



RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DE TISSEMSILT
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



Polycopié de cours

POLLUTION ET PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Parcours : **3 Licence Ingénierie des Transports**
Matière : **Pollution et protection de l'environnement**
Filière : **Ingénierie des Transports**
Spécialité : **Technologies, Organisation et sécurité des transports**

Préparé par : **Dr. CHELLALI RACHID**

Tissemsilt-2024/2025

Préface

Ce support de cours, revêt une importance capitale pour les étudiants de licence en génie du transport dans la mesure où il est conçu pour répondre aux objectifs tels que fixés par le programme de formation à savoir sensibiliser les étudiants à l'étendue de la gravité des dommages déjà perceptibles de la pollution sur l'environnement à l'échelle planétaire. Il leur permet aussi de s'imprégner des méthodes d'analyses physico-chimiques et biologiques dans le contexte de l'évaluation, de la surveillance de la qualité et de la protection de l'environnement.

Il permet également de leur procurer:

- Une Synthèse de connaissances : Il condense les informations essentielles sur la pollution, offrant aux étudiants une vue d'ensemble claire et structurée du sujet.
- Un approfondissement des concepts : Il permet d'explorer en détail des notions complexes liées à la pollution, telles que les causes et les conséquences.
- Un complément à l'enseignement : Il vient enrichir les cours magistraux, en offrant des exemples concrets et des études de cas.
- Une large sensibilisation aux enjeux environnementaux : Il permet de sensibiliser les étudiants aux problématiques liées à la pollution et à leur impact sur l'environnement et la santé.
- L'adoption d'une démarche citoyenne : Il encourage les étudiants à adopter des comportements responsables en matière de protection de l'environnement.
- Un fondement pour des actions concrètes : Il fournit les connaissances nécessaires pour mettre en œuvre des projets de réduction de la pollution.

A la fin, il faut souligner que ce polycopié a été expertisé et approuvé par deux éminents professeurs spécialistes et enseignants chercheurs universitaires, qu'ils trouvent ici l'expression de mon grand respect.

Pr. BIDAOUI MOURAD enseignant chercheur à l'Université de Tissemsilt

Pr. CHOUGUI ABDELKADER enseignant chercheur à l'Université de Tiaret

SOMMAIRE

Nomenclature	3
Liste des figures	4
Liste des tableaux	4
Introduction générale	5
Chapitre 1. Pollutions et implications écologiques	7
1.1 Causes actuelles de la pollution	7
1.2 Classification des pollutions	18
1.3 Principe de la pollution	19
Chapitre 2. Mécanisme de dispersion et circulation des substances polluantes dans la biosphère	20
2.1 Circulation atmosphérique des polluants	21
2.2 Propriétés physiques	33
2.3 Propriétés physiques	33
2.4 Durée de vie des substances	33
2.5 Processus biogéochimiques	33
2.6 Répartition des polluants	34
2.7 Concentration par les êtres vivants	34
Chapitre 3. Pollution atmosphérique	35
Introduction	35
3.1 Structure et composition de l'atmosphère	37
3.2 Les polluants atmosphériques	38
3.3 Nature et origine de la pollution atmosphérique	41
3.4 Les impacts de la pollution de l'air	43
Chapitre 4. Pollution des sols	48
Introduction	48
4.1 Définition	48
4.2 Propriétés du sol	50
4.3 Les pollutions des sols	52
4.4 Les formes de pollution des sols	54
4.5 Les conséquences de la pollution du sol	54
4.6 Lutte contre la pollution des sols	55
Chapitre 5. Pollution des eaux	56
Introduction	56
5.1 Ressources en eau	56
5.2 Les eaux naturelles	57
5.3 Définition de la pollution des eaux	58
5.4 Principales sources de pollution	58
5.5 Les différents types de pollution	59
5.6 Impacts majeurs de la pollution des eaux	60

Chapitre 6. Analyses physico-chimiques	62
6.1 Analyses physico-chimiques	62
6.2 Méthodes d'analyse	66
6.3 Classification de la qualité des eaux	73
Chapitre 7. Analyses biologiques	75
7.1 Notion de bioindicateur	75
7.2 Avantages des indicateurs biologiques	75
7.3 Principaux types de méthodes biologiques actuellement utilisées	75
7.4 Méthodes d'analyse microbiologiques	77
7.5 Autres méthodes d'évaluation de flores microbiennes	85
Chapitre 8. Protection de l'environnement: Réglementation algérienne	87
Introduction	88
8.1. Importance de la législation et du pouvoir législatif	88
8.2 Textes législatifs pour la protection de l'environnement	89
8.3 Rôle des collectivités locales dans la protection de l'environnement	90
8.4 Rôle du citoyen dans la protection de l'environnement	96
8.5 Le rôle de l'opinion publique	97
Conclusion générale	98
Références bibliographiques	99
Résumés	100

Nomenclature

NO_x : oxydes d'azote

POPs : Polluants organiques persistants

HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques

PCB : Polychlorobiphényles

MTH : Maladies à transmission hydrique

CFCs : Chlorofluorocarbures

Liste des figures

Fig.1 Production mondiale d'énergie	8
Fig.2 Concentration en ozone de l'atmosphère aux diverses altitudes et latitudes	22
Fig.3 Mouvements des masses d'air autour du globe	24
Fig.4 Distribution et mouvements de l'ozone (gris sombre), de l'eau (gris moyen) et des	25
Fig.5 Processus de bio-concentration et de bio-amplification du DDT	30
Fig.6 Principaux types de pyramides des concentrations Pyramide selon la valeur du facteur	31
Fig.7 Carte de pollution de l'air dans le monde	37
Fig.8 Stratification verticale de l'atmosphère	38
Fig.9 Taille des particules : échelle et ordre de grandeur	41
Fig.10 Composition d'un sol	49
Fig.11 Carte de pollution des sols par les pesticides dans le monde	52
Fig.12 Sources de pollution	53
Fig.13 Carte de pollution de l'eau dans le monde	56
Fig.14 Cycle naturel de l'eau	57
Fig.15 Chromatographie en phase gazeuse (GC)	67
Fig.16 Principe chromatographie en phase liquide haute performance	68
Fig.17 Spectromètre infrarouge	69
Fig.18 Daphnia magna	76
Fig.19 Cellule de Malassez	78
Fig.20 Lecture de la cellule de Malassez	79
Fig.21 Filtration sur membrane	82
Fig.22 Cytométrie de flux	87

Liste des tableaux

Tableau.1 Classification des principaux types de pollutions et de nuisances	20
Tableau.2 Nature et origine des principaux groupes de polluants atmosphériques	43
Tableau. 3Principaux types, nature et origines des produits polluants des eaux continentales	59
Tableau.4 Effets des polluants sur la santé et sur l'environnement	61
Tableau.5 Récapitulatif des méthodes d'analyses	72
Tableau.6 Grille de la classification de la qualité des eaux superficielles en Algérie	73
Tableau.7 Dénombrement en milieu liquide à un seul essai	83
Tableau.8 Dénombrement par la technique du nombre le plus probable	84
Tableau.9 Table de Mac Grady	85
Tableau.10 Concentration cellulaire approximative par spectroscopie	86
Tableau.11 Textes juridiques relatifs à la protection de l'environnement en Algérie	90

Introduction générale

Les changements climatiques, l'appauvrissement de la couche d'ozone, les déséquilibres des écosystèmes, l'appauvrissement de la biodiversité, l'épuisement des ressources naturelles et la dégradation des biotopes, résument les défis du 20ème siècle auxquels on se trouve confronté. L'industrialisation croissante et les exigences d'une démographie ascendante ne font qu'exacerber les problèmes environnementaux en portant atteinte à la nature et le bien-être de l'humanité.

Par sa présence insidieuse, la pollution est une des causes majeures de dégradation de l'environnement par les produits qui se diffusent dans plusieurs milieux de notre univers. Ainsi on la retrouve aussi bien dans l'eau, dans l'air, que dans le sol.

Est considéré polluer ou passible de l'être, tout écosystème ne pouvant pas ou plus dégrader les substances introduites dans son milieu. Le seuil critique de sa capacité à éliminer naturellement les substances est dépassé on dit que l'équilibre de l'écosystème est rompu.

Les sources de pollutions sont nombreuses et l'identification des substances polluantes et de leurs effets sur les écosystèmes est complexe. Elles peuvent provenir de catastrophes naturelles ou résulter de l'activité humaine. Les pollutions peuvent être aussi bien les marées noires, les pollutions chimiques, les accidents nucléaires, l'introduction d'espèces invasives, les déchets déversés dans la nature. Les nuisances engendrées par les diverses sources de pollutions sont variées et peuvent s'accumuler.

D'après l'OMS la pollution de l'air intérieur et extérieur est l'une des principales causes évitables de maladie et de décès dans le monde et le plus grand risque environnemental pour la santé au monde. Il est établi que 4,3 millions de décès surviennent chaque année suite à une exposition à la pollution de l'air intérieur des habitations et que 3,7 millions de décès sont imputables chaque année à la pollution de l'air ambiant (extérieur), ce qui entraîne un coût élevé pour les sociétés [1].

Conscient que l'exposition aux polluants atmosphériques, notamment aux particules fines, est un facteur de risque majeur de maladies non transmissibles chez les adultes, notamment les cardiopathies ischémiques, les accidents vasculaires cérébraux, les bronchopneumopathies chroniques obstructives, l'asthme et le cancer, et constitue une menace sanitaire considérable pour les générations actuelles et futures.

Par ailleurs, l'industrie chimique et métallurgique, l'activité pétrolière et minière, l'élimination des déchets produisent en effet des substances susceptibles de polluer les sols. Cette pollution se fait sous forme de rejets directs à partir des sites producteurs, ou bien par retombées aériennes après la dispersion des polluants dans l'atmosphère ou dans les eaux d'évacuation. L'agriculture contribue également à la pollution des sols par l'épandage d'engrais et d'amendements, l'usage de pesticides et de fertilisants.

La qualité naturelle de l'eau, qu'elle soit douce ou salée, se trouve également affectée par ce phénomène dont les MTH sont la conséquence la plus ravageuse avec un million de décès par an à cause de la diarrhée selon l'OMS.

Il est également inquiétant de constater que la moitié des décès dus aux infections aiguës des voies respiratoires inférieures, y compris la pneumonie chez les enfants de moins de cinq ans, puissent être attribués à la pollution de l'air intérieur, ce qui en fait un facteur de risque majeur de mortalité infantile. La prévention de la pollution, et l'application du principe de précaution sur toutes les potentialités de pollution issues des activités humaines est systématique dans l'application des principes du développement durable. Il s'agit bien entendu de remédier aux pollutions existantes, mais également d'anticiper et d'éviter les sources de pollutions à venir, afin de préserver l'environnement et la santé publique.

Par cette contribution nous visons à sensibiliser les lecteurs et particulièrement les étudiants -toutes spécialités confondues- de l'étendue des dommages gravissimes que la pollution peut engendrer et prendre part énergiquement dans les efforts de prévention consentis par l'état.

Avant de s'immiscer dans le fond du sujet par ce développement, un introductif sur les pollutions et leurs implications écologiques était indispensable pour identifier leurs origines et leur nature ainsi que le mécanisme de dispersion et la circulation des substances polluantes dans la biosphère comme première partie.

Les pollutions de l'atmosphère, des sols et des eaux représentent l'essentiel de ce travail dans lequel on a pu résumer une bibliographie abondante dans un langage simplifié pour circonscrire cette problématique complexe.

L'usage de différentes méthodes d'analyses physico-chimiques et biologiques pour identifier et quantifier les différents polluants ont été abordées succinctement à la fin, pour conclure avec un rappel sur la réglementation algérienne en matière de protection de l'environnement.

1. Pollutions et implications écologiques

1.1. Causes actuelles de la pollution

1.1.1 Pollution liée à la production et à l'utilisation d'énergie (pétrole, charbon, nucléaire)

Une première donnée qui explique l'ampleur des impacts sur l'environnement liés aux combustibles fossiles est l'importance des flux de matières en circulation. On extrait du sous-sol, chaque année, dans le monde, de l'ordre de 8 milliards de tonnes de combustibles fossiles, soit, en 1989, environ 3,5 milliards de tonnes de charbon, 3,1 milliards de tonnes de pétrole et 1,4 milliards de tonnes de gaz. Ces matières premières nécessitent des traitements divers pour les convertir en produits commerciaux. Elles doivent être stockées, transportées sur les lieux de consommation, souvent sur de longues distances. Le transport des combustibles constitue, par exemple, la moitié environ des trafics maritimes. Le fonctionnement des filières d'approvisionnement en combustible représente ainsi une activité considérable et les impacts sur l'environnement sont à l'échelle de cette activité [2].

Une seconde caractéristique des combustibles fossiles, notamment le pétrole et le charbon, est que, par suite de leur processus de formation, ils sont constitués par des mélanges d'un grand nombre de composés chimiques divers avec une composition qui varie suivant l'origine du gisement ; parmi ces composés, principalement organiques, certains sont des produits toxiques pour l'homme ou pour d'autres organismes vivants. La complexité et la diversité des combustibles fossiles sont un élément important pour expliquer leur impact environnemental.

Un troisième facteur est celui des conditions dans lesquelles, en bout de cycle, ces combustibles complexes réagissent avec l'oxygène de l'air dans une réaction de combustion vive. Cette réaction génère un ensemble de nouveaux composés, dont certains sont toxiques ; d'autres composés se forment encore par transformation ultérieure des produits de combustion... Une part importante du flux des 8 milliards de tonnes/an de combustibles fossiles est brûlée sans que l'on se préoccupe de la composition des produits formés et les produits de combustion sont rejetés sans traitement dans l'environnement, essentiellement dans l'atmosphère.

Les voies par lesquelles l'homme, en faisant usage des combustibles fossiles, agit sur son environnement sont très diverses (Fig.1). On le montrera, dans une première partie de cette note, en passant rapidement en revue les facteurs d'impact aux différentes étapes des filières des combustibles. On centrera ensuite la présentation sur un ensemble d'impacts particulièrement important, celui des émissions dans l'atmosphère, dont on donnera un aperçu général.

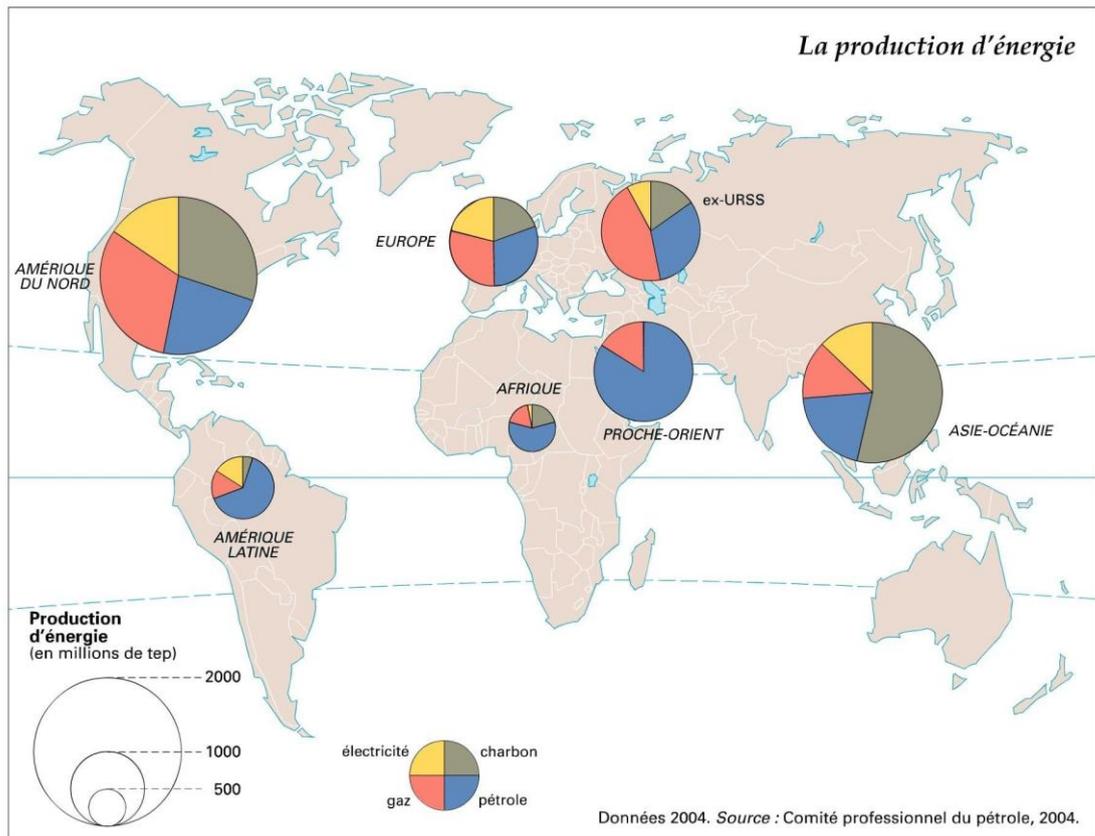


Fig.1 Production mondiale d'énergie

Certains risques liés à l'utilisation des énergies fossiles sont connus depuis longtemps, par exemple le risque pour la santé humaine qui, dans le proche voisinage d'installations de combustion, peut résulter de concentrations élevées de dioxyde de soufre et de particules. Ces risques ont fait l'objet dans de nombreux pays de politiques de contrôle qui visaient à éloigner les rejets de la population et à les disperser (cheminées) puis à limiter, pour certains polluants, le débit de rejet de chaque installation. De telles politiques ont atteint leurs objectifs et ont permis de supprimer les "points noirs", ou les pics locaux, de certaines pollutions. Dans le même temps, les niveaux globaux d'émission d'un grand nombre de polluants et les niveaux moyens de leurs concentrations dans l'environnement, ont continué à croître. Les préoccupations en matière d'environnement ont donc porté de plus en plus, au cours des dernières années, sur les risques des pollutions de fond. C'est ce qu'on illustrera dans une seconde partie de la note où, après un rappel sur l'évolution de la composition de l'atmosphère, on proposera, à titre d'exemples, des éléments d'évaluation de trois types de risques : le risque sanitaire des aérosols, l'impact de l'ozone troposphérique sur l'agriculture, l'effet de serre.

- Les facteurs d'impact sur l'environnement aux différentes étapes de la filière de production et d'utilisation des combustibles fossiles

En suivant les différentes étapes de la chaîne de production et d'utilisation des combustibles fossiles, on tentera de repérer les principaux facteurs d'impacts sur l'environnement et en particulier les principales émissions de pollution.

a) Extraction des combustibles

- les exploitations minières de charbon, qu'elles soient souterraines ou à ciel ouvert, impliquent, par le volume des excavations et celui des remblais de stériles, un bouleversement de leur site (disparition du système antérieur d'occupation du sol, production d'un nouveau paysage, altération de la circulation et de la qualité des eaux...);
- l'extraction de pétrole ou de gaz a aussi un impact géophysique (affaissement des sols...), elle s'accompagne généralement de l'émission dans l'atmosphère de gaz de gisement ainsi que de rejets liquides (eaux extraites du gisement, boues de forage...).

b) Installations de préparation et d'acheminement des combustibles

- la préparation et le transport des combustibles depuis les lieux d'extraction jusqu'aux lieux d'utilisation impliquent un ensemble d'infrastructures lourdes (voies ferrées, ports, routes, conduites, raffineries, stockages...) qui mobilisent des espaces spécifiques, par exemple des espaces littoraux ou des sites de vallées...;
- certaines opérations de traitement, telles que le raffinage, s'accompagnent du rejet dans l'environnement de composés organiques gazeux et de liquides (phénols, produits ammoniacaux...);
- le fonctionnement du système d'extraction, de préparation et de transport nécessite une quantité importante d'énergie, donc la combustion d'une partie du combustible; cette combustion génère, comme on le verra ci-après, des émissions atmosphériques de polluants.

c) Installations de préparation et d'acheminement des combustibles

- la préparation et le transport des combustibles depuis les lieux d'extraction jusqu'aux lieux d'utilisation impliquent un ensemble d'infrastructures lourdes (voies ferrées, ports, routes, conduites, raffineries, stockages...) qui mobilisent des espaces spécifiques, par exemple des espaces littoraux ou des sites de vallées.

- certaines opérations de traitement, telles que le raffinage, s'accompagnent du rejet dans l'environnement de composés organiques gazeux et de liquides (phénols, produits ammoniacaux...).
- le fonctionnement du système d'extraction, de préparation et de transport nécessite une quantité importante d'énergie, donc la combustion d'une partie du combustible; cette combustion génère, comme on le verra ci-après, des émissions atmosphériques de polluants.

d) Équipements d'utilisation des combustibles

- la transformation de l'énergie chimique des combustibles en énergie mécanique (transports, production d'électricité...) implique le rejet dans l'environnement sous forme de chaleur d'une part majeure de l'énergie apportée ; par exemple, une centrale électrique modifie de manière importante la température et par conséquent l'écologie d'un cours d'eau faisant fonction de source froide.
- les moteurs dissipent une énergie sonore importante (moteurs à explosion des véhicules routiers, réacteurs d'avions...) ; on sait que le bruit est ressenti comme l'une des nuisances graves de la vie quotidienne, notamment en milieu urbain.

e) Existence de "fuites" tout au long des filières d'approvisionnement

- des évasions d'hydrocarbures liquides dans l'environnement, dont les accidents de pétroliers ne sont que l'exemple le plus visible, existent en divers points de la filière pétrolière (0,1 % des tonnages transportés par mer); la couche la plus superficielle des océans est ainsi chargée de quantités importantes d'hydrocarbures légers; cela constitue une sorte d'empoisonnement de l'interface des échanges océan-atmosphère aux effets mal évalués ;
- des pertes d'hydrocarbures volatils (0,3% des flux) surviennent à toutes les étapes de la filière pétrolière et en particulier lors des stockages ;
- le gaz naturel est principalement constitué de méthane, gaz à effet de serre; une part significative du gaz produit (quelques pour cent) s'évade dans l'atmosphère tout au long de la filière d'approvisionnement ;
- le "combustible solide" qu'est le charbon, ainsi d'ailleurs que les terrains entourant le charbon dans le gisement, contiennent des "matières volatiles", notamment du méthane; ce méthane s'évade dans l'atmosphère du fait de l'extraction du charbon ;
- la manutention et le stockage du charbon s'accompagnent également de pertes de matière; ainsi des envols de poussières depuis les stocks exposés au vent, ou les véhicules non couverts;

Le lessivage de tas de charbon exposés à la pluie qui entraîne des minéraux solubles dans les nappes phréatiques.

f) Le rejet final dans l'environnement des produits de combustion

- Dans la combustion, les combustibles sont pour l'essentiel convertis en produits gazeux rejetés dans l'atmosphère :
 - les combustibles étant principalement composés de carbone et d'hydrogène, les produits de combustion sont constitués en premier lieu de dioxyde de carbone (CO_2), et de vapeur d'eau ;
 - dans la mesure où les combustibles contiennent du soufre (le charbon et le pétrole brut ont des teneurs en soufre variables, la moyenne des approvisionnements se situant autour de 1% de leur poids en soufre), la combustion produit aussi du dioxyde de soufre (SO_2) ;
 - l'oxygène nécessaire à la combustion est généralement apporté par l'air; en même temps que la combustion, et suivant les conditions de cette combustion, il y a oxydation d'une partie de l'azote de l'air et production d'oxydes d'azote (NO_x); ces oxydes se forment également par oxydation de l'azote organique contenu dans le charbon ou le pétrole ;

les produits de combustion rejetés dans l'atmosphère contiennent aussi, en proportions variables, des composés résultant d'une oxydation incomplète du combustible (monoxyde de carbone CO), des imbrûlés (particules de carbone), des hydrocarbures volatils, en particulier des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), et d'autres composés organiques volatils (COV) tels que des aldéhydes, des éléments minéraux inclus dans le combustible brut (arsenic, chrome, cadmium, mercure...) ou des éléments ajoutés (plomb...), etc..

- la charge minérale du combustible - le charbon contient couramment 10% de cendres - peut être en partie récupérée, avec les imbrûlés solides, par exemple par dépoussiérage des fumées de combustion .Cette charge constitue un déchet solide qui est redéposé dans l'environnement
- les impacts des énergies fossiles sur l'environnement (lixiviation par les eaux d'infiltration, par exemple, peut représenter un risque ;
- pour limiter les rejets gazeux d'oxydes de soufre ou d'azote, des traitements des gaz de combustion sont effectués sur certaines installations ; d'autres déchets, notamment des déchets solides, sont alors produits... La liste des produits rejetés dans l'atmosphère lors de la phase de

combustion demande à être affinée suivant les différents combustibles et les différents compartiments des filières énergétiques :

- pour un même contenu énergétique, le pétrole, et plus encore le charbon, contiennent davantage de carbone que le gaz naturel et produisent donc par combustion davantage de dioxyde de carbone ; le soufre est assez facilement extrait du gaz naturel avant sa distribution, alors que cette extraction n'est pas économiquement envisageable dans le cas du charbon. Pour le pétrole, les traitements classiques de raffinage tendent à répartir entre les différents flux sortants le soufre contenu dans le pétrole brut approvisionné : on fabrique des produits légers peu soufrés (carburants) et des produits lourds très soufrés (fuels). Le dioxyde de soufre est donc émis, pour une part majeure, par les installations consommant charbons et fuels lourds (centrales électriques, raffineries, grandes chaudières pour l'industrie ou le chauffage...) ; pour de telles installations, des solutions techniques peuvent être mises en œuvre pour extraire des fumées de combustion une grande partie du dioxyde de soufre ;
- les moteurs et les petites installations de combustion sont moins favorables à une combustion complète des combustibles; les véhicules de transport sont donc à l'origine de la majeure partie des émissions de monoxyde de carbone et de composés organiques volatils. Cependant, en disposant des catalyseurs appropriés sur le circuit des gaz en sortie du moteur, il est possible de forcer l'oxydation de ces composés et réduire leurs émissions;
- les oxydes d'azote sont produits lors de toutes les combustions, avec des taux de production relativement plus élevés dans les moteurs ; des techniques de réduction catalytique permettent de les décomposer. De cette présentation rapide de différents facteurs d'impact des combustibles fossiles, on retiendra notamment l'importance quantitative des rejets de matière dans l'atmosphère en fin de cycle. C'est l'impact de ces rejets qui sera traité dans la suite de l'exposé.

