le parathion, le phosdrine et le tétraéthylepyrophosphate (TEPP),
  - Les polychlorobiphényles (PCB).

Dans les rivières et les lacs, de nombreux pesticides organochlorés ont tendance à s'accumuler principalement dans les sédiments et dans les tissus de certains organismes aquatiques, plutôt que dans l'eau.

#### I.4.4.5. Polluants chimiques inorganiques

Les polluants inorganiques sont rejetés par la pratique agricole et les diverses industries :

- **Des rejets industriels** : ils sont représentés par les résidus de traitement de minerais, traitement de surface, traitement électrolytes etc... qui la plupart d'entre eux sont riches en métaux lourds (figure I.2).
- **L'agriculture** : L'utilisation intensive et non adaptée aux besoins des sols et des plantes des engrais et des pesticides par les agriculteurs est une source de pollution diffuse. Dans le sol, la dégradation des phytosanitaires donne des résidus métalliques qui rejoignent les cours d'eau et les nappes phréatiques par ruissellement ou infiltration respectivement.

Il a été montré que les métaux lourds interagissent entre eux comme le cuivre et le zinc qui rentrent en compétition pour les sites d'adsorption (Mesquita et al., 1998). De même il a été observé que la présence des métaux lourds entraîne l'inhibition de la dénitrification des produits azotés lors du traitement des eaux.

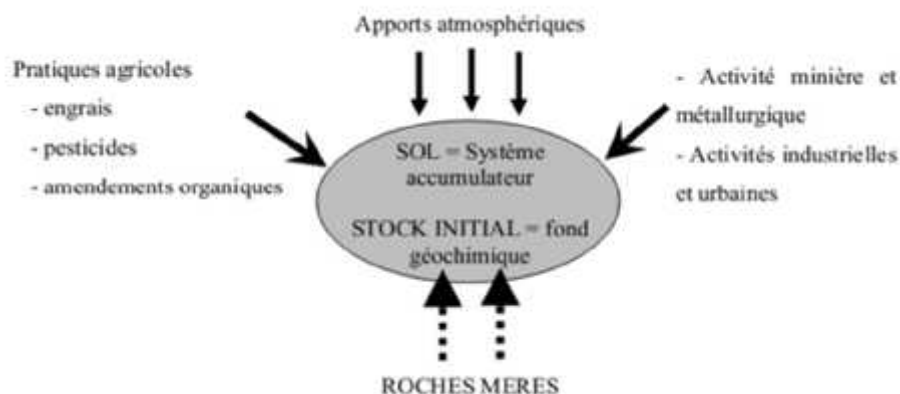


Figure I.2 : Origine des métaux dans le sol (Huynh, 2009)

#### I.4.4.6. La pollution microbiologique

La pollution microbiologique résulte de la présence dans l'eau de micro-organismes comme les virus, les bactéries, les protozoaires et les helminthes, qui sont véhiculés par l'eau et sont responsables de beaucoup de maladies hydriques transmises (Baumont et al., 2004). Ces maladies, comme le choléra, la fièvre typhoïde, s'étalent par la contamination des systèmes de distribution d'eau potable ou par l'irrigation.

- **Les virus** : Les virus sont les plus petits pathogènes présents dans l'eau (taille entre 1 et 300nm). Ils se reproduisent en infectant un organisme hôte.
- **Les bactéries** : Les bactéries sont des organismes unicellulaires simples. Leur taille est comprise entre 0,1 et 10  $\mu\text{m}$ . Elles sont les plus communes et les plus nombreux micro-organismes pathogènes dans l'eau.
- **Les protozoaires** : Les protozoaires sont des organismes unicellulaires munis d'un noyau, plus complexes et plus gros que les bactéries. La plupart des protozoaires pathogènes sont des organismes parasites qui se développent au dépend de leur hôte.

### I.5. Influence de la pollution des eaux sur les êtres vivants

#### I.5.1. Sur la santé humaine

A partir d'une certaine dose, les substances polluantes présentent un effet toxique pour les êtres vivants. Ces polluants pénètrent dans l'organisme par ingestion ou par inhalation. Il existe deux types de toxicité :

- **La toxicité aigüe** : C'est la réaction immédiate de l'organisme à une quantité importante d'une substance toxique. Elle peut entraîner la disparition totale ou partielle des organismes vivants dans le milieu pollué.

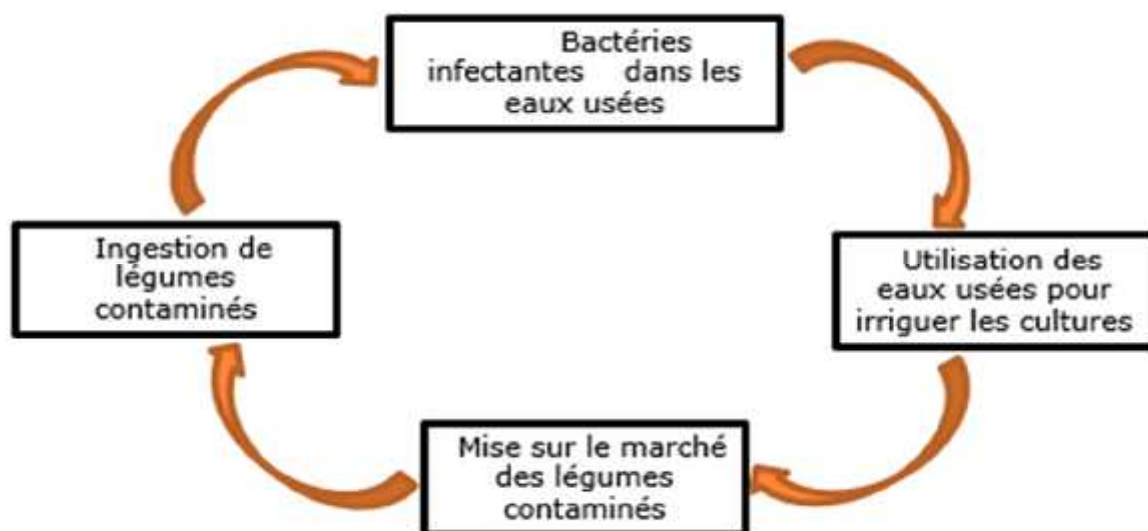
- **La toxicité chronique** : C'est la réaction d'un organisme exposé sur une longue période à de petites quantités de substances polluantes. Elle peut provoquer un dysfonctionnement d'un organe et même des maladies comme elle affecte la reproduction.

La présence de certains éléments inorganiques tels que le cuivre, le zinc est indispensable à la croissance des êtres vivants et leur absence peut entraîner des carences et des déséquilibres. Seulement, leur utilisation à de fortes doses est considérée comme une toxicité pour la santé humaine (Gaujous, 1995 ; Le Goff et Bonnomet, 2004).

L'impact des métaux lourds sur la santé dépend de leur espèce chimique, de leur concentration, de leur biodisponibilité et de leur passage dans la chaîne alimentaire. Les métaux lourds pénètrent dans l'organisme par inhalation, exposition cutanée ou par ingestion d'eau, de poissons ou d'autres aliments contaminés. La bioaccumulation des métaux lourds se manifeste à différentes parties de l'organisme :

- ✓ Le plomb au niveau du squelette (les os) ;
- ✓ Le mercure dans les cellules nerveuses ;
- ✓ Le cadmium au niveau des reins et le foie.

Le risque microbiologique se manifeste par la contamination fécale à travers des produits végétaux arrosés par des eaux usées brutes (Fig.1.3). Des infections comme les infections parasitaires (ascaris, trichocéphales) et par des bactéries à dose infectante élevée peuvent être observées chez les consommateurs de légumes crus ou de viande bovine insuffisamment cuite (Cauchi et al., 1996).



**Figure I.3** :Cycle hypothétique de la transmission de micro-organismes infectants

**I.5..2. Impact sur la faune et la flore aquatiques**

La contamination par les polluants peut être directe par absorption d'eau ou indirectement par l'intermédiaire d'une nourriture contaminée.

La disparition de la faune et de la flore aquatiques sont les conséquences des marées noires. Les hydrocarbures lourds (pétrole brut et autres types de fioul) provoquent un engluement physique où la végétation recouverte est étouffée et les oiseaux mazoutés sont incapables de voler et ne peuvent plus se nourrir. Tandis que les hydrocarbures légers comme les carburants ont des effets toxiques. Ils pénètrent dans les chaînes alimentaires marines et se bioaccumulent. Le zooplancton peut être aussi touché par ce type de pollution qui par conséquent réduit la teneur en oxygène dissous.

De même pour les pesticides, ils sont accumulés par certains organismes et atteignent de ce fait la dose létale. La caractéristique la plus importante de ces produits polluants est leur résistance à la dégradation chimique et biochimique (PNUE, 1984).

Les déchets peuvent aussi nuire à la biodiversité, en particulier aux animaux marins et côtiers qui les confondent avec des proies et les ingèrent.

**I.5..3. Impact sur les cultures**

Les eaux usées traitées utilisées pour l'irrigation présentent des risques par les contaminants toxiques et pathogènes pour les produits agricoles, le sol et les eaux souterraines (Aiello et al., 2007; Qadir et al., 2007). Les eaux usées peuvent contenir une variété de polluants, tels que les sels, les métaux lourds, les composés organiques, les bactéries entériques et les virus.

Une accumulation excessive de métaux lourds dans les sols par l'irrigation avec des eaux usées traitées crée des problèmes de production agricole (Singh et al., 2004) et entraîne l'absorption de métaux par les cultures, affectant ainsi la qualité et la sécurité des aliments (Khan et al., 2008). L'un des problèmes cruciaux de la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures est la présence de micro-organismes pathogènes (Rubino and Lonigro, 2008 ; Petterson et al., 2011) qui représentent un risque potentiel pour la santé des consommateurs lorsqu'ils entrent dans la chaîne alimentaire (Toze, 2006).

**I.6. Oxygénation et désoxygénation**

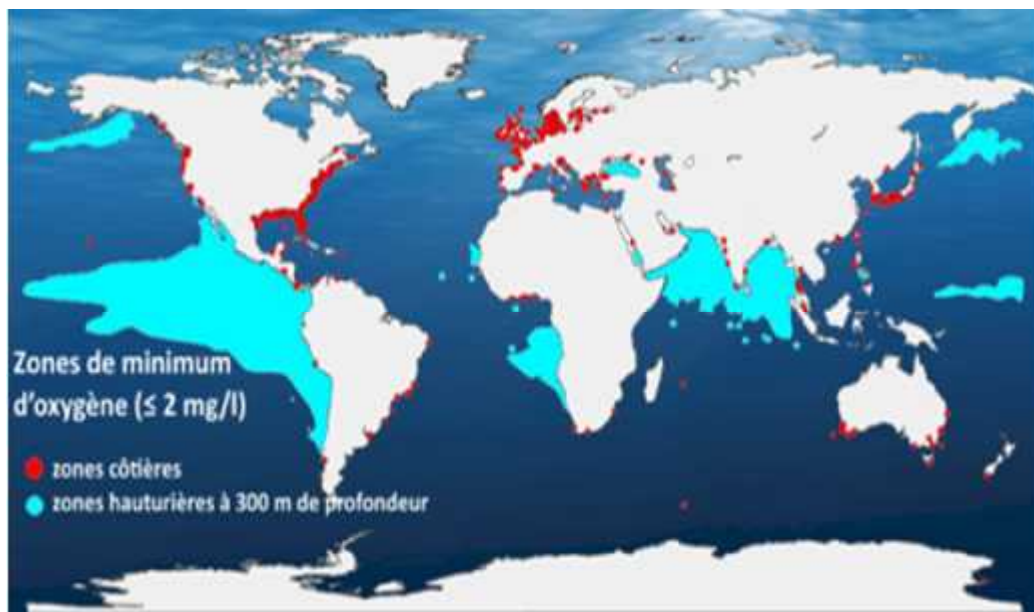
L'oxygène est un paramètre déterminant pour la faune et la flore. Cependant, les effets combinés du changement climatique et de la surcharge en nutriments agissent sur le taux d'oxygène dans les milieux aquatiques. La faible teneur en oxygène, qualifiée d'hypoxie, peuvent freiner la croissance des espèces, entraver leur reproduction et entraîner des maladies voire la mort. L'anoxie est le stade ultime, où l'oxygène dissous est absent dans l'eau. Les

phénomènes d'hypoxie et d'anoxie ont un impact considérable sur la biodiversité, du fait des épisodes de mortalités qu'ils provoquent.

Le changement des teneurs en oxygène peut aussi déclencher le rejet de substances chimiques dangereuses telles que le protoxyde d'azote, un gaz à effet de serre jusqu'à 300 fois plus puissant que le dioxyde de carbone, et le sulfure d'hydrogène toxique.

Dans les eaux côtières, la pollution par les nutriments provenant des terres crée des proliférations algales qui consomment énormément d'oxygène et lorsqu'elles meurent et se décomposent elles augmentent considérablement le nombre et la taille des "zones mortes», où le niveau d'oxygène est insuffisant pour assurer la survie de la majeure partie des organismes aquatique.

L'apparition des zones mortes en haute mer est due au changement climatique (figure I.4). Le réchauffement des eaux de surface empêche l'oxygène d'atteindre les profondeurs de l'océan. De plus, lorsque l'océan se réchauffe, il retient moins d'oxygène (Garcia and al., 2010a).



**Figure I.4 :** Carte représentant les zones en décroissance d'oxygène.

- **En rouge**, sites côtiers où les charges en nutriments ont causé la décroissance du contenu en oxygène jusqu'à des concentrations  $< 2 \text{ mg/l}$ .
- **En bleu**, zones de minimum d'oxygène à 300 m de profondeur.

## I.7. Eutrophisation

L'eutrophisation est l'ensemble des symptômes que présente un écosystème suite à un apport excessif de nutriments notamment l'azote et de phosphore d'origine humaine ou agricole. Ces nutriments favorisent le développement intense de plantes et d'algues appelé « la prolifération

végétale » Certains paramètres du milieu accentuent l'eutrophisation comme la température élevée, l'abondance de la lumière et la faible circulation de l'eau. Les proliférations végétales présentent ainsi un impact sur les milieux aquatiques et leur biodiversité. De ce fait, elles entraînent une consommation d'oxygène excessive notamment la nuit (phénomène de respiration des végétaux) ou quand les quantités énormes de plantes se décomposent (oxydation de la matière organique). Le milieu est ainsi vidé de son oxygène, les organismes qui y vivent meurent par asphyxie.

La décomposition des plantes mortes produit des gaz toxiques tels que le sulfure d'hydrogène ( $H_2S$ ) et le méthane ( $CH_4$ ), provoquant ainsi des nuisances olfactives et des problèmes de santé.

Les proliférations végétales peuvent rendre l'accès impossible aux milieux aquatiques, contraignant l'activité de navigation comme elles impactent la pisciculture ou l'élevage suite aux risques toxiques liés à la mortalité des animaux aquatiques.

## **I.8. Notions sur les Traitements et l'épuration des eaux usées**

Le traitement des eaux usées est la première barrière contre les risques posés par les différents polluants. Il permet de réduire considérablement la charge excrétée dans l'environnement.

### **I.8.1. Prétraitement**

Le prétraitement permet d'éliminer la fraction la plus grossière pour ne pas gêner les opérations ultérieures.

#### **I.8.1.1. Dégrillage et tamisage**

Le dégrillage consiste en l'insertion d'une grille en travers du courant d'eau usée à prétraiter. Son objectif est d'éliminer les déchets volumineux et de protéger la station de traitement. La vitesse moyenne de passage est comprise entre 0,6 et 1 m/s ou 1,20 à 1,40 m/s en débit maximal avec une perte de charge ( $\Delta h$ ) comprise entre 0,05m et 0,15m en eau de consommation et 0,1 à 0,40 m en eau résiduaire.

Le tamisage est un dégrillage fin (le macrotamisage avec des mailles de dimensions  $>250 \mu$  et microtamisage avec un vide de maille compris entre  $30 \mu$  et  $150 \mu$ ).

La vitesse de filtration du tamis est de 40 cm/s avec une perte de charge de 20 cm d'eau.

## **I.8.1.2. Dessablage**

Il a pour but d'extraire des eaux les graviers, sables et particules minérales plus ou moins fines (les particules à granulométrie supérieure à 200  $\mu\text{m}$ ) de façon à éviter les dépôts dans les canaux et conduites, à protéger les pompes et autres appareils contre l'abrasion.

## **I.8.1.3. Décantation**

C'est une technique de séparation liquide-solide, basée sur la loi de gravitation de Newton qui consiste à séparer d'un liquide les particules en suspension. Le processus de décantation dépend de plusieurs facteurs, tels que la qualité de la suspension, la surface disponible, le débit, le temps de passage et le sens d'écoulement (les bassins à flux horizontal et bassins à flux vertical).