1.1.2 Pollution d'origine industrielle (diversification des polluants chimiques et l'accumulation des déchets)

Depuis la fin de la seconde Guerre mondiale, la chimie organique a mis à notre disposition une multitude de nouvelles molécules de synthèse. On estimait dans les années 1990 que 120 000 molécules étaient commercialisées dans le monde et que chaque année étaient mises sur le marché de 500 à 1 000 substances chimiques nouvelles. Parmi elles, les matières plastiques, les détergents, les matériaux isolants ont apporté d'incontestables éléments de confort à la vie quotidienne.

On constate par ailleurs que les agents polluants dont l'action sur la biosphère est la plus préoccupante sont le fruit de technologies quasi inexistantes dans la première moitié du xx^e siècle et qui se sont multipliées depuis lors. On peut, par ailleurs, affirmer que dans bien des pays industrialisés, la crise contemporaine de l'environnement, bien qu'intensifiée par la forte densité de population de beaucoup d'entre eux, ne provient pas de l'accroissement démographique — il est vrai limité depuis les années 1950. Commoner (1971) soulignait déjà à juste titre le rôle déterminant du progrès technologique dans la pollution de l'environnement, aux États-Unis depuis 1945. Cet auteur remarquait que la population y avait crû de 42 % entre cette date et 1970 alors que le PNB y avait augmenté de 126 % et que le niveau de pollution s'y était élevé de 10 fois dans le même laps de temps [3] .

Il est opportun de se demander à ce propos quel est l'ordre de grandeur des divers types de pollutions et des nuisances que les technologies modernes entraînent à l'heure actuelle. Les bilans se multiplient chaque jour et parmi le flot croissant de données statistiques, nous choisirons au hasard quelques exemples. Ainsi, les déchets industriels dangereux produits par les États-Unis dépassaient 300 millions de tonnes par an au milieu de la dernière décennie... La moyenne européenne pour la production d'ordures ménagères était de 524 kg/hab/an en 2008. Elle s'élevait alors en France à 543 kg/hab/an (316 en 1993), le record étant détenu par le Danemark avec 802 kg/hab/an. On relève des valeurs analogues en Amérique du Nord. Au total, la production française de déchets atteignait 868 millions de tonnes en 2006. À la fin des années 2000, il était estimé que 4 milliards de tonnes de déchets étaient annuellement produits dans le monde. L'un des aspects les plus redoutables de la pollution globale par les substances chimiques de synthèse tient en la croissance des rejets de polluants organiques persistants (POPS) tant dans les pays industrialisés que dans le Tiers-monde. Par suite de leur ubiquité et de leur stabilité, ces substances : hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), solvants chlorés, polychlorobiphényles (PCB) et PolyBromoBiphényles (PBB), pesticides organochlorés, dioxines.. se rencontrent de nos jours dans les régions les plus reculées de la biosphère, tant continentales qu'océaniques, y inclus, pour certaines d'entre elles, dans les eaux profondes de la zone néritique de l'océan glacial Antarctique. Une autre caractéristique non moins préoccupante de la pollution de la biosphère tient en l'étendue des surfaces exposées aux innombrables substances toxiques produites par les activités humaines. Limitées aux débuts du xx^e siècle aux villes et à leurs zones d'activités artisanales et industrielles périphériques ces surfaces ont pris une extension sans cesse croissante depuis la fin de la seconde Guerre mondiale. La contamination des biotopes continentaux et océaniques par les produits de la technologie moderne et les polluants associés à son activité se sont

progressivement étendus à la quasi-totalité de la biosphère, affectant ses zones les plus reculées. Ainsi, le phénomène des pluies acides concerne des continents entiers et dès la fin des années 1960 fut découverte une pollution par les composés organochlorés des neiges tombant à l'emplacement même du pôle Sud ! À la fin des années 1990 fut détectée dans l'océan Indien une immense zone, de surface supérieure à celle de l'Europe, marquée par une intense pollution atmosphérique résultant du stade déjà considérable d'industrialisation de l'Inde et de la Chine [4].

Auparavant, dans les années 1950, l'opinion internationale s'était alarmée à juste titre des retombées sur l'ensemble de l'hémisphère boréal d' ^{131}I , de ^{90}Sr et de ^{137}Cs et autres radionucléides provoquées par les essais atmosphériques d'armes nucléaires. On s'est en revanche bien moins inquiété, jusqu'à une date encore récente, de la contamination de l'ensemble de l'écosphère, océan mondial inclus, par diverses matières premières et substances synthétisées par la chimie moderne. Faut-il rappeler qu'au moins 3,5 millions de tonnes de pétrole sont chaque année rejetés à la mer par accident et le plus souvent volontairement (soit en volume l'équivalent d'environ une soixantaine de Prestige , ou encore que l'on trouve des fragments de matières plastiques dérivant au sud de la convergence antarctique au nord de la baie de Ross, à des milliers de kilomètres des premières zones habitées.

Faut-il aussi préciser que des agents plastifiants très nocifs - tels Les PCB -, les dioxines, ou encore les polychlorodibenzofurans (PCDF) empoisonnent peu à peu l'atmosphère de toute la planète et que l'on trouve, par exemple, aujourd'hui des traces de ces substances dans l'organisme d'animaux vivant dans les zones arctiques ou au centre de l'océan Pacifique. Ainsi, a-t-on trouvé des PCDF dans des requins capturés au milieu de cet océan, loin de toute côte industrialisée. L'océan constitue, en effet, l'ultime zone d'accumulation de tous les résidus toxiques produits par la technologie moderne, et des substances de synthèse aux effets trop souvent tout aussi pernicieux qu'insoupçonnés. On peut estimer que le tiers du DDT fabriqué jusqu'à ce jour dans le monde est entreposé à l'heure actuelle dans l'hydrosphère, essentiellement dans des sédiments côtiers... avec une surprenante persévérance, la civilisation technologique contemporaine, occidentale par essence, continue à considérer l'océan à la fois comme une poubelle et comme un garde-manger, usages a priori incompatibles... Comme le faisait remarquer de façon prémonitoire un rapport sur les problèmes environnementaux critiques faisant état des conclusions des travaux d'un groupe d'expert du MIT effectués à la fin des années 1960 : « le déclin des poissons marins et les

niveaux d'accumulation du DDT dans leurs tissus à des taux inacceptables pour l'homme ne peuvent qu'être accélérés par la libération de cette substance dans l'environnement. Certains risques liés à l'usage du DDT, particulièrement difficiles à quantifier, méritent une très sérieuse évaluation. On ignore, le taux auquel il se dégrade en produits inoffensifs dans l'écosystème marin. Pour certains de ses produits de dégradation, la durée de demi-vie est de l'ordre de quelques années à quelques décennies... Plus on étudie le problème, plus on met en évidence des effets inattendus. Si l'on fait une rétrospective des conséquences écologiques observées au cours des dernières années, on conclut que ces risques, (liés aux nouvelles technologies) ont été immensément sous-estimés ». En effet, le problème des pollutions est multiforme. On peut certes prévoir, d'après des recherches de laboratoire, l'action d'une substance sur un type d'organisme, mais il n'en est plus de même dans la nature. Les composés que l'Homme disperse dans l'écosphère réagissent sur l'ensemble des biocénoses et non sur quelques espèces particulièrement sensibles. En outre, se produisent des effets de potentialisation difficiles à prévoir par avance. Dans de nombreux cas, certaines conditions de milieu, voire la présence d'un polluant particulier, exaltent la toxicité de substances qui pourraient paraître au premier abord inoffensives lors de recherches effectuées in vitro. Citons, par exemple, le rôle déterminant que jouent dans la pollution des océans, les composés organiques persistants (POP) : la présence quasi permanente sur de vastes étendues pélagiques de flaques de pétrole à la surface de ces dernières augmentant de beaucoup leurs concentrations dans les couches superficielles. De même, le mercure minéral, peu toxique à l'état métallique, est converti par les bactéries benthiques en méthyl-mercure, de toxicité redoutable.

1.1.3 Pollutions dues à l'agriculture et l'élevage intensif

L'agriculture constitue la principale utilisation des terres par les humains. En 1999, les pâturages et les cultures représentaient à eux seuls 37 pour cent de la surface émergée du globe. Plus des deux tiers de la consommation humaine d'eau sont destinés à l'agriculture. En Asie, cette part en représente quatre cinquièmes.

La culture et l'élevage ont un profond effet sur l'environnement au sens large. Ce sont les causes principales de la pollution de l'eau par les nitrates, les phosphates et les pesticides. Ils constituent aussi les principales sources anthropiques des gaz à effet de serre - le méthane et l'oxyde nitreux - et ils contribuent massivement à d'autres types de pollution de l'air et de l'eau. L'étendue et les méthodes de l'agriculture, de la foresterie et de la pêche sont les principales

causes de perte de biodiversité dans le monde. Les coûts externes de ces trois secteurs peuvent être considérables.

L'agriculture nuit également à son propre avenir par la dégradation des sols, la salinisation, le soutirage excessif d'eau et la réduction de la diversité génétique des cultures et du bétail. Les conséquences à long terme de ces processus sont toutefois difficiles à quantifier.

Si des méthodes de production plus durables sont adoptées, les impacts négatifs de l'agriculture sur l'environnement pourront être atténués. Dans certains cas, même, l'agriculture pourra permettre de résoudre ces problèmes, par exemple en stockant le carbone dans le sol, en aidant à l'infiltration de l'eau et en entretenant les paysages ruraux et la biodiversité

Rivières, aquifères et sols sont soumis à des pollutions d'origine agricole : nitrates et produits phytosanitaires, matières en suspension. La pollution par les nitrates résulte de l'excès de fertilisation : engrais et déjections animales. Celle par les produits phytosanitaires provient soit d'une mauvaise utilisation des produits par les utilisateurs (déversements accidentels, surdosages, mauvais réglage des pulvérisateurs), soit de phénomènes naturels tels ruissellements lors de pluies imprévues. L'excès de fertilisation et l'utilisation de pesticides pour la protection des cultures, l'amélioration de la productivité et de la qualité des productions) ont des conséquences négatives sur la qualité de l'eau mais aussi sur la santé des utilisateurs.

L'eau est utilisée en agriculture pour abreuver le bétail, diluer ou mettre en suspension les intrants qui se présentent sous forme solide, laver les installations et irriguer les cultures. Les effluents issus de ces activités sont chargés en polluants. Cette pollution peut ensuite rejoindre les cours d'eau et les nappes souterraines par ruissellement, érosion des sols et infiltration.

— Les principaux polluants issus des activités agricoles sont :

- Les nitrates et le phosphore qui composent les engrais. Ces deux substances sont connues pour provoquer l'eutrophisation des cours d'eau lorsqu'elles sont présentes en trop grande quantité.

Les pesticides utilisés pour lutter contre les organismes dits nuisibles et favoriser ainsi le développement des cultures.

- Les matières en suspension (MES) qui résultent de l'érosion et du lessivage des terres.

- A cela s'ajoute des pollutions accidentelles lors de manipulation de produits phytosanitaires par exemple. Il est donc nécessaire de traiter ces effluents avant rejet dans le milieu récepteur ou de mettre en place des solutions techniques pour limiter les risques de pollution.

Certaines pratiques permettent de réduire la pollution :

Utiliser des modes de production économes en intrants : production intégrée, agriculture biologique,...

- Augmenter les surfaces enherbées.
- Assurer une couverture permanente des sols, notamment par l'implantation de Cultures Intermédiaires Pièges A Nitrates (CIPAN).
- Sécuriser les zones où les produits phytosanitaires sont manipulés : site de stockage, site de lavage,...
- Améliorer la connaissance sur les éléments fertilisants disponibles dans le sol et les besoins en nutriments des plantes afin de limiter la fertilisation.
- Concerter et gérer les pratiques agricoles de manière collective via des projets de territoire.
- L'activité agricole exerce aussi une pression sur la ressource en eau avec les prélèvements agricoles nécessaires à l'irrigation. Ces prélèvements limités peuvent tout de même avoir un impact sur la ressource en eau car ils sont généralement effectués en période de basses eaux.

Toute fois, il faut noter que les engrais sont cause de pollution quand ils sont appliqués en quantité supérieure à ce que les cultures peuvent absorber, ou lorsqu'ils sont emportés par l'eau ou par le vent avant de pouvoir être absorbés. L'excès d'azote et de phosphates peut être lessivé dans les eaux souterraines ou s'écouler dans les eaux de surface. Cette surcharge d'éléments nutritifs cause l'eutrophisation des lacs, réservoirs et mares, et provoque une prolifération d'algues qui détruisent les autres plantes et les animaux aquatiques.

Les prévisions de production végétale à l'horizon 2030 laissent prévoir un ralentissement de l'emploi d'engrais azotés. Si l'on peut améliorer leur efficacité, l'augmentation de la quantité totale d'engrais utilisés entre 1997-99 et 2030 pourrait se limiter à 37 pour cent. Leur emploi actuel dans beaucoup de pays en développement, cependant, est très inefficace. En Chine, le plus gros

consommateur d'engrais azotés au monde, jusqu'à la moitié des engrais appliqués se perd par volatilisation, et 5 à 10 pour cent de plus par lessivage.

Les insecticides, les herbicides et les fongicides sont également appliqués en grande quantité dans beaucoup de pays développés et en développement, et entraînent la pollution de l'eau douce par des carcinogènes et autres poisons affectant les êtres humains ainsi que différentes espèces de faune et de flore. En outre, les pesticides réduisent la biodiversité en détruisant les mauvaises herbes et les insectes et par là les espèces dont se nourrissent les oiseaux et autres animaux.

L'emploi des pesticides s'est accru considérablement pendant les 35 dernières années, le taux de croissance ayant récemment atteint 4 à 5,4 pour cent dans certaines régions. Les années 1990 ont vu un certain déclin de l'emploi d'insecticides, tant dans des pays développés comme la France, l'Allemagne et le Royaume-Uni, que dans certains pays en développement comme l'Inde. Par contre, l'emploi des herbicides a continué à croître dans la plupart des pays.

Avec la montée des préoccupations concernant la pollution et la perte de biodiversité, il se peut que l'emploi des pesticides croisse plus lentement que par le passé. Dans les pays développés, la législation et la fiscalité en limitent de plus en plus l'emploi. En outre, il sera freiné par la croissance de la demande de produits biologiques, cultivés sans intrants chimiques. On verra probablement à l'avenir une augmentation de l'emploi de pesticides "intelligents", de variétés de cultures résistantes et de méthodes écologiques de lutte intégrée contre les ravageurs.

1.2. Classification des pollutions

Il existe 3 grands groupes de pollutions:

A. Pollution physique

- La chaleur
- Les matières solides en suspension (MES)
- Pollution radioactive
- Le bruit
- La pollution lumineuse

B. Pollution chimique

- Les hydrocarbures liquides
- Les détersifs et tensioactifs
- Les plastifiants
- Les pesticides
- Les matières eutrophisantes

- Les métaux lourds
- Les médicaments et cosmétiques

C. Pollution biologique

- Toxines algales,
- les germes pathogènes (Coliformes totaux, les Escherichia Coli, les entérocoques et les salmonelles) sont le plus redoutable pour la santé humaine (MTH) et dans une certaine mesure à la vie aquatique.
-

1.3 Principe de la pollution

Le nombre des polluants est considérable. La société américaine de chimie en dénombre 4 millions, dont 70000 suspects d'action cancérigène en 1977. Il est donc impossible de les énumérer tous d'autant plus que leur nombre croît sans cesse [5].

Le pouvoir polluant d'une substance est déterminé par deux facteurs principaux :

- La dose d'introduction dans le milieu récepteur, déterminée par sa concentration
- La fréquence des apports, dont la répétition accroît les risques par effet cumulatif.

2. Mécanisme de dispersion et circulation des substances polluantes dans la biosphère

La dispersion caractérise le devenir dans le temps et dans l'espace d'un ensemble de particules (aérosols, gaz, poussières) rejetées dans l'atmosphère.

La dispersion (mobilité) est représentée par la tendance des produits chimique de se propager dans d'autre domaine de l'environnement depuis l'endroit où ils ont été générés ou appliqués pour la première fois. La distance jusqu'à laquelle les substances sont transportées dépend de leurs propriétés physique (pression de vapeur, point d'ébullition et de fusion, solubilité dans l'eau, capacité d'être adsorbé, tension superficielle...). La rapidité de transport réalisé dans un compartiment à une influence sur la distance. Les substances sont transportées avant tout par l'atmosphère et par le cycle de l'eau (nappe phréatique incluse; mais aussi les organismes qui changent de lieu et les activités des êtres humains apportent leur contribution au phénomène de transport (par contre le sol n'a pas d'action de transport).

Tableau.1 Classification des principaux types de pollutions et de nuisances [6]

Nature des pollutions	Milieu affecté par la pollution ou la nuisance		
	Atmosphère	Hydrosphère	Sols
1. Pollutions physiques			
Radiations ionisantes	+	+	+
Caléfaction	+	+	
Bruit et vibrations à basse fréquence (nuisance auditive = sonore)	+		+
2. Pollutions chimiques			
Dérivés gazeux du carbone	+	+	
Hydrocarbures		+	+
Dérivés du soufre	+	+	+
Dérivés de l'azote	+	+	+
Métaux et métalloïdes toxiques		+	+
Fluorures	+		+
Particules solides (aérosols)	+		
Détergents		+	
Pesticides et autres composés organiques de synthèse non volatils		+	+
Émission de substances chimiques nauséabondes (nuisance olfactive)	+		
Matières organiques fermentescibles		+	
3. Pollutions biologiques			
Contaminations microbiologiques des milieux inhalés ou ingérés (bactéries ou virus)	+	+	
Introduction des OGM dans l'espace rural			+
Modification des biocénoses par introduction intempestive d'espèces exotiques végétales ou animales invasives		+	+

4, Nuisance esthétique			
Dégradation de l'espace rural ou du milieu urbain par l'urbanisation sauvage ou des aménagements mal conçus	+		
Implantation d'industries dans des biotopes vierges ou peu modifiés par l'Homme	+		

2.1 Circulation atmosphérique des polluants

Les mouvements atmosphériques jouent un rôle fondamental dans la répartition des agents polluants. En effet, qu'il soit gazeux, liquide ou même solide, tout composé organique ou minéral peut, théoriquement, passer dans l'air. Évident dans le cas des gaz, ce passage s'effectue pour les liquides sous forme d'aérosols ou par évaporation si leur tension de vapeur est suffisante. Quant aux solides, ils peuvent tous être entraînés dans l'atmosphère, à condition qu'ils se trouvent réduits à l'état de fines particules. Certains des agents polluants introduits par l'Homme dans l'atmosphère en sont les constituants naturels ainsi, le dioxyde de carbone, les oxydes d'azote, le dioxyde de soufre ou le mercure s'ajoutent aux quantités normalement présentes dans l'air où les introduisent divers phénomènes naturels tels le volcanisme et certains autres processus biogéochimiques.

D'autres polluants, comme les radionucléides, les pesticides ou diverses substances organiques de synthèse, sont d'origine artificielle.

Ce sont les courants ascendants et les vents qui dispersent les substances polluantes en altitude et assurent ainsi leur circulation troposphérique. Cette contamination de l'atmosphère ne se fait pas au hasard mais selon des mécanismes bien définis liés aux divers paramètres qui contrôlent les phénomènes météorologiques.

a) Structure de l'atmosphère

L'atmosphère comporte plusieurs zones qui se succèdent en altitude et dans lesquelles la pression décroît progressivement. Ce sont la troposphère, la stratosphère, la mésosphère et l'ionosphère (encore dénommée thermosphère).

Les deux premières couches, les plus basses et les plus denses, présentent seules une importance pour le sujet qui nous préoccupe. Elles jouent, en effet, un rôle déterminant dans la contamination globale de la biosphère car elles assurent un transfert des polluants vers les lieux les plus reculés, les plus à l'écart des régions peuplées et industrialisées. Ainsi a-t-on pu montrer dès 1967 la présence de composés organochlorés dans les neiges qui tombent dans la partie centrale de l'inlandsis antarctique en des zones situées à plusieurs milliers de km des localités les

plus proches où ces substances auraient pu être utilisées (Île du sud de la Nouvelle Zélande et Patagonie). Au cours des années 1980 et 90 une pollution massive de l'Arctique par les polluants organiques persistants a été mise en évidence avec pour conséquence, une contamination très importante et généralisée des ours polaires par ces substances. Ici encore, il ne s'agit pas d'une pollution directe par des rejets à ces hautes latitudes mais de transferts par la circulation atmosphérique globale en provenance des régions habitées et industrialisées de l'hémisphère Nord (D'après AMAP, in WRL, 2000).

La troposphère constitue la plus basse des couches de l'atmosphère. Elle renferme les $\frac{3}{4}$ de la masse de ces dernières. La température y décroît rapidement lorsque l'on s'élève jusqu'à la tropopause, sa limite supérieure, située vers 9 km d'altitude aux pôles et 16 km à l'équateur.

Au niveau de la tropopause, la température est en moyenne de l'ordre de $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Au-delà, et jusqu'à une cinquantaine de kilomètres d'altitude s'étend la stratosphère, zone dans laquelle l'air se trouve disposé en couches stratifiées, d'où son nom, et où la température décroît pour atteindre le minimum de $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ vers 18 km d'altitude au-dessus des régions équatoriales.

Bien que l'ozone O_3 existe dans l'air à toutes les altitudes, c'est dans la stratosphère qu'il se rencontre aux plus fortes concentrations, constituant la « couche » ou écran d'ozone.

En réalité, la teneur de l'air en ozone présente d'importantes variations selon l'altitude, la latitude et la saison. Le maximum de densité est atteint à une trentaine de kilomètres d'altitude dans les régions équatoriales et vers 18 km au niveau des pôles (figure 2)

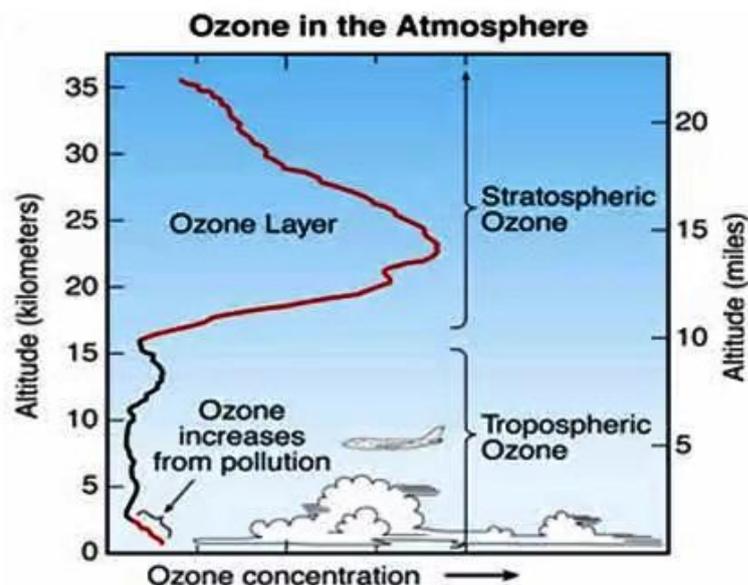


Fig.2 Concentration en ozone de l'atmosphère aux diverses altitudes et latitudes.

L'écran d'ozone qui arrête la plupart du rayonnement ultra-violet, en particulier la bande de plus faible longueur d'onde -la plus nocive- a joué un rôle essentiel dans l'évolution de la biosphère, car sa fonction protectrice a permis la colonisation des continents émergés par les êtres vivants.

La pauvreté en vapeur d'eau constitue une autre particularité de la stratosphère. Cela résulte des très faibles températures qui y règnent. La teneur en eau y est en moyenne 10 000 fois inférieure à celle des basses couches de l'atmosphère.

b) Cinétique des polluants dans l'atmosphère

Il est évident que les mouvements de circulation atmosphérique jouent un rôle essentiel dans la dispersion des polluants. La connaissance des courants troposphériques et stratosphériques est donc essentielle pour comprendre les mécanismes par lesquels s'effectue la contamination de la biosphère. Ces derniers ont été précisés par diverses recherches réalisées depuis quelques décennies à l'aide d'aéronefs et de ballons sonde de haute performance conçus pour l'exploration aérologique, et, plus récemment, grâce aux divers satellites météorologiques.

Nous connaissons aujourd'hui, avec assez de précision, le sens et la vitesse des principaux courants atmosphériques ; ainsi, on a pu montrer l'existence d'un vent dominant d'Ouest qui souffle au niveau de la tropopause dans l'hémisphère Nord, dénommé jet-stream, sa vitesse, de 35 m/s en moyenne, peut excéder 100 m/s. Elle permet un transit circumterrestre de toute substance située à ce niveau en douze jours (figure 2). Cela explique la célérité avec laquelle les particules émises par une explosion nucléaire ou une éruption volcanique se dispersent dans l'ensemble de l'atmosphère planétaire.

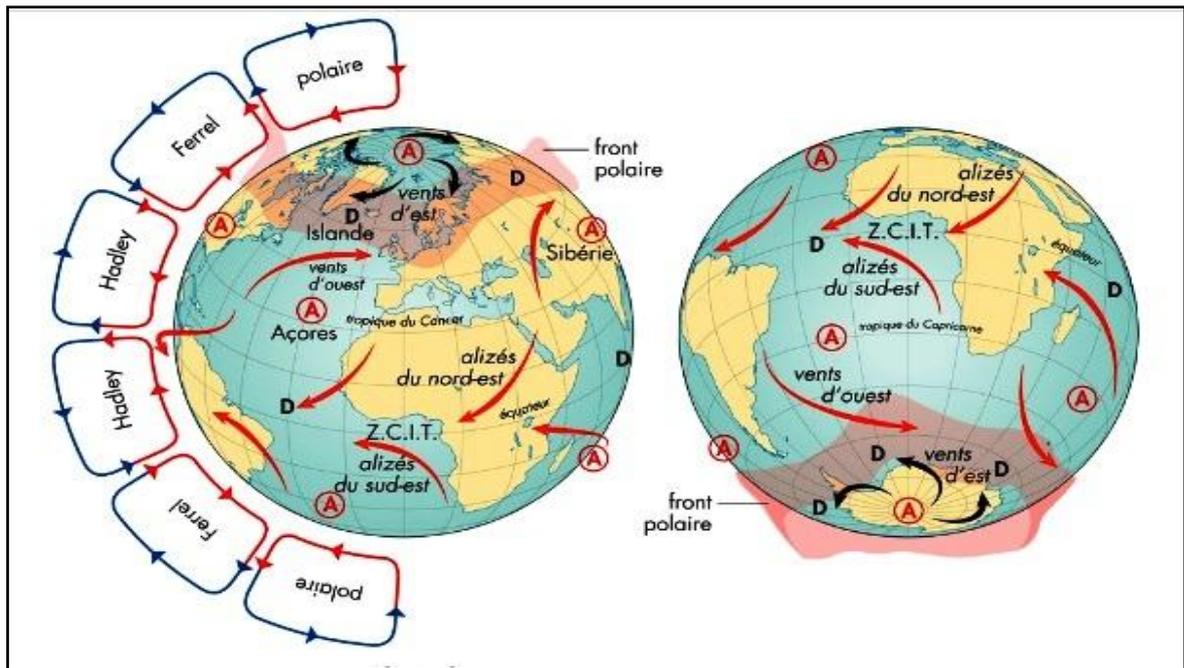


Fig .3 Mouvements des masses d'air autour du globe.

À ces courants horizontaux sont associés des mouvements verticaux des masses d'air qui permettent une circulation atmosphérique du Nord vers le Sud et inversement. La combinaison des vents Ouest-Est avec une dérive ascensionnelle au niveau des basses altitudes engendre un type de circulation atmosphérique dénommé cellule de Hadley. La zone d'affrontement des cellules de Hadley boréales et australes est dénommée front intertropical de convergence (FIT), qui joue un rôle majeur dans l'ajustement des climats aux basses latitudes. Par ailleurs, le FIT est à l'origine de l'échange des masses d'air entre les deux hémisphères au niveau de la troposphère des régions équatoriales (figure.3). Aux plus hautes latitudes se rencontrent successivement la cellule de Ferrel puis la cellule polaire. Cette dernière s'étend en règle générale depuis le cercle polaire jusqu'au pôle mais elle peut descendre en période hivernale vers les moyennes latitudes.

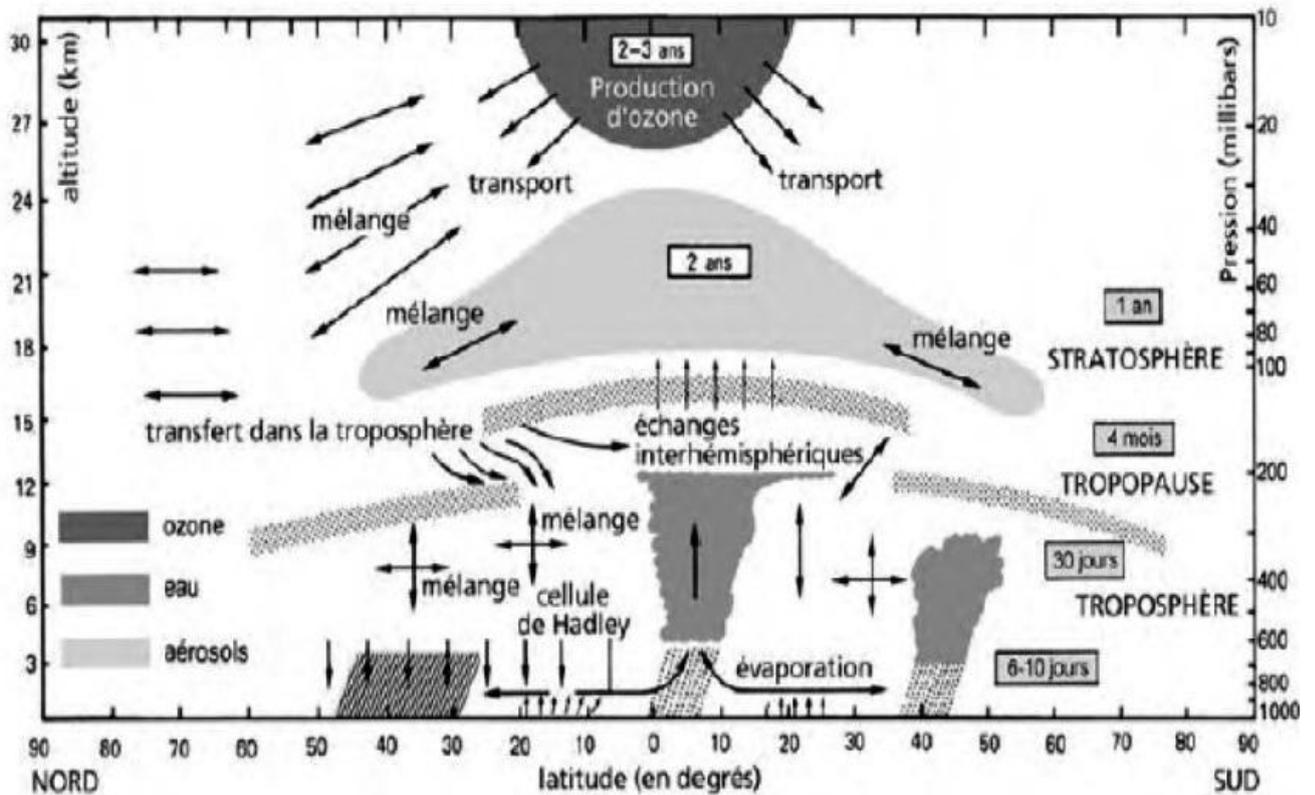


Fig.4 Distribution et mouvements de l'ozone (gris sombre), de l'eau (gris moyen) et des aérosols (gris clair) dans l'atmosphère terrestre.

Les déplacements verticaux des masses d'air interviennent de façon déterminante dans la circulation et la dispersion des polluants. L'existence des cumulo-nimbus, ces énormes nuages d'orage qui peuvent atteindre une quinzaine de kilomètres de hauteur, atteste de l'importance de ces mouvements ascensionnels, dont la vitesse dépasse parfois 35 m/s.

Quasi immédiate au niveau de la troposphère, la dispersion verticale des polluants est, au contraire, très lente dans la stratosphère, à cause de la faible vitesse à laquelle se font les échanges entre les couches d'air d'altitudes différentes. En effet, à ce niveau, les mouvements verticaux sont très lents atteignant au plus quelques cm/s.

On a pu calculer que le temps moyen de résidence, durée pendant laquelle une particule insédimentable - improprement dénommée aérosol par les spécialistes de la pollution atmosphérique- demeure dans la basse stratosphère, vers 20 km d'altitude pendant 2 ans. Cette durée n'est que de 4 mois au niveau de la tropopause, de 30 jours dans la haute troposphère et seulement de 6 à 10 jours dans les couches les plus basses de l'atmosphère vers 3 km d'altitude et au-dessous (figure.4).

Si l'on examine maintenant les temps moyens de résidence dans la troposphère des gaz polluants que l'Homme y introduit, on constate que ceux-ci sont plus élevés, de l'ordre de 2 à 4 mois. Ce phénomène est d'autant plus accusé qu'il s'agit de substances pour lesquelles il n'existe pas de

mécanisme biogéochimique efficace permettant leur extraction de l'atmosphère puis leur transformation et leur accumulation, ou celle des produits qui en dérivent, dans les eaux naturelles, les sédiments ou les sols. Ces processus de dégradation font quasiment défaut pour divers composés organiques de synthèse volatils — ou particuliers — que l'Homme libère dans l'air et a fortiori pour les gaz rares qui sont dépourvus de réactivité chimique et peuvent ainsi persister indéfiniment dans l'atmosphère. Cela soulève à long terme le problème d'une éventuelle accumulation dans l'atmosphère de certains CFC dont les temps de demi-vie dépassent 500 ans ou de gaz rares radioactifs produits par l'industrie nucléaire tels le ^{85}SKr dont la période est de 10,4 années.

Cependant, et dans la plupart des cas, les polluants atmosphériques ne séjournent pas ad infinitum dans la stratosphère ou la troposphère. Les substances gazeuses qui polluent l'atmosphère sont le plus souvent dissoutes par les pluies qui les ramènent à la surface.

En outre, elles peuvent réagir entre elles par diverses réactions chimiques et donner des produits hydrosolubles. Ainsi, le SO_2 va-t-il s'oxyder et produire de l'acide sulfurique qui donne ensuite avec le NH_3 , présent naturellement dans l'air, des microcristaux de sulfate d'ammonium. De même, le NO_2 va se transformer spontanément en acide nitrique susceptible de donner selon le cas, en mélange avec l'acide sulfurique des dépôts secs ou humides, agents des précipitations acides.

Enfin, de nombreux polluants gazeux sont adsorbés par les sols et/ou transformés par les micro-organismes édaphiques et les plantes en composés inoffensifs.

Après un temps variable de séjour, les particules solides, qu'elles soient ou non sédimentables, sont ramenées à la surface des terres émergées ou des océans après un séjour plus ou moins prolongé dans l'atmosphère. Ce retour s'effectue soit par gravité, soit par entraînement physique du fait des précipitations, soit — pour ceux qui sont hydrosolubles — par dissolution dans ces dernières. Les particules insédimentables insolubles dans l'eau, ou peu réactives chimiquement, finissent aussi par retourner au sol après un temps de résidence plus ou moins long par suite de l'attraction électrostatique qui provoque leur coalescence en particules de plus grande taille.

Les phénomènes de lessivage des sols par les eaux continentales amèneront ces particules, et de façon plus générale les diverses substances polluantes, dans le milieu marin où les courants achèveront de les disperser dans l'ensemble de l'hydrosphère. En définitive, l'océan constitue le puits ultime des polluants produits par la civilisation technologique contemporaine.

2.2.2 Incorporation des polluants dans la biomasse

La répartition et la dispersion des diverses substances polluantes dans l'ensemble de la biosphère ne sont pas seulement conditionnées- il s'en faut même de beaucoup - par les seuls facteurs abiotiques qui régissent la circulation atmosphérique et celle des eaux dans les sols et l'hydrosphère. Toute substance qui contamine le milieu naturel peut être incorporée par les êtres vivants, grâce aux multiples processus métaboliques. Elle va de la sorte pénétrer dans les réseaux trophiques de divers écosystèmes, s'intégrer au cycle de la matière dans les biocénoses et exercer une action néfaste sur d'innombrables espèces végétales et animales qu'elles comportent.

La dilution des agents polluants dans l'air ou les eaux, sur laquelle notre civilisation industrielle a trop longtemps compté pour atténuer leurs effets, apparaît comme un phénomène somme toute limité quand on étudie son importance.

En premier lieu, la « capacité réceptrice du milieu », qu'il s'agisse de celle de atmosphère, des eaux naturelles ou des sols, sur laquelle les pouvoirs publics des pays développés, leurs experts et autres responsables du contrôle des pollutions, ont trop souvent fondé leurs politiques de gestion des rejets, s'est avérée en règle générale peu efficace dans le moyen terme.

En effet, cette capacité est apparue à l'usage, dans la plupart des cas, beaucoup plus faible que l'on ne l'avait antérieurement supposé et se trouve rapidement saturée à moyen terme en règle générale.

Un autre aspect encore plus redoutable de la pollution environnementale résulte de l'intervention de nombreuses espèces vivantes qui, par leur activité, facilitent considérablement la dispersion des substances toxiques, bien au-delà des zones de rejet, et accroissent, en outre, leur concentration dans les réseaux trophiques.

Ainsi, diverses espèces d'oiseaux d'Amérique du Nord tempérée qui migrent en Amérique tropicale où est située leur aire d'hivernage s'y contaminent par de fortes concentrations d'insecticides organochlorés encore largement utilisés dans ces pays. Ils sont de ce fait à l'origine d'une pollution des chaînes trophiques lorsqu'ils retourneront dans leur aire de nidification.

De même, un poisson migrateur qui s'est contaminé dans une zone littorale pourra être ingéré par un prédateur - quand il sera parvenu dans Les zones pélagiques de la province océanique, donc très éloignées des côtes - qu'il contaminera à des teneurs supérieures à celles de ses propres tissus par le jeu des phénomènes de bio-concentration et de bio-amplification.

a) Existence de concentrateurs biologiques

Les processus évoqués ci-dessus montrent que non seulement les organismes effectuent une dispersion active de nombreux polluants, mais pis encore, peuvent les concentrer dans leurs tissus, ce qui accroît les risques toxicologiques. Il existe même dans la nature un ensemble d'espèces animales et végétales qui se comportent en véritables concentrateurs biologiques.

Ainsi, l'aptitude des *Fucus* et plus encore des laminaires à concentrer l'iode présent dans l'eau de mer est connu de longue date. Ces algues sont d'ailleurs employées pour l'extraction industrielle de cet élément minéral et dans les eaux naturelles à l'état de traces irrécupérables.

D'autres substances encore plus rares dans l'hydrosphère, peuvent être absorbées et concentrées par certains animaux marins. Ainsi, le vanadium se rencontre à des taux très élevés dans le sang des calmars. L'hépatopancréas des Mollusques Bivalves, retient lui jusqu'à une partie pour 1 000 de cadmium rapporté à son poids sec.

Parmi les végétaux terrestres, un des cas les plus extraordinaires de bio-concentration d'un métal toxique est celui d'un arbre de Nouvelle-Calédonie, *Sebertia acuminata* (Sapotacées), dont le latex peut renfermer jusqu'à 35 % de nickel (teneur dans l'extrait sec), métal pourtant très phytotoxique, soit des concentrations de l'ordre de 60 000 ppm dans le latex frais.

Mais ce phénomène de concentration biologique n'est pas le seul fait de substances naturelles, il s'observe aussi avec de nombreux composés organiques de synthèse et bien d'autres substances artificiellement produites par l'homme.

Dès 1954, Foster relevaient dans le phytoplancton de la rivière Columbia des taux de radio-phosphore (^{32}P) mille fois supérieurs à celui de ses eaux. Bryant et al. (1957) décelaient 0,111 pCi/g de Sr dans le sol d'un pâturage britannique une teneur de 2,5 pCi/g dans les graminées qui croissaient sur ce dernier [7].

Il en est de même pour les polluants organiques persistants pour lesquels de tels phénomènes de bio-concentration ont été mis en évidence dès les années 1960.

Hunt et Bischoff ont constaté que le phytoplancton d'un lac de Californie renfermait 5 ppm d'un insecticide voisin du DDT [8], le TDE alors que sa concentration dans les eaux n'était que de 0,014 ppm. Robinson (1967) signalait que la dieldrine, un insecticide dilué à l'état de traces indosables dans les eaux de la mer du Nord, atteignait une concentration de 1 ppb² dans le phytoplancton [9].

Divers végétaux terrestres, comme la carotte, l'arachide voire les tubercules de pomme de terre sont aussi capables de concentrer certaines substances minérales ou organiques présentes dans le sol, en particulier divers pesticides.

Ce pouvoir de concentration biologique est aussi particulièrement élevé chez certaines espèces animales. Les lombrics et autres Oligochètes peuvent accumuler le DDT dans leur organisme à des taux plusieurs dizaines de fois supérieur à celui auquel il est présent dans la litière ou le sol dont ils

se nourrissent. Parmi les Invertébrés aquatiques, les Mollusques Bivalves peuvent atteindre des facteurs de concentration considérables. Ainsi Butler, dès 1965, montrait que l'huître *Crassostrea virginica* pouvait accumuler le DDT dans son organisme à un taux 70 000 fois supérieur à celui dans lequel il se trouvait dans l'eau de mer dans laquelle étaient élevés les individus de cette espèce faisant l'objet de ses recherches. Le record de bio-concentration d'un polluant organique persistant chez des Mollusques est détenu par des moules (*Mytilus galloprovincialis*) de la région de Marseille dont le facteur de concentration des PCB atteignait 690 000 [10].

b) Accumulation des polluants dans les chaînes trophiques

En réalité, tous les êtres vivants présentent, certes à des degrés divers, cette propriété de pouvoir stocker dans leur organisme toute substance peu ou pas biodégradable. De ce fait, il apparaîtra des phénomènes d'amplification biologique des polluants dans tout écosystème contaminé. En effet, les organismes qui ont ainsi concentré telle ou telle substance toxique vont servir de nourriture à d'autres espèces animales qui les accumuleront à leur tour dans leurs tissus. Le facteur de concentration sera d'autant plus élevé que la substance sera moins rapidement métabolisable — toutes choses égales par ailleurs. Il va se produire de la sorte de proche en proche une contamination de tout le réseau trophique de l'écosystème initiée par les producteurs primaires qui pompent le polluant dispersé dans le biotope. La concentration du toxique dans les êtres vivants s'élèvera à chaque niveau trophique et dans tous les cas, ce seront les prédateurs situés au sommet des chaînes alimentaires qui présenteront les taux de contamination les plus élevés.

c) Principaux types de circulation des polluants dans les réseaux trophiques

La vulnérabilité des écosystèmes aux pollutions est variable car selon leur type et leur localisation, l'exposition aux polluants n'est pas identique. En outre à l'intérieur d'un même écosystème certains habitats peuvent être plus exposés que d'autres.

Par ailleurs, et bien qu'il s'en faille de beaucoup pour que ce phénomène soit la règle, les processus de bio-concentration et de bio-amplification surviennent dans divers cas avec pour conséquence une « focalisation » des polluants dans les réseaux trophiques. Celle-ci ramène les substances toxiques vers les organismes situés aux niveaux les plus élevés de la pyramide écologique — carnivores primaires, secondaires puis super-prédateurs.

Dans de tels cas, si l'on figure sous la forme d'une pyramide écologique le taux auquel certains polluants contaminent les espèces situées aux divers niveaux trophiques dans une biocoenose, on

constate que celle-ci présente un aspect rigoureusement inversé de la pyramide des biomasses (figure 5).

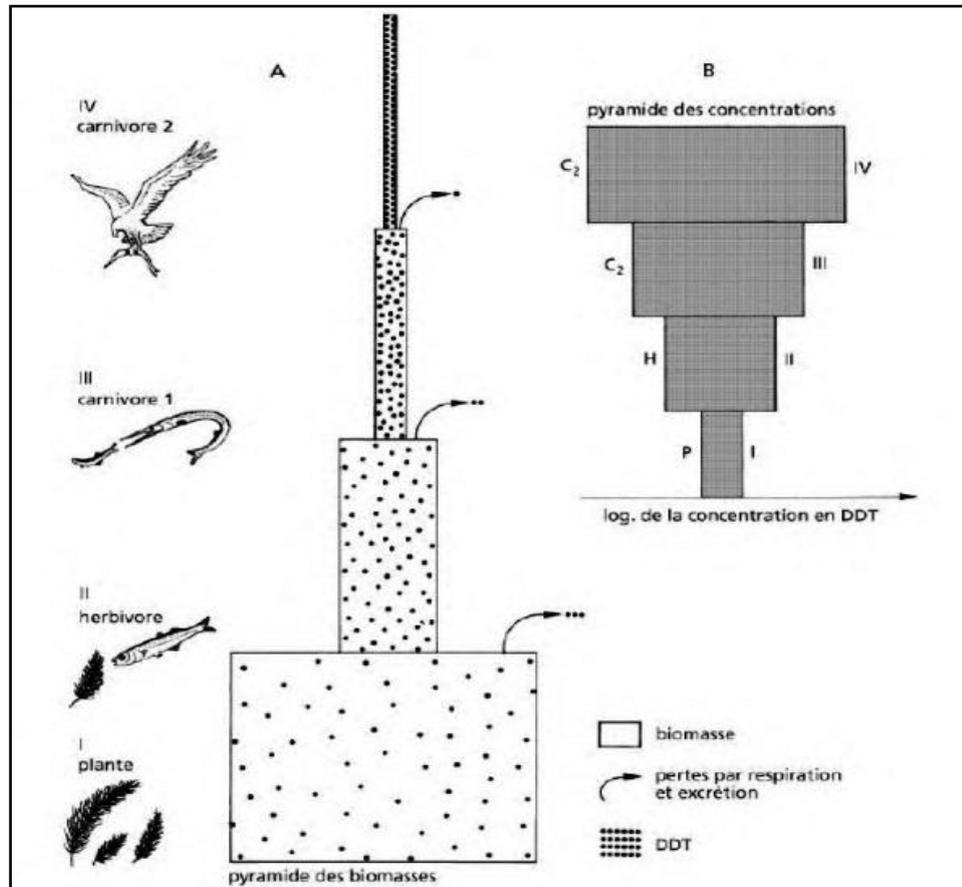


Fig.5 Processus de bio-concentration et de bio-amplification du DDT dans une chaîne trophique[6]

A) Pyramide des biomasses avec les concentrations relatives en DDT figurées par des pointillés de densité proportionnelle.

B) Pyramide des concentrations de cet insecticide figuré en échelle logarithmique.

Il convient toutefois à ce propos de souligner la différence entre bio-concentration et bioamplification.

Si, en effet de nombreux polluants sont susceptibles d'être absorbés par les organismes vivants et de s'accumuler dans ces derniers à des concentrations supérieures à celles à laquelle ils se rencontreraient dans le milieu extérieur, seule une fraction des contaminants potentiels peut donner lieu à des phénomènes de bio-amplification dans les chaînes trophiques.

Le comportement des polluants dans les réseaux trophiques répond à trois différents types. Dans un premier cas, qui est le plus fréquent, on constate un simple transfert de ces derniers d'un niveau

trophique à l'autre sans changement de concentration au fur et à mesure que l'on s'élève dans le réseau trophique. Il concerne en particulier la plupart des éléments biogènes — divers métaux et métalloïdes — indispensables aux êtres vivants pour lesquels existent des phénomènes de régulation ainsi que de nombreux composés chimiques. Un second cas, fort heureusement moins fréquent, se rapporte à certains isotopes stables ou radioactifs d'éléments, en particulier de métaux toxiques, ainsi que de nombreuses substances organiques peu ou pas biodégradables appartenant au groupe des POPs. Avec divers éléments ou composés chimiques surviennent souvent des phénomènes de bio-amplification dans les réseaux trophiques (cas des PCB, des insecticides organochlorés, des dioxines parmi bien d'autres). Enfin, un dernier cas, plus rare, est celui de substances incapables de franchir la barrière intestinale des vertébrés : le plutonium, diverses molécules organiques naturelles ou de synthèse dont certaines peuvent être très toxiques en ingestion, voire par inhalation. Ici, on observera une diminution de la concentration au fur et à mesure que l'on s'élève dans la chaîne trophique des consommateurs (figure 6).

Toutefois, même dans ces conditions, il est possible de mettre en évidence une bio-accumulation par rapport à l'eau ou aux sols chez les végétaux situés au premier niveau trophique.

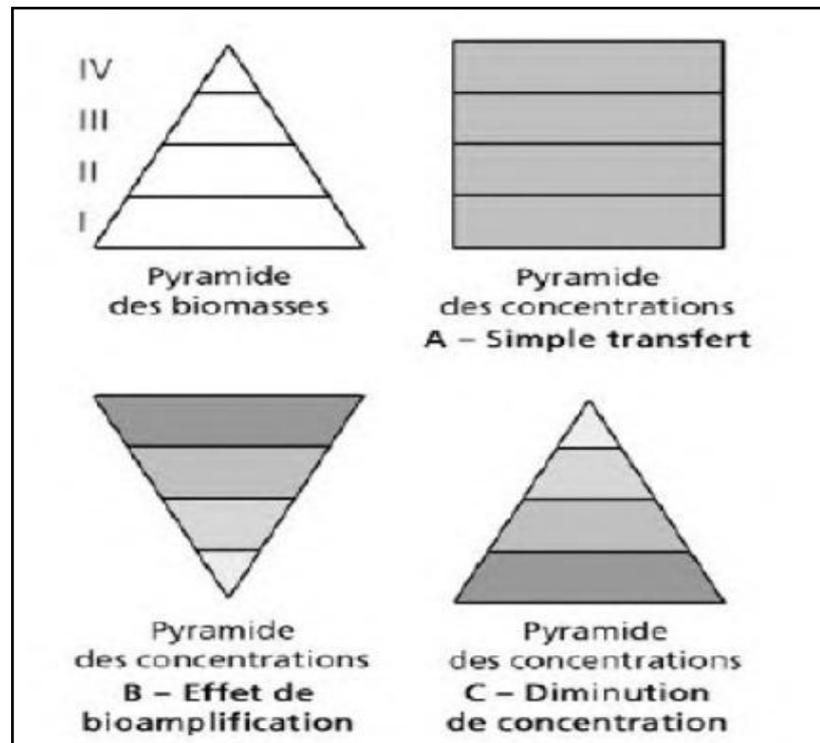


Fig.6 Principaux types de pyramides des concentrations Pyramide selon la valeur du facteur de transfert des biomasses des concentrations dans les réseaux trophiques [6].