## **I.8.1.4. Déshuilage et dégraissage**

C'est une opération destinée à éliminer les graisses et les huiles présentes dans les eaux résiduaires (stations-service, abattoirs, industries alimentaires etc...) (Photo I.1).



**Photo I.1 : Système de déshuilage**

## **I.8.1.5. Dilacération**

Cette opération concerne particulièrement les eaux résiduaires. Elle a pour but de broyer les matières solides et de les transformer en particules plus fines qui seront envoyées vers les décanteurs.

## I.8.2. Traitement physico-chimique

### I.8.2.1. Neutralisation

La neutralisation est une opération de traitement d'un acide par une base et inversement, jusqu'à l'obtention d'un milieu de pH égal à 7.

La neutralisation des eaux alcalines utilise des acides courants ( $H_2SO_4$ ,  $HCl$ ) et des gaz ( $SO_2$ ,  $CO_2$ ) que l'on insuffle au sein de l'eau à traiter.

### I.8.2.2. Précipitation

Action chimique par laquelle un corps en solution se sépare de son solvant et se dépose au fond. La précipitation est une méthode très largement utilisée pour éliminer les composés solubles, le plus souvent minéraux, les sels (carbonates, sulfates, ...), les phosphates à l'origine de l'eutrophisation et les métaux lourds.

### I.8.2.3. Purification par adsorption (sur charbon actif)

La sorption sur charbon actif est employée pour le traitement des eaux résiduaires, surtout pour éliminer les micropolluants toxiques (hydrocarbures chlorés).

En poudre ou en grains, le charbon actif est un corps qui comporte un grand nombre de pores étroits de diamètre entre 5 et 1000Å. Sa surface spécifique est souvent au environ de 1000 m<sup>2</sup>/g.

### I.8.2.4. Dégazage physique (stripping)

Ce traitement vise à éliminer les gaz dissous qui peuvent être des polluants ( $SO_2$ ,  $H_2S$ ) mais aussi des agents de corrosion ou d'entartrage ( $O_2$ ,  $CO_2$ ).

### I.8.2.5. Techniques membranaires

C'est un procédé de séparation au cours duquel une solution (eau+ matières dissoutes) est forcée à travers une membrane synthétique. Le but de ce procédé est de retenir côté concentrat (résidu concentré) les matières dissoutes dans l'eau brute (sels, impuretés...) pour obtenir un perméat (eau purifiée).

### I.8.2.6. Désinfection des eaux usées

Elle se fait soit par :

- **Procédé physique** comme les rayons ultraviolets (émis par des lampes à vapeur de mercure avec une longueur d'onde comprise entre 200 et 300nm) ou la chaleur (qui détruit la totalité des micro-organismes vivants indésirables à 65°C en quelques minutes pour certaines souches et plus de 120°C pendant plus d'une heure pour les souches résistantes).



- **procédé chimiques** par utilisation du chlore qui est un oxydant puissant ou l’ozone qui est le seul procédé efficace contre les virus (Lazarova et al., 2003). Comme il existe d’autres produits tels que les ferrates ; le dioxyde de chlore et l’acide peracétique (Baumont, 2004).

**I.8.3. Traitement biologique**

Un grand nombre de micro-organismes sont capables de métaboliser la matière organique qui va permettre l’épuration des eaux usées chargées en matière organique biodégradable.

Les micro-organismes sont classés en germes :

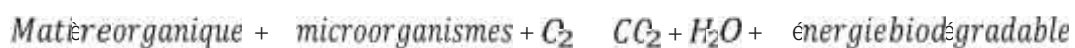
- Aérobie exigeant l’oxygène pour assurer leur métabolisme.
- Anaérobies qui tirent leurs besoins énergétiques de la matière organique en l’absence de l’oxygène.
- Facultatifs avec métabolisme aérobie et anaérobie.

La majorité des micro-organismes présents dans les procédés d’épuration biologique sont du type facultatif. La plupart des procédés font appel à des organismes hétérotrophes qui utilisent à la fois le carbone organique comme source d’énergie et comme source de carbone pour la synthèse cellulaire.

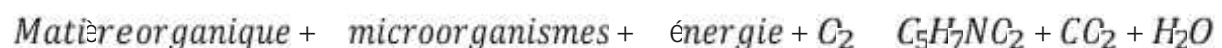
Par contre, les micro-organismes autotrophes n’utilisent pas le carbone organique comme source de carbone mais le CO<sub>2</sub> ou les bicarbonates. Les germes chimiotrophes tirent leur énergie de l’oxydation de composés inorganiques, l’azote, et le soufre contenus dans les eaux usées.

Les mécanismes réactionnels de la métabolisation aérobie de la pollution carbonée sont les suivants :

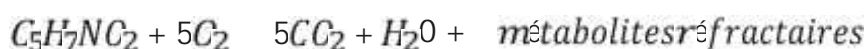
**-Réaction de catabolisme :**



**-Réaction d’anabolisme :**



**-Oxydation de biomasse**



**C<sub>5</sub>H<sub>7</sub>NC<sub>2</sub>**: Formule qui décrit la composition de la matière vivante des bactéries.

L'épuration biologique s'applique aux composés oxydables qui, en solution ou en suspension, constituent souvent la fraction majeure de la pollution des eaux. Les matières oxydables biodégradables sont celles qui peuvent être éliminées par les micro-organismes à qui elles servent de nourriture.

Le rapport  $\frac{DCO}{DBC_5}$  donne une estimation de la biodégradabilité des matières présentes dans l'eau usée par les micro-organismes.

Si  $\frac{DCO}{DBC_5} < 1$  alors l'effluent est excellent pour le traitement biologique ;

Si  $1 < \frac{DCO}{DBC_5} < 2,5$  alors bonne traitabilité de l'effluent par voie biologique ;

Si  $2,5 < \frac{DCO}{DBC_5} < 3,5$  possibilité de traitement biologique avec adaptation de souches ;

Si  $\frac{DCO}{DBC_5} > 3,5$  alors le traitement biologique est impossible.

### **I.9. Prévention de la pollution des eaux**

Les mers, les océans, les lacs et les fleuves contribuent à l'économie mondiale, nationale et locale avec création de centaines de millions d'emplois à travers le monde. Pour cela, il faut réduire la pollution des eaux de plusieurs manières :

- Epuration adéquate des eaux usées avant leur rejet direct ;
- Eviter la désoxygénation ;
- Réduire les risques de pollution accidentelle ;
- Réduire l'utilisation de produits phytosanitaires ;
- Réglementer la fertilisation des sols ;
- Réduire l'effet des algues.

**Références bibliographiques**

- Aiello R., Cirelli G.L., Consoli S.** ,(2007). Effect of reclaimed wastewater irrigation on soil and tomato fruits: a case study in Sicily (Italy). *Agric. Water Manage.* 93:65–72.
- Anonyme** . (1999). Office Nationale de l'eau potable. Revue mensuelle du monde rural et de l'environnement, N° 50 septembre 2001.
- Aubert H.**, (1970). Pollution des océans. Mise à jours scientifiques, 5-3 : 246-268.
- Baumont S, Camard J-P, Lefranc A., Franconie A.**, (2004). Réutilisation des eaux usées : risques sanitaires et faisabilité en Ile-de-France. Rapport ORS, 220p.
- Bellan G. et Pérès J.M.**, (1994). La pollution des mers. 3<sup>ème</sup> édition, presses universitaires de France, collection que sais-je ? 127p. Science, 4 janvier 2018.
- Cadillon and Tremea**, (1989). Technical aspect of wastewater reuse in agriculture. International seminar on wastewater reuse un agriculture. Antipolis S. (France)..
- Cauchi, Hyvrard, Nakache, Schwartzbrod, Zagury, Baron, Carre, Courtois, Denis, Cuinat R.**, (1976). La pollution des eaux. Collection « que sais-je » P.U.F 4<sup>ème</sup> ed.
- Colas R.**, (1976). La pollution des eaux. Collection « que sais-je » P.U.F 4<sup>ème</sup> ed.
- Data Stream Initiative** , (2021). Un guide de surveillance de la qualité de l'eau.
- Garcia, H. E., R. A. Locarnini, T. P. Boyer, and J. I. Antonov**, (2010a). World Ocean Atlas Volume 3: Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Oxygen
- Gaujous D.** (1993). La pollution dans les milieux aquatiques. Aide-mémoire. Editions Techniques et Documentation. 212p.
- Gaujous D.** (1995). La pollution des milieux aquatiques. Aide-mémoire, Paris, 1995. 183p.
- Huynh TMD** (2009). Impact of heavy metals on plant/worm / soil microflora interaction « Impact des métaux lourds sur les interactions plante / ver de terre/ microflore tellurique » (Doctoral dissertation, Université ParisEst.
- John M. Evans, Howard Perlman** ,(2013). USGS Georgia Water Science Center.
- Khan S., Cao Q., Zheng Y.M., Huang Y.Z., Zhu Y.G.**, (2008). Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. *Environ. Pollut.* 152:686–692.

- Lazarova V., Gaid A., Rodriguez-Gonzales J., Alday Ansola J. (2003). L'intérêt de la réutilisation des eaux usées : analyses d'exemples mondiaux. *Techniques, Sciences et Méthodes*, 9 :64-85
- Le Goff F. et Bonnomet V., (2004). Devenir et comportement des métaux dans l'eau : biodisponibilité et modèles BLM. Rapport technique, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, direction de l'eau, Paris.
- l'Hôte Y., (1990). « Historique du concept de cycle de l'eau et des premières mesures hydrologique en Europe », *Hydrologie Continentale*, vol. 5, n° 1, p. 13-27
- Leynaud G. et Verrel J. L., (1980). Modification du milieu aquatique sous l'influence des pollutions. In : Pesson P. (ed.). *La pollution des eaux continentales. Incidence sur les biocénoses aquatiques*. Gauthier-Villars. 1-28.
- Mara D. (2011). *Waste stabilisation pond design manual*, Power and Water Corporation éd..
- Mesquita M.E., Vieirae Silva J.M. et Domingues H., (1998). Competitive sorption of Cu and Zn by sludge amended acid soils. *Compte rendu du 16<sup>ème</sup> congrès mondial de science du sol*. Montpellier, 2p. CD-ROM.
- Pidwirny, M., 2006. *The Atmospheric composition. Fundamentals of Physical Geography*, 2nd Edition. Available online: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8b.html>
- PNUE/CEE/FAO/UNESCO/OMS/AIEA. (1984). *Les polluants d'origine ellurique en Méditerranée : Rapport et études du PNUE sur les mers régionales N° 32*.
- Projet Mor., (1986). Réutilisation des eaux usées à des fins agricoles. 86/018.PNUD/FAO/OMS/MAMVA/AGR.
- Qadir M., Wichnel D., Raschid-Sally L., Singh Minhas P., Drechsel P., Bahri A., McCornick P., (2007). Agricultural use of marginal-quality water-opportunities and challenges. In: Molden, D. (Ed.), *Water for Food; Water for Life. A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Earthscan, 8–12 Camden High Street, London, pp. 425–457.
- Pettersen S.R., Ashbolt N.J., Sharma A., (2011). Microbial risks from wastewater irrigation of salad crops: a screening-level risk assessment. *Water Environ. Res.* 73(6):667–672.

-**Rodier J.** (1984). Analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. Ed. Dunod, 7<sup>ème</sup>éd, Paris.

-**Rubino P., Lonigro A.** (2008). Municipal treated wastewater irrigation: microbiological risk evaluation. *Ital. J. Agron.* 1 (1):119–124.

-**Singh K.P., Mohan D., Sinha S., Dalwani R.** (2004). Impact assessment of treated/untreated wastewater toxicants discharged by sewage treatment plants on health agricultural and environmental quality in the wastewater disposal area. *Chemosphere* 55:227–255.

-**Toze S.** (2006). Reuse of effluent water-benefits and risks. *Agric. Water Manage.* 80:147–159.

# **Chapitre II :**

## **pollution des sols**

## **II.1. Bases en sciences du sol**

### **II.1.1. Généralités**

Le sol est une couche de quelques centimètres à plusieurs mètres de matière organique et inorganique, accumulée au-dessus de la roche, capable de porter une végétation. Sa formation est de 0,1 à 1mm en 10 ans.

C'est un milieu naturel à propriétés essentiellement dynamiques, différencié en plusieurs horizons : horizon (A) appelé l'humus, une couche inférieure ou horizon (B) et une roche mère non altérée (horizon C) (Koller, 2009).

Les composantes non biotiques du sol comprennent les trois phases de la matière, soit les solides (matériaux organiques composés de résidus végétaux et animaux à des stades différents de décomposition (5%) et inorganiques minéraux (45%), les liquides (l'eau du sol) et les gaz (l'air du sol soit 25%). Sa composante biotique est constituée des organismes vivants environ 80 000 dans 1dm<sup>3</sup> de terre. Cet environnement physico-chimique spécifique associé à la communauté des organismes qui y vivent constitue un écosystème dans lequel les ions et les molécules en présence se déplacent d'une de ses composantes à l'autre.

Le sol agit comme un filtre, réservoir et même transformateur pour les substances naturelles et anthropogènes dont certaines parviennent dans le sol intentionnellement (engrais, pesticides), d'autres accidentellement ou de manière diffuse. Un tel fonctionnement est assuré quand ses composants restent en équilibre. Actuellement, cet équilibre est détruit ; certains produits chimiques perturbent le développement des végétaux et des micro-organismes et freinent la dégradation de la litière dans les environs des retombées.

### **II.1.2. Propriétés du sol**

#### **II.1.2.1. Propriétés physiques**

##### **Structure**

La structure d'un sol traduit l'assemblage de ses constituants. Elle résulte de la force de cohésion de l'argile et de l'humus qui tendent à agglomérer entre elles les particules formant ainsi les structures suivantes :

- Structure particulaire : Les particules solides sont libres. Le sol ne retient pas l'eau.
- Structure fragmentaire : Les éléments solides sont cimentés par le complexe argilo-humiques avec formation d'agrégats plus ou moins gros entre lesquels se trouvent des vides permettant la circulation de l'eau, de l'air et la pénétration des racines.

- Structure compacte ou massive : Les particules forment un bloc sans aucun vide.

**Texture**

La texture précise la proportion des divers éléments physiques (argile, limon, gravier). Elle est aussi caractérisée par la porosité qui est une grandeur physique exprimant le rapport entre le volume occupé par les pores et son volume total.

La texture d'un sol influe sur la perméabilité à l'eau exprimée en  $\text{cm}^3/\text{h}$  et à l'air.

**Température du sol**

La température du sol influence l'intensité et la vitesse de la plupart des phénomènes biologiques et physiques.

**Porosité**

La porosité d'une couche de sol est la partie d'un volume apparent unitaire, qui n'est pas occupé par la phase solide. Elle est déterminée par la mesure de la densité apparente  $d_a$  et de la densité  $d_r$ .

La porosité totale  $P$  s'exprime en pourcentage du volume de terre par la relation suivante :

$$P = [1 - \frac{d_a}{d_r}] 100 \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$d_a$ : poids de terre sèche par unité de volume apparent ;

$d_r$ : poids spécifique réel de la phase solide ;

$P$  : volume des espaces lacunaires remplis d'eau ou d'air.

**Perméabilité**

La perméabilité est l'aptitude du sol à laisser passer l'eau vers les couches inférieures. Elle dépend de la texture et de la structure.

Quand le sol est saturé, l'eau s'infiltré sous l'influence de la gravité. Le débit ( $Q$ ) est donné par la loi de Darcy :

$$Q = K(H.S/I) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$Q$  : débit ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ;

$K$  : la conductivité hydraulique ( $\text{m/s}$ ) qui exprime la perméabilité du sol ;

$H$  : la charge hydraulique ( $\text{m}$ ) ;

$S$  : la section de terrain concernée ( $\text{m}^2$ ) ;

$I$  : l'épaisseur de la tranche de sol ( $\text{m}$ )



**II.1.2.2. Propriétés physico-chimiques pH**

Ce paramètre exprime le degré d'acidité ou de basicité du milieu. Il est représenté par le logarithme de l'inverse de la concentration en ion H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> (ion hydronium).

$$pH = \log(1/H^+) \quad (II.3)$$

**Pouvoir adsorbant**

Le pouvoir adsorbant d'un sol est caractérisé par sa rétention à certains éléments fertilisants. Ce sont les colloïdes (argile et humus) qui possèdent le pouvoir adsorbant le plus élevé, d'où le nom de complexe adsorbant argilo-humique.