De nombreuses recherches ont été consacrées à la modélisation de la circulation et du comportement des polluants dans les réseaux trophiques, plus particulièrement aquatiques.

L'équation (1) décrit la relation fondamentale qui exprime la valeur du facteur de concentration (F) dans un organisme en fonction de celle des paramètres physico-chimiques et biologiques de l'espèce considérée.

$$F_c = \frac{F_t}{K + GC}$$

où F_t est le facteur de transfert (qui intègre dans le cas des organismes aquatiques à la fois le transfert direct et celui par l'alimentation), A le coefficient d'équilibre absorption-désorption et G le taux de croissance des individus.

2.3 Propriétés physiques

Nous trouvons les pollutions dans les 3 états de la matière :

- Pollution de l'eau (liquide) ;
- Pollution de l'air (gaz) ;
- Pollution des sols (solide).

2.4 Durée de vie des substances

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

- Les polluants primaires: sont directement émis par des sources de pollution : CH_4 : année, CO : mois, SO_2 : jours à mois, Ozone : qq jours, COV NM : heures à jours, Aérosols : 1-10 μm : minute à jours, Aérosols : 1 μm jours à semaines.

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

2.5 Processus biogéochimiques

Le rejet des polluants dans l'environnement est un phénomène complexe, Dans la quasitotalité des cas, les substances libérées dans l'écosphère vont être entraînées fort loin du point de rejet. La circulation atmosphérique et hydrologique les dispersera de façon progressive dans l'ensemble de l'écosphère.

2.3.1 Circulation atmosphérique des polluants

Les mécanismes de la pollution atmosphérique

Les processus qui régissent la pollution atmosphérique s'échelonnent en plusieurs étapes ;

- Émissions
- Transport et dispersion (la dispersion verticale et la dispersion horizontale)
- Transformations chimique par réactions complexes

2.3.2 Les mouvements de l'hydrosphère

Il existe deux types de courants : les courants de surface et les courants profonds. Les courants de surface des mers et océans, générés par les vents, se déplacent très rapidement. Les courants profonds, beaucoup plus lents, ne se déplacent que de quelques millimètres par an.

2.3.3 Transferts des substances dans le sol

Des polluants, et notamment des substances organiques, sont soumis à des réactions biochimiques dans l'environnement. Ces réactions peuvent se faire par:

- des réactions photochimiques, (à la surface du sol),
- des phénomènes chimiques (notamment l'hydrolyse et l'oxydation des composés,
- par des interactions avec des bactéries, des fungi ou des algues, on parle alors de biodégradation.

2.6 Répartition des polluants

Les problèmes de pollution atmosphérique sont le résultat de la présence et de l'interaction de divers polluants atmosphériques qui sont rejetés dans l'atmosphère. Ces polluants sont rejetés dans le cadre d'activités humaines, comme le, l'utilisation de combustibles pour la production d'électricité et le chauffage, les procédés industriels et l'utilisation de certains produits. Ils proviennent également de sources naturelles.

2.7 Concentration par les êtres vivants

Notions de bioaccumulation et de bioconcentration

La dernière phase de la circulation d'un polluant dans la biosphère correspond en définitive à la contamination même des êtres vivants propres aux diverses communautés terrestres ou aquatiques.

- a- La bioaccumulation correspond au processus d'absorption par lequel les êtres vivants peuvent accumuler dans leur organisme un polluant, quelle que soit la voie de pénétration dans l'organisme considéré. Chez les animaux terrestres, elle résulte des absorptions par voie digestive, respiratoire et cutanée. Chez les plantes, elle s'effectue, en règle générale, par les voies transradiculaires et transfoliaires – éventuellement par voie respiratoire, via les stomates, lorsqu'il s'agit de polluants gazeux.

- b- La bioconcentration désigne le processus physiologique par lequel un polluant prélevé dans un biotope par un être vivant va se rencontrer dans l'organisme de ce dernier à des concentrations supérieures à celles auxquelles il se trouve selon le cas dans les eaux, l'air et/ou les sols.

3. Pollution atmosphérique

Introduction

Le rejet intempestif de substances diverses dans l'atmosphère constitue sans aucun doute la plus évidente des dégradations de l'environnement par l'Homme.

Quoique remontant à l'aube de la civilisation industrielle, la pollution atmosphérique s'est accrue depuis le milieu du xx^e siècle dans des proportions considérables, dans l'ensemble du monde. Au cours des deux dernières décennies, la plupart des pays en voie de développement ont rejoint, voire souvent dépassé sur ce point, les nations anciennement industrialisées par suite de l'accroissement de la production industrielle et de la circulation des véhicules à moteur en l'absence de toute mesure destinée à limiter les émissions polluantes.

Pendant la seconde moitié du xx^e siècle, cet accroissement de la pollution atmosphérique s'est accéléré, devenant spectaculaire, même dans les zones les plus reculées du monde, ce qui atteste de la dimension globale prise par le phénomène. Shaw, avait alarmé dès 1970 la communauté scientifique en montrant que dans une des régions les plus éloignées de toute source de pollution de la totalité du territoire américain -le parc national de Yellowstone- s'était produit un accroissement d'un facteur dix de la teneur de l'air en particules d'Aitken, les plus fines des particules insédimentables polluant l'atmosphère, passant en moins d'une décennie, de 100 à 1 000/cm. Au cours des années 1980 dans des zones de montagne de l'ex-URSS ainsi que du parc national des Smoky Mountains, dans les Appalaches - situées loin de toute industrie - il fut montré que les brumes n'y constituaient plus un phénomène entièrement naturel. En effet, leur importance et leur fréquence s'y étaient considérablement accrues dans les dernières décennies et de plus, les particules de sulfates produites par les combustions en zone urbaine y étaient devenues un constituant prépondérant [11].

Bien que la croissance de l'usage des combustibles fossiles en soit la cause majeure, il résulte de multiples sources d'émission d'aéropolluants : industries métallurgiques et chimiques, grands travaux de génie civil, transports routiers, aériens et maritimes — dont le rôle dans les pollutions environnementales est trop souvent sous-estimé, etc.

L'origine des principales substances qui contaminent l'atmosphère est en définitive des plus variée. En sus de l'usage des combustibles fossiles comme source d'énergie, bien qu'il soit la cause primordiale de la pollution atmosphérique, existent bien d'autres causes de contamination de la biosphère évoquées ci-dessus. Nous citerons, outre les sources industrielles, les fermentations de matières organiques dans les décharges ou dans les dépôts de déchets de l'agriculture et de l'élevage moderne qui, en sus des rejets de dérivés nitrés dans les eaux, produisent des émissions gazeuses dont certaines sont riches en hydrogène

sulfuré. Par ailleurs, l'érosion éolienne des sols dans les sites objet de grands travaux d'infrastructures, ou celle produite par l'agriculture dans des zones steppiques concourt aussi à accroître la pollution de l'air.

La pollution atmosphérique sévit surtout en milieu urbain, non seulement à cause de la concentration des industries et des foyers domestiques, mais aussi par suite de la densité de la circulation des véhicules à moteur à explosion : automobiles, utilitaires et poids lourds — ainsi aux États-Unis, 95 % des automobiles appartiennent à des citadins (Fig.7).

Il existe toutefois des causes de pollution situées hors des grandes villes, voire en zones rurales. Certes, celles-ci résultent de façon plus spécifique de l'usage des produits chimiques (engrais et pesticides) en agriculture, mais aussi de certaines installations industrielles implantées dans des zones isolées à cause de leur dangerosité, mais aussi trop souvent par suite de l'importance de leurs rejets polluants, parfois enfin pour des raisons purement logistiques — facilité d'approvisionnement en matières premières minérales — ou proximité de sources d'énergie. Il en est ainsi, par exemple, des cimenteries ou encore, des usines d'électrochimie de l'alumine, lesquelles furent installées, dès la fin du XIX siècle, dans des vallées de montagnes où se trouvent des centrales hydroélectriques.

On entend, par pollution de l'air, « la contamination de l'environnement intérieur ou extérieur par un agent chimique, physique ou biologique qui modifie les caractéristiques naturelles de l'atmosphère ». Les agents polluants en jeu sont des gaz ou des particules dont les sources sont naturelles (ex. : feux de forêt) ou anthropiques. Les principales causes de la pollution de l'air sont en relation avec la consommation de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) utilisés par l'homme. Le transport routier, les industries, le secteur résidentiel, mais aussi l'agriculture sont parmi les principales activités humaines contributrices à la pollution de l'air, selon l'OMS [12].

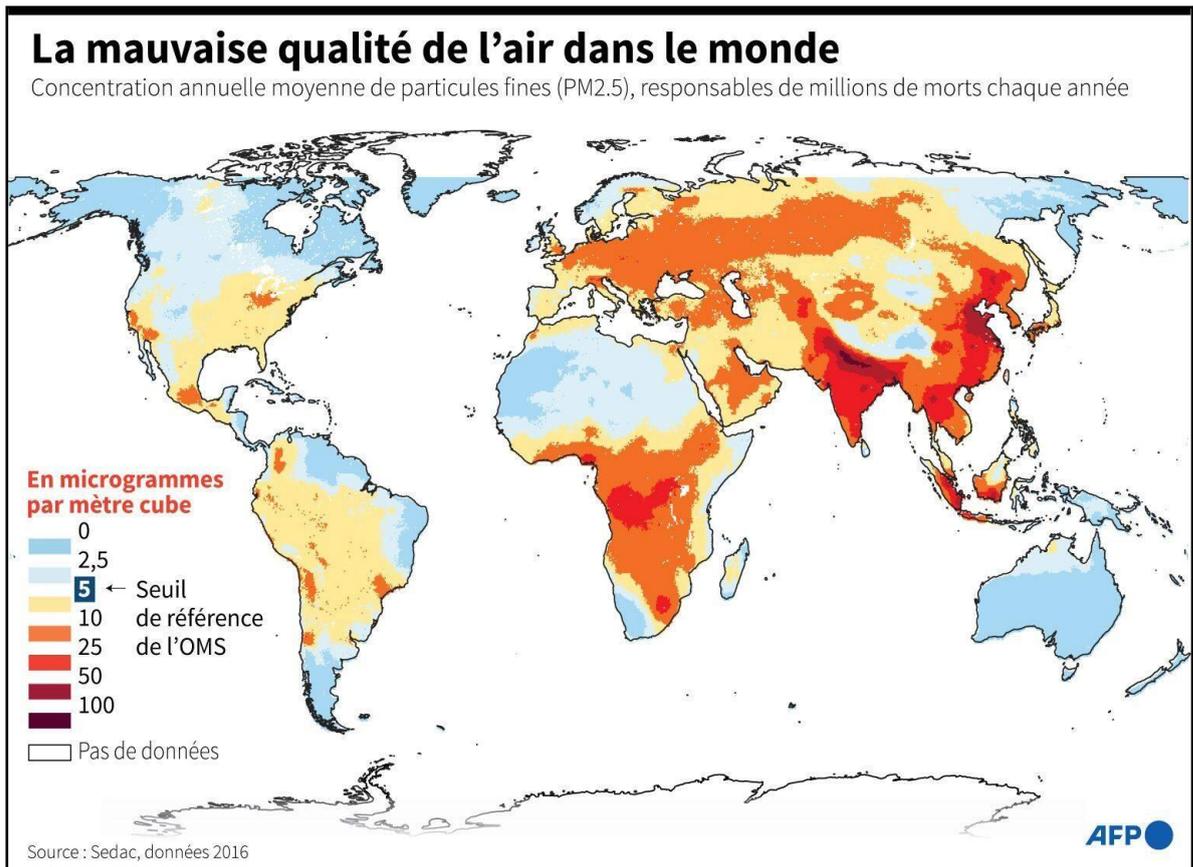


Fig.7 Carte de pollution de l'air dans le monde

3.1 Structure et composition de l'atmosphère

L'atmosphère est une enveloppe gazeuse d'environ 700 km d'épaisseur, elle est maintenue par gravité autour du globe terrestre en rotation. Sa pression diminue avec l'altitude. On y observe également une distribution verticale de la température.

L'atmosphère peut être schématiquement découpée en 4 zones selon l'altitude (Fig.8):

- la troposphère (couche la plus basse, 8 à 16 km d'altitude)
- la stratosphère (jusqu'à 48 km d'altitude)
- la mésosphère (jusqu'à 80 km d'altitude)
- la thermosphère (couche la plus haute, jusqu'à 700 km).

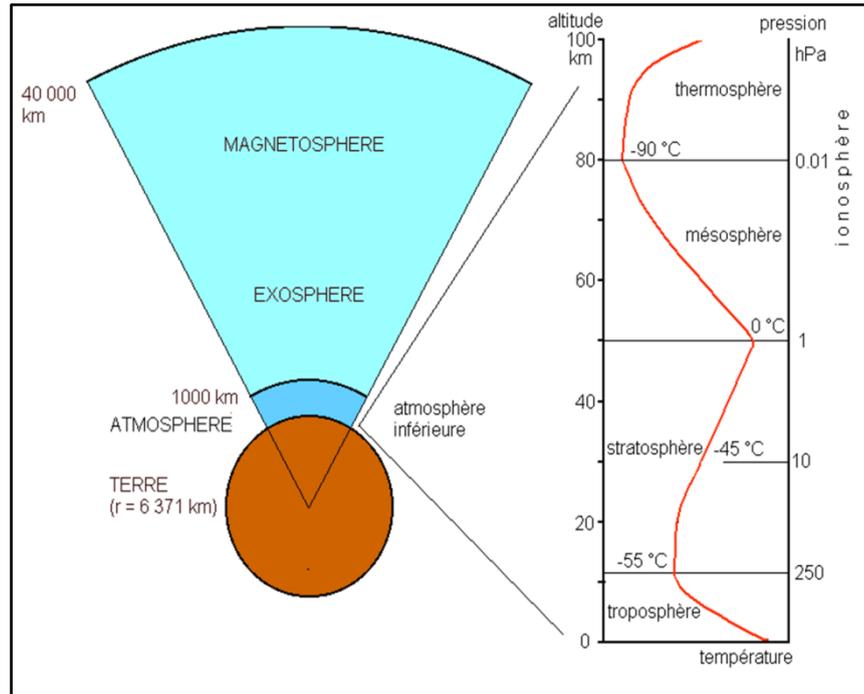


Fig.8 Stratification verticale de l'atmosphère [13].

En dehors de la vapeur d'eau, quatre gaz composent la majeure partie de l'atmosphère. L'azote (78,08%), l'oxygène (20,95 %), l'argon (0,93 %) et le CO₂ (0,04 %). D'autres gaz et particules, dont ceux qu'on appelle polluants entrent dans la composition de l'atmosphère en plus petites quantités.

3.2 Les polluants atmosphériques

Les principaux polluants atmosphériques sont les suivants :

- Le dioxyde de soufre (SO₂)

La pollution atmosphérique au dioxyde de soufre (SO₂) provient principalement de la consommation de combustibles fossiles (fuel, houille, etc.), qui contiennent souvent du soufre. En effet, les impuretés soufrées contenues dans ces combustibles sont oxydées par l'oxygène de l'air pour donner du dioxyde de soufre. La combustion du charbon représente par ailleurs 50 % des émissions globales annuelles de SO₂, celle du pétrole de 25 à 30 %. Le dioxyde de soufre contribue à la formation de pluies acides dues à la génération d'acide sulfurique.

- Les oxydes d'azote (dont le NO, le NO₂, et le N₂O)

Les oxydes d'azote sont les formes oxydées de l'azote, telles que l'oxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂): il s'agit des deux principaux gaz analysés dans le cadre de la surveillance

de la qualité de l'air, car ils sont à l'origine de pluies acides et de la présence d'ozone dans la troposphère. S'y ajoutent le protoxyde d'azote (N_2O) et quelques autres encore. Ces gaz contribuent à l'odeur caractéristique de l'air urbain pollué par la circulation. Les oxydes d'azote proviennent, directement ou non, en grande partie de la combustion de combustibles fossiles dans les industries, mais surtout des véhicules automobiles roulant au diesel, dont les émissions d'oxydes d'azote sont diminuées grâce à des pots catalytiques.

- L'ozone (O_3)

Sous l'effet du rayonnement solaire, les oxydes d'azote (et, plus particulièrement, le dioxyde d'azote) réagissent avec des hydrocarbures imbrûlés et l'oxygène de l'air et se transforment alors en ozone (O_3). Ce gaz, qui protège notre planète des UV dans la stratosphère, est un polluant dans la troposphère, c'est-à-dire la couche la plus basse de l'atmosphère. En effet, étant un oxydant, l'ozone peut notamment brûler les végétaux les plus sensibles, voire empêcher la photosynthèse. Il peut également amener à la formation de pluies acides. Certes, les teneurs en ozone sont très faibles dans la troposphère (0,03 ppm en moyenne), mais elles peuvent augmenter avec la pollution : la dégradation de la qualité de l'air par l'ozone est donc problématique autour des grandes villes, et le problème s'aggrave en cas de canicule.

- Le monoxyde de carbone (CO)

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz dangereux, car il est « invisible » : inodore et incolore, il est très toxique pour les mammifères et peut entraîner la mort. Il se forme à la suite de réactions incomplètes, lorsque la température excède les 950°C et que la quantité d'oxygène disponible est faible : le CO se forme alors au détriment du CO_2 . Le monoxyde de carbone est principalement produit dans les chaudières et les moteurs thermiques.

- Les composés organiques volatils (COV) et persistants (POP)

Les composés organiques volatils composés de carbone, d'oxygène et d'hydrogène, sont principalement issus de l'évaporation de solvants lors de l'application de produits en contenant ou encore de la dégradation de la biomasse.

Cependant, une partie de ces émissions est également issue de la consommation d'hydrocarbures ou des rejets de gaz par les raffineries. Les COV regroupent principalement le benzène, le formaldéhyde et l'isoprène, alors que les POP regroupent les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) issus de la combustion de carburants automobiles, des combustions domestiques ou encore de la production d'énergie dans les centrales fonctionnant au pétrole ou au charbon.

- Les métaux lourds

Plomb (Pb), mercure (Hg), arsenic (As), cadmium (Cd), nickel (Ni), cuivre (Cu)...

Ces polluants proviennent essentiellement de la combustion des charbons, des pétroles, des ordures ménagères, mais aussi de la production industrielle (métallurgie...); le plomb provenait essentiellement de l'essence, jusqu'à son interdiction en 2000.

- Les particules en suspension

Communément appelées poussières, elles sont issues de la combustion d'énergies fossiles dans les véhicules, les centrales thermiques ou les industries, mais aussi de la combustion du bois. Elles sont classées en quatre catégories Fig.9:

- Les PM_{10} ayant un diamètre inférieur à 10 micromètres : elles sont considérées comme dangereuses puisqu'elles peuvent s'infiltrer dans le corps. Cependant, elles se limitent pour la plupart au nez ou aux bronches.
- Les $PM_{2.5}$ dont le diamètre est inférieur à 2,5 micromètres : appelées « particules fines », elles sont issues de la combustion de diesel, notamment dans les véhicules. Ce sont également les plus dangereuses pour la santé, car du fait de leur taille plus faible, elles peuvent pénétrer jusqu'aux alvéoles pulmonaires.
- Les $PM_{1.0}$ appelées les « particules très fines », dont le diamètre est inférieur à 1,0 micromètre.
- Les $PM_{0.1}$, appelées « particules ultrafines » ou « nanoparticules », dont le diamètre est inférieur à 0,1 micromètre.

Les particules peuvent être des polluants primaires, lorsqu'elles sont directement émises dans l'atmosphère, ou secondaires lorsqu'elles sont générées à partir d'autres polluant dits « précurseurs »

- L'ammoniac (NH_3)

L'ammoniac (NH_3) est un composé chimique émis par les déjections des animaux et les engrais azotés utilisés pour la fertilisation des cultures. Son dépôt excessif en milieu naturel peut conduire à l'acidification et à l'eutrophisation des milieux. De plus, il peut se recombinaer dans l'atmosphère avec des oxydes d'azote et de soufre pour former des particules fines ($PM_{2.5}$).

- Les polluants biologiques

Outre ces polluants classiques, les polluants biologiques, tels que les légionnelles, pollens, moisissures... contribuent également à la mauvaise qualité de l'air ambiant, en particulier lorsqu'ils sont associés à des particules sur lesquelles ils s'adsorbent, augmentant ainsi leur nocivité.

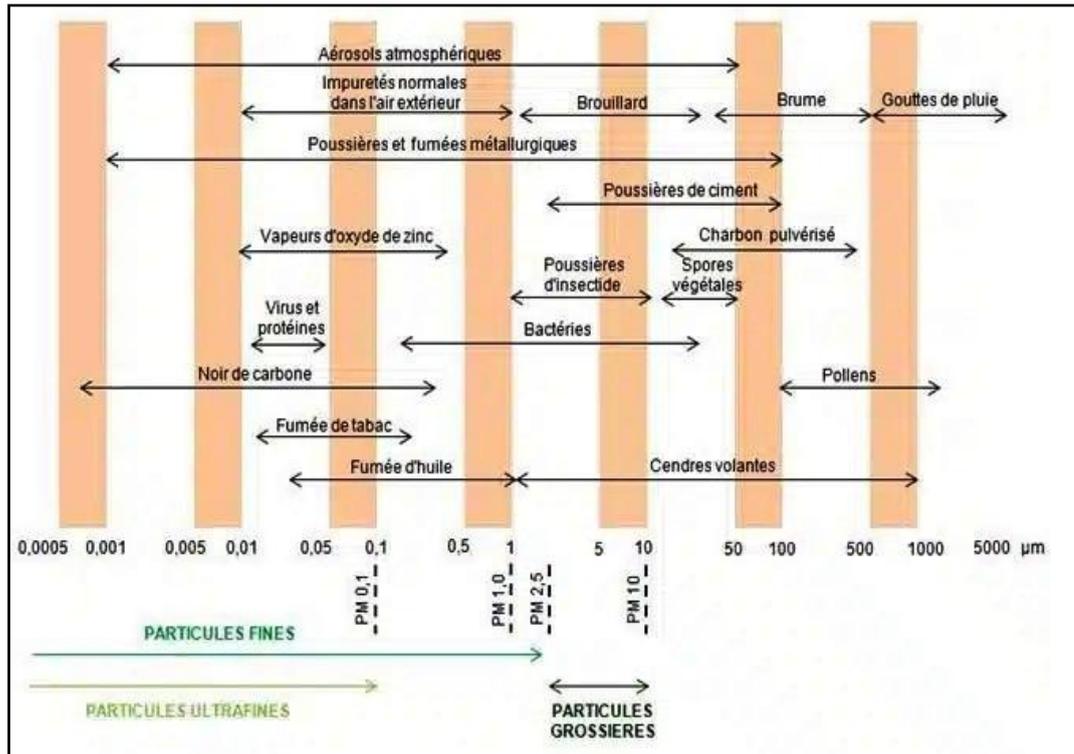


Fig.9 Taille des particules : échelle et ordre de grandeur [14].

3.3 Nature et origine de la pollution atmosphérique

D'origine naturelle ou anthropique, les substances émises peuvent être de nature physique (radioactivité, énergie...), chimiques (gaz, particules, aérosols...) ou biologiques (pollens, acariens, moisissures...). Cette première partie présente succinctement les sources de la pollution atmosphérique ayant directement ou indirectement un impact sur la santé et en se limitant aux rejets chimiques d'origine anthropique (hors gaz à effet de serre et hors semi-volatils comme les pesticides).

Ces pollutions sont dites primaires lorsqu'elles s'échappent directement des pots d'échappements, les cheminées ou des surfaces agricoles, etc. Elles vont ensuite se disperser, se diluer, se transporter voire se transformer en d'autres composés dits « secondaires » comme l'ozone ou le nitrate l'ammonium [15].

• Origine des « aérosols » anthropogéniques

Outre par l'incendie de la végétation spontanée, l'Homme interfère de plus en plus avec les processus naturels d'introduction de particules dans l'atmosphère. Il a pu être démontré que des particules carbonées retombant dans le Pacifique proviennent des incendies de savanes tropicales allumés traditionnellement en Afrique par des populations de pasteurs (Cachier, 1989). De

même, bien des « aérosols » minéraux ne sont plus d'origine naturelle mais proviennent de l'augmentation de l'érosion éolienne, due à l'action de l'Homme au travers de la désertification et de la dégradation des sols résultant de mauvaises pratiques agricoles, en particulier de la défriche de sols fragiles en zones semi-arides.

Les grands chantiers de génie civil, par le biais de l'érosion éolienne des zones dénudées par les engins de travaux publics, contribuent également à la production et à la dispersion d'importantes quantités de particules dans l'atmosphère.

Les industries extractives : mines à ciel ouvert, carrières et de façon générale toutes celles qui préparent des minerais ou encore fabriquent ou utilisent des matériaux de construction : concasseurs, cimenteries, chantiers du bâtiment, participent aussi amplement à l'injection d'« aérosols » dans l'atmosphère. Il faut, par exemple, broyer 2,8 t de divers minéraux pour obtenir une tonne de ciment. De la sorte, les cimenteries françaises rejetaient en moyenne 3 % de leur production dans l'atmosphère à la fin des années 1960, soit environ 100 000 t de poussières par an, sous forme de particules d'environ 10 µ de diamètre qui blanchissaient toute la végétation parfois à des km sous le vent de l'installation polluante ! Le développement de contrats de branches dans les années 1970 a mis un terme à cette inadmissible situation mais ce type de pollution reste aujourd'hui encore l'apanage de la grande majorité des cimenteries installées en dehors des pays de OCDE.