**II.2. Causes et conséquences de la dégradation/pollution des sols**

**II.2.1. Définition de la pollution des sols**

La pollution des sols fait référence à la concentration plus ou moins importante de composés chimiques toxiques dans les sols. La distribution horizontale et verticale des polluants varie dans l'espace et le temps selon la structure et la texture du sol, de la température et de la forme et le type de polluant (Thibault et al., 2000).

Cette pollution pourra se diffuser ensuite dans l'environnement via l'eau, l'air ou les organismes vivants du sol (Zouboulis et al., 2004.), entraînant un dysfonctionnement des écosystèmes et des dangers non négligeables pour la santé.

**II.2.2. Causes de la pollution des sols**

Les sources de pollution du sol sont aussi nombreuses que diverses.

Tableau II.1 : Les différents types des déchets solides

Déchets ménagers	Tous déchets issus des activités des ménages, ainsi que les déchets analogues provenant des activités industrielles, commerciales.
Déchets industriels	Tous déchets non ménagers résultant d'une activité industrielle, minière...
Déchets dangereux	Tous déchets qui par leurs constituants ou par les caractéristiques des matières nocives qu'ils contiennent sont susceptibles de nuire à la collectivité ou à l'environnement.
Déchets agricoles	Tous déchets organiques générés directement par des activités agricoles, agro-alimentaires...
Déchets biodégradables	Tous déchets pouvant subir une décomposition biologique naturelle anaérobie ou aérobie
Déchets inertes	Tous déchets provenant de l'exploitation des carrières, des mines, qui ne sont pas contaminée par substances dangereuses.
Déchets médicaux	Tous déchets issus des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif.

**II.2.2.1. Les polluants agricoles**

Les taux élevés d'azote et de phosphate résultant de l'utilisation excessive des engrais, de pesticides et de fumier modifient l'acidité des sols.

Dans le sol, les pesticides sont affectés par différents processus physiques, chimiques et biologiques couplés qui conditionnent leur rétention, leur dégradation et leur transfert vers les autres compartiments de l'environnement (eau, plante, atmosphère) (Mamy et al., 2009).

**II.2.2.2. Le trafic routier**

Le trafic routier est une source d'un grand nombre de polluants (monoxyde de carbone, oxyde d'azote, dioxyde de soufre, hydrocarbures). Les véhicules sont aussi une source de métaux lourds tels que le plomb, le zinc, le cuivre et le cadmium. Ces polluants sont susceptibles de se disperser dans l'environnement proche, selon plusieurs voies comme les eaux de ruissellement et les retombées sèches ou humides. Ils ne peuvent pas être dégradés (Haferburg et Kothe 2012) et s'accumulent dans les sols pendant plusieurs années et menacent les écosystèmes et la chaîne alimentaire (Paz-Ferreiro et al., 2014 ; Wawer et al., 2015) .

**II.2.2.3. Exploitation des mines et carrières**

L'exploitation minière et l'extraction des ressources entraînent d'importants dégâts et de vastes pollutions dues notamment à la diffusion des métaux lourds naturellement présents dans les sols qui par conséquent sont dégradés jusqu'à l'épuisement.

Après exploitation, les déchets miniers sont généralement abandonnés sur place sous forme de terrils.

**II.2.2.4. Les déchets ménagers**

La quantité de déchets ménagers a connu au cours des dernières décennies un accroissement en raison de la croissance démographique accélérée. Ce phénomène est plus critique dans les pays en développement qui n'ont pas toujours les moyens pour gérer les déchets (Thonart et al. , 2005). La mise en décharge sauvage des déchets est une pratique très courante et elle peut être dommageable pour l'environnement et pour la population. Au-delà des nuisances générées (odeurs, fumée, plastiques volants), les décharges sauvages sont une source de pollution des sols et des eaux de la nappe phréatique (Nhari et al., 2014) Ces déchets devraient être recyclés (plastique) ou se dégrader naturellement.

### **II.2.2.5. L'industrie**

Tous les secteurs industriels peuvent générer différentes sources de pollutions.

L'industrie lourde produit souvent des quantités d'eau usée et de produits chimiques indésirables comme les produits pétroliers, les détergents les déchets radioactifs et qui sont susceptibles d'entrer en contact avec le sol.

### **II.2.2.6. L'urbanisation**

Une grande partie des sols est bétonnée pour répondre à la demande croissante d'urbanisation. Sous le béton, le sol est mélangé et compacté ce qui rend la circulation de l'eau et des racines des plantes difficile.

La construction de bâtiments et d'autres infrastructures urbaines nécessite souvent l'excavation et le déplacement de grandes quantités de sol. Ceci permet la perturbation de la couche arable du sol et la libération des contaminants emprisonnés dans le sol.

### **II.2.2.7. Les déchets radioactifs**

Les déchets radioactifs sont riches en métaux lourds tels que l'uranium, le radium et le plutonium dont leur durée de vie est plus ou moins longue. Présents dans le sol ou dans les sites de stockage, leurs émanations peuvent pénétrer dans l'organisme par contact, ingestion ou inhalation (Mangano, 2009).

### **II.2.2.8. Le pétrole et ses dérivés**

L'exploitation des champs pétroliers rejette dans l'environnement de nombreux résidus. Les opérations de forage introduisent du pétrole et une grande variété d'autres composés chimiques complexes dans le milieu à travers les déblais de forage et les fluides tels que les fluides à base de pétrole ou à base de fluides synthétiques (Kloff et Wicks 2004). L'utilisation du pétrole et ses dérivés a une certaine répercussion au stade du transport, du stockage sur le nombre des incidents susceptibles de contaminer les sols.

### **II.2.2.9. Les pluies acides**

Les pluies acides sont des précipitations anormalement acides causées par les polluants présents dans l'air tels que le  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{NO}_2$  et le  $\text{NO}$  qui se mélangent à la pluie pour former le  $\text{H}_2\text{SO}_3$  et le  $\text{HNO}_3$  et retombent sur le sol induisant ainsi son acidification (Schindler, 1988). Cette acidité modifie la structure des sols et empêchent le développement normal des végétaux ce qui entraîne des déséquilibres écologiques.

### II.2.3. Les conséquences de la pollution des sols

La perte de qualité sol entraîne une multitude de conséquences néfastes qui vont de leur dévaluation à l'impossibilité de les utiliser pour la construction, la culture ou, tout simplement, pour avoir un écosystème en équilibre.

Le degré de gravité de la pollution est relatif à la nature du polluant (plus ou moins dégradable ou non dégradable), à sa capacité à perturber le fonctionnement d'un écosystème ainsi qu'à la nature du sol (sa structure, sa surface, sa profondeur).

Plusieurs réactions en chaîne se mettent en place après le déséquilibre du sol causé par les différents polluants :

#### II.2.3.1. Déclin de la biodiversité

Le sol entretient des liens étroits avec la vaste majorité des écosystèmes de la planète, et constitue l'une des conditions fondamentales au maintien de la vie. Il est le support de la flore et abrite une quantité considérable de micro-organismes, d'insectes et d'invertébrés qui sans eux la terre ne peut pas maintenir son équilibre et ses fonctions.

La pollution des sols entraîne l'élimination de certains maillons des écosystèmes et une diminution de la matière organique et par conséquent moins de nutriments pour les êtres vivants et moins de protection contre le transfert des polluants dans la chaîne alimentaire.

#### II.2.3.2. Diminution de la fertilité du sol

La perte de la qualité de la terre agit défavorablement sur le rendement agricole. Un sol pollué compromet la sécurité alimentaire mondiale en réduisant la quantité et la qualité des récoltes. La plupart des plantes, incapables de s'adapter à des changements du sol, se font alors plus rares.

#### II.2.3.3. Modification de la structure du sol

Les produits chimiques et les toxines déversés ou filtrés dans les sols entraînent des changements structurels dans leur composition. De même, la disparition des nombreux organismes vivants du sol tels que les vers de terre et les plantes peut affecter sa structure et avec elle sa capacité à agir comme un filtre face aux contaminants.

#### II.2.3.4. Contamination des eaux

Les rivières, les lacs et les cours d'eau sont contaminés par ruissellement et les nappes phréatiques sont directement touchées par l'infiltration des lixiviats et des eaux usées. La présence de polluants chimiques toxiques dans les eaux souterraines peut conduire à une

diminution de la ressource en eau potable et une contamination généralisée avec l'apparition de plusieurs maladies parfois mortelles.

#### **II.2.3.5. Désertification**

La dégradation des sols conduit à une perte permanente de la productivité biologique et économique des écosystèmes. Celle-ci est due à l'érosion du vent et de l'eau, à la perte de la capacité des sols à stocker l'eau, à la chute de leur fertilité, à l'absence de toute végétation : la désertification représente son stade ultime (Marc Bied et Robin D., 2017).

#### **II.2.3.6. Risques sanitaires**

Les milieux pollués comme les zones minières, les sites industriels ou d'élimination des déchets sont aussi vecteurs de maladies comme les bronchites, les cancers, l'anémie et les problèmes neurologiques.

Certains métaux lourds, métalloïdes et certains hydrocarbures, en particulier le benzène et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), sont reconnus pour leur effet CMR (cancérogène, mutagène, reprotoxique) et neurologique. En 2003, les HAP ont été rajoutés aux produits visés par la convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants : ils ont été classés comme produits très préoccupants pour la santé.

Un sol contaminé peut également affecter les cultures, le bétail et entraîner des intoxications alimentaires à grande échelle.

### **II.3. Comportement des éléments traces dans le sol**

#### **II.3.1. Origine des éléments traces métalliques**

Les éléments traces métalliques (ETM) proviennent des rejets industriels tels que les déchets d'équipements électriques et électroniques, les matières plastiques, les déchets médicaux et les matières plastiques (Bodjona et al., 2012) ou ils sont émis par le trafic routier sous la forme d'émissions d'échappement, ainsi que par la libération de composants dus à l'usure des matériaux tels que les freins, les pneus et les convertisseurs catalytiques (Zereini et al., 2012).

#### **II.3.2. Devenir des ETM**

Certains métaux lourds, comme le manganèse (Mn), le zinc (Zn), le cuivre (Cu) et le bore (Br) représentent les oligo-éléments bénéfiques aux êtres vivants, mais ils deviennent toxiques à des concentrations très élevées. D'autres par contre, tels que le mercure (Hg), le plomb (Pb) et le cadmium (Cd) sont toxiques à faibles doses.

Tableau II.2 : Seuil de toxicité pour certains polluants (Koller, 2009)

Elément	Plomb	Cuivre	Cadmium	Zinc	Nickel	Chrome	Cobalt	Mercur	Fluor
Valeur indicative (mg/kg de sol MS)	50	40	0,8	150	50	50	25	0,5	700

Les éléments traces métalliques ne sont pas dégradables dans le sol. Ils peuvent persister longtemps dans les écosystèmes terrestres et aquatiques et constituer un danger potentiel par bio-accumulation le long de la chaîne alimentaire ou migrent vers les eaux souterraines (Matech et al., 2014).

Ils forment souvent des composés stables avec les particules du sol. Ils se concentrent dans le sol et ne sont que graduellement transportés par lixiviation dans les eaux souterraines ou adsorbés par les végétaux.

La distribution verticale des métaux lourds dans les sols révèle leur accumulation dans les zones superficielles et qui pourrait être expliquée par la teneur des sols en matière organique et le pH. Ayant une capacité d'échange cationique élevée et d'importante surface spécifique, la matière organique du sol contribue à absorber de fortes quantités de métaux lourds.

Les paramètres physico-chimiques du sol ont une considérable influence sur la concentration, le comportement et le devenir des éléments traces métalliques. Le pH est considéré comme l'un des facteurs importants qui détermine la concentration des métaux lourds dans le sol, leur mobilité et leur disponibilité pour les plantes. Une augmentation du pH favorise l'adsorption des métaux. Dans un milieu acide, l'adsorption du plomb et du cuivre peut être obtenue à  $\text{pH} \geq 5$ , celle du cadmium à  $\text{pH} \geq 6$  (Alkorta, et al., 2004, Marseille et Denot, 2007).

Les caractéristiques géologiques du sol sont aussi un paramètre important dans le devenir des éléments traces métalliques. Ainsi, les sols sablonneux possèdent une faible capacité de rétention des métaux lourds cationiques car ils contiennent une faible teneur de phyllosilicates capables d'adsorber de fortes quantités de métaux lourds (Nduwayezu, 2010).

#### **II.4. Comportement des polluants organiques dans le sol**

Les polluants organiques sont des substances à base de carbone telles que les hydrocarbures, solvants chlorés, dioxines, furanes, pesticides, les polychlorobiphényles (PCB), les polychloroterphényles (PCT) les phénols et les chlorophénols, les tensio-actifs, etc...).

Ils sont fixés au sol en fonction de leur solubilité dans l'eau, de leur structure moléculaire et de leur groupe fonctionnel et se présentent sous différentes formes : dissoute dans la solution du sol, volatilisée ou liée à la matrice organique ou minérale du sol. Seule la fraction phytodisponible sera susceptible d'être prélevée par la plante au cours de sa croissance.

### **II.4.1. La mobilité**

Quand une substance entre en contact avec le sol, son comportement dépend de son état (liquide, gazeux ou solide), de son volume et de ses propriétés physico-chimiques et celles du milieu. La mobilité des polluants dans le sol est directement liée à leurs caractéristiques de rétention (Barriuso et al.1996).

Une substance liquide répandue en grande quantité sur le sol s'écoule plus ou moins en fonction de sa viscosité mais aussi de la perméabilité du sol.

La matière organique est un important adsorbant pour toutes sortes de polluants organiques car elle réagit avec les groupements fonctionnels des contaminants.

Les substances et leurs produits de transformation ne restent pas à l'endroit où elles sont rejetées, mais elles peuvent passer d'un milieu à l'autre. La distribution des contaminants dépend de la perméabilité du sol et de ses propriétés physico-chimiques ainsi que des propriétés des polluants. Les composés organiques apolaires auront par exemple plus d'affinité avec l'argile. Le transport des composés dissous dans le sol peut s'effectuer par diffusion, par entraînement par l'écoulement de l'eau ou par les deux processus.

### **II.4.2. La transformation et la dégradation**

Les polluants organiques se transforment et se dégradent relativement vite dans le sol. La première étape de la substance est souvent une hydrolyse qui s'effectue en présence d'eau. Les réactions de réduction et d'oxydation peuvent conduire à l'altération chimique des substances polluantes.

La photominéralisation des polluants organiques adsorbés est basée sur l'absorption des rayons UV de longueur d'onde supérieure à 290 nm.

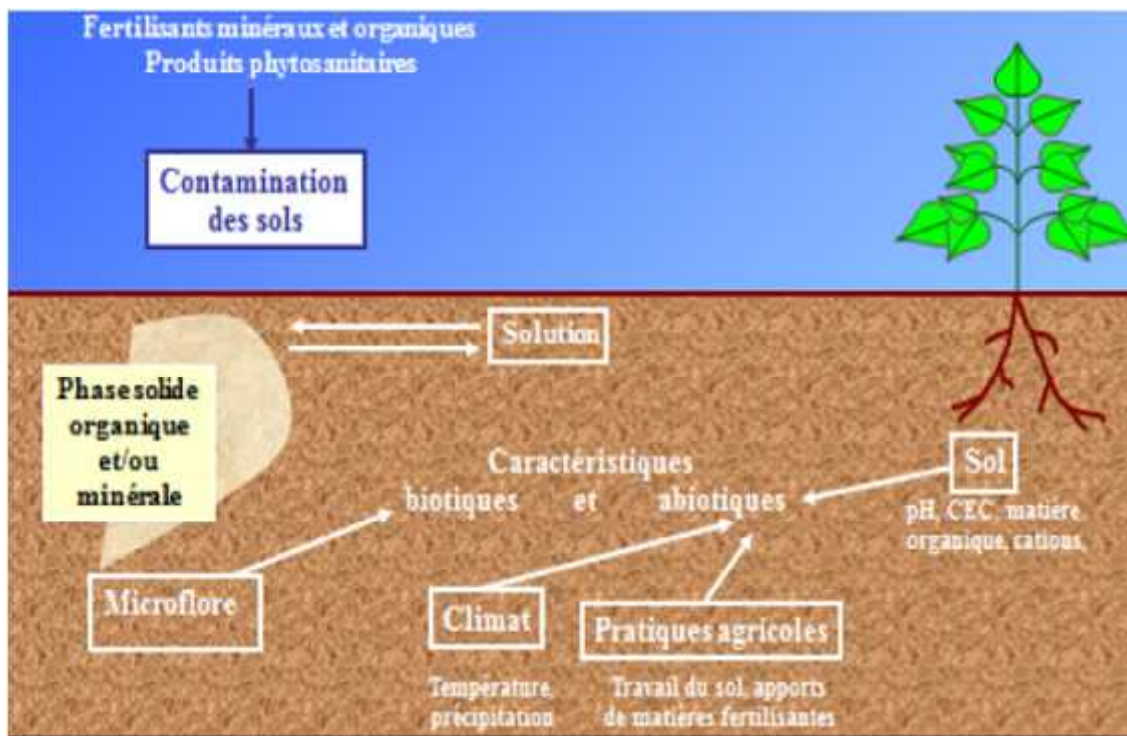
La dégradation biologique des polluants organiques est assurée par les micro-organismes.

### **II.4.3. L'accumulation**

Elle intervient quand les polluants mettent davantage de temps à être transformés ou dégradés. Certains polluants organiques persistants (POP), tels que les PCB et le DDT, présentent la particularité de s'accumuler dans la chaîne alimentaire (bioamplification). Ils sont particulièrement toxiques, persistants, car ils sont résistants aux dégradations biologiques naturelles, et peuvent être transportés sur de longues distances.

La teneur en matière organique joue un rôle sur l'aptitude du sol à retenir plus ou moins fortement les polluants organiques qu'ils soient polaires ou apolaires. Elle joue également un rôle sur les réactions biochimiques amenant à la dégradation des polluants (figure II.1).

Le pH, la CEC, l'humidité du sol, température et la solubilité dans l'eau auront une influence principalement sur les composés polaires.



**Figure II.1** : Caractéristiques biotiques et abiotiques du milieu influençant sur le devenir des polluants organiques (selon Morel, 1996)

### II.5. Analyse de risques et législation

L'évaluation des risques spécifiques à un site suppose d'identifier :

- le danger ;
- les voies d'exposition ;
- les cibles (biosphère, eau superficielle, etc...).

**Une analyse comprend :**

- une évaluation géomécanique ;
- une évaluation géologique ;
- Une évaluation hydrogéologique ;
- une évaluation des incidents ;



- une évaluation géochimique ;
- une évaluation à long terme.

### **L'étude des impacts comprend :**

- des impacts immédiats ;
- des impacts différés ;
- des impacts secondaires.

### **Législation**

Des lois et des normes ont été produites par l'OMS et l'union européenne afin de prévenir, identifier, surveiller, diagnostiquer, traiter les pollutions et maîtriser leurs impacts dans les meilleures conditions. En Algérie, des lois et des arrêtés ont aussi été produits dans le cadre de la définition des modalités de la gestion de certains déchets.

### **Loi n° 2003-10 du 19 Jomada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable**

Loi n° 2001-19 du 27 Ramadhan 1422 correspondant au 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.

Textes d'application

1/ Décret exécutif n° 2002-372 du 6 Ramadhan 1423 correspondant au 11 novembre 2002 relatif aux déchets d'emballages.

2/ Décret exécutif n° 2004-199 du Aouel Jomada Ethania 1425 correspondant au 19 juillet 2004 fixant les modalités de création, d'organisation, de fonctionnement et de financement du système public de traitement des déchets d'emballages.

3/ Décret exécutif n° 2003-477 du 15 Chaoual 1424 correspondant au 9 décembre 2003 fixant les modalités et les procédures d'élaboration, de publication et de révision du plan national de gestion des déchets spéciaux

Arrêté du 7 Rabie El Aouel 1429 correspondant au 15 mars 2008 portant désignation des membres de la commission chargée de l'élaboration du plan national de gestion des déchets spéciaux.

Arrêté du 9 Chaâbane 1435 correspondant au 7 juin 2014 portant désignation des membres de la commission chargée de l'élaboration du plan national de gestion des déchets spéciaux.

Arrêté du 23 Dhou El Hidja 1442 correspondant au 2 août 2021 portant désignation des membres de la commission chargée de l'élaboration du plan national de gestion des déchets spéciaux.

4/ Décret exécutif n° 2003-478 du 15 Chaoual 1424 correspondant au 9 décembre 2003 définissant les modalités de gestion des déchets d'activités de soins.

Arrêté interministériel du 30 Rabie Ethani 1432 correspondant au 4 avril 2011 fixant les modalités de traitement des déchets anatomiques.

5/ Décret exécutif n° 2004-210 du 10 Joumada Ethania 1425 correspondant au 28 juillet 2004 définissant les modalités de détermination des caractéristiques techniques des emballages destinés à contenir directement des produits alimentaires ou des objets destinés à être manipulés par les enfants.

6/ Décret exécutif n° 04-409 du 2 Dhou El Kaada 1425 correspondant au 14 décembre 2004 fixant les modalités de transport des déchets spéciaux dangereux

Arrêté interministériel du 26 Chaouel 1434 correspondant au 2 septembre 2013 fixant le contenu du dossier de demande d'autorisation de transport des déchets spéciaux dangereux, les modalités d'octroi de l'autorisation ainsi que ses caractéristiques techniques.

Arrêté interministériel du 26 Chaouel 1434 correspondant au 2 septembre 2013 fixant les caractéristiques techniques des étiquettes des déchets spéciaux dangereux.

7/ Décret exécutif n° 04-410 du 2 Dhou El Kaada 1425 correspondant au 14 décembre 2004 fixant les règles générales d'aménagement et d'exploitation des installations de traitement des déchets et les conditions d'admission de ces déchets au niveau de ces installations

8/ Décret exécutif n° 2005-314 du 6 Chaâbane 1426 correspondant au 10 septembre 2005 fixant les modalités d'agrément des groupements de générateurs et/ou détenteurs de déchets spéciaux

9/ Décret exécutif n° 2005-315 du 6 Chaâbane 1426 correspondant au 10 septembre 2005 fixant les modalités de déclaration des déchets spéciaux dangereux

10/ Décret exécutif n° 2006-104 du 29 Moharram 1427 correspondant au 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux.

11/ Décret exécutif n°07-205 du 15 Joumada Ethania 1428 correspondant au 30 juin 2007 fixant les modalités et procédures d'élaboration, de publication et de révision du schéma communal de gestion des déchets ménagers et assimilés.

12/ Décret exécutif n° 2009-19 du 23 Moharram 1430 correspondant au 20 janvier 2009 portant réglementation de l'activité de collecte des déchets spéciaux

13/ Décret exécutif n° 19-10 du 16 Joumada El Oula 1440 correspondant au 23 janvier 2019 réglementant l'exportation des déchets spéciaux dangereux.

Arrêté du 21 Rabie Ethani 1441 correspondant au 18 décembre 2019 portant désignation des membres du comité intersectoriel d'exportation des déchets spéciaux dangereux.

Arrêté du 16 Chaoual 1441 correspondant au 8 juin 2020 portant approbation du règlement intérieur du comité intersectoriel d'exportation des déchets spéciaux dangereux.

Arrêté du 16 Chaoual 1441 correspondant au 8 juin 2020 fixant les modalités d'habilitation de l'exportateur des déchets spéciaux dangereux.

Arrêté du 28 Rabie El Aouel 1443 correspondant au 4 novembre 2021 modifiant l'arrêté du 21 Rabie Ethani 1441 correspondant au 18 décembre 2019 portant désignation des membres du comité intersectoriel d'exportation des déchets spéciaux dangereux.

## **II.6. Techniques de décontamination et études de cas**

### **II.6.1. Définition**

La décontamination est un ensemble de procédés qui consistent à épurer, à isoler un milieu ayant été exposé à une pollution chronique afin le rendre apte à un nouvel usage agricole, industriel ou apte à un retour à la nature. Le procédé utilisé dépend de la nature du polluant et du degré de contamination.

Les matériaux à extraire se présentent sous différentes formes :

- Sols : depuis les argiles jusqu'aux sables.
- Sédiments dont la teneur en eau est supérieure à 50%.
- Agrégats.
- Boues.
- Produits industriels.
- Déchets solides.
- Déchets dangereux

### **II.6.2. Techniques de décontamination**

Il existe plusieurs méthodes de traitement avec un prétraitement qui permet de réduire le volume des matériaux polluants.

#### **II.6.2.1. Décontamination par lavage**

Le procédé n'est indiqué que pour les sols dont le contenu est supérieur à 30% d'argile et de limons. Il implique :

- l'excavation du sol pollué ;

- La séparation en utilisant le tamisage mécanique afin de récupérer les divers matériaux. Cette opération permet d'avoir des particules de différentes tailles.
- La gestion des résidus obtenus.

Les substances polluantes sont transférées dans une phase liquide puis concentrées. Les contaminants adsorbés en surface sont éliminés par nettoyage abrasif et scubbing avec de l'eau additionnée de surfactants ou d'autres agents chimiques. Après séparation, les contaminants sont transportés avec le solide. Le lavage du sol dépend de :

- La distribution de la taille des particules ;
- la puissance de la liaison des particules avec les polluants ;
- la distribution des polluants parmi les diverses tailles des particules.

### **II.6.2.2. Solidification et stabilisation**

La solidification et la stabilisation sont parmi les techniques les plus utilisées pour les sols pollués par les métaux.

Elles consistent à employer une substance (ciment, aluminosilicates, phosphates, chaux ou pouzzolane) pour neutraliser et fixer le sol, réduisant ainsi la solubilité et la mobilité des contaminants (Bisone et al., 2013).

Avec la stabilisation et la solidification, les polluants ne sont pas détruits mais les risques sont réduits pour l'environnement. Ces techniques sont utilisées sur les polluants non biodégradables comme les métaux lourds.

### **II.6.2.3. Vitrification**

La vitrification est un procédé thermique in situ. Lors de l'élévation de la température à environ 2000°C, avec utilisation des électrodes enfoncées dans le sol contaminé, ce dernier est transformé en un matériau fondu qui, après refroidissement, forme un verre encapsulant les contaminants. Le bloc obtenu est stable, chimiquement inerte avec un potentiel de lixiviation très faible. Les polluants organiques sont volatilisés ou pyrolysés lors de la première étape de chauffage puis migrent vers la surface sous forme gazeuse pour être récupérés et traités.

### **II.6.2.4. Biodégradation aérobie**

Les traitements biologiques font appel aux capacités naturelles des micro-organismes à dégrader les polluants organiques. Ces micro-organismes sont naturellement présents dans le sol avec de fortes proportions allant de  $10^7$  à  $10^9$  bactéries par gramme de sol.

Les micro-organismes utilisent tout ou une partie de ces polluants comme source de carbone et d'énergie pour son développement (Colin, 2000).

En condition aérobies, l'oxygène joue le rôle de facteur limitant et permet la transformation métabolique du polluant carboné en dioxyde de carbone, en eau et en biomasse (croissance des micro-organismes). D'autres facteurs environnementaux tels que la température, le pH et le taux d'humidité jouent aussi un rôle considérable pour l'activité métabolique des micro-organismes. Le pH du milieu affecte l'activité microbienne car la plupart des bactéries sont capables de se développer dans un intervalle de pH compris entre 5 et 9, avec un optimum d'environ 7.

De même, des taux d'humidité du sol inférieurs à 2% en masse limitent les vitesses des réactions de biodégradation. Inversement, des teneurs trop élevées influent sur la perméabilité des sols aux gaz et génèrent des conditions de limitation de transfert de l'oxygène.

Le procédé de la biodégradation aérobie aboutit à une dégradation totale par rapport à celui de la biodégradation anaérobie (absence d'oxygène).

### II.6.2.5. Traitement de confinement

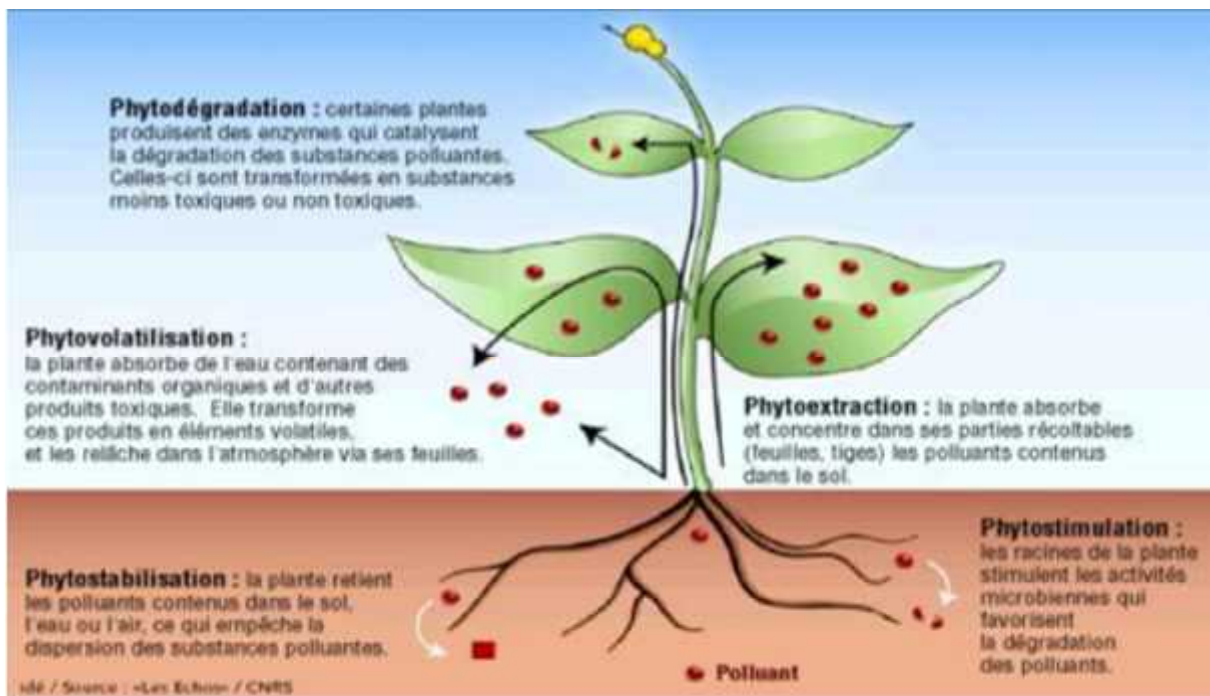
Cette technique consiste à isoler la couche de sol pollué pour éviter une contamination progressive des couches saines qui la jouxtent. La terre et les eaux polluées sont laissées sur site. Pour l'élimination du risque, des barrières sont créées entre le polluant et le milieu menacé.

### II.6.2.6. La phytoremédiation

La phytoremédiation est un ensemble de techniques qui utilisent les plantes pour immobiliser ou réduire les polluants organiques du sol. Cette technique permet aussi de traiter des contaminants inorganiques (métaux lourds et radionucléides) (Schnoor et al., 2003)(figure. II.3 ).

- **La phytoextraction** : Les polluants sont absorbés par les racines de certaines plantes appelées accumulatrices ou (hyperaccumulateur. Ils seront ensuite extraits, transportés et concentrés.
- **La phytostabilisation** : Pour protéger la chaîne trophique et les nappes phréatiques, certaines plantes sont utilisées pour réduire la biodisponibilité, la mobilisation des polluants dans le sol.
- **La rhizodégradation ou phytostimulation** : Les contaminants présents dans la rhizosphère sont dégradés par l'activité microbienne. Les plantes peuvent modifier les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol de la rhizosphère par la sécrétion d'exsudats racinaires (Chevrier, 2013).

- **La phytovolatilisation** : utilisation des espèces végétales à forte évapotranspiration pour le relargage atmosphérique des polluants du sol. Une fois volatilisés, les polluants se dispersent dans l'atmosphère à des concentrations qui, normalement, ne représentent plus un danger pour les êtres vivants.
- **La phytodégradation** : certaines plantes produisent des enzymes pour catalyser la réaction de dégradation des substances absorbées ou adsorbées. Ces dernières sont transformées en substances moins toxiques ou non toxiques par la métabolisation des contaminants dans les tissus végétaux (Origo et al., 2012).
- La phytomining : traitement de la biomasse (végétaux), chargée en métaux par le recyclage en usine.



**Figure II.2** : Schéma synthétisant les différentes formes de phytoremédiation selon (Chevrier, 2013).

### II.6.3. Etude de cas

Cette étude porte sur la décontamination d'un sol chargé en éléments traces métalliques suite à l'activité de zingeries (Photo II.1).

#### -Lieu du site contaminé

Le sol contaminé est situé en Campine, région du NordEst de la Belgique. Sa superficie est de 280 km<sup>2</sup>.



**Photo II.1** : Site de Maatheide (Lommel) avant dépollution d'après (Horckmans et al., 2006).

### **-Source de la pollution du sol**

La source de pollution est la société métallurgique de Lommel (dite « de Maatheide ») qui était une usine de raffinage et production de zinc. Cette fonderie a fonctionné depuis 1904. Le zinc était produit par un procédé pyrométallurgique, caractérisé par de très fortes émissions vers l'atmosphère de zinc et d'autres métaux lourds comme le cuivre, le cadmium, le plomb. Des déchets solides tels que les cendres et les scories métalliques furent également stockés sur ce site. En 1974, l'usine fut fermée et démolie. La végétation naturelle a disparu sur plus de 135 ha. Le site fut nivelé et laissé à l'abandon.