Il existe, par ailleurs, de nombreuses autres sources industrielles de particules. Parmi ces dernières, nous avons déjà évoqué les combustions de charbon ou de dérivés pétroliers qui outre les particules carbonées vont rejeter dans l'air de nombreuses variétés minérales et des métaux. Les fumées des chaufferies industrielles et autres foyers fonctionnant au charbon ou aux fuels sont très chargées en de telles particules. La situation est particulièrement préoccupante dans le cas des raffineries de pétrole ou des centrales thermiques au fuel lourd, qui rejettent dans l'air des quantités importantes de particules carbonées sous forme de fuméons chargés de HAP cancérigènes, que les techniques actuelles ne permettent pas d'épurer.

Les principales sources des pollutions anthropiques sont les suivantes Tableau.2:

- Transports : 63 % des émissions de NO_x ;
- Résidentiel : 46 % des émissions de COV ;
- Industrie : 80 % des émissions de SO₂ ;
- Culture (élevage) . 97 % des émissions de NH₃.

Ces quatre sources sont également responsables des émissions de particules [8].

Tableau.2 Nature et origine des principaux groupes de polluants atmosphériques

État des polluants	Nature chimique	Sources d'émission (naturelles ou anthropogéniques)
G a z e u x	Dioxyde de carbone (CO ₂)	Volcanisme Respiration des êtres vivants Combustibles fossiles
	Oxyde de carbone	Volcanisme Émissions des moteurs à explosion
	Hydrocarbures	Plantes vertes, bactéries Émissions des moteurs à explosion
	Composés organiques gazeux	Industries chimiques Incinérations d'ordures Combustions diverses
G a z e u x	Dioxyde de soufre (SO ₂) et autres dérivés soufrés	Bactéries Embruns marins Combustibles fossiles Volcanisme
	Oxydes d'azote (NO _x) et autres dérivés nitrés	Bactéries Combustions diverses Émissions des moteurs à explosion
	Radionucléides	Industrie nucléaire Explosions (tests d'armements nucléaires ou accidents : Tchernobyl)
P a r t i c u l i e r s	Métaux toxiques, composés inorganiques	Volcanisme, météorites Érosion éolienne, embruns marins Industries diverses Émissions des moteurs à explosion
	Composés organiques naturels ou de synthèse	Industrie chimique Incinération des ordures Combustions Agriculture (pesticides)
	Radionucléides	Industrie nucléaire Explosions (tests d'armements nucléaires ou accidents)

3.4 Les impacts de la pollution de l'air

Les effets de la pollution atmosphérique sont divers : ils concernent aussi bien la santé humaine que les écosystèmes naturels (lacs, rivières, forêts, zones agricoles, etc.) et la sauvegarde du patrimoine et des monuments historiques. C'est bien la mise en évidence des effets induits par la pollution atmosphérique, par exemple le fameux *smog* de Londres en 1952 ou les pluies acides qui contaminaient les lacs scandinaves dans les années 1970, qui a permis une prise de conscience collective des enjeux de protection de la santé humaine et des écosystèmes.

3.4.1 Impacts sanitaires de la pollution atmosphérique

Parmi les effets les plus courants on cite :

- Les particules: plus les particules sont fines plus elles pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire et plus leur temps de séjour y est important.
- SO₂: le SO₂ entraîne une inflammation des bronches avec un spasme qui provoque une altération de la fonction respiratoire.
- NO-NO₂: NO₂ est toxique pénètre profondément dans les poumons. NO est un gaz irritant pour les bronches, il réduit le pouvoir oxygénateur du sang.
- COV: certains composés organiques tels que les aromatiques, les oléfines provoquent des irritations des yeux. Certains COV tels que le benzène, sont cancérigènes.
- CO: se fixe sur l'hémoglobine du sang. Le phénomène est irréversible. On connaît les accidents mortels liés à l'inhalation de CO lors du fonctionnement défectueux de chauffe eau.
- Ozone: est un oxydant puissant. C'est un irritant des yeux, de la gorge et des bronches. Ses effets sont majorés par l'exercice physique.
- POP : Les conséquences observées sur les animaux sont: stérilité plus fréquente et baisse de l'effectif des populations, dysfonctionnements hormonaux, mutations sexuelles, déficiences du système immunitaire, anomalies de comportement, tumeurs et cancers, graves malformations congénitales.

3.4.2 Impacts de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes

Sous l'effet de la pluie, les polluants glissent et contaminent les sols et les cours d'eau, perturbant ainsi l'équilibre chimique des végétaux et la biodiversité.

Les espèces ont du mal à se reproduire ou à se nourrir, le nombre de pollinisateurs décline... les polluants modifient la physiologie des organismes, l'anatomie et le biotope. Associés à d'autres facteurs (sécheresse, parasites), ils entraînent le dépérissement des forêts et la dégradation des sols.

Eutrophisation des milieux due aux retombées d'azote issues des émissions d'oxydes d'azote NO_x et d'ammoniac (NH₃) qui conduisent à enrichir les milieux et à en modifier les équilibres chimiques.

3.4.3 Impacts de la pollution atmosphérique sur le bâti

Sur les matériaux, la pollution atmosphérique induit de la corrosion due au dioxyde de soufre, des noircissements et encroûtements des bâtiments par les poussières issues en grande partie de la combustion des produits pétroliers, ainsi que des altérations diverses en association avec le gel, l'humidité et les micro-organismes.

3.4.4 Impacts de la pollution sur l'air et le climat

Les gaz à effet de serre et les polluants atmosphériques sont sensiblement générés par les mêmes sources et leurs effets peuvent être étroitement liés. Certains polluants de l'air (ozone ou particules) agissent sur le climat en réchauffant ou en refroidissant l'atmosphère. Inversement, les changements climatiques et ses phénomènes extrêmes (canicules notamment) peuvent avoir un impact sur les niveaux d'ozone.

a) Effet de serre et changement climatique :

L'effet de serre est un phénomène avant tout naturel de piégeage par l'atmosphère du rayonnement de chaleur émis par la terre sous l'effet des rayons solaires. Il permet une température sur Terre bien supérieure à celle qui régnerait en son absence.

La plupart des gaz atmosphériques sont transparents aux radiations et présentent de la sorte un coefficient d'adsorption nul. En revanche, le CO₂, la vapeur d'eau et dans une moindre mesure le méthane, les oxydes d'azote et l'ozone qui sont des corps composés, absorbent une partie importante du spectre solaire, en particulier dans l'infrarouge, radiations transportant une grande énergie thermique .

En réalité, la vapeur d'eau joue le rôle principal dans la réabsorption du flux calorifique réémis par la surface terrestre par suite de sa très large bande d'absorption dans l'infrarouge et à cause de son abondance dans l'atmosphère où elle se rencontre à des concentrations de trois fois à trente fois supérieure à celle du CO₂. Malgré sa très forte dilution dans l'air (394 ppm), le dioxyde de carbone constitue un remarquable absorbeur de l'infrarouge entre 13 µm et 17 µm, et dans une moindre mesure entre 2 µm et 5 µm de longueur d'onde. Au taux actuel auquel il se rencontre dans l'atmosphère, il retient toute l'énergie correspondant à la bande comprise entre 14 µm et 16,5 µm et une fraction des longueurs d'onde situées en deçà et au-delà. Fait important, il absorbe l'infrarouge dans la « fenêtre » de 9 µm à 15 µm, celle où précisément la vapeur d'eau est entièrement transparente à ces radiations.

Parmi Les autres gaz de serre naturellement présents dans l'atmosphère, il convient de citer le méthane, qui possède un pouvoir d'absorption des infrarouges 23 fois supérieur à celui

du CO, et le N₂O (protoxyde d'azote), dont le pouvoir d'absorption est 290 fois celui du CO, enfin l'ozone qui absorbe dans une étroite bande (entre 9 11 et 10 μ m).

À cela doivent être ajoutés des polluants de synthèse, entièrement produits par la civilisation technologique, essentiellement les CFC dont le coefficient d'absorption excède 10% fois celui

du CO, ainsi que divers autres composés organohalogénés. En conséquence, ces composés possèdent la propriété fondamentale de réabsorber les rayons infrarouges émis par la surface du sol et des océans — qui s'échauffent pendant la Journée sous l'effet du rayonnement solaire incident — ou réémis vers la surface avant d'être dissipés dans l'espace. Ces divers gaz produisent donc un effet de serre, car ils agissent en quelque sorte comme la vitre d'une serre qui piège les radiations calorifiques à l'intérieur de celle-ci, élevant de la sorte la température de la basse troposphère.

b) Destruction de la couche d'ozone:

Les chlorofluorocarbones, improprement dénommés fréons, sont des hydrocarbures chlorofluorés qui ont été utilisés depuis les années 1930 d'abord comme liquides cryogéniques dans les congélateurs, réfrigérateurs etc., puis à partir des années 1950, comme gaz propulseurs des bombes aérosols, dont les usages domestiques ont connu un très considérable accroissement au cours des dernières décennies, enfin dans diverses autres applications. Les plus utilisés de beaucoup sont le fréon 11 (CF₂Cl) et le fréon 12 (CF₂Cl₂), dérivés du méthane. À aussi donné lieux à diverses applications le fréon 112 (C₂F₅Cl), dérivé de l'éthane. Le maximum de production mondiale — quelque 1,8.10⁶t — a été atteint en 1987 avec 1,15 .10⁶t par an, pour les fréons 11 et 12, qui représentaient alors à eux seuls plus de 60 % du total. Les HCEC ont été produits après 1987 en substitution aux Fréons. L'HCFC 22 (CH₂Cl₂) a connu la plus vaste utilisation, en particulier dans les climatiseurs. Quoique moins stables, leur capacité à dégrader l'ozone stratosphérique et leur considérable facteur de serre a conduit à partir du début des années 2000 à procéder à leur interdiction progressive, celle-ci devant devenir totale en 2015.

Moins connus du profane, les halons sont des molécules voisines des CFC mais chlorofluorobromées, servant essentiellement comme extincteurs dans des locaux renfermant des équipements spéciaux et dans l'industrie électronique et spatiale. Le plus utilisé d'entre eux a été le halon 12B11 (CF₃BrCl).

La découverte du rôle et de l'importance des CFC dans la destruction de l'ozone stratosphérique a été faite en 1973 par Rawland et Molina à l'Université d'Irvine en Californie, ce qui leur a valu en compagnie de Crutzen le prix Nobel de chimie en 1995.

Ils ont précisé les nombreuses réactions — plus d'une centaine — qui caractérisent l'équilibre dynamique de l'ozone dans la stratosphère.

Leurs travaux ont servi de base scientifique à la promulgation du fameux protocole de Montréal en 1987, destiné à protéger la « couche » d'ozone stratosphérique, qui a interdit la production des CEC et des halons, mais dont la ratification n'a été, hélas, que progressive et demeure aujourd'hui encore incomplète.

La destruction de la couche d'ozone se produit quand l'équilibre naturel entre la production et la destruction de l'ozone stratosphérique est incliné en faveur de la destruction. Bien que les phénomènes naturels puissent causer la perte provisoire de l'ozone, le chlore et le brome libérés des composés synthétiques tels que les CFCs sont maintenant considérés comme cause principale de cet amincissement. Les émissions de CFCs représentent environ 80% de l'amincissement total de l'ozone stratosphérique.

4. Pollution des sols

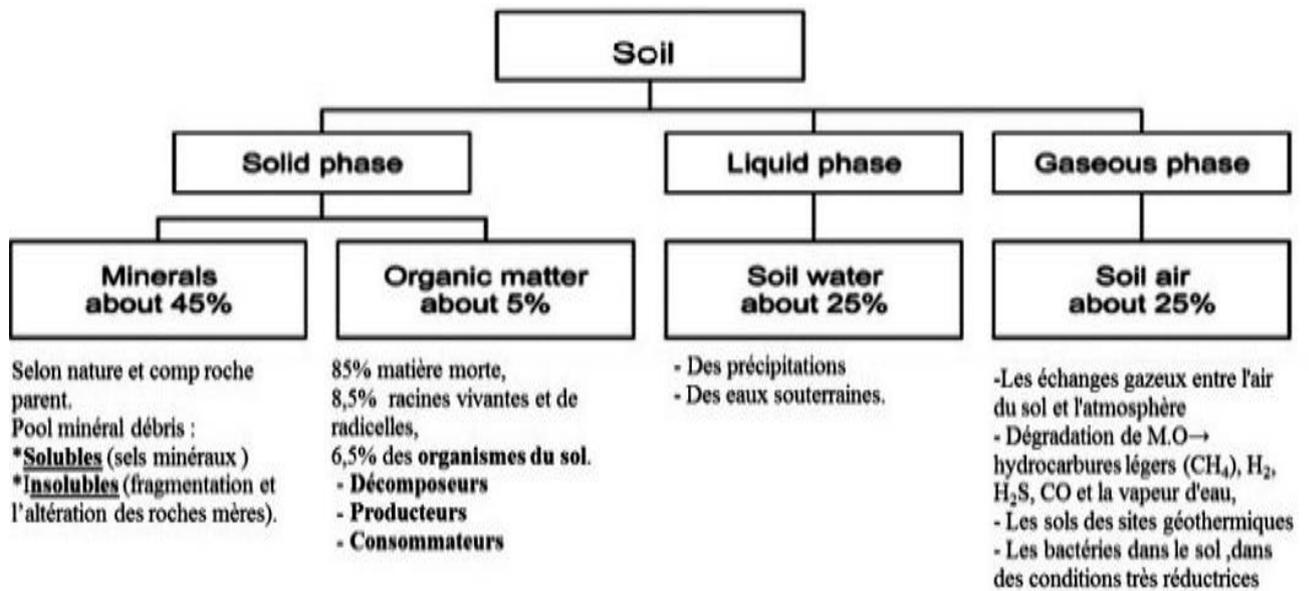
Introduction

Le sol remplit de nombreuses fonctions. Terrain nourricier des plantes, filtre des eaux pluviales et de toutes sortes de dépôts naturels ou issus de l'industrie, support, voire matière de l'habitat et des activités humaines, réservoir de multiples ressources souterraines et surface d'échanges avec l'atmosphère, c'est un lieu de vie intense et complexe. La pollution des sols peut être d'origine naturelle, liée à la nature géologique des roches, ou résulter des activités humaines. L'industrie chimique et métallurgique, l'activité pétrolière et minière, l'élimination des déchets produisent en effet des substances susceptibles de polluer les sols. Cette pollution se fait sous forme de rejets directs à partir des sites producteurs, ou bien par retombées aériennes après la dispersion des polluants dans l'atmosphère ou dans les eaux d'évacuation. L'agriculture contribue également à la pollution des sols par l'épandage d'engrais et d'amendements, l'usage de pesticides et de fertilisants.

4.1 Définition

➤ Le sol est défini comme «l'épiderme de la terre», épais de quelques millimètres à plusieurs dizaines de mètres, le sol recouvre les deux tiers des terres émergées. Milieu hétérogène et complexe, le sol forme une succession de couches aux caractéristiques physicochimiques et biologiques spécifiques. Il est constitué d'éléments organiques (humus), d'éléments minéraux répartis en fractions grossières (sables) ou fines (argiles), d'une partie gazeuse, de végétaux et d'animaux. L'eau qui y circule dissout des gaz et des éléments minéraux. La solution de sol qui en résulte est absorbée par les racines des plantes, les nourrit ou les contamine.

➤ Le sol est également défini comme la couche supérieure de la croûte terrestre composée de particules minérales, de matière organique, d'eau, d'air et d'organismes. Le sol n'est pas seulement le support des constructions et des activités humaines, mais remplit aussi de nombreuses fonctions indispensables à l'équilibre des écosystèmes et constitue une interface entre l'air et l'eau (eaux superficielles et souterraines). Il peut subir une dégradation physique (érosion, tassement, saturation en eau...), chimique (acidification, salinisation, contamination par des micropolluants comme les métaux lourds et les produits phytosanitaires...) ou biologique (réduction de la diversité biologique, modification de la minéralisation de l'humus).



Composition d'un sol [16]

- Au sens pédologique, le sol fait partie des formations naturelles superficielles soumises aux processus pédologiques et subissant des évolutions plus ou moins importantes dans la composition chimique et la constitution minéralogique; le type de sol qui va progressivement prendre naissance dépendra
 - de la nature de la roche mère de départ (conditions lithologiques),
 - de la nature des réactifs d'attaque { conditions physico-chimiques),
 - de la valeur des paramètres réglant l'équilibre thermodynamique (conditions thermohydriques).

- Au sens hydrogéologique, le sol fait partie des formations pédologiques et lithologiques comprises entre la surface et le niveau de la nappe phréatique (zone non saturée), dont les fonctions ou l'utilisation sont susceptibles d'être affectées, de façon négative, du fait de l'apport de substances ou polluants dangereux.

4.2 Propriétés du sol

Les propriétés du sol influant sur le transfert des contaminants vers les nappes sont la porosité, la texture, la composition chimico-minéralogique, l'acidité, l'état rédox et la teneur en matière organique. Contrairement à celle d'un aquifère, la porosité du sol n'est pas saturée par l'eau, elle contient de l'air dont l'oxygène est utilisé par les racines et l'activité microbienne. L'objectif de l'irrigation et du drainage des sols est le maintien de l'équilibre eau-air.

Un déficit d'oxygène entraîne des réactions anaérobies dégradant certaines substances en sous-produits potentiellement toxiques. Un déficit d'eau, outre ses conséquences sur le dessèchement des plantes, entraîne un déficit d'apports minéraux. La texture du sol peut être décrite qualitativement, en fonction de son aspect (graveleux ou fin), ou quantitativement, à partir des proportions de particules minérales plus ou moins grossières, sans tenir compte de la matière organique présente. Les propriétés agricoles du sol dépendent largement de cette texture :

- un sol grossier et sableux sera peu compact, bien aéré et facile à cultiver ; il sera bien drainé mais retiendra peu l'eau, qui y circulera rapidement ;

- tandis qu'un sol fin ou argileux retiendra beaucoup d'eau, deviendra plastique et collant humide, puis compact et dur en séchant. On parle de sol «lourd » même si sa densité est en fait souvent moindre. La composition chimico-minéralogique, et notamment la richesse relative en minéraux argileux, influe fortement sur l'aptitude du sol à retenir momentanément ou à fixer les polluants apportés par infiltration. Elle contribue aussi à déterminer son climat chimique et la disponibilité de colloïdes. L'acidité du sol et son état rédox sont les deux paramètres physico-chimiques qui influent le plus sur la spéciation des polluants. Ils influent donc indirectement sur la mobilité de ceux-ci. La teneur en matière organique joue un rôle à la fois sur l'aptitude du sol à retenir momentanément ou à fixer les polluants, sur le climat chimique, la disponibilité de colloïdes et sur les réactions biochimiques amenant à leur dégradation. Le comportement d'un sol face à une infiltration de polluants sera affecté par ces propriétés. Il sera donc nécessaire de caractériser le sol pour prévoir ou comprendre le comportement des polluants et les conséquences possibles de la pollution.

4.2.1 Le sous-sol

Les constituants du sous-sol sont les roches, sous leur forme initiale ou sous forme de produits d'altération. L'épaisseur de la zone d'altération est extrêmement variable. Elle peut être nulle ou peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Les roches « fraîches » non altérées.

– Propriétés

Les propriétés du sous-sol influant sur le transfert des contaminants vers les nappes sont la porosité, l'hétérogénéité, la fracturation et les discontinuités créant des voies de circulation préférentielle. Tous les types de roches ne sont pas susceptibles de recevoir des eaux souterraines et de constituer des aquifères où l'eau soit mobilisable. Cette propriété dépend de la porosité et de la perméabilité de la roche. Les sables, calcaires et grès constituent la majorité des aquifères. Les roches peu poreuses ou perméables, telles que argiles, marnes et la plupart des roches cristallines, constituent rarement des aquifères. Lorsque la plupart des roches constituant le sous-sol sont peu poreuses ou perméables, les eaux souterraines ne constituent pas des nappes homogènes, mais suivent le réseau de fracturation. On parle alors de milieu fracturé ou fissuré. C'est très souvent le cas dans les régions formées de roches cristallines. De ces propriétés intrinsèques dérivent les propriétés hydrauliques d'une roche : perméabilité, conductivité, gradient hydraulique.

4.2.2 Principaux types de milieux souterrains

Qu'il s'agisse d'une pollution diffuse de type agricole (nitrates par exemple) ou d'une pollution accidentelle (déversement d'hydrocarbures..), le schéma général de contamination des eaux est le même : le point de départ est la surface du sol puis le transit vertical dans la zone dite non saturée (ZNS) surplombant la nappe, l'arrivée à la nappe puis le cheminement sub-horizontale du polluant dans celle-ci avec étalement progressif du panache de pollution (beaucoup plus prononcé suivant la direction de l'écoulement).

Sous la Zone non saturée, on peut rencontrer trois grands types de milieux souterrains pouvant contenir des nappes, plus ou moins vulnérables à une pollution suivant leur profondeur et le degré de fissuration de la zone non saturée. Le cas des nappes captives, protégées par des couvertures très peu perméables qui les rendent moins vulnérables à la pollution. En sus, des paramètres physiques du sol et du sous-sol interviennent dans le processus de transport. Ainsi, selon qu'il s'agisse de la zone non saturée, d'un milieu poreux saturé en eau, d'un milieu fissuré de socle ou d'un milieu karstique, les caractéristiques de la migration et les méthodes mises en œuvre pour décrire et prévoir le devenir de la migration seront différentes.

4.3 Les pollutions des sols

Un sol est dit pollué quand il contient un ou plusieurs polluant(s) ou contaminant(s) susceptibles de causer des altérations biologiques, physiques et chimiques de l'écosystème constitué par le sol (Fig.11). c'est un site présentant un risque pérenne, réel ou potentiel, pour la santé humaine ou l'environnement du fait d'une pollution de l'un ou l'autre des milieux, résultant de l'activité actuelle ou ancienne. La notion de pollution du sol désigne toutes les formes de pollution touchant n'importe quel type de sol (agricole, forestier, urbain...)

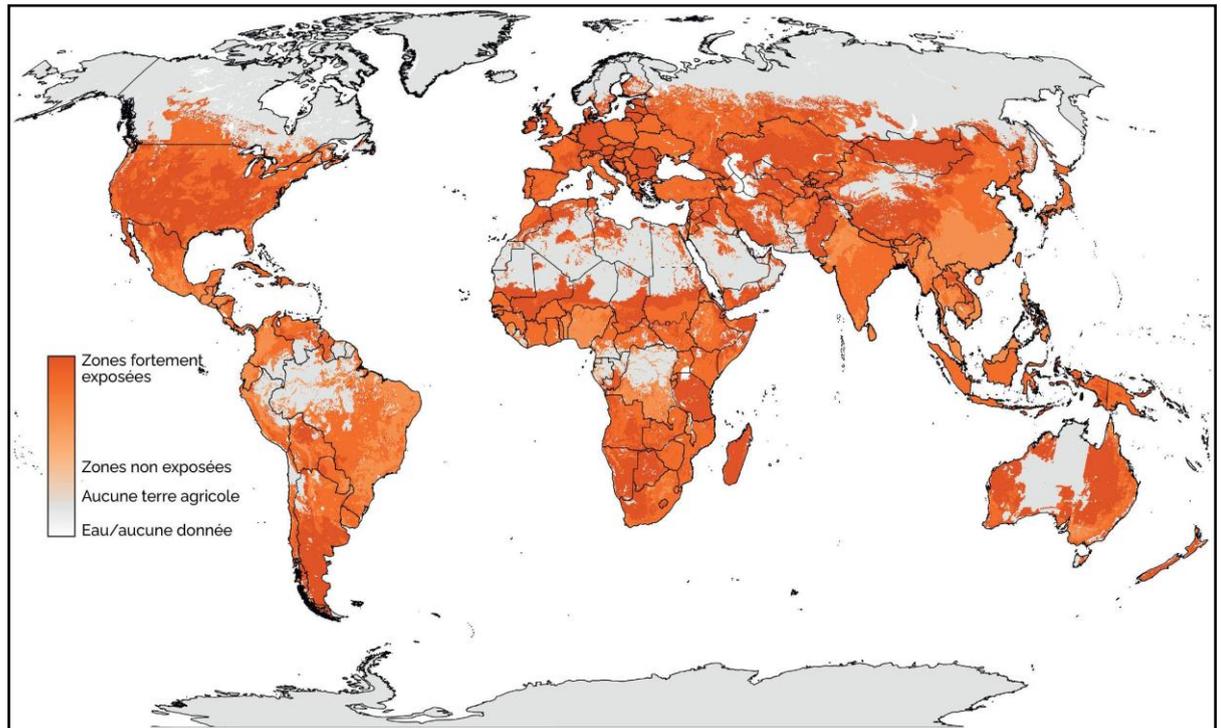


Fig.11 Carte de pollution des sols par les pesticides dans le monde

4.3.1 La propagation de la pollution sera différente selon que les sols sont composés de :

- Gravier à particules grossières centimétriques ;
- Sables à particules fines millimétriques ;
- Sables limoneux à particules très fines micrométriques.