### **-Problématique**

Le sol était fortement contaminé par les métaux lourds. Les concentrations totales atteignaient des valeurs maximales :

- Zn (20 000 mg/kg) ;
- Pb (4 000 mg/kg) ;
- Cu (1 500mg/kg) ;
- Cd (110 mg/kg).

Cette pollution a généré de graves dangers tels que le lessivage vers la profondeur, pollution des récoltes par absorption via les racines et étalement de la zone polluée sous l'influence des vents transportant les poussières polluées vers les terres agricoles et les zones d'habitation.

### **-Objectifs**

Décontamination du sol ;

-Assurer la réhabilitation du site industriel en minimisant les risques environnementaux.

### **-Méthode de décontamination**

-Immobilisation

En 1990, une superficie de 3ha de sols acides fortement pollués par des métaux lourds a été traitée avec une combinaison de produits stabilisants (cendres volantes, compost et béringite).

-Phytostabilisation

Un mélange de plantes tolérantes aux métaux (*Agrostis tenuis* et *Festuca rubra*) a été semé.

### **-Résultats**

Après cinq et sept ans, des analyses physico-chimiques, des tests de phytotoxicité et de biodiversité ont été réalisés.

Les résultats obtenus ont révélé que dans la zone traitée, la fraction du zinc extractable était 64 fois plus faible que dans le sol non traité. De même pour le cadmium.

La diminution de la phytotoxicité a permis l'implantation de nouvelles espèces végétales sans tolérance aux métaux lourds.

La quantité de bactéries dans la zone traitée était 100 à 1000 fois supérieure à celles de la zone non traitée. Ceci a permis l'établissement d'une relation symbiotique et l'augmentation de l'activité des micro-organismes.

Après dix ans, la biodiversité a augmenté et a été diversifiée.

Les résultats obtenus ont montré l'efficacité et la durabilité du traitement.



**Références bibliographiques**

- Alkorta I., Hernandez-Alica J., Becerril J.M., Amezaga I., Albizu I., and Garbisu C,** (2004). “Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead and arsenic”, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 3, pp. 71-90.
- Barriuso E., Eklo O.M., Iglesias E. and Houot S,** (1996). Modification de la mobilité de pesticides dans les sols après addition de matières organiques exogènes. 5èmes Journées nationales de l'étude des sols, AFES, Rennes, 99-101.
- Bodjona B. M., Kili A. K., Tchegueni S., Kennou B., Tchangbedji G. & El Meray M.** (2012). Evaluation de la quantité des métaux lourds dans la décharge d'Agoè (Lomé-Togo) : cas du plomb, cadmium, cuivre, nickel et zinc. *International Journal of Biological and Chemical Science*, 6(3): 1368-1380
- Chevrier E.,** (2013). La phytoremédiation, une solution d'avenir pour le Québec. Mémoire en vue de l'obtention du grade de maître de l'environnement. Université de Sherbrooke. 102p.
- Colin F. ,** (2000). Pollution localisée des sols et sous-sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés. Tec et Doc. 417p.
- Haferburg, G., and Kothe, E.,** (2012). “Biogeosciences in heavy metal-contaminated soils”, *Soil Biology*, pp.17-34.
- L. Horckmans, R. Swennen, J. Deckers,** (2006). Geochemical and mineralogical study of a site severely polluted with heavy metals (Maatheide, Lommel, Belgium), *Environ. Geol.*, 50, 725–742
- KLOFF S. et Wicks C.,** (2004). Gestion environnementale de l'exploitation de pétrole offshore et du transport maritime pétrolier, *Sociales – CEESP*, p 80
- Koller E.,** (2009). Traitement des polluants industriels : Eau, Air, Déchets, Sols, Boues. 2ème édition. DUNOD.
- MAMY Laure , Enrique BARRIUSO , Carole BEDOS , Pierre BENOIT , Véronique CHAPLAIN , Yves COQUET , Christian MOUGIN , Valérie POT , Laure VIEUBLE-GONOD ,** (2009). Des pesticides qui s'accumulent dans les sols ? Conference: Forum des Labos INRA « Concevoir l'agriculture du futur : le pôle EGER face aux enjeux du développement durable » At: Grignon, France
- Mangano, J.J.,** (2009). Newborn hypothyroidism near the Indian Point nuclear plant. [www.radiation.org/reading/pubs/091125/hypothyroid\\_indianpoint](http://www.radiation.org/reading/pubs/091125/hypothyroid_indianpoint).
- Marc Bied-Charreton and Robin D.,** (2017). La dégradation des sols, un problème panénaire qui affecte deux milliards d'êtres humains.
- Marseille F. & Denot A.,** (2007). Mobilité et biodisponibilité des contaminants présents dans les sols aux abords des infrastructures et impact sur la santé. Rapport intermédiaire. Retrieved from [www.lara.inist.fr](http://www.lara.inist.fr) , 13/07/2019
-

- Matech F., Zaakour F., Moustarhfer K., Chemsy Z., Benazzouz I. & Saber N.,**(2014). Concentrations en éléments traces métalliques dans les sols irrigués par les eaux usées versées dans l'oued merzeg (casablanca –maroc). *European Scientific Journal*, vol.10, n°29, pp. 1857-7881
- Morel R.,** (1996). *Les sols cultivés*. 2ème édition. Lavoisier/ Tec Et Doc. 389p.
- Nduwayezu I.,** (2010). Adsorption et désorption du plomb dans un sol sablonneux traité par divers amendements (Mémoire de Maîtrise). Université du Québec à Montréal.
- Nhari F., Sbaa M., Vasel J. L., Fekhaoui M. & El Morhit M.,** (2014). Contamination des sols d'une décharge non contrôlée par les métaux lourds : cas de la décharge Ahfir-Saidia (Maroc Oriental). *J. Mater. Environ. Sci.* 5(5) : 1477-1484.
- Origo N., Wicherek S., Hotyat M.,** (2012). Réhabilitation des sites pollués par phytoremediation. *Revue électronique en sciences de l'environnement*. 12(2).  
<https://doi.org/10.4000/vertigo.12633>
- Paz-Ferreiro J., Lu H., Fu S., Méndez A., and Gascó G.,** (2014). "Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal", *Solid Earth*, 5, p. 65–75.
- Schindler DW, 1988. Effects of acid rain on freshwater ecosystems. *Science (Washington)*, Vol. 239. 149-157
- Schindler DW,** (1988). Effects of acid rain on freshwater ecosystems. *Science (Washington)*, Vol. 239. 149-157.
- Schnoor J.L., Cutcheron S.C.,** (2003). *Phytoremediation-Transformation and control of contaminants*. Wiley interscience. INC. USA. 987p
- Thibault Sterckeman, F. Douay, N. Proix et H. Fourrier,**( 2000). Vertical distribution of Cd, Pb and Zn in soils near smelters in the North of France », *Environmental Pollution*, vol. 107, no 3, p. 377-389 (ISSN 0269-7491, e-ISSN 1873-6424, OCLC 117564299, PMID 15092984, DOI 10.1016/s0269-7491(99)00165-7, HAL hal-02698839).
- Thonart P., Diabate S. I., Hiligsmann S. & Lardinois M. ,**(2005). *Gestion des déchets ménagers et sites d'enfouissement technique dans les pays du Sud*. Guide pratique. Retrieved from [www.iepf.org](http://www.iepf.org), 04/01/2018
- Wawer, M., Magiera, T., Ojha, G., Appel, E., Busoils, AS., and Kusza, G. ,**(2015). « Caractéristiques de la pollution routière actuelle à l'aide de parcelles de contrôle », *Science de l'environnement total*, 505, pp.759-804
- Zouboulis A.I., Loukidou M.X. et Matis K.A.,**(2004). Biosorption of toxic metals from aqueous solutions by bacteria strains isolated from metal polluted soils, *Process Biochemistry*, 39, 909-916.
- Zereini, F., Alsenz, H., Wiseman, C.L.S., Püttmann, W., Reimer, E., R. Schleyer., Bieber, E., and Wallasch,** (2012). « M. Éléments du groupe du platine (Pt, Pd, Rh) dans les particules en suspension dans les zones rurales et urbaines en Allemagne : concentrations et modèles spatiaux de distribution », *Sci Total Environ*. 416, pp. 261-268.
-

# **Chapitre III :**

## **Pollution de l'air**

### **III.1.Mise en situation**

#### **III.1.1. Environnement**

L'environnement est l'ensemble des facteurs physiques, chimiques et biologiques dont dépendent la vie et la postérité d'une population humaine, animale ou végétale.

Les échanges de matière s'effectuent dans quatre compartiments de la terre caractérisés par l'état physique de leurs constituants (Koller, 2009) :

- Gazeux pour l'atmosphère ;
- Liquide pour l'hydrosphère ;
- Solide pour la lithosphère ;
- Matière vivante pour la biosphère.

Dans un milieu donné, les êtres vivants sont interdépendants entre eux et ils sont organisés en écosystèmes.

Un écosystème est constitué par l'association de deux composantes en constante interaction l'une avec l'autre : un environnement physico-chimique dénommé biotope habité par des populations. Ainsi la terre, l'air, l'eau s'y trouvent reliés et harmonisés entre eux à travers de nombreux processus biologiques et physico-chimiques en rapport avec les événements météorologiques.

Les éléments et les composés chimiques sont susceptibles de circuler à travers les différents compartiments.

#### **III.1.2. Pollution**

Le terme « pollution atmosphérique » désigne l'ensemble des rejets de composés toxiques libérés dans l'atmosphère ainsi que de substances malodorantes et qui exercent une action perturbatrice sur l'environnement et les organismes vivants. La figure ci-dessous illustre ses origines :

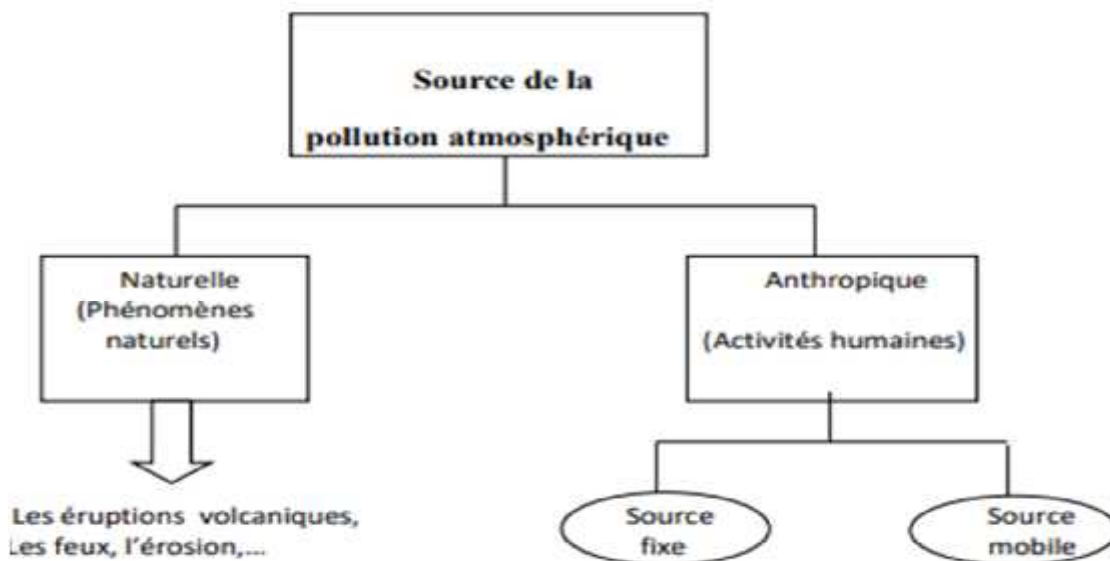


Figure III.1 : Origines des polluants atmosphériques

La dégradation de la qualité de l'air résulte soit d'une modification quantitative par hausse de la concentration dans l'air de certains de ses constituants, soit d'une modification qualitative due à l'introduction de composés étrangers à ce milieu comme les radioéléments.

Les paramètres influençant la concentration des rejets dans l'atmosphère dépendent des quantités émises, des altitudes auxquelles ces polluants sont émis et des conditions météorologiques qui commandent leur dispersion (figure III.2).

A l'échelle locale (entre 0,1 et 100km) ou régionale (1000 km), la pollution de l'air dépend de trois processus suivants :

- **Emissions** : le rejet des substances polluantes à la source ;
- **Transmission** : elle désigne le transport et la transformation partielle des polluants dans l'air ;
- **Immisions** : concentration ou dépôt des polluants où ils agissent. Elles dépendent principalement du polluant considéré et des conditions de dispersion et de transformation dans l'air (Deleage, 2000).

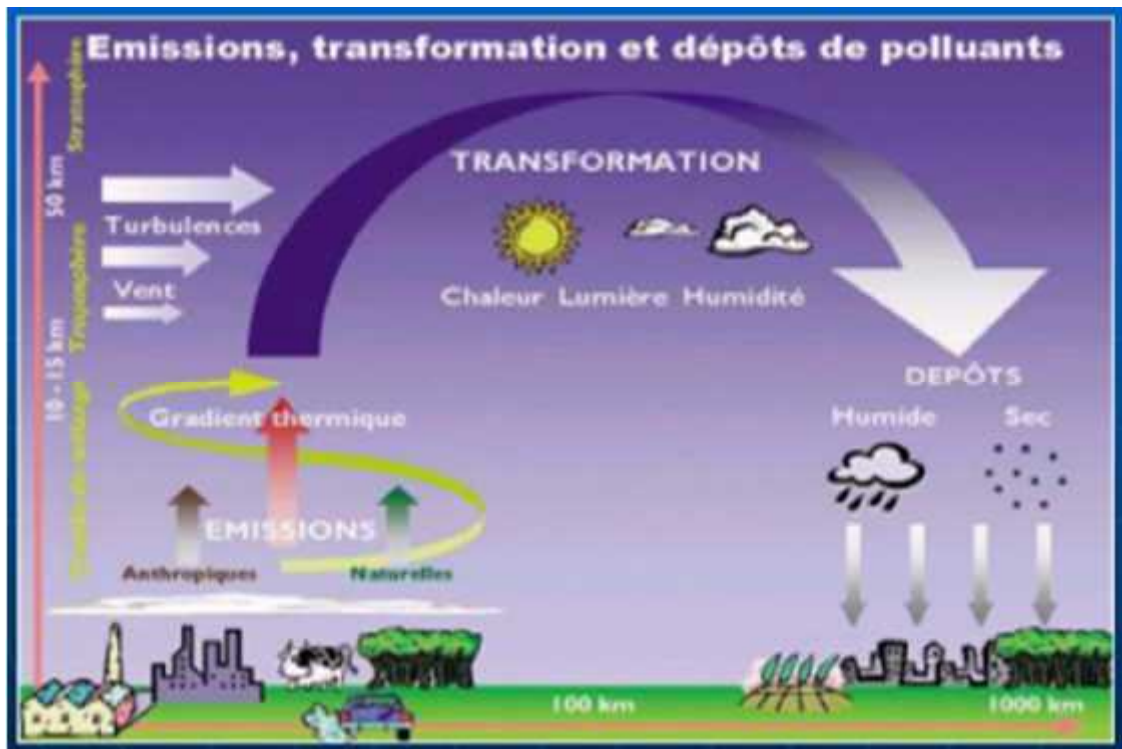


Figure III.2 : Les processus subis par les polluants dans l'atmosphère  
(Malardel, 2009)

### III.1.3. Développement durable

Le développement durable est défini comme développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Cette définition apparue en 1987 dans le rapport de Mme Brundtland, premier ministre norvégien publié par la commission mondiale sur l'environnement et le développement.

Le développement durable est un processus qui relie progrès social et économique, et protection de l'environnement dans le but de ne pas compromettre les capacités des générations qui viennent. Il doit également permettre à tous de bénéficier des ressources naturelles. Le développement durable intègre tous les domaines de l'activité humaine comme l'industrie, l'agriculture, l'habitat, etc. Il repose sur trois piliers :

- L'efficacité économique ;
- L'équité sociale ;
- La qualité environnementale.

Les objectifs de développement durable sont un appel à l'action de tous les pays (pauvres, riches et à revenu intermédiaire) afin de promouvoir la prospérité tout en protégeant la planète.

Mettre fin à la pauvreté doit aller de pair avec des stratégies qui développent la croissance économique et répondent à une série de besoins sociaux tels que l'éducation, la santé, la protection sociale et les possibilités d'emploi, tout en luttant contre le changement climatique et la protection de l'environnement.

Les objectifs de développement durable, également nommés objectifs mondiaux, ont été adoptés par les Nations Unies en 2015. Ils sont un appel mondial à agir pour éradiquer la pauvreté, protéger la planète et faire en sorte que tous les êtres humains vivent dans la paix et la prospérité d'ici à 2030.

#### **III.1.4. Energie**

L'énergie peut être extraite ou récupérée soit directement, soit par l'intermédiaire d'un processus de conversion ou de transformation à partir d'une source d'énergie.

Il existe deux types :

##### **III.1.4.1. L'énergie primaire ou énergie brute**

Toute énergie disponible dans les ressources naturelles. Elle représente l'énergie avant quelque intervention humaine, sans stockage ni transformation comme :

- Les combustibles fossiles (pétrole, le charbon, le gaz). Ces derniers représentent environ 80% de la consommation primaire commerciale et non commerciale d'énergie mondiale (Ngô et Régent, 2012).
- le charbon : représente la ressource fossile la plus abondante et la plus polluante.
- l'uranium : un élément naturel qui se trouve partout dans l'écorce terrestre.
- la biomasse : elle désigne la masse de matière organique (animale, végétale, bactérienne ou fongique) pouvant se transformer en énergie.
- des ressources renouvelables comme l'eau courante, l'énergie radiante.

##### **III.1.4.2. Les énergies secondaires**

Elles sont obtenues par transformation d'une énergie primaire comme les biocarburants raffinés, l'électricité.

#### **III.1.5. Consommation d'énergie primaire et émission de CO<sub>2</sub>**

Les activités humaines augmentent les niveaux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère principalement par la combustion de combustibles fossiles et accessoirement du gaz naturel.

Les émissions de CO<sub>2</sub> par les combustibles fossiles, sont proportionnelles à la consommation d'énergie primaire. Elles dépendent de la nature du combustible, de la saison et de l'heure de la journée.

La combustion du charbon génère du CO<sub>2</sub> qui augmente l'effet de serre. L'émission est entre 860 et 1290 g de CO<sub>2</sub> par kWh électrique produit (Robert, 2006 ; Ngô et Régent 2012).

Le pétrole est la source d'énergie la plus commode car il est concentré ( 9 à 13 kWh /kg. Sa combustion génère moins de CO<sub>2</sub> que le celle du charbon, soit 700 à 800g de CO<sub>2</sub>/ kWh électrique produit. Le gaz naturel est en grande partie constitué de CH<sub>4</sub> (70à 95%). Comme le méthane contient un seul atome d'hydrogène, le gaz naturel émet, pour la même quantité d'énergie produite, moins de CO<sub>2</sub> lors de sa combustion que le pétrole et le charbon. La production de 1 kWh d'électricité à partir du gaz génère entre 480 et 780 g de CO<sub>2</sub> (Ngô , 2008). .

### **III.2. Notion fondamentales de l'atmosphère**

L'atmosphère est une enveloppe avec une épaisseur moyenne d'environ 600 km (figure III.3). Elle est essentiellement gazeuse qui entoure le globe terrestre et assure la distribution des échanges thermiques entre les zones froides et les zones chaudes du globe. Elle présente une structure en couche qui est en grande partie fonction de la température et de la source d'énergie. Dans les couches hautes, l'atmosphère est chauffée par le rayonnement solaire.

**-La troposphère** où se concentre 90% de la masse de l'atmosphère et la quasi-totalité de l'eau. Dans cette couche, se produisent tous les phénomènes météorologiques et les mouvements convectifs. Le gradient vertical de température est négatif (la température diminue verticalement d'environ 6°C/km).

**-La stratosphère** où la température réaugmente jusqu'à 0°C à cause de l'absorption des UV par la couche d'ozone. Les vents sont très violents (350km/h).

**-La mésosphère** : dans cette couche la température diminue jusqu'à -80°C. Le CO<sub>2</sub> y joue un rôle important pour l'effet de serre mais l'ozone se raréfie.

**-La thermosphère** : à ce niveau les molécules deviennent rares et la température augmente et atteint 580°C à 200 km. Cette couche sert de réflecteur pour les ondes radioélectriques et permet aux ondes d'être transportées sur de très longues distances.

Au-delà de l'altitude 600 km, se trouve l'exosphère avec une présence rare de particules d'hydrogène et d'hélium.



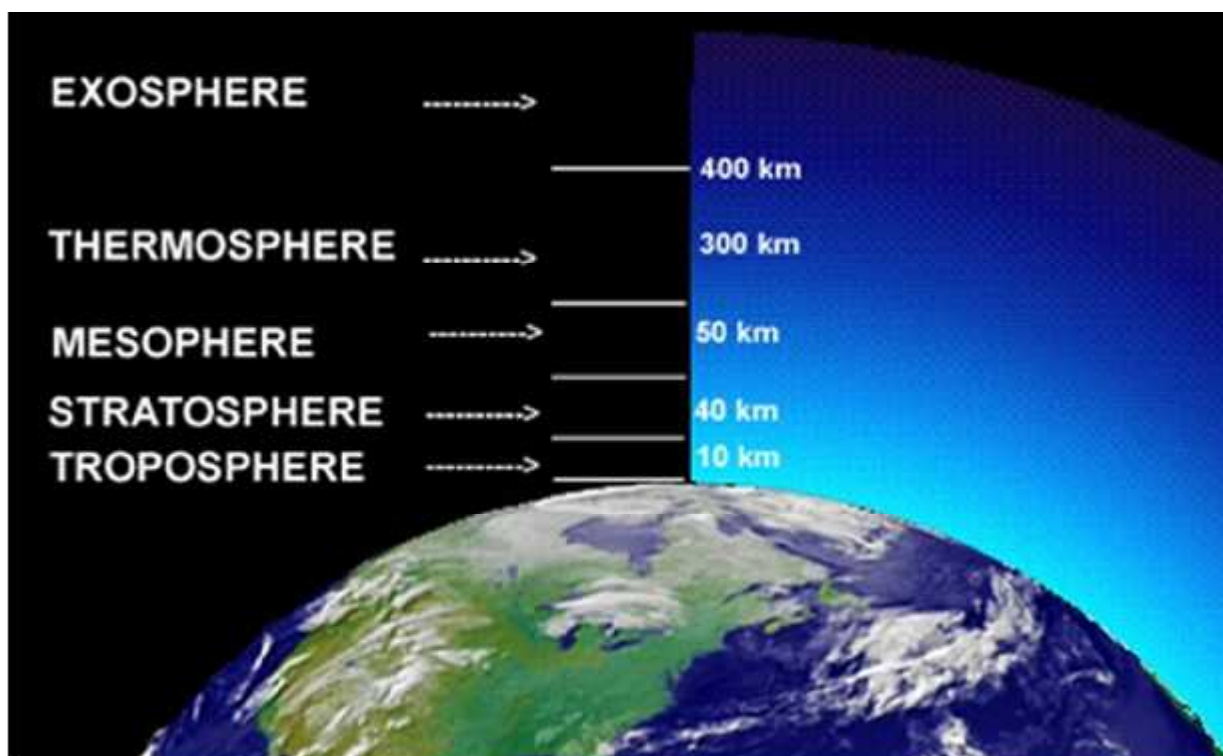


Figure III.3 : Les différentes couches de l'atmosphère (Labitzke et al., 1989)

### III.3. Les paramètres météorologiques

#### III.3.1. Circulation atmosphérique

La circulation atmosphérique est le mouvement à l'échelle planétaire de la couche d'air entourant la Terre qui redistribue la chaleur provenant du soleil en conjonction avec la circulation océanique. En effet, comme la Terre est un sphéroïde ayant un axe de rotation incliné de 23,5 degrés par rapport à son plan de translation, la radiation solaire incidente au sol varie entre un maximum aux régions faisant face directement au soleil (équateur) et un minimum à celles très inclinées par rapport à ce dernier (Pôle). La radiation réémise par le sol est liée à la quantité d'énergie reçue. Il s'ensuit un réchauffement différentiel entre les deux régions (David et al., 2017).

#### III.3.2. Le vent

Le vent est un mouvement de l'atmosphère. Ces mouvements de masses d'air sont provoqués inégalement et répartis à la surface de la planète par l'énergie solaire et la rotation de la planète.

Le vent intervient par sa direction dans la dispersion des polluants (les panaches de fumées) et par sa vitesse pour diluer et entraîner les différentes émissions.

- ✓ **La direction du vent** : c'est la résultante de la force de pression (la zone à haute pression vers la zone à basse pression) et la force de Coriolis (provoquée par la rotation de la terre).
- ✓ **La vitesse du vent** : au niveau du sol, la vitesse est ralentie par les obstacles (2m/s), condition idéale à l'accumulation de polluants et aux transformations chimiques de leurs composants. Par contre, en altitude, la vitesse du vent est élevée et la dispersion des polluants est rapide.

### **III.3.3. Température**

Elle est responsable de la dispersion verticale des substances polluantes.

L'air se refroidit de 10°C / km et l'air humide saturé se refroidit de 6,5°C / km.

### **III.3.4. La pression**

Elle dépend de l'altitude et des conditions atmosphériques (circulation atmosphérique globale et vents locaux).

Hautes pressions : les polluants ne sont pas dispersés ce qui induit des épisodes d'accumulation des contaminants.

Basses pressions : forte turbulence de l'air induisant ainsi les bonnes conditions de dispersion.

### **III.3.5. L'humidité**

La quantité maximale de vapeur d'eau que peut contenir l'air est fonction de la température de celui-ci. Lorsque l'air s'élève, il se dilate et sa température diminue, permettant la condensation de la vapeur d'eau, à saturation, en gouttelettes.

L'humidité influence la transformation des polluants primaires.

- Formation de l'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) à partir des oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ).
- Formation de l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) à partir de dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ).

### **III.3.6. Les pluies**

Les polluants les plus lourds sont entraînés au sol par les pluies. Ces dernières favorisent la dissolution de certaines substances polluantes. Par temps de pluies, les concentrations en contaminants diminuent.

## **III.4. Evolution de la qualité de l'air**

Il a été démontré qu'il existe un lien étroit entre la qualité de l'air et le changement climatique.

Ce dernier conduit à la modification des phénomènes météorologiques régissant l'évolution des polluants dans l'atmosphère. Pendant l'été, l'augmentation de la fréquence périodes de

chaleur renforce la pollution à l'ozone. Concernant les particules polluantes, les conditions météorologiques peuvent être favorables à leur dispersion atmosphérique ou, à l'inverse, engendrer leur accumulation dans l'air.

Selon l'organisation météorologique mondiale (OMM), les effets des polluants atmosphériques se produisent près de la surface, sur des échelles de temps allant de quelques jours à quelques semaines par contre le changement climatique en cours se produit sur une échelle de temps de plusieurs décennies à plusieurs siècles et entraîne des modifications progressives de l'environnement dans le monde entier.

### **III.5.Effets sur les organismes**

La pollution de l'air semble avoir des conséquences globales, en affectant la santé (la physiologie), la distribution et le développement de nombreux êtres vivants.

Les effets des polluants atmosphériques inhalés par l'être humain sont graves (Blandin, 2008). :

- Irritations des muqueuses (les yeux, le nez, la gorge) ;
- des crises d'asthme ;
- une exacerbation de troubles cardio-vasculaires et respiratoires conduisant à une hospitalisation et même à la mort.
- les polluants peuvent contribuer au développement de maladies chroniques comme les cancers, troubles neurologiques, etc.

Le bulletin a indiqué aussi que la mortalité mondiale est passée de 2,3 millions en 1990 dont 91% sont dus aux particules et 9% à l'ozone à 4,5 millions en 2019 (92% dus aux particules et 8% à l'ozone).

La pollution n'affecte pas seulement la vie humaine, elle a aussi un impact significatif sur la flore et la faune et le milieu environnemental :

- Les matières particulaires étouffent les plantes et inhibent leur capacité d'absorber le CO<sub>2</sub>, réduisant ainsi la photosynthèse. Il en résulte des récoltes agricoles faibles.
- -Certaines plantes absorbent les polluants à travers les pores ou les stomates de leurs feuilles, causant des dommages physiques directs conduisant à une sénescence prématurée (vieillesse).
- Les polluants peuvent causer des dommages au niveau des surfaces des plantes par abrasion. L'O<sub>3</sub> par exemple, peut affecter indirectement les plantes en détournant la consommation d'énergie des processus physiologiques importants vers la détoxification de l'ozone.

- Les effets des substances polluantes et l'altération des conditions du biotope affaiblissent la capacité des organismes à se reproduire qui se traduit par un appauvrissement de la biodiversité et ensuite par la perturbation du fonctionnement des écosystèmes.

L'ensemble de ces modifications engendre des effets aussi néfastes sur la distribution et la reproduction de la faune.

### III.6. Composition chimique de l'atmosphère

Les gaz de l'atmosphère sont continuellement brassés, ainsi, sa composition chimique change selon les époques.

Pour les composés majeurs, l'air est composé principalement de 78,084 % d'azote, 20,946 % d'oxygène, 0,934 % d'argon (figure III.4). Les gaz mineurs dont la proportion varie avec l'altitude se trouvent sous forme de trace (tableau III.1) .

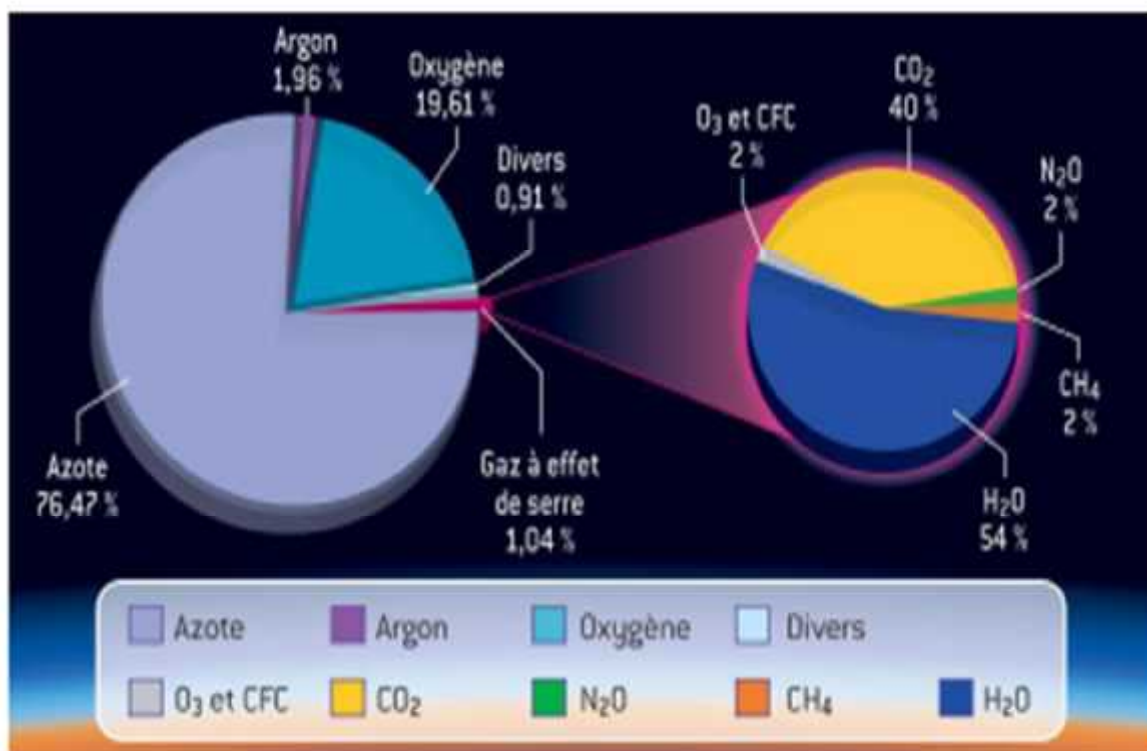


Figure III.4 : Composition chimique de l'atmosphère (Pomerol et al., 2000)

Aux éléments d'origine naturelle qui sont présents en faible quantité dont les spores, la poussière et le pollen, s'ajoute des polluants industriels comme le fluor, le chlore, le soufre et le mercure. Les gaz à effet de serre qui font partie de la composition de l'atmosphère, sont la vapeur d'eau, le dioxyde d'azote, le méthane et l'ozone. La vapeur d'eau est en quantité variable.

Tableau III.1 : Composition de l'atmosphère basse terre (ppmv=partie par million ( $10^{-6}$ ) en volume) (selon Encrenaz, 2000).