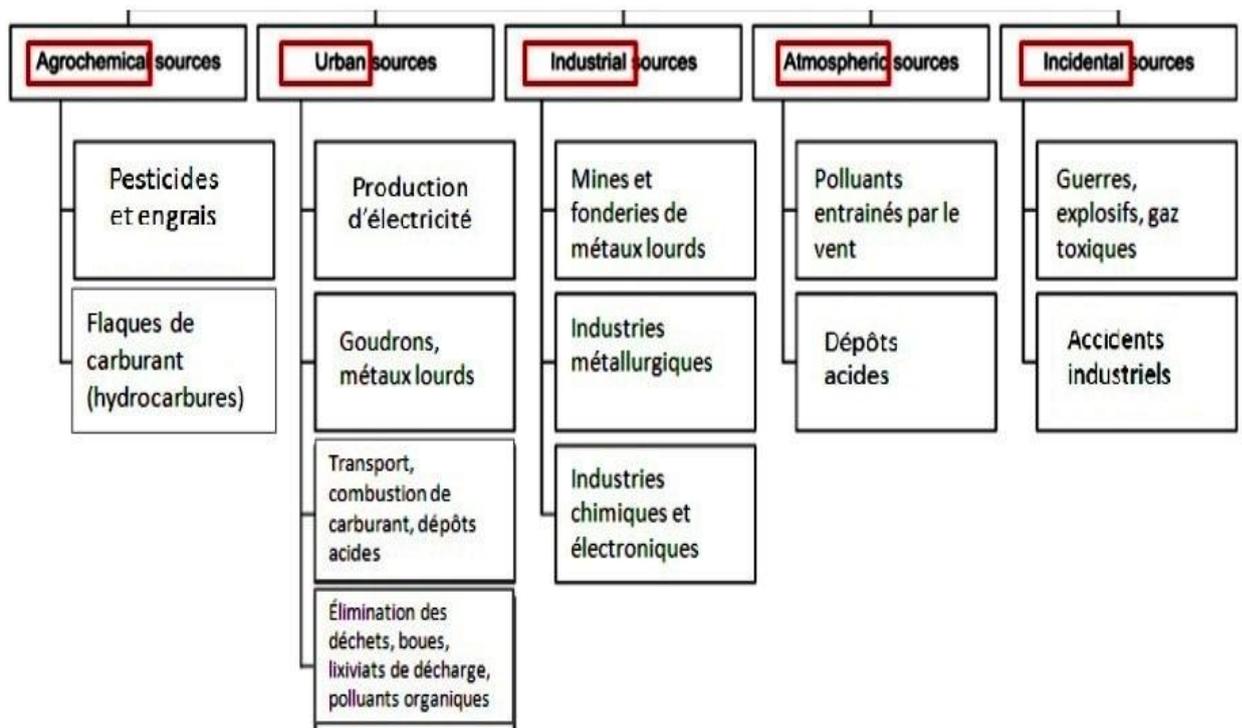
4.3.2 Les principaux polluants

- Les métaux lourds (arsenic, chrome, cuivre, cadmium, mercure, nickel, plomb, zinc...)
- Les hydrocarbures (essences, fioul, huiles...)
- Les solvants chlorés ou aromatiques
- Les produits phytosanitaires (pesticides, herbicides).

4.3.3 Les origines de pollution à prendre en compte :

Étant donné la diversité des sources de pollution, les causes sont souvent difficiles à identifier, car les polluants peuvent atteindre le sol, les plantes, les animaux ou l'eau, pour de nombreuses raisons différentes qui ne sont pas toujours évidentes. Dans tous les cas, ce qu'on peut dire, c'est que la quasi-totalité d'entre elles sont liées à l'action de l'homme et à l'activité industrielle. En résumé, et de manière schématique, les causes de la contamination des sols sont :

- des anciennes pratiques sommaires d'élimination des déchets,
- des fuites ou épandages de produits chimiques, utilisation intensive de produits chimiques
- des contaminations dues à des retombées de rejets atmosphériques, fumées des voitures et de l'industrie.



Sources de pollution [16]

4.4 Les formes de pollution des sols

- En fonction de leur durée : pollutions accidentelles et pollutions chroniques ;
- En fonction de leur étendue : pollutions ponctuelles (locales) ou pollutions diffuses.
 - La pollution diffuse: concerne une grande superficie. Elle peut être due aux pratiques agricoles comme l'épandage ou aux retombées atmosphériques d'origine urbaine, industrielle ou routière
 - La pollution ponctuelle: demeure très localisée et intense. Elle est en rapport avec des sites industriels, des dépôts de déchets ou à d'autres sites pollués de façon chronique ou accidentelle (métaux lourds, hydrocarbures, benzène, solvants organiques industriels).

4.4 Les conséquences de la pollution du sol

- **Déclin de la biodiversité :** la pollution des sols entraîne une véritable extinction des différents maillons des écosystèmes souterrains. Le sol abrite pourtant une quantité formidable de micro-organismes, d'insectes et d'invertébrés. Sans eux, impossible de maintenir une terre en bonne santé.
- **Diminution de la fertilité du sol :** Au-delà de la contamination de la faune et des cultures, c'est le rendement agricole lui-même qui est largement altéré. Un sol pollué compromet la sécurité alimentaire mondiale en réduisant la quantité et la qualité des récoltes.
- **Empoisonnement de la nappe phréatique :** L'eau douce stockée sous les couches du sol est directement exposée au ruissellement de surface. L'introduction de polluants chimiques 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.
- **Désertification :** Superficie des terres utilisables en décroissances
- **Risque sanitaire :** Les milieux pollués comme les zones minières, les sites industriels ou d'élimination des déchets sont aussi de formidables vecteurs de maladies. Des bronchites dans le meilleur des cas, mais aussi des cancers, de l'anémie et des problèmes neurologiques dans les cas les plus graves. Un sol contaminé peut également affecter le bétail et entraîner des intoxications alimentaires à grande échelle.

4.5 Lutte contre la pollution des sols

Renforcer les politiques de gestion des sources de pollution : Renforcer les réglementations agricoles, surveiller les résidus de pesticides, préserver les surfaces vertes en ville et mettre en place un suivi strict de la santé des sols.

- Encadrer les pratiques agricoles : La mauvaise utilisation des terres reste une préoccupation majeure dans la prévention et le contrôle de la pollution des sols. La surexploitation et le surpâturage doivent être évités car tous deux contribuent à l'érosion des sols.

Dans la gestion des terres agricoles, les méthodes idéales de conservation des sols associent des techniques de contrôle mécaniques et biologiques (rotation des cultures, culture en bandes, utilisation de composts organiques...). Le tout en privilégiant l'utilisation de fumier naturel, riche en nutriments, et en limitant le recours aux pesticides et produits chimiques.

- Encourager le reboisement : Essentiel à la bonne santé du sol, le reboisement devrait notamment être encouragé dans les terres arides ayant subi des incendies par exemple, ou pour maintenir un équilibre lors du retrait d'une partie du couvert forestier pour l'urbanisation.

Les racines des plantes lient les particules du sol entre elles, favorisent l'apparition de micro-organismes et l'entretien de la nappe phréatique. Le sol est alors mieux protégé de la pollution terrestre, et moins enclin au processus d'érosion.

- Proposer un traitement approprié des déchets solides : Les déchets devront être classés en fonction de leur degré de contamination, soumis à un contrôle strict et éliminés de manière efficace.

Transférer les coûts de traitement et de dépollution aux entreprises polluantes : Quant à la dépollution des sols contaminés, il est question d'instaurer le principe du pollueur-payeur et d'imposer aux exploitants de remettre les sites en état après toute cessation d'activité.

5. Pollution des eaux

Introduction

La pollution de l'eau est une dégradation physique, chimique, biologique ou bactériologique de ses qualités naturelles, provoquée par l'homme et ses activités. Elle perturbe les conditions de vie de la flore et de la faune aquatiques; elle compromet les utilisations de l'eau et l'équilibre du milieu naturel (Fig.13).

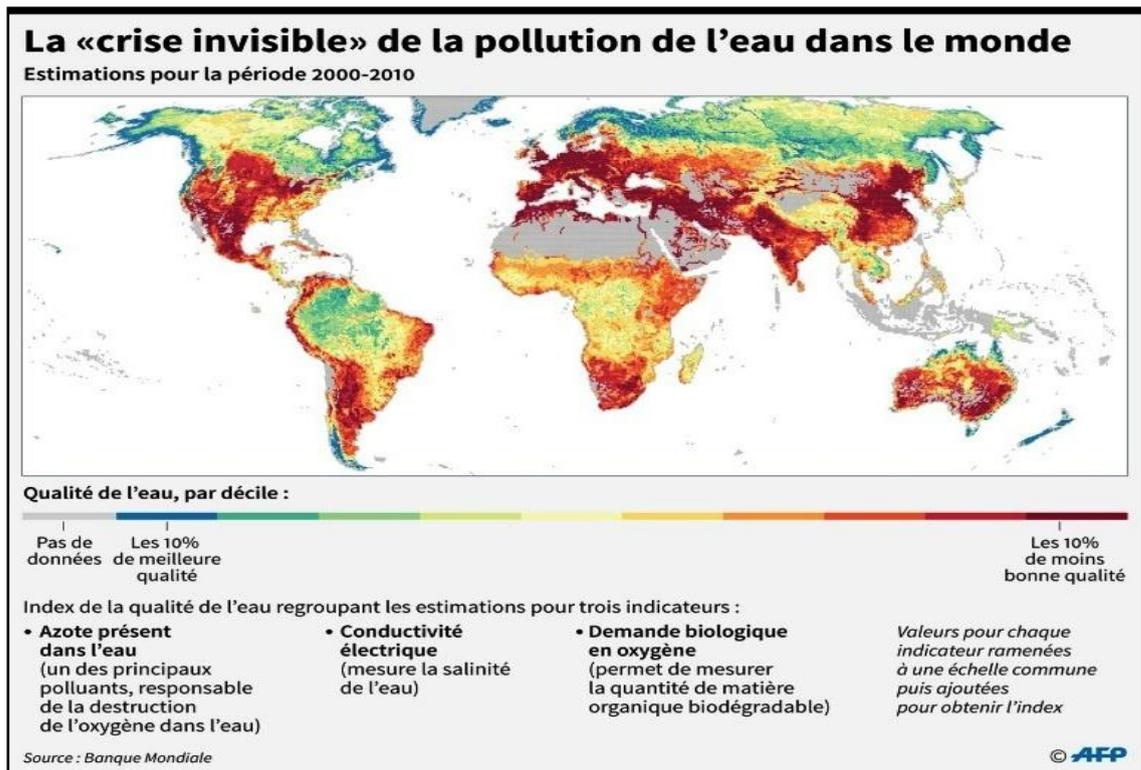


Fig.13 Carte de pollution de l'eau dans le monde

5.1 Ressources en eau

L'eau sur terre se compose de 97,5 % d'eau salée, contenue dans les océans et de 2,5 % d'eau douce, contenue dans les lacs, rivières, glaciers, nappes phréatiques, etc. Et l'utilisation de l'eau douce par l'homme n'est possible qu'à hauteur de 0,7 % de la totalité des réserves d'eau.

L'eau douce se renouvelle en permanence par le cycle de l'eau. Elle passe de la mer à l'atmosphère, puis de la terre à la mer, en suivant un cycle qui se répète indéfiniment (Fig.14).

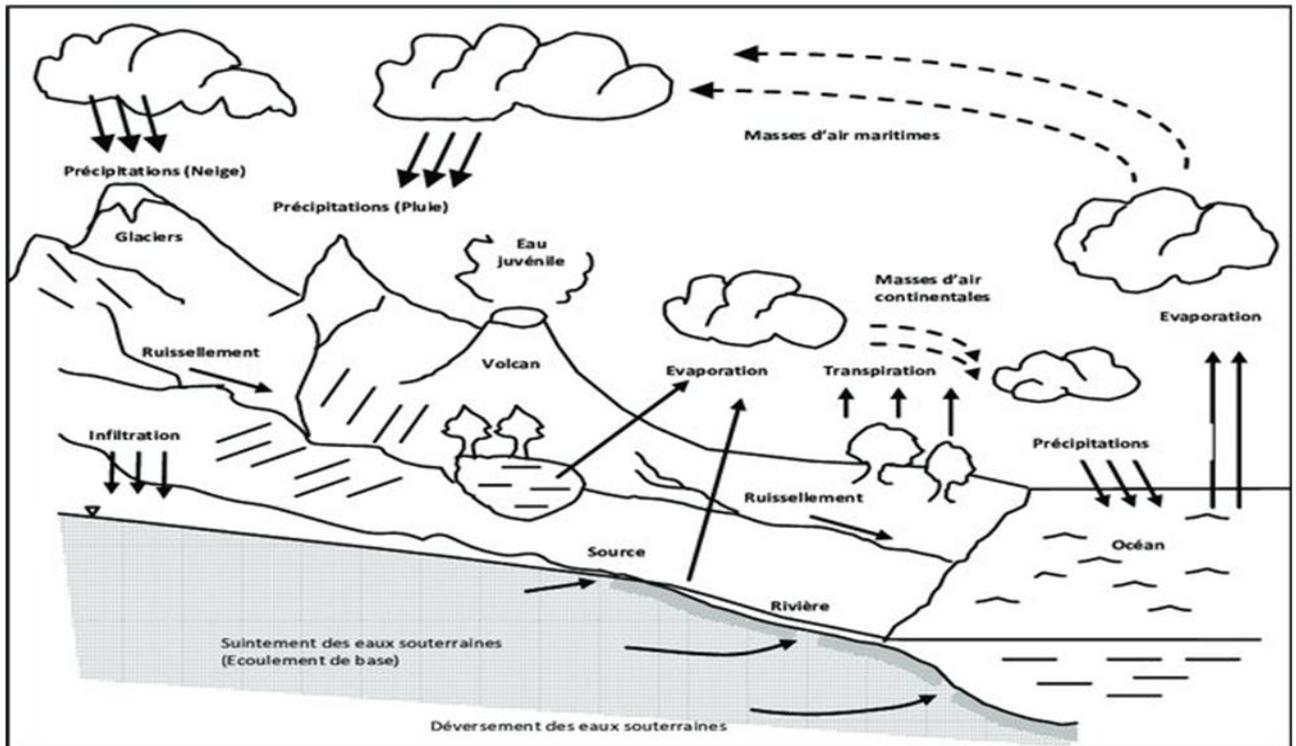


Fig.14 Cycle naturel de l'eau

5.2 Les eaux naturelles

Du point de vue hydrologique il existe deux types d'eaux : superficielles et souterraines

5.2.1 Eaux superficielles :

Elles ont pour origine, soit des nappes souterraines dont l'émergence constitue une source, soit les eaux de ruissellement. Ces eaux se rassemblent en cours d'eau, caractérisés par une vitesse de circulation appréciable. Elles peuvent se trouver stockées en réserves naturelles (lacs) ou artificielles (retenues de barrages) où peut apparaître une grande hétérogénéité de la qualité selon la profondeur.

5.2.2 Eaux souterraines

Les eaux souterraines regroupent l'ensemble des réserves d'eau qui se trouvent dans le sous-sol. L'eau est stockée dans des zones appelées aquifères, composées de roches poreuses et/ou fissurées. L'eau peut s'accumuler dans ces espaces vides pour former des nappes, qui occupent tout ou partie de l'aquifère. La profondeur des nappes est variable : les plus profondes peuvent se trouver à plusieurs centaines de mètres sous la surface. Les nappes phréatiques sont celles qui se trouvent près de la surface. Leur faible profondeur les rend facilement accessibles pour les activités humaines.

5.3 Définition de la pollution des eaux

- La pollution de l'eau est une altération qui rend son utilisation dangereuse et (ou) perturbe l'écosystème aquatique. Elle peut concerner les eaux superficielles (rivières, plans d'eau) et/ou les eaux souterraines.
- La pollution désigne l'ensemble des rejets des composés toxiques que l'homme libère dans l'écosphère, mais aussi les substances qui, sans être dangereuses pour les organismes vivants, exercent une influence perturbatrice sur l'environnement.

5.4 Principales sources de pollution

La pollution des eaux peut avoir des origines diverses :

- La pollution industrielle : générée par les eaux qui sont rejetées par l'usine dans le milieu extérieur, après avoir contribué à la fabrication, au nettoyage, au transport, au refroidissement, etc., en excluant généralement les eaux pluviales sauf si elles sont polluées par des eaux de ruissellement suite aux lessivages des toitures d'usines à l'origine d'une forte pollution atmosphérique (par exemple, cimenteries, centrales thermiques, etc.) ou des sols de sites industriels en activité ou à l'abandon, contaminés par des substances diverses (composés azotés, hydrocarbures, sels métalliques).
- La pollution agricole : L'agriculture, l'élevage, l'aquaculture et l'aviculture sont responsables du rejet de nombreux polluants organiques et inorganiques dans les eaux de surface et souterraines. Ces contaminants comprennent à la fois des sédiments provenant de l'érosion des terres agricoles, des composés phosphorés ou azotés issus des déchets animaux et des engrais commerciaux, notamment des nitrates.
- La pollution domestique : Elle provient des différents usages domestiques de l'eau, qui génèrent essentiellement une pollution organique. Les eaux usées domestiques 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, etc.
 - eaux vannes, il s'agit des rejets des toilettes, chargés de diverses matières organiques azotées et germes fécaux.

- La pollution accidentelle : issue du déversement accidentel de produits toxiques dans le milieu naturel créant des perturbations de l'écosystème.

5.5 Les différents types de pollution

En rejetant des effluents contaminés dans le milieu aquatique, les activités humaines industrielles, agricoles ou urbaines polluent les eaux. On peut distinguer trois grandes familles de pollution, la pollution physique, chimique et microbiologique (Tableau 3).

Le déversement dans le milieu aquatique de substances ou d'effluents contaminés n'est pas la seule cause de pollution des eaux de surface ou souterraines. En effet, l'eau de pluie permet aux polluants rejetés dans l'atmosphère de retomber sur les sols et lessive les zones polluées par ruissellement et/ou infiltration.

La pollution des eaux de surface s'est très diversifiée à partir de nombreuses activités humaines comme la déforestation, l'érosion due aux activités humaines, la construction de barrages, la canalisation de rivières, le comblement de zones humides, l'extraction de granulats.

Tableau.3 Principaux types, nature et origines des produits polluants des eaux continentales [17]

Type de pollution	Nature	Source ou agent à l'origine
Physique: Pollution thermique	Rejets d'eau chaude	Centrales thermiques
Pollution radioactive	Radio-isotopes	Installations nucléaires
Pollution mécanique	Matières en suspension	Eaux résiduaires industrielles
Chimique: Fertilisants	Nitrates, phosphates	Agriculture, lessivage
Métaux et métalloïdes	Mercure, cadmium, plomb Aluminium, arsenic	Industries, agriculture, Pluies acides, combustion
Pesticides	Insecticides, herbicides, fongicides	Agriculture, industries
Organochlorés	PCB, solvants	Industries
Composés organiques de synthèse	Nombreuses molécules	Industries
Détergents	Agent tensio-actifs	Effluents domestiques
Hydrocarbures	Pétrole et dérivés	Industrie pétrolière, transports
Pollution microbiologique	Bactéries, virus, champignons	Effluents urbains et d'élevages
Pollution biologique Espèces invasives	Espèces végétales, espèces animales, OGM	Jardins botaniques, laboratoires de recherche

5.6 Impacts majeurs de la pollution des eaux

5.6.1 Contribution à la diminution du taux d'oxygène dissous dans les eaux naturelles par :

- Oxydation chimique directe
- Consommation biologique par les microorganismes aérobies dans le cours de la métabolisation des polluants biodégradables.
- Phénomènes physico-chimiques contrariant le maintien d'un taux d'oxygène convenable (température, salinité)
- Limitation des échanges gazeux entre l'atmosphère et le milieu aquatique.
- Conséquences des phénomènes fermentaires intervenant à la suite de déversements de matières organiques décantables.

5.6.2 Phénomènes de toxicité aigue ou d'accumulation de micropolluants à effet de toxicité différée

- Toxicité aigue ou subaiguë se traduisant par des taux de mortalité significatifs de populations entières.
- Toxicité à long terme au travers de la bioaccumulation dans les chaînes alimentaires qui nuit à la sante de l'homme.

5.6.3 Phénomènes résultants de déversements excessifs de substances azotées et phosphorées.

a - Substances azotées:

- Toxicité directe de certaines formes ammoniacale et nitritique sur la vie piscicole.
- Surcoût pour la production d'eau potable
- Contribution à l'eutrophisation

b - Substances phosphorées :

- Eutrophisation du milieu aquatique: est engendrée par une population d'algue en excès et une pollution organique massive.
- Coloration et mauvaises odeurs qui gêne la production d'eau potable
- Dérèglement des concentrations en oxygène dissous avec asphyxie de nuit et mortalités spectaculaires de poissons.

5.6.4 Phénomènes de contamination bactérienne ou virale

Les maladies liées à la présence d'éléments pathogènes ou de molécules toxiques sont très répandues. Les parasitoses d'origine hydrique dominent très largement la pathologie des êtres humains et de la faune aquatique (Tableau.4).

Tableau.4 Effets des polluants sur la santé et sur l'environnement [18]

Polluants	Effets environnementaux	Effets sanitaires
Les matières en suspension (MES)	- Eaux plus troubles: perturbe la photosynthèse, la respiration des poissons et colmate les milieux aquatiques	- Transportent des polluants; ce qui augmente les risques d'absorption de substances Toxiques par l'organisme
Pollution organique	- Asphyxie du milieu par consommation de l'oxygène dissous, mort des poissons -Simulation de la production végétale (eutrophisation) et accumulation de boues -Faiblement biodégradable	-Favorise le développement d'organismes pathogènes pour l'Homme
Azote (nitrates, nitrite), phosphore	- Eutrophisation des milieux aquatiques par excès de matières nutritives pour les végétaux (algues) et conduisant à l'asphyxie des milieux - Toxicité de l'ammoniaque et des nitrites pour la faune aquatique	-Nitrates: empoisonnement du sang chez les nourrissons par blocage de l'hémoglobine interdisant le transport de l'oxygène (maladie bleue) -Nitrites: cancers à long terme chez les adultes (même à faible concentrations associés à Certains pesticides)
Métaux lourds	Non biodégradables, bioaccumulables	- Troubles respiratoires, digestifs, nerveux, ou cutanés Arsenic, Nickel et chrome sont également comme cancérigènes
Pesticides	- Substances très dangereuses pour les milieux aquatiques - Polluants organiques persistantes S'adsorbent et s'accumulent dans certains compartiments (sédiments, matières organiques, chaîne alimentaire	-Les plus toxiques: les insecticides Effets reprotoxiques (malformations, stérilité, troubles de la reproduction), mutagènes et cancérigènes.

6. Analyses physico-chimiques

8.4 Analyses physico-chimiques

6.1.1 Le pH

Le pH représente le degré d'acidité ou d'alcalinité du milieu aquatique. Un pH compris entre 6 et 9 permet un développement à peu près correct de la faune et de la flore. Les organismes vivants sont très sensibles aux variations brutales même limitées du pH. L'influence du pH se fait également ressentir par le rôle qu'il exerce sur les équilibres ioniques des autres éléments en augmentant ou diminuant leur toxicité.

Le pH est très fortement influencé par la photosynthèse, et influence lui-même un grand nombre de processus biologiques et chimiques. Le pH influence ainsi la forme de certains composés chimiques (gaz carbonique, acide sulfurique, ammonium/ammoniac etc.). Une partie de ces formes chimiques peuvent devenir toxiques quand le pH dépasse certaines limites.

Outre cette toxicité indirecte, le pH peut avoir des effets néfastes directs pour les poissons et d'autres espèces de la faune et de la flore. En général des valeurs de pH inférieures à 4.5 et supérieures à 10 sont toxiques pour les poissons.

La préférence des poissons d'eau douce est pour un pH entre 6 et 7.5 et pour les poissons d'eau de mer entre 8 et 8.5. Les espèces qui supportent des valeurs extrêmes sont les Anguilles (pH 4.5) et les Carpes (pH 9.8).

6.1.2 La température de l'eau

Une température élevée réduit la solubilité des gaz dans l'eau et en particulier les teneurs en oxygène. Si la température de l'eau varie de 13 °C à 20 °C, la concentration en oxygène chute de 13 %. Or, le rôle de l'oxygène est fondamental pour les organismes vivants et pour l'oxydation des déchets. Les températures basses affectent l'autoépuration des rivières car les réactions d'oxydation sont ralenties. Au contraire, une température plus élevée accélère ces réactions, mais entraîne par voie de conséquence une plus forte consommation d'oxygène dissous.

6.1.3 La conductivité et la salinité

Il existe une relation entre la teneur en sels dissous d'une eau et la résistance qu'elle oppose au passage d'un courant électrique. Cette résistance peut être exprimée par la conductivité électrique qui constitue une bonne appréciation des concentrations globales des matières en solution dans l'eau.

La salinité détermine en grande partie les processus biologiques, mais également les processus chimiques dans l'eau. Les peuplements floristiques et faunistiques dépendent de la salinité et surtout des variations absolues au cours de l'année. Les changements de la salinité sont souvent des signaux qui déclenchent des migrations vers l'intérieur ou l'extérieur de la lagune.

Un certain nombre d'espèces (poissons) ne supportent pas les extrêmes et ont tendance à quitter le milieu quand les salinités deviennent trop basses ou trop fortes.

La salinité et la conductivité suivent des variations saisonnières, mais aussi des variations à plus grande échelle de temps. Leurs valeurs dépendent du bilan hydrique entre les entrées d'eau douce, d'eau saumâtre ou marine ainsi que de l'évaporation et de la pluviosité

6.1.4 Les matières en suspension MES

Il s'agit ici de la matière qui est sous forme de particules et la matière colloïdale qui reste en suspension dans l'eau (de taille 10^{-2} à 10^{-8} mm).

Ce peut être de la matière minérale ou de matière organique, c'est souvent un mélange des deux. Elle est mesurée par pesée. Un volume connu d'eau usée est filtré ou centrifugé. On met la matière à sécher à 105°C.

6.1.5 La turbidité

L'activité phytoplanctonique influence la turbidité. Pendant une période de forte activité, l'eau devient trouble et change souvent de couleur. On peut observer des colorisations rougeâtres, verdâtres, marron. Pendant un fort bloom d'algues unicellulaires, la turbidité dans l'eau peut être si importante que la visibilité est seulement de quelques centimètres.

La turbidité se mesure avec des appareils de laboratoires assez complexes (spectrophotomètres). Les résultats sont donnés en FTU ou NTU (unité de turbidité). Pour éviter de gros investissements on utilise les disques Secchi qui donne immédiatement des résultats, mais sans atteindre l'exactitude des mesure de spectrométrie.

Ce type d'analyse s'appelle aussi néphélométrie.

Le résultat est indiqué en NTU ("nephelometric turbidity unit" ou unité de turbidité néphélométrique). On attribue les termes "eau claire" ou "eau trouble" aux mesures approximatives suivantes :

Eau claire : moins de 5 NTU

Eau légèrement trouble : entre 5 et 50 NTU

Eau trouble : plus de 50 NTU

On trouve de fortes turbidités après des pluies importantes et des vents violents. Il est donc nécessaire de noter si la mesure a été faite pendant un temps relativement calme ou au cours d'événements météorologiques particuliers.

6.1.6 L'oxygène dissous et saturation en oxygène

L'oxygène représente environ 35 % des gaz dissous dans l'eau. Les teneurs en oxygène sont déterminées principalement par :

- la respiration des organismes aquatiques,
- l'oxydation et la dégradation des polluants,
- l'activité photosynthétique de la flore,
- les échanges avec l'atmosphère.

Ces derniers sont fonction de la température de l'eau et de l'air, de la pression atmosphérique et de la salinité de l'eau. Les résultats sont exprimés soit en teneur en oxygène dissous (mg/l), soit en pourcentage de saturation. Ce dernier exprime le rapport entre la teneur effectivement présente dans l'eau et la teneur théorique correspondant à la solubilité maximum pour une température donnée.

Le stock d'oxygène dans l'eau est très limité et par conséquent très fragile. La rivière peut être comparée à un milieu confiné ; si les êtres vivants sont trop nombreux (par exemple des proliférations végétales liées à l'eutrophisation) ou si les polluants biodégradables trop concentrés comme c'est souvent le cas dans l'Orge, le stock d'oxygène peut être rapidement consommé par la respiration et les oxydations, et entraîner de nombreuses mortalités parmi les organismes vivants.

6.1.7 Demande chimique en oxygène ou DCO

C'est la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder chimiquement et totalement les matières organiques de l'effluent. La matière organique sera transformée en gaz carbonique (CO_2) et en eau (H_2O).

6.1.8 Demande biochimique en oxygène ou DBO

Sur le principe, c'est le même type de réaction que ci-dessus, mais au lieu d'être une réaction chimique via "l'oxydant", c'est l'oxygène dissous (à saturation) présent dans l'eau polluée qui est mise en incubation avec des micro-organismes inoculés. Ce sont eux qui réalisent la réaction de l'oxydation à 20C.

La différence fondamentale avec la DCO réside dans le fait que l'on considère que la DBO mesure la pollution dégradable par les micro-organismes alors que la DCO mesure la quantité totale de la matière potentiellement polluante.

Elle peut être mesurée sur 5 jours d'incubation DBO_5 ou sur 21 jours DBO_{21} .

6.1.9 Le carbone organique total COT

La mesure du carbone organique total permet de donner une indication directe de la charge organique d'une eau. Les composés organiques sont d'une part les protéines, les lipides, les glucides et les substances humiques et d'autre part, les substances organiques carbonées élaborées ou utilisées par l'industrie chimique, pharmaceutique, pétrolière...

Le COT permet de mesurer le carbone sous forme inorganique (CI), qui n'est que du CO_2 , et le carbone organique (CO).

Pour mesurer le CO on oxyde la matière organique par oxydation thermique catalytique à 800-1000°C

6.1.10 Les matières toxiques

Ces produits toxiques sont des métaux (mercure, cadmium, arsenic, plomb ...) des composés phénoliques, des organo-halogénés (lindane, DDT, Poly Chloro Benzènes..), des organo-phosphorés...

Pour mesurer la toxicité de ces substances on utilise des méthodes spécifiques ou des méthodes mettant en jeux des organismes vivants.

Par exemple celui des "daphnies" ou encore appelées "puces d'eau". Ce sont de petits crustacés qui se déplacent par cascade. On les trouve dans des mares.

D'autres méthodes peuvent être utilisées comme le test "microtox" qui mesure l'effet toxique sur une bactérie marine bioluminescente *Phosphobacterium phosphoreum*.

6.1.11 La pollution azotée

Elle est souvent responsable de la prolifération des algues et des végétaux aquatiques dans les étendues d'eau. En pourrissant ces végétaux vont se déposer au fond et relarguer des produits solubles qui vont polluer de nouveau le milieu.

La matière qui s'accumule va finir par combler l'étendue d'eau (eutrophisation)

L'azote peut se présenter sous plusieurs formes dans l'eau usée. On a :

- L'azote organique ou l'azote se retrouve dans des molécules avec de l'hydrogène, du carbone, et du phosphore.
- L'azote ammoniacal ou le N est sous forme d'ammoniac dissous dans l'eau (NH_3) ou sous forme d'ion ammoniacal (NH_4^+).
- Les ions nitrate NO_3^- (qui sont une forme stable de l'azote dans la nature) ou d'ion nitrite NO_2^-

On mesure les deux premières formes par une réaction colorimétrique (la méthode Kjeldahl d'où le nom "d'azote Kjeldahl". Pour quantifier les nitrates et les nitrites on utilise souvent des techniques de chromatographie ionique.

6.1.12 La pollution phosphorée

Le phosphore est lui aussi responsable du développement des algues, de végétaux aquatiques qui vont générer les mêmes problèmes que l'azote.

Il est sous forme organique ou sous forme minérale (PO_4H_2^- orthophosphate, ou polyphosphate). Dans la matière vivante le phosphore se trouve notamment dans les acides nucléiques (ADN, ARN). Il est dosé par spectrométrie.

6.2 Méthodes d'analyse

6.2.1 Techniques de prélèvements

Les prélèvements des échantillons peuvent s'effectuer de trois manières :

- Par prélèvements ponctuels ;
- Par prélèvements accumulés dans le temps ;
- Par une surveillance continue en temps réel.

a) Prélèvements ponctuels

L'échantillonnage ponctuel consiste à prélever un échantillon unique d'eau à un moment donné et à un endroit spécifique. Cela signifie que l'échantillon représente les conditions de l'eau à cet endroit précis et à ce moment précis. L'échantillonnage ponctuel est souvent utilisé pour des analyses immédiates ou pour évaluer des événements ponctuels, tels que des déversements accidentels de produits chimiques. Cependant, cette méthode ne reflète pas nécessairement les variations temporelles ou les fluctuations qui peuvent survenir dans le corps d'eau.

b) Prélèvements accumulés

Il est postulé que les effets de beaucoup de polluants, y compris ceux de la masse totale des particules en suspension et ceux du radon et de ses descendants, sont proportionnels aux concentrations moyennes de ces polluants sur une longue période, et on préfère dans leur cas des techniques de mesure qui permettent de connaître aussi leur concentration accumulée avec le temps. Le plus souvent, on mesure la concentration moyenne, sur 24 heures ou davantage, des particules en suspension recueillies sur un papier filtre à travers lequel on a fait passer un volume connu.

c) Surveillance continue en temps réel

Les mesures en temps réel sont possibles grâce aux appareils d'analyse en continu qui peuvent déterminer, de façon spécifique, la présence d'un ou plusieurs polluants déterminés.

6.2.2 Méthodes d'analyse en laboratoire

6.2.2.1 Méthodes Chromatographiques

Les méthodes chromatographiques permettent la séparation et l'identification de nombreuses substances par adsorption sur colonne ou sur papier sensible spécial, puis par élution des divers composés au moyen de solvants sélectifs. On peut ainsi séparer les constituants de mélanges complexes sans leur faire subir de modification chimique. Ces méthodes permettent de déceler très rapidement des traces d'ions minéraux ; le gain de temps est considérable par rapport aux autres techniques. La sensibilité de la chromatographie est très grande. De plus, toutes les substances peuvent être dosées [19].

a- Chromatographie en phase gazeuse (GC)

La chromatographie en phase gazeuse est rapidement devenue l'une des meilleures méthodes analytiques dans le domaine scientifique, autant en recherche que dans le domaine industriel (industrie pharmaceutique, agriculture, environnement, etc.). Cette technique fut découverte en 1952 par James et Martin et a fait des progrès vertigineux, particulièrement grâce à la découverte des détecteurs ultrasensibles. Le seuil de détection de la chromatographie en phase gazeuse, de l'ordre des parties par billions, n'a pas encore été égalé. C'est également le seul type de chromatographie qui utilise un gaz comme phase mobile, ce qui nécessite un appareil spécial, appelé communément le chromatographe à gaz [20]. Dépendant de la phase stationnaire, il est possible d'exploiter les phénomènes d'adsorption ou de partition en chromatographie en phase gazeuse (Fig .15).

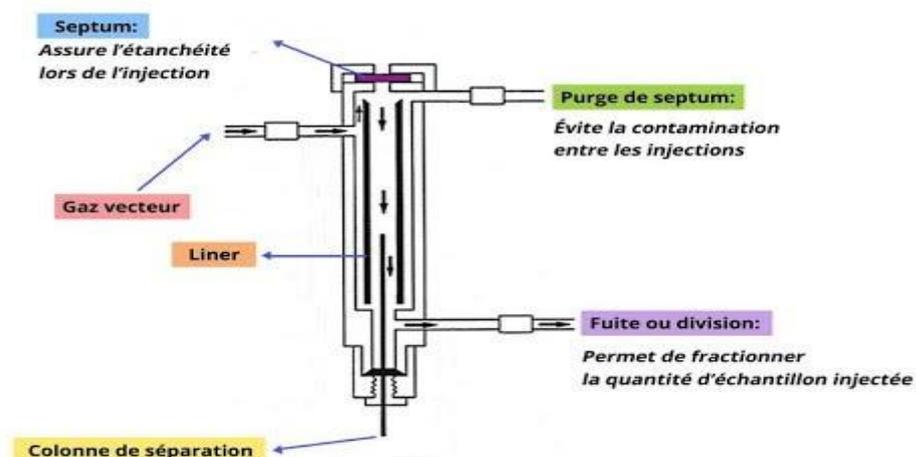


Fig .15 Chromatographie en phase gazeuse (GC)

a- Chromatographie en phase liquide haute performance (HPLC)

A l'origine, la chromatographie en phase liquide se faisait avec des colonnes en verre. Le liquide traversait la phase stationnaire par gravité ou sous faible pression. Par la suite, pour augmenter le débit, et donc réduire le temps d'analyse, des essais ont été effectués sous pression plus forte. C'est ce que l'on a appelé la Chromatographie Liquide sous Haute Pression HPLC (Fig.16). Après d'autres modifications (amélioration des colonnes, ...), la technique a atteint un très haut degré de performance et de fiabilité, si bien que le P de Pression est devenu le P de Performance. Aujourd'hui, l'HPLC est la Chromatographie Liquide Haute Performance [21].

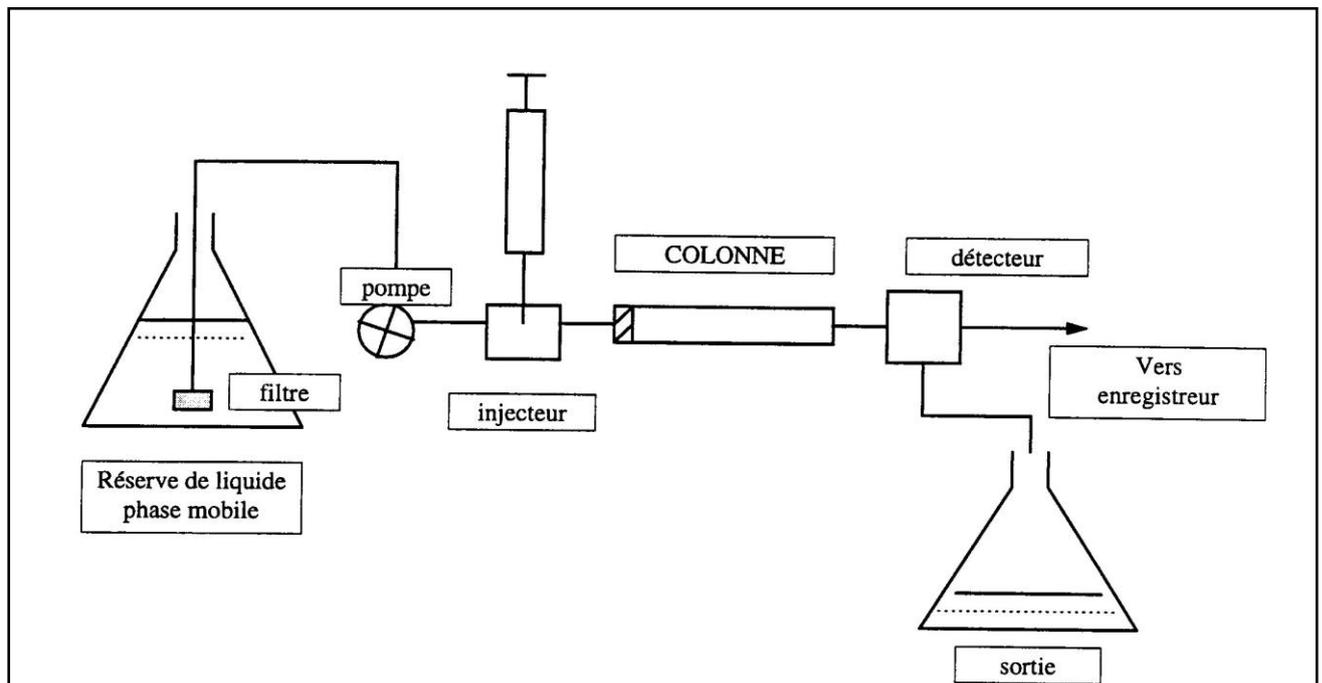


Fig.16 Principe chromatographie en phase liquide haute performance

6.2.2.2 Méthodes Spectrométriques

La spectrophotométrie, basée sur l'absorption d'une certaine bande de radiations électromagnétiques dans les régions du visible, de l'ultraviolet et de l'infrarouge du spectre, est l'une des méthodes instrumentales d'analyse les plus importantes; elle peut donc rendre service lorsqu'il s'agit d'analyser les impuretés atmosphériques. L'absorption varie avec la longueur d'onde de la radiation incidente ; les mesures doivent donc être faites en lumière monochromatique ou de spectre limité, réalisable avec des filtres spéciaux. Le faisceau émergent de la source ayant été ainsi convenablement ajusté est envoyé dans la substance à étudier; à sa sortie, on mesure par un dispositif de détection approprié l'intensité de la radiation non absorbée [20].

a- Absorption du rayonnement IR

La spectrométrie infrarouge, elle, s'utilise davantage sur le gaz polluant lui-même, en mettant en évidence des spectres d'absorption correspondant aux mouvements de vibration et de rotation des molécules concernées [22].

Le faisceau IR traverse deux cuves en parallèle, dont l'une est remplie par le mélange à analyser et l'autre remplie par un gaz de référence. Les deux faisceaux inégalement absorbés sont reçus dans un récepteur à deux compartiments, qui sont remplis du composé à doser et absorbent donc l'énergie IR résiduelle. Ceci se traduit par un échauffement différent du gaz de chaque compartiment, donc par une pression différentielle, qui est prise en compte par un amplificateur, et traduite en concentration Fig.17. Cette méthode d'analyse des gaz n'est habituellement pas utilisée comme méthode absolue, mais comme méthode comparative. Pour cette raison la notion de précision est très difficilement accessible. Elle est très variable du fait que les bandes d'absorption se chevauchent très souvent, il se produit alors des interférences. La concentration maximale est de 100% pour tous les gaz, le seuil de détection s'exprime en partie par million en volume et elle varie selon les gaz [23].

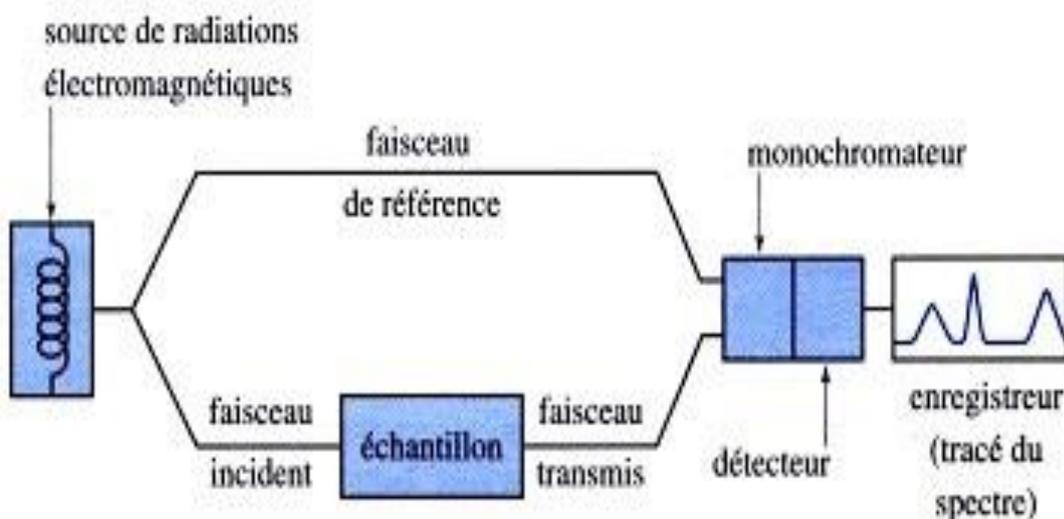


Fig.17 Spectromètre infrarouge

b- Absorption dans le visible et l'ultraviolet

Cette méthode est très voisine de l'absorption IR : sous l'action d'un faisceau UV certaines molécules subissent des vibrations et/ou des transitions électroniques qui conduisent à des spectres d'absorption UV. Les applications sont très voisines de l'absorption IR, à ceci près que la vapeur d'eau n'interfère pas dans l'UV, ce qui permet une meilleure spécificité pour la mesure de SO₂ et NO [23].

c- Analyseurs à corrélation par filtres gazeux (IR ou UV)

Cette méthode se différencie des méthodes classiques d'absorption IR ou UV par l'utilisation d'une seule chambre de mesure au lieu de deux (référence et échantillon). Le faisceau émis par la source IR ou UV est haché séquentiellement par un disque tournant (de corrélation) composé : d'un secteur opaque au rayonnement, d'un secteur avec une cuve remplie du composé à analyser, à forte concentration, d'un secteur avec une cuve remplie d'azote.

d- Analyseurs par interférométrie IR ou UV Les structures fines des bandes d'absorption IR ou UV sont caractérisées séparées par un écart de longueur d'onde quasi constant : il est donc possible, moyennant un dispositif optique adéquat, de créer des franges d'interférence optique entre ces raies. Une telle méthode est pratiquement totalement spécifique, car chaque composé est repéré d'une part, par la longueur d'onde de la bande d'absorption, d'autre part, par l'écart entre raies dans une même bande.

6.2.2.3 Luminescence

La luminescence est la propriété d'émettre sous forme de lumière une partie de l'énergie absorbée au cours d'une excitation quelconque (réaction chimique, irradiation, ...). Ce phénomène est notamment exploité pour la détection et la mesure de concentration d'organismes vivants bioluminescents. Dans le cadre du dosage de polluants intérieurs, les principes exploités sont la chimiluminescence, la fluorescence, ou la phosphorescence.

a- Chimiluminescence C'est une méthode automatique fondée sur la réaction en phase gazeuse de l'ozone sur NO sous pression, soit réduite, soit voisine de la pression atmosphérique.

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2^* + O_2 \quad NO_2^* \rightarrow NO_2 + h\nu$$

La concentration du dioxyde d'azote est déterminée indirectement en mesurant par photométrie l'intensité de la lumière produite par la réaction de l'ozone sur NO. Le dioxyde est quantitativement réduit en monoxyde au moyen d'un convertisseur avant sa réaction avec l'ozone, ce qui donne une mesure de NO + NO₂. Il suffit ensuite de déduire de ce dernier résultat la teneur en NO pour obtenir teneur en NO₂. Les deux dosages de NO et de NO + NO₂ peuvent se faire en même temps avec un appareil double, ou successivement avec un appareil unique, pourvu que l'intervalle de temps entre les deux dosages ne dépasse pas deux minutes [24].

b- Spectrofluorométrie

Le phénomène de luminescence peut s'observer également lorsqu'un corps réémet sous forme lumineuse de l'énergie qu'il a reçue sous forme thermique ou sous l'effet d'un rayonnement incident. C'est dans cette catégorie que l'on classe la fluorescence et la phosphorescence. Si le temps qui sépare l'irradiation de l'émission induite est inférieur à 10^{-8} s, on parle de fluorescence. Dans le cas contraire, on parle de phosphorescence. La phosphorescence est une émission lumineuse qui persiste un certain temps après l'arrêt de la stimulation. La fluorescence, au contraire, cesse aussitôt l'arrêt de la stimulation.

6.2.2.3 Spectrométrie d'absorption atomique

Cette méthode d'analyse dite élémentaire permet de doser des éléments chimiques à l'état de traces (en très faible quantité : quelques ppm) contenus dans une solution, et de déterminer les concentrations des espèces présentes.

La spectrométrie d'absorption est basée sur la théorie de la quantification de l'énergie des atomes. En effet un atome qui passe de son état (d'énergie) fondamental à un état excité quelconque absorbe un ou plusieurs photons. La fréquence ν du photon dépend de l'énergie ΔE acquise par l'atome par la relation :

$$\Delta E = h \nu$$

où h est la constante de Planck.

L'absorption permet de mesurer les concentrations des éléments à doser [24].

La spectrométrie d'absorption atomique peut être appliquée au dosage d'une trentaine d'éléments, et cela tout aussi bien au niveau des éléments majeurs ($0,1 \dots 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) que d'éléments en trace ou ultratrace ($0,0001 \dots 0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tableau.5 Récapitulatif des méthodes d'analyses [25]

Technique utilisée	Principe	Produits détectés	Gammes de mesure	Avantages	Inconvénients
Absorption infrarouge	Absorption par le produit à détecter d'un rayonnement IR ($\lambda \geq 800$ nm) 1 seul λ ,	par exemple alcanes (CH), CO, CO ₂ , etc	De la ppm à 100 % v/v selon appareil et réglages	Assez sélectif si domaine de faible . Stable dans le temps.	Peut être sensible à l'humidité, à l'empoussièremment, au dioxyde de carbone.
Absorption visible/UV ou Fluorescence	Absorption d'un rayonnement UV visible ($\lambda \leq 800$ nm)	Produits non détectés par l'IR : CO, SO ₂ , NO.	Quelques ppm ou moins	Spécifique ; Susceptible d'être miniaturisé	Onéreux et encombrant
Chimiluminescence	Emission lumineuse par un intermédiaire excité, lors d'une réaction chimique	NO, NO ₂	1 ppb	très spécifique	maintenance étalonnage délicat
Spectrométrie de masse	Des molécules sont ionisées dans une source,	Tous composés (sous forme gazeuse)	ppb à ppm	Analyse complète sélectif, sensible, quantification parfaite	Interprétation pas facile. Matériel transportable plus que portable
Chromatographie en phase gazeuse	Séparation de Composés gazeux sur une colonne, suivie d'analyse par FID, PID etc	ous produits (selon détecteur et colonnes)	$\ll 1$ ppm à beaucoup plus selon colonne et détecteur	Sensible, spécifique, stable si correctement étalonné ;	Peu portable, réponse assez longue. nécessite plusieurs détecteurs

6.3 Classification de la qualité des eaux

- Normes de la qualité des eaux superficielles adoptées en Algérie

Une approche plus simple est adoptée dans notre étude pour apprécier globalement la qualité de l'eau des réservoirs dans la zone sensible, elle consiste à exploiter les grilles à double entrée (classe de qualité et paramètres mesurés), établies par l'ANRH (Tableau 6). Elle comporte quelques paramètres, importants certes, mais ne couvrent pas toutes les formes de pollution. (Biologique, radioactive...).

Les quatre classes de qualité définies par la grille sont:

Classe 1 (C1): Eau de bonne qualité, utilisée sans exigence particulière (Couleur bleue)

Classe 2 (C2): Eau de qualité moyenne, utilisée après un simple traitement (Couleur verte)

Classe 3 (C3) : Eau de mauvaise qualité, ne peut être utilisée qu'après un traitement très poussé (Couleur jaune).