<i>Gaz</i>	<i>Proportion en Volume (ppm : partie par million en volume)</i>	<i>Composition isotopique (%)</i>
Diazote (N <sub>2</sub> )	78,084 ± 0,004 %	<sup>14</sup> N :99,63 ; <sup>15</sup> N :0,37
Dioxygène (O <sub>2</sub> )	20,946±0,002 %	<sup>16</sup> O :99,759 <sup>17</sup> O :0,037 ; <sup>18</sup> O :0,204
Argon (Ar)	0,934±0,001 %	<sup>36</sup> A :0,337, <sup>38</sup> A :0,0063 ; <sup>40</sup> A :99,60
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	0,035±0,001 %	<sup>12</sup> C :98,89 ; <sup>13</sup> C :1,11
Néon (Ne)	18,18±0,04 ppmv	<sup>20</sup> Ne :90,92 <sup>21</sup> Ne :0,257 ; <sup>22</sup> Ne : 8,82
Hélium (He)	5,24 ±0,004ppmv	<sup>4</sup> He :100 ; <sup>3</sup> He :0,00013
Méthane (CH <sub>4</sub> )	2,0 ppmv	
Krypton (Kr)	1,14±0,01 %	
Dihydrogène (H <sub>2</sub> )	0,5 ppmv	<sup>1</sup> H : 99,985 <sup>2</sup> H : 0,015
Xénon (Xe)	0,087±0,001%	
Oxydes d'azote (NO <sub>2</sub> )	0,5 ±0,01 ppmv	
Propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	2,0 ppmv	

### III.7.Les polluants chimiques

Les polluants chimiques sont des substances engendrées par les industries, l'épandage de produits agricoles ou des fumées. Dépassant un certain seuil, ces polluants deviennent dangereux pour les organismes et l'environnement. On retrouve :

- l'ozone.
- le dioxyde de soufre.
- le dioxyde d'azote.
- Le monoxyde de carbone.

A ceux-ci, s'ajoutent d'autres polluants chimiques.

Les polluants chimiques sont caractérisés par leur durée de vie qui varie de :

- Quelques heures (composés organiques volatils).
- quelques jours ((composés de l'azote et du soufre).
- quelques semaines ou mois (aérosols, ozone, monoxyde de carbone).
- quelques années ou dizaines d'années (gaz à effet de serre).

Plus la durée de vie d'un polluant est longue, plus il sera transporté loin de sa source d'émission (figure III.5).

Les polluants à très courte durée de vie affectent des échelles spatiales très petites (cas des radicaux OH dont le temps de séjour est de 1s).

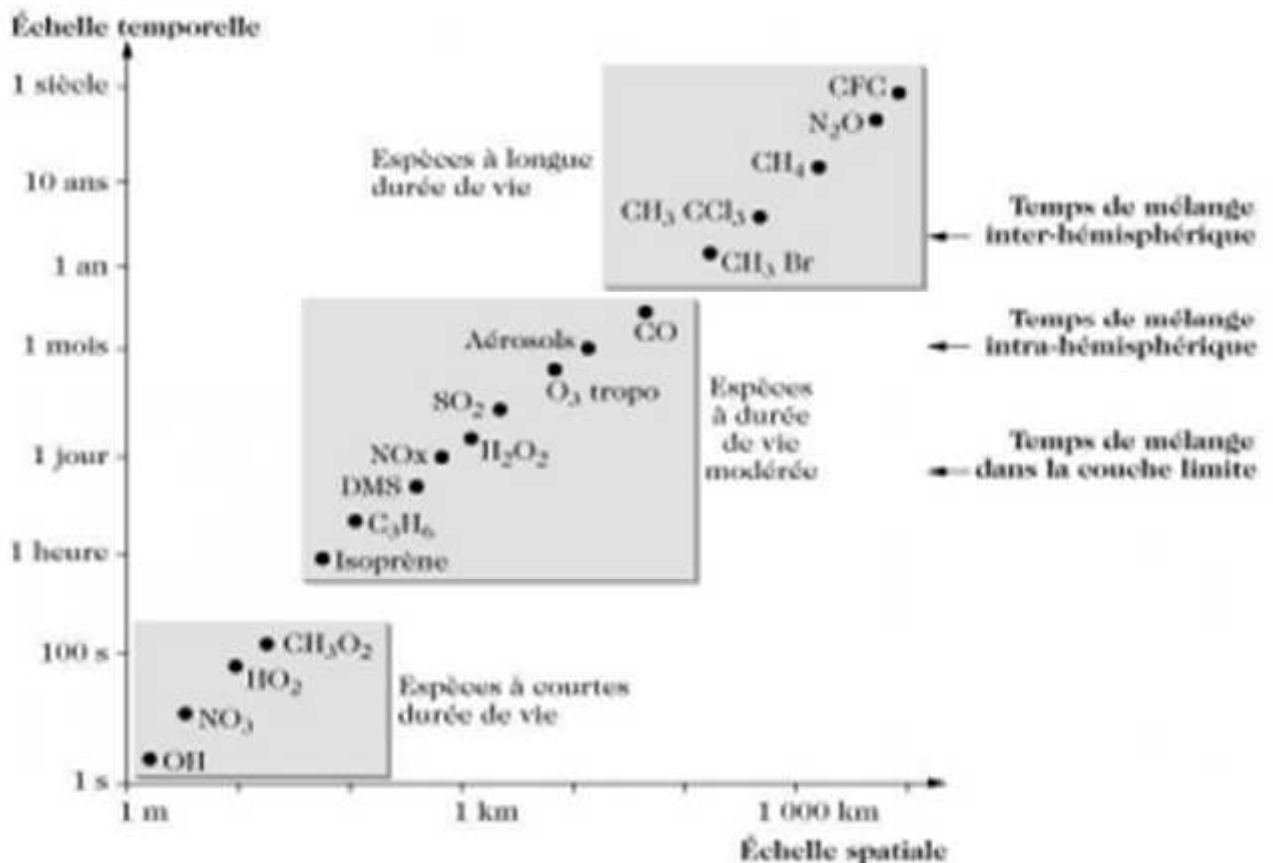


Figure III.5 : Echelle caractéristique de la pollution atmosphérique (Seinfeld and Pandis, 2006)

**III.7.1. Pollution par le NO<sub>2</sub>**

Les oxydes d'azote ou NO<sub>x</sub> qui sont des polluants atmosphériques sont représentés par le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>). Ces oxydes d'azote peuvent provenir de l'azote dans l'air comburant ou de l'azote contenu dans le combustible.

Les combustions à haute température et à haute pression comme les moteurs des automobiles, en particulier les moteurs Diesel, émettent deux à trois fois plus de NO<sub>x</sub> que les moteurs à essence. (Combustion...).

Les NO<sub>x</sub> sont aussi produits à températures basses pendant la combustion du bois qui contient de l'azote présent dans l'arbre sous forme de protéines et d'amines. Lors de la combustion, l'azote commence par se dégrader sous forme de molécules azotées de faible poids moléculaire (NH<sub>3</sub>) ou de radicaux libres (NH<sub>2</sub>, NH, HCN, CN), qui jouent un rôle de précurseur dans la formation des NO<sub>x</sub> (Jacubowicz, 1998). Plus la concentration en NO<sub>2</sub> augmente, plus la pollution s'accroît.

Le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) des voitures sont réglementés par les normes européennes.

**III.8. Formation des polluants**

Les activités humaines comme les industries, les transports, l'agriculture, le chauffage résidentiel et les phénomènes naturels tels que les éruptions volcaniques, les brumes de sable, les incendies de forêts, sont à l'origine d'émissions de gaz et de particules dans l'atmosphère.

Ces substances peuvent subir des transformations par réactions chimiques, qui dépendent des conditions météorologiques. Il en résulte l'apparition d'autres polluants plus complexes.

On distingue :

**III.8.1. Les polluants primaires**

Ils sont émis directement de la source comme monoxyde d'azote, dioxyde de soufre, composés organiques volatils, monoxyde de carbone, métaux lourds, hydrocarbures aromatiques polycycliques, poussières.

**III.8.2. Les polluants secondaires**

Ils sont issus de transformations physico-chimiques de gaz sous l'effet de conditions météorologiques :

**-Cycle de Chapman**

L'oxygène atomique à l'état fondamental et le NO sont obtenus par la photodissociation de NO<sub>2</sub> avec recyclage du NO et O<sub>3</sub> (figure III.6)

Selon la longueur d'onde d'excitation, la photodissociation de l'ozone produit de l'oxygène moléculaire et de l'oxygène atomique à l'état excité :



état excité qui revient à l'état fondamental par perte d'énergie.

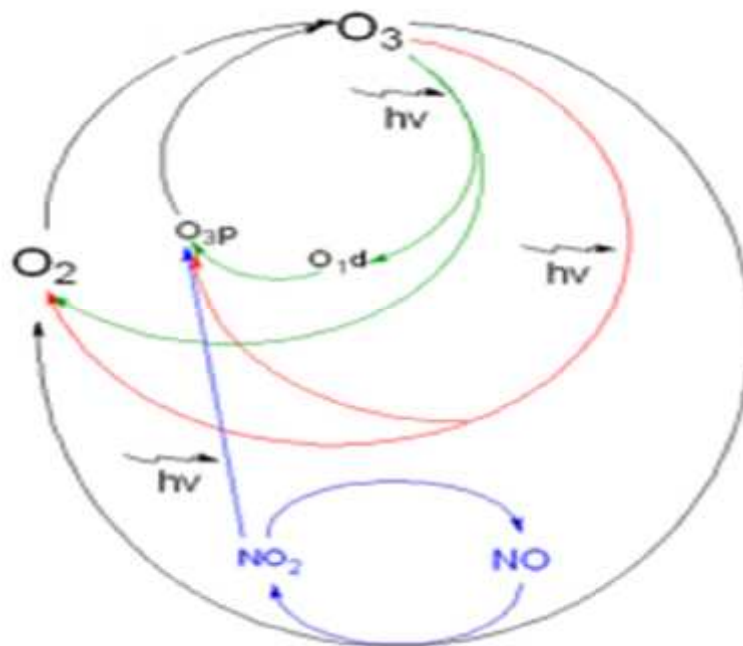


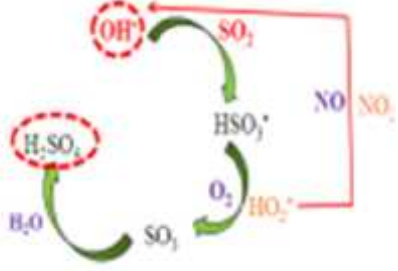
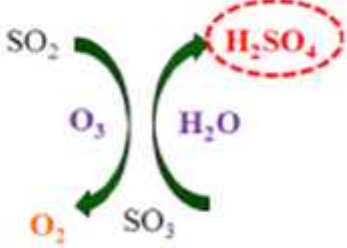
Figure III.6 : Cycle d'ozone (Chapman, 1931)

**-Formation des radicaux libres**

La photodissociation d'éléments chimiques présents dans l'atmosphère comme le NO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>, CO, HCHO, HNO<sub>2</sub> donne les radicaux libres.

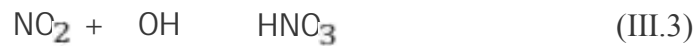


-Cycle du dioxyde de soufre

Action de HO• qui a lieu en phase gazeuse	Action de l'ozone qui a lieu en phase liquide
	

-Cycle du dioxyde d'azote

Action de HO• : le radical HO• réagit avec le NO<sub>2</sub> :



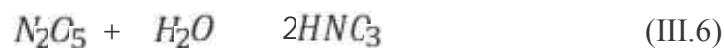
Action de l'ozone : l'ozone oxyde le dioxyde d'azote pour former un radical nitrate NO<sub>3</sub>.



Le radical nitrate formé réagit avec le dioxyde d'azote réagit avec le radical formé pour former l'émipentoxyde selon la réaction suivante :



Le N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ainsi formé réagit avec la vapeur d'eau atmosphérique pour donner l'acide nitrique selon la réaction ci-dessous :



### **III.9. Quelques conséquences de la pollution de l'air**

#### **III.9.1. Le smog**

Le terme smog a été utilisé pour la première fois en 1905 par Henry Antoine Des Voeux pour décrire les conditions atmosphériques au-dessus de nombreuses villes britanniques. Le terme signifie la combinaison de fumée (smoke) et de brouillard (fog) à haute pression.

Le smog est une forme courante de pollution atmosphérique que l'on retrouve principalement dans les zones urbaines et les grands centres de population. Il englobe une large catégorie de polluants atmosphériques dont les particules (MP) et l'ozone troposphérique (O<sub>3</sub>) constituent les principaux composants.

Actuellement, le smog a une composition et une définition plus spécifique.

#### **-Différents types de smog**

##### **Le smog hivernal**

Appelé smog londonien ou encore le smog sulfureux qui résulte d'une forte concentration d'oxydes de soufre dans l'air causées par l'utilisation de combustibles fossiles soufrés, en particulier le charbon pour le chauffage pendant les mois d'hiver. La forte humidité dans l'atmosphère catalyse la transformation du SO<sub>2</sub> issue de la combustion en acide sulfurique.

L'air stagnant provoque une accumulation de particules polluantes confinées par la couche chaude qui surmonte la couche froide à proximité du sol qui persiste sous forme de nuages bruns atmosphériques. Quand le smog rencontre une couche d'inversion (causée par des zones chaudes dans la haute atmosphère), il peut rester au-dessus pendant une longue période. Le vent peut disperser ces particules sur le sol, réduisant ainsi leur quantité.

##### **Le smog photochimique**

En raison de son abondance dans les régions où la température est plus élevée, le smog photochimique est plus fréquent en été (Hinrichs and Kleinbach 2013). Les villes qui subissent quotidiennement ce smog sont Los Angeles, Sydney, la ville de Mexico, Pékin.

#### **-Composition du smog photochimique**

Les phénomènes naturels tels que les volcans et les feux des forêts ainsi que les combustions des fossiles émettent le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>). Lorsqu'il est exposé aux rayons ultraviolets, le NO<sub>2</sub> subit une série complexe de réactions avec les hydrocarbures pour produire les composants du smog photochimique qui sont un mélange

d'ozone, d'acide nitrique, d'aldéhydes, de nitrates de peroxyacyle (NPA) et d'autres polluants secondaires (Tyler et al.,2011).

Le NO<sub>2</sub>, l'ozone et les NPA sont appelés oxydants photochimiques parce qu'ils peuvent réagir et oxyder certains composés dans l'atmosphère.

### **Formation**

Le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) provenant des gaz d'échappement des véhicules sont introduits dans l'atmosphère et peuvent se combiner avec l'eau (humidité) pour former de l'acide nitrique ou vont être photolysés par le rayonnement solaire et se décompose en oxyde d'azote et un atome singulier d'oxygène (figure III.7).



Le radical oxygène réagit avec une molécule d'oxygène atmosphérique pour produire de l'ozone.



La prolifération de l'ozone près du niveau du sol conduit à la formation d'un smog dense et visible sous la forme d'une brume brune.

L'acide nitrique peut se précipiter sur la Terre et donner lieu à des pluies acides, ou rester dans le smog.

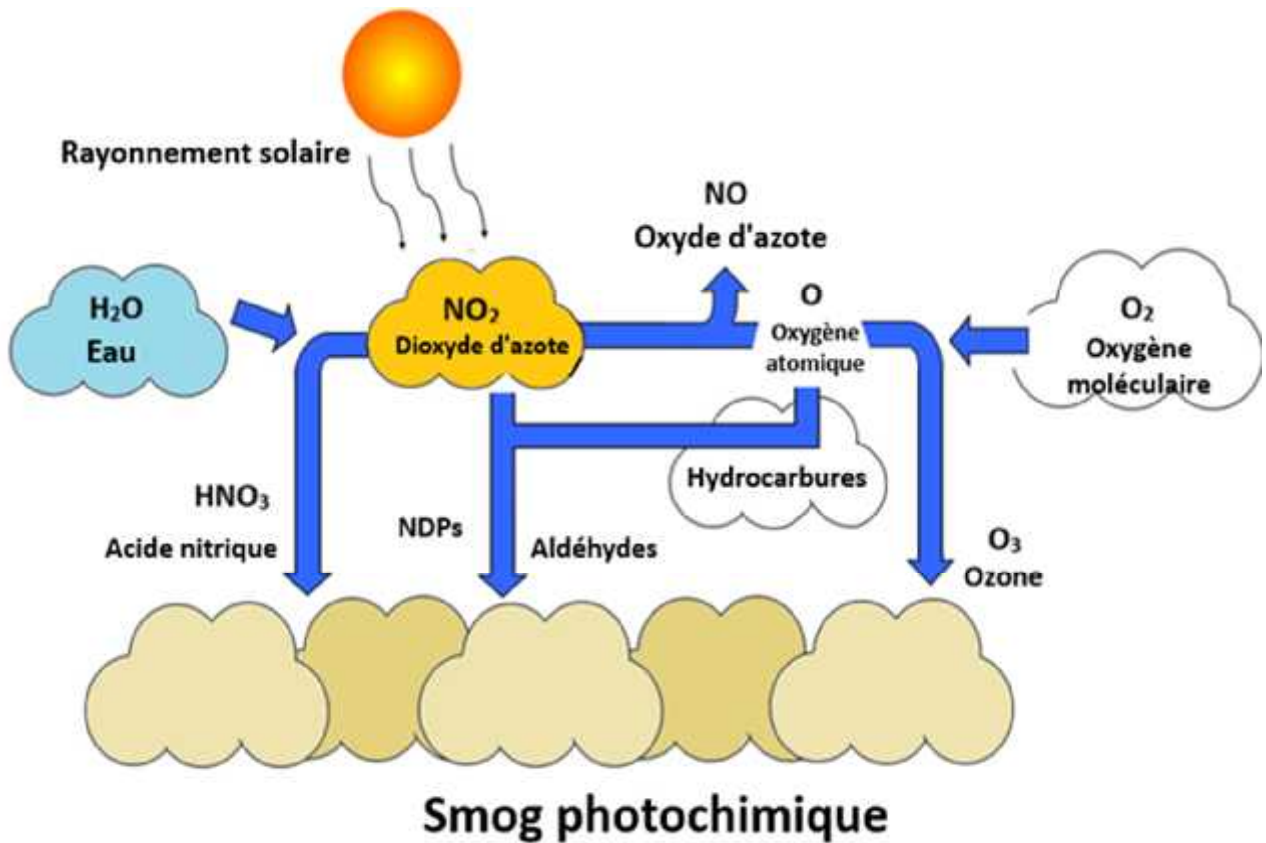
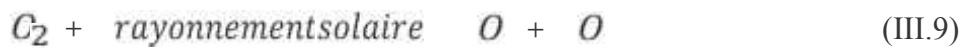


Figure III.7 : Formation de smog photochimique (Tyler et al., 2011)

### III.9.2. Trou d’ozone

#### - La couche d’ozone

L'existence de la couche d'ozone ou ozonosphère a été démontrée en 1913 par les physiciens français Henri Buisson et Charles Fabry. C'est la partie de la stratosphère de la terre qui contient près de 90% de l'ozone atmosphérique. Cet ozone est produit par l'action des UV du rayonnement solaire sur les molécules de dioxygène à haute altitude (figure III.8).



Cette couche a pour rôle d'absorber une partie importante du rayonnement solaire ultraviolet dangereux pour les êtres vivants. Elle renvoie les rayons solaires et n'en laisse pénétrer que 50 % dans la troposphère.

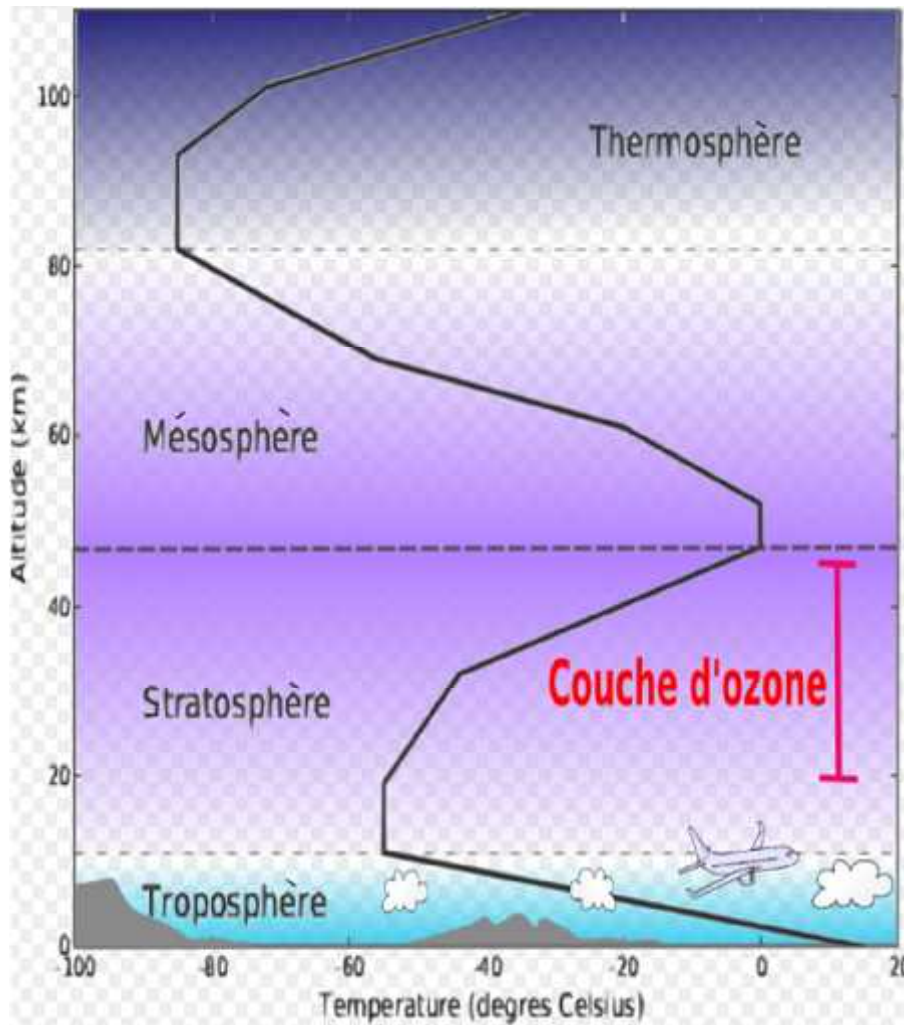


Figure III.8 : La couche d'ozone (Pomerol et al., 2000)

- Action des composés chlorés sur la couche d'ozone

La dégradation de la couche d'ozone est le résultat d'une pollution lente et étendue de l'atmosphère. Elle est catalysée par le chlore qui a pour origine le chlorure de méthyle produit par les micro-organismes et les algues des océans et les chlorofluorocarbones (CFC) dits « fréons » produits par l'homme. Dès les années 1980, il a été démontré que les chlorofluorocarbones, ont des effets potentiellement négatifs ; destruction de la couche d'ozone dans la stratosphère ainsi qu'une contribution considérable à l'effet de serre.

Les chlorofluorocarbones sont très stables, compressibles, non solubles, ininflammables et très commodes à utiliser comme fluides frigorigènes ou gaz propulseurs dans les produits conditionnés sous forme d'aérosols sous pression. Leur durée de vie dans l'atmosphère est de plusieurs siècles.

Quand les vents brassent l'atmosphère, le transport se fait horizontalement d'un pôle à l'autre avec un temps moyen, comme il se fait verticalement avec une homogénéisation de l'atmosphère jusqu'à 80 km d'altitude. Ainsi, les CFC se retrouvent dans toute l'atmosphère sous toutes les latitudes.

Depuis la fin des années 1970, l'épaisseur de l'ozone est passée, en certains endroits, de l'équivalent de 3 mm à 2 mm en moyenne.

C'est cette diminution relative de l'épaisseur de la couche d'ozone stratosphérique (par rapport à son épaisseur standard ou initiale de 300 DU) est appelée « trou d'ozone ». Le protocole international de Montréal en 1987, a prévu diverses interdictions prenant effet entre 1994 et 2030, selon les produits considérés susceptibles de nuire la couche d'ozone. (Bliefert et Perraud 2001).

### **III.9.3. Effet de serre**

L'effet de serre est un processus naturel qui piège une partie des rayons infrarouges. Son rôle dans la régulation du climat est essentiel car s'il n'existait pas, la température moyenne serait -18°C au lieu de 15°C sur terre, température compatible avec la présence d'eau liquide. L'effet de serre naturel est majoritairement (72%) dû à la vapeur d'eau et aux nuages. Il résulte de l'influence de l'atmosphère sur les différents flux thermiques.

L'énergie thermique reçue à la surface de la terre provient principalement du rayonnement solaire (Figure. III.9). Une partie du rayonnement solaire est renvoyée par l'atmosphère soit 30% et une partie est absorbée (20%). Environ 50% de l'énergie solaire arrive au sol et réchauffe la surface de la terre qui à son tour émet des rayonnements infrarouges qui seront absorbés par les gaz présents dans l'atmosphère (Horsin et Villain, 2021).

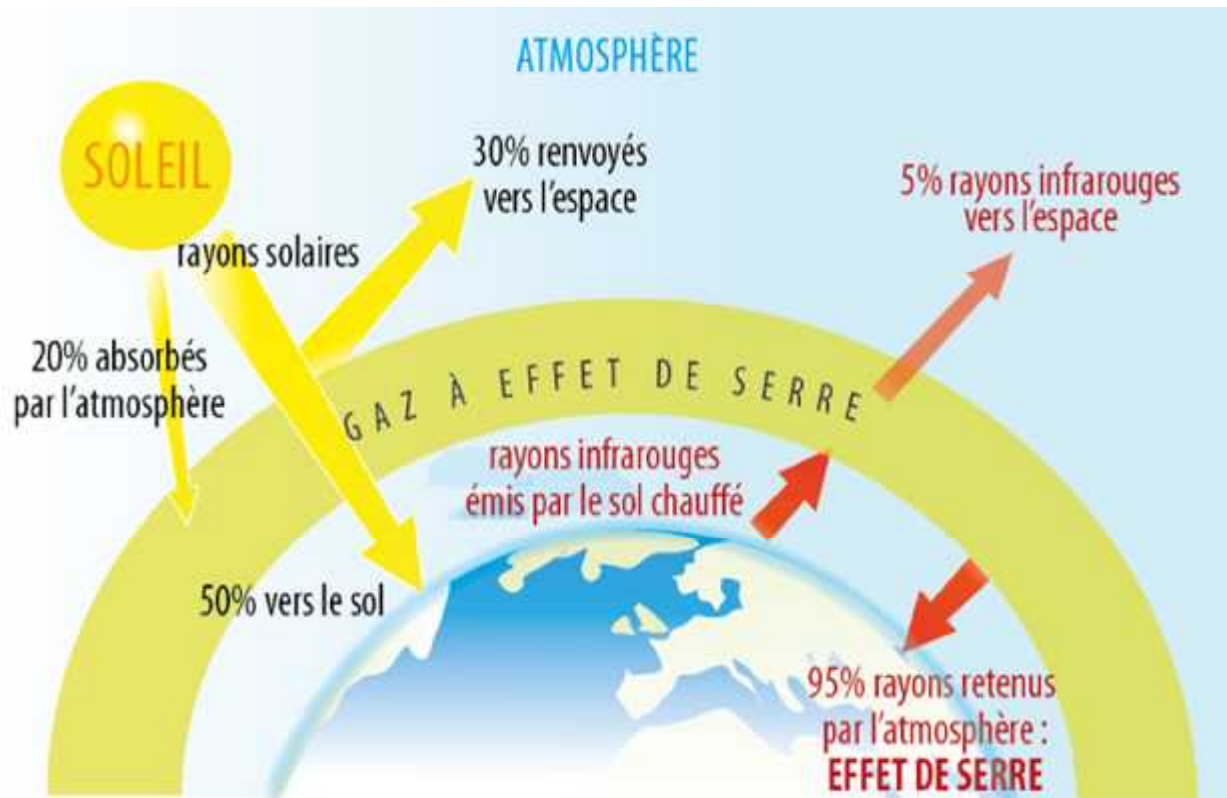


Figure III.9 : Fonctionnement de l'effet de serre selon (Juvenon, 2019).

### -Les gaz à effet de serre

L'augmentation de l'effet de serre depuis la révolution industrielle du XIXe siècle est induite par les émissions d'autres gaz à effet de serre et qui sont capables d'absorber une partie du rayonnement infrarouge. Ils sont peu à peu désintégrés dans l'atmosphère, mais à des vitesses très différentes. Ils sont caractérisés par des durées de vie très variables et ils sont mesurés en équivalent CO<sub>2</sub> (eq. CO<sub>2</sub>).

### La vapeur d'eau

La vapeur d'eau est le gaz à effet de serre le plus abondant dans l'atmosphère. Elle est responsable de 60% de l'effet de serre par temps clair.

### Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)

Il contribue pour 2/3 de l'augmentation de l'effet de serre induite par les activités humaines. La concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique est passée de 280 ppm avant 1750 à environ 410 ppm en 2021 (Lorck, 2015).

### **Le méthane ou CH<sub>4</sub>**

Il est d'origine anthropique et également naturelle telles que les zones humides. Environ 60% sont émis par les activités humaines tels que l'élevage intensif des bovins, les déjections animales et la mise en décharge des déchets organiques. Sa durée de séjour dans l'atmosphère est de l'ordre de 12ans.

### **Le protoxyde d'azote ou N<sub>2</sub>O**

Il provient principalement de pratiques agricoles par la transformation des produits azotés (engrais, déjections animales, résidus des récoltes) comme il est aussi émis par les procédés industriels. Son pouvoir sur l'effet de serre est 298 fois plus élevé que celui du CO<sub>2</sub>. Son séjour dans l'atmosphère est d'environ 120 ans.

### **L'ozone (O<sub>3</sub>)**

Il est produit dans les basses couches de l'atmosphère à partir de composés organiques volatiles issus principalement des transports.

### **Les gaz fluorés**

Ils sont d'origine principalement anthropique. Ils sont utilisés dans la réfrigération ou l'air conditionné, l'industrie des semi-conducteurs, les aérosols et les mousses isolantes.



**Références bibliographiques**

- Blandin C.**, (2008). Rapport sur les risques et dangers pour la santé humaine de substances chimiques d'usage courant : éthers de glycol et polluants de l'air intérieur. Evaluation de l'expertise publique et des choix opérés. Tome 1. Conclusions du rapporteur. OPECST
- Briefert Claus, Perraud Robert**, (2001). Chimie de l'environnement, air eau, sol, déchets. De Boeck Université, 477p.
- Charles Pomerol, Yves Lagabrielle et Maurice Renard**, (2000). Éléments de géologie, Paris, -  
-Dunod, coll., Masson Sciences, 12e éd., 746 p. (ISBN 978-2-10-004754-3 et 978-2100047543, BNF 37198579).
- David O. Edokpa\*, Vincent E. Welu**, (2017). An Assessment of Atmospheric Boundary Layer Turbulence in Maiduguri, Nigeria. Open Journal of Air Pollution Vol.6 No.2.
- Deleage J.-P.**, (2000). La pollution de l'air. In La science au présent, Encycloppedia Universalis.
- Encrenaz Thérèse**, (2000). Atmosphères planétaires : Origine et évolution, Belin, coll. « Croisée des sciences », 152 p
- Hinrichs R. A. and Kleinbach M.**, (2013). "Nitrogen oxides, photochemical smog and ozone," in Energy: Its Use and the Environment, 5th ed. Toronto, Ont. Canada: Brooks/Cole, ch.8, sec.C, pp.250-252
- Horsin Molinaro Hélène and Villain Olivier**, (2021). L'effet de serre : c'est quoi ? Culture Sciences de l'Ingénieur
- Jacobowicz Isidore**, (1998). Dénitrification des gaz de combustion. Techniques de l'ingénieur, J3922.
- Juvenon S.**, (2019). Effet de serre, réchauffement climatique et électricité : tout pour y voir clair . Electricité verte.
- K. Labitzke, J. J. Barnett et Belva Edwards**, (1989). Atmospheric structure and its variation in the region 20 to 120 km, vol. XVI, University of Illinois, coll. « Handbook for MAP ».
- Koller E.**, (2009). Traitement des pollutios industrielles. Eau, Air, Déchets, Sols, Boues. 2<sup>ème</sup> édition. DUNOD.569p.
- LORCK. J** . (2015). Effet de serre et réchauffement climatique, global-climat, consulté en novembre 2023, <https://global-climat.com/effet-de-serre-et-rechauffement-climatique/> Effet de serre et réchauffement climatique. Global-climat.
-

-**Ngo C.**, (2008). Energie, ressources, technologies et environnement, Dunod.

-**Ngô C., Régent A.**, (2012). Déchets, effluent et pollution. Impact sur l'environnement et la santé. 3<sup>ème</sup> édition, DUNOD

-**Robert L.**, (2006). Epuration des polluants issus de la combustion domestique du bois. Vol. 61, N° 2, pp 213-223.

- **Sylvie Malardel**, (2009). Fondamentaux de Météorologie, Cepadues-Editions, 2<sup>ème</sup> édition .728p.

-**John H. Seinfeld and Spyros N. Pandis**, (2006). Atmospheric Chemistry And Physics. From Air Pollution to Climate Change. SECOND EDITION. A WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION JOHN WILEY & SONS, INC. , 1191p.

-**Tyler G., Miller Jr. and Hackett D.**, (2011). "Photochemical and Industrial Smog," in Living in the Environment, 2nd ed. USA: Nelson, ch.20, sec.3, pp.465-471.

.

.