Classe 4 (C4): Pollution excessive, cette eau ne peut être utilisée qu'après un traitement spécifique et très onéreux. (Couleur rouge)

Tableau.6 Grille de la classification de la qualité des eaux superficielles en Algérie [ANRH]

Paramètres	Unités	Qualité de l'eau			
		Bonne	Moyenne	Polluée	Excessivement polluée
		C1	C2	C3	C4
Qualité physicochimique					
pH		6.5 – 8.5	6.5 – 8.5	8.5 - 9	<6.5 et > 9.0
Conductivité à 25°C	µS/cm	-	-	> 2800	> 2800
Température	°C	25	25 - 30	30 - 35	> 35
MES	mg/l	0 - 30	30 - 75	75 – 100	> 100
Nitrite (NO ₂)	mg/l	0 – 0.01	0.01 – 0.1	0.1 – 3	>3
Nitrate (NO ₃)	mg/l	0 – 10	10 – 20	20 – 40	>40
NH ₄	mg/l	≤ 0.01	0.01 – 0.1	0.1 – 3.0	>3
NTK	mg/l	≤ 2	2 - 3	3 - 10	>10
Phosphate (PO ₄)	mg/l	0 – 0.01	0.01 – 0.1	0.1 – 3.0	>3
O ₂ dissous	%	90 – 100	50 – 90	30 – 50	<30
DBO ₅	mg/l	< 5	5 - 10	10 - 15	>15
DCO	mg/l	< 20	20 - 40	40 - 50	>50
MO	mg/l	< 5	5 - 10	10 – 15	>15
Salinité	%	<0.5	0.05 – 3.00	3 – 5	>5
Résidu sec	mg/l	300 – 1000	1000 – 1200	1200 – 1600	> 1600
Ca	mg/l	40 – 100	100 – 200	200 – 300	> 300
Mg	mg/l	< 30	30 – 100	100 – 150	> 150
Na	mg/l	10 – 100	100 – 200	200 – 500	> 500
Cl	mg/l	10 – 150	150 – 300	300 – 500	> 500
SO ₄	mg/l	50 – 200	200 - 300	300 – 400	> 400

Fe	mg/l	0 – 0.5	0.5 – 1	1 – 2	> 2
Mn	mg/l	0 – 0.1	0.1 – 0.3	0.3 – 1	> 1
Cr	mg/l	0	0 – 0.05	0.05 – 0.5	> 0.5
Cu	mg/l	0 – 0.02	0.02 – 0.05	0.05 – 1	> 1
Zn	mg/l	0	0 – 0.5	0.5 – 1	> 1
Cd	mg/l	0	0	0 – 0.01	> 0.01
Pb	mg/l	0	0	0 – 0.05	> 0.05
F-	mg/l	0	0 – 0.8	0.8 – 1.5	> 1.5
Cn-	mg/l	0	0	0 – 0.02	> 0.02
Phénols	mg/l	0 – 0.002	0.002 – 0.02	0.02 - 1	> 1
Det	mg/l	0 – 0.3	0.3 - 0.5	0.5 – 3	> 3

7. Analyses biologiques

7.1 Notion de bioindicateur

On peut déduire les caractéristiques des milieux à partir de la composition des peuplements qu'ils hébergent, le principe étant d'utiliser les organismes aquatiques (animaux ou végétaux) comme témoins de la capacité de l'eau et du milieu à maintenir et entretenir la vie. Les organismes utilisés sont appelés : Indicateurs Biologiques ou Bioindicateurs [26].

7.2. Avantages des indicateurs biologiques

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

- Ils intègrent le facteur temps : un dosage chimique donne une image ponctuelle de la qualité de l'eau, alors que la présence d'un organisme vivant implique que ce dernier a pu accomplir son cycle de développement dans le milieu, et donc témoigne d'une certaine qualité de ce milieu dans le passé. Ils fournissent une indication intégrée des effets spatiotemporels des polluants sur le biote puisqu'ils « reflètent le temps total d'exposition au polluant, contrairement aux mesures instrumentales qui prennent les valeurs des paramètres de façon instantanée et localisée » [27]
- Ils peuvent fournir des informations sur la biodisponibilité des polluants plutôt que sur leur concentration totale dans le milieu ;
- Ils détectent toutes les influences, quelles qu'elles soient, y compris celles de substances ou phénomènes inconnus pour l'observateur, ou celles de facteurs autres que chimiques (aménagement...), dont l'évaluation directe est complexe ;
- Ils sont financièrement plus économiques puisqu'ils permettent généralement d'éviter d'employer du matériel technologique coûteux ;
- De plus, grâce à leur capacité de bioaccumulation, certains bio-indicateurs permettent une détection précoce des polluants ou des perturbations [28].
- Ils servent de substituts à des mesures de conditions environnementales qui seraient autrement trop difficiles ou onéreuses à mesurer directement [29].

7.3 Principaux types de méthodes biologiques actuellement utilisées

Parmi les méthodes biologiques utilisées dans le suivi environnementale, on peut citer :

7.3.1. Les méthodes biochimiques :

Niveau « cellulaire et tissulaire » avec les biomarqueurs, que Lagadic *et al.*, (1997) définissent comme étant « un changement observable et/ou mesurable au niveau moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique ou comportemental, qui révèle l'exposition présente ou passée d'un

individu à au moins une substance chimique à caractère polluant [30]» (Ex : perturbation de la photosynthèse, d'une activité enzymatique, etc.).

7.3.2. Les méthodes écotoxicologiques :

Niveau « organisme ». Appartiennent à ce niveau deux types d'approche :

- Les tests de toxicité (les bioessais) :

Les tests de toxicité sont des tests en laboratoire au cours desquels une population d'organismes aquatiques est exposée à un polluant dont on veut estimer la toxicité afin d'évaluer les niveaux de concentration provoquant des effets toxiques (mortalité, baisse de reproduction, baisse de respiration, ...). Ces tests sont menés dans des conditions contrôlées de lumière, température, milieu de culture ou support d'élevage [31].

Exemple: Test Daphnies :

C'est un test éco-toxicologique qui consiste à déterminer la concentration d'échantillon étudié provoquant une inhibition de la mobilité de la moitié d'une population de micro-crustacées d'eau douce (*Daphnia magna*).



Photo.18 *Daphnia magna* [32]

Les résultats des essais de toxicité sont généralement exprimés par une concentration létale pour 50 % des individus testés (CL 50) [33].

- Les bioaccumulateurs

Les bioaccumulateurs sont des organismes qui intègrent des micropollutions (le plus souvent toxiques : éléments traces, pesticides...), c'est-à-dire qu'ils captent et stockent les polluants en fonction de la quantité présente dans le milieu. L'intérêt est qu'ils mettent ainsi en évidence des contaminations qui ne peuvent être détectées chimiquement du fait des faibles teneurs, mais aussi des pollutions exceptionnelles et sporadiques qui n'ont pu être détectées par les réseaux de surveillance habituels [26].

On peut citer ici l'utilisation des bryophytes (mousses aquatiques) dans la détection de micropolluants métalliques grâce à leur capacité d'accumulation rapide et relativement régulière [34]

7.3.3. Les méthodes biocénotiques :

Niveau « peuplement ». Ces méthodes sont basées notamment sur la composition et la structure des peuplements. Ces bioindicateurs au sens strict peuvent être définis comme des espèces ou groupes d'espèces qui, par leur présence et/ou leur abondance, sont significatifs d'une ou plusieurs propriétés de l'écosystème dont ils font partie (Guelorget et Perthuisot, 1984).

7.4 Méthodes d'analyse microbiologiques

L'analyse microbiologique doit permettre de quantifier dans l'échantillon une souche particulière de bactéries. Le résultat d'une telle analyse quantitative est rendu sous forme d'une concentration en micro-organismes (appartenant à une souche particulière) par unité de masse ou de volume d'échantillon.

Bien que de nombreuses techniques de numération soient utilisables, il n'existe pas à l'heure actuelle de technique parfaite. Certaines méthodes ne permettent pas de différencier les germes vivants des germes morts, d'autres s'avèrent incapables de compter individuellement les cellules microbiennes lorsque celles-ci sont associées (*Staphylococcus*, *Streptococcus*, mycélium, etc) et permettent d'évaluer des unités formant colonies (UFC) ou des unités formant trouble (UFT)

Autrement dit, quel que soit le type de méthodes employé, le résultat de la numération n'est toujours qu'une approximation du nombre réel de germes présents dans l'échantillon analysé. De nombreuses causes d'erreur peuvent en effet influencer sur le résultat, par exemple l'homogénéisation, la réalisation des suspensions mères et des dilutions, la qualification du manipulateur. De plus, la précision des techniques bactériologiques est faible : elles donnent une valeur qui se range à l'intérieur d'un intervalle de confiance plus ou moins large. Pour pallier cette incertitude et pour tenir compte de la sensibilité variable du consommateur, les normes bactériologiques imposées sont telles que la limite de sécurité n'est pas dépassée même si le nombre de germes trouvé est sous-estimé par rapport à la valeur réelle

7.3.1 Numération microscopique

Il s'agit d'un dénombrement par observation directe ; la numération cellulaire est réalisée par comptage au microscope, à l'aide d'une lame de comptage spéciale ou cellule de numération ou hématimètre (Cellule de Malassez) (figure 19). En effet, Il existe deux grands types principaux de cellules de numération (Cellule de Thoma et la Cellule de Malassez, la plus courante).

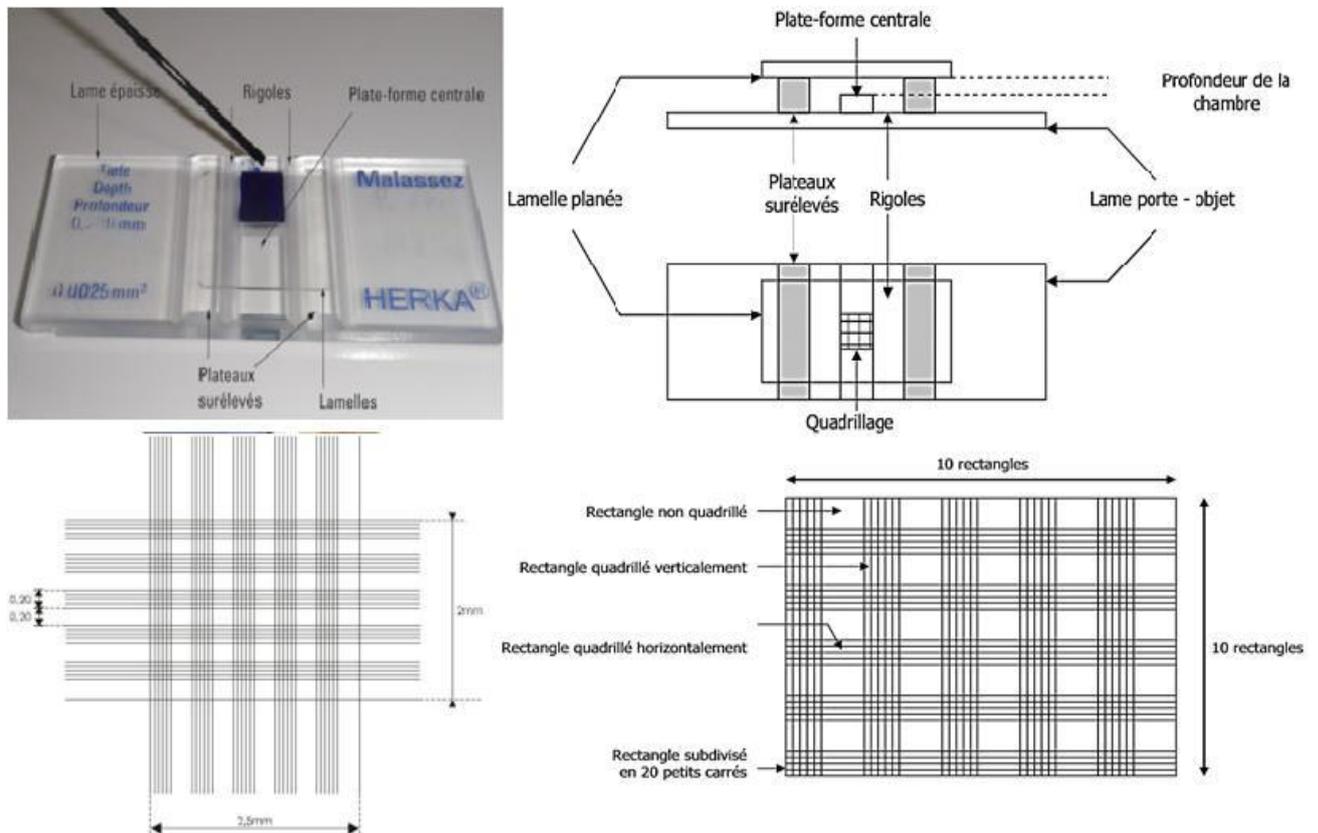


Fig.19 Cellule de Malassez

Une cellule de numération est une lame porte objet dans laquelle est creusée une chambre de comptage de volume connu. C'est une lame épaisse en verre, comportant des rigoles et un quadrillage.

Lorsque la suspension cellulaire est trop concentrée, il est nécessaire de réaliser une dilution préalable de façon à permettre le comptage des cellules au microscope.

Le volume de comptage est déterminé par la surface du quadrillage gravé sur la lame et la profondeur de la chambre. Le volume correspondant au quadrillage total est égal à $1 \text{ mm}^3 = 10^{-6} \text{ dm}^3$ (10^{-3} cm^3 donc $1 \mu\text{l}$), Chaque rectangle correspond à un volume 100 fois plus faible, soit $0,01 \text{ mm}^3 = 10^{-8} \text{ dm}^3$.

- Humecter les deux plateaux latéraux. Faire adhérer parfaitement la lamelle aux plateaux latéraux : pour cela placer la lamelle sur ces plateaux, puis à l'aide des pouces posés sur la lamelle, exercer une pression sur la lamelle tout en pratiquant un mouvement de va et vient jusqu'à perception d'une résistance.
 - Placer la cellule de comptage sur une surface plane. Homogénéiser la suspension cellulaire, et prélever celle-ci à l'aide d'une pipette Pasteur. Remplir la chambre de comptage par capillarité, en plaçant la pointe de la pipette légèrement inclinée près de la lamelle sur la plate-forme centrale quadrillée. Le remplissage doit être fait en une seule fois, sans bulles d'air, et sans faire déborder le liquide dans les rigoles. Laisser sédimenter les cellules sur le quadrillage quelques minutes, et passer à la numération (Fig.20).
 - Observer à l'objectif **x10** pour repérer la position du quadrillage, et vérifier l'homogénéité de la répartition des cellules à compter (si la répartition est mauvaise, recommencer).
 - Observer ensuite à l'objectif **x40** pour réaliser le comptage (1 rectangle par champ).
 - Compter les cellules contenues dans 4, 10, 20 ou dans la totalité des 100 rectangles du quadrillage.
- Remarque : pour les cellules chevauchant les lignes de quadrillage, compter seulement celles qui chevauchent 2 arêtes du rectangle sur 4 (en pratique, on choisit de prendre en compte les cellules chevauchant la ligne horizontale supérieure, et la ligne verticale droite).

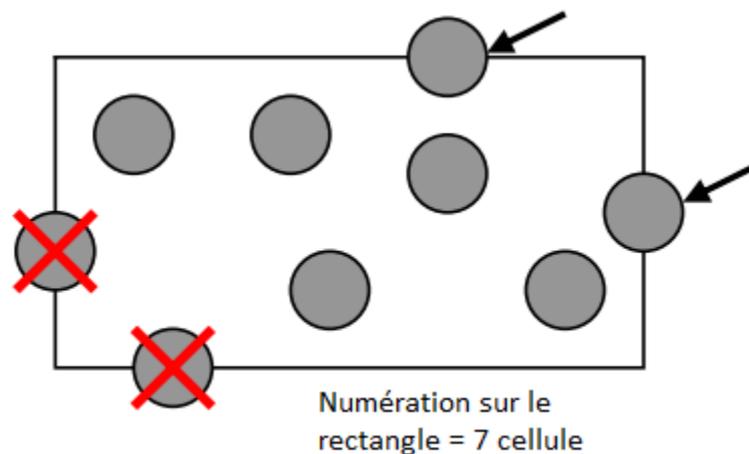


Fig.20 Lecture de la cellule de Malassez

Après utilisation, la lame porte-objet et la lamelle planée sont immergées dans un bain d'eau de Javel pendant 5 minutes, puis sont rincées avec de l'eau distillée et essuyées avec du papier (sans frotter, en particulier au niveau du quadrillage).

Après avoir effectué la manipulation, on calcule la concentration cellulaire de la suspension de cellules étudiée.

$$N = (n / V) \times f$$

-**n** : nombre de cellules comptées

-**V** : volume de comptage

-**f** : facteur de dilution

-**N** : nombre de cellules par litre

7.3.2 Numération en milieu solide

Cette méthodologie est le plus fréquemment réalisée dans des boîtes de Pétri. Elle repose sur le principe que toute bactérie vivante introduite dans la masse ou en surface d'un milieu gélosé favorable donne en principe naissance après incubation à une colonie macroscopique. Le nombre total de colonies correspond alors au nombre d'UFC présents dans l'inoculum.

a- Technique de numération dans la masse de la gélose

Les milieux gélosés (répartis en erlenmeyer ou en flacon de 15 ml) sont liquéfiés au bain-marie bouillant ou au four à micro-ondes, puis maintenus en surfusion dans un bain-marie à $45 \pm 1^\circ\text{C}$. 1 ml du liquide dans lequel on veut connaître le nombre de micro-organismes est introduit au centre de la boîte de Pétri posée bien à plat dans la zone de protection du bec Bunsen. L'inoculum peut être réparti en gouttes sur le fond de la boîte. Afin de n'utiliser qu'une seule pipette stérile pour toutes ces opérations il est recommandé de commencer l'ensemencement par la dilution la plus grande pour terminer avec le liquide non dilué. Les essais sont pratiqués en duplicata (ou triplicata si possible) pour chaque dilution.

Sur chaque boîte l'origine de l'analyse, le milieu utilisé et la dilution correspondante sont enregistrés (sur le côté de façon à ne pas être gêné par la suite pour le comptage).

b- Technique de numération en surface de la gélose

100 à 500 microlitres (pipette graduée ou mieux pipette automatique) du milieu à analyser sont déposés à la surface de la gélose et immédiatement répartis de façon uniforme à la surface du milieu au moyen d'un ensemencement stérile du type pipette râteau. La pipette râteau est «stérilisée» entre deux étalements par immersion dans de l'éthanol, l'éthanol adsorbé sur le verre étant ensuite enflammé.

Après la période d'incubation nécessaire, procéder au comptage des colonies pour chaque boîte contenant moins de 300 colonies. Dans le cas de microorganismes donnant des colonies de taille

élevée, la valeur 300 paraît très élevée. Il est possible que 2 unités microbiennes ou plus se retrouvent à proximité immédiate lors de l'inoculation et donnent une seule grosse colonie.

Le calcul de la concentration en micro-organismes [N] présents dans l'échantillon essai est une moyenne pondérée à partir des résultats de 2 dilutions successives.

Pour que le calcul soit valable, il est nécessaire de compter sur au moins une boîte contenant au moins 15 colonies.

$$[N] \text{ ou UFC/ml} = \frac{\sum c}{(n_1 + 0.1 n_2) d V}$$

- Σc la somme de toutes les colonies comptées sur toutes les boîtes retenues (et tel que au moins une des boîtes comptées contenait au moins 15 colonies).
- V le volume inoculum appliqué à chaque boîte (généralement 1ml en masse et 0.1ml en surface)
- n_1 le nombre de boîtes retenues à la première dilution (en général 2).
- n_2 le nombre de boîtes retenues à la deuxième dilution (en général 2).
- d le taux de dilution de la première dilution retenue pour les comptages sur boîte.

Si aucune boîte ne contient au moins 15 colonies, faire la moyenne arithmétique des colonies comptées sur les 2 boîtes de la plus petite dilution d et tenir compte de cette dilution. Bien préciser dans l'expression du résultat qu'il s'agit alors d'une estimation en rédigeant ainsi : « nombre **estimé** de micro-organismes par millilitre = ... ».

- **Dénombrement après filtration sur membrane**

Dans certains produits liquides (eau, solutés pharmaceutiques buvables ou injectables...), les microorganismes sont à une concentration très faible (voire nulle si le produit est stérile). Leur dénombrement (en UFC par unité de volume) impose donc de «concentrer les microorganismes» pour pouvoir compter des colonies. Cette méthode consiste à faire passer un certain volume d'échantillon (ou de ses dilutions) au travers d'une membrane filtrante dont la porosité moyenne de 0,45 μm ou 0,22 μm sur laquelle sont retenus les microorganismes recherchés.

Le filtre est alors posé sur la surface d'un milieu gélosé, face portant les micro-organismes vers le haut. Après incubation, les colonies formées à la surface du filtre sont comptées (Fig 21).

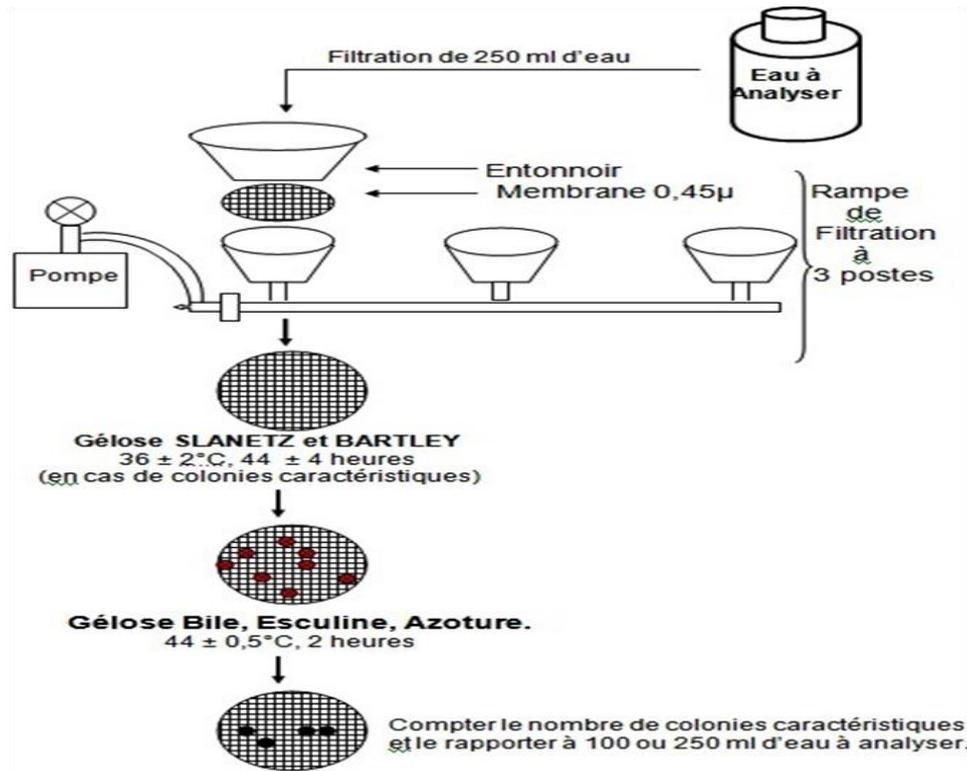


Fig 21 Filtration sur membrane

Le nombre de colonies présentes sur la membrane permet de calculer la concentration bactérienne N en nombre d'Unités Formant Colonie (UFC) par ml selon la formule :

$$N_{\text{UFC/mL}} = \frac{n}{V}$$

Où n : nombre d'UFC sur la membrane, V : volume de produit filtré en ml

7.3.3 Numération en milieu liquide

Cette méthode présente certains avantages tels que la possibilité d'étudier un caractère biochimique du germe difficilement mis en évidence sur milieu gélosé comme la production de gaz (cloche) ou encore d'effectuer facilement la numération avec une phase de revivification. Si les conditions optimales de croissance sont réunies, un seul micro-organisme présent dans l'inoculum introduit dans un milieu liquide se développe en y créant un trouble. La lecture des tubes contenant le milieu liquide etensemencés avec l'inoculum est de type binaire :

Résultat négatif si absence de trouble et/ou de modification du milieu : il y a moins de un microorganisme présent dans l'inoculum introduit dans le milieu liquide ;

- Résultat positif si présence de trouble et/ou de modification du milieu : il y avait au moins un microorganisme présent dans l'inoculum introduit dans le milieu liquide.

Le volume de l'inoculum : le plus souvent = 1 ml (parfois 10 ml)

Le choix des dilutions à tester : dépend de la population estimée, le but étant d'obtenir, pour une analyse statistique optimale des résultats :

- une dilution contenant moins d'un microorganisme dans l'inoculum utilisé
- une dilution contenant plus d'un microorganisme dans l'inoculum utilisé

Le choix du nombre d'essais par dilution dépend de la précision souhaitée pour les résultats en fonction de leur analyse statistique. En général trois tubes sontensemencés par dilution, un ou deux tubes sontensemencés si une précision moins importante est suffisante, cinq tubes ou même plus sontensemencés si une précision plus importante est demandée.

7.3.4 Dénombrement à un seul essai

Dans le cas, 1 tube par dilution estensemencé avec 1 ml d'inoculum on aura :

Tableau.7 Dénombrement en milieu liquide à un seul essai

Dilution	100	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
Resultat	+	+	+	-	-

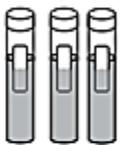
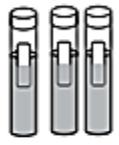
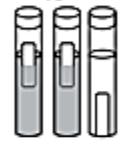
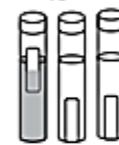
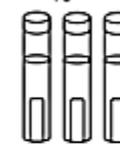
7.3.5 Dénombrement à essais multiples «technique du nombre le plus probable NPP»

Cette méthode repose sur une analyse statistique et fournit par calcul des nombres les plus **probables** (NPP). Ce dénombrement s'effectue en utilisant les tables de Mac Grady, le nombre caractéristique de la série réalisée est une combinaison de trois chiffres :

- Chaque chiffre correspond au nombre de tubes « positifs » pour une dilution donnée ;
- Les trois chiffres correspondent à trois dilutions successives ;
- Le chiffre des centaines correspond à la plus faible dilution (donc à la plus forte concentration en micro-organismes), celui des dizaines à la dilution intermédiaire et celui des unités à la plus grande dilution. 6

Parmi les différentes combinaisons, celle correspondant au nombre le plus grand et, si possible, inférieur à 330 est retenue (correspond à une meilleure répartition des micro-organismes dans les dilutions).

Tableau.8 Dénombrement par la technique du nombre le plus probable

Dilutions et aspect des tubes après incubation (lecture d'un trouble associé à la production de gaz collecté dans une cloche).	Résultats (trois essais par dilution)				
	10^{-n}	$10^{-(n+1)}$	$10^{-(n+2)}$	$10^{-(n+3)}$	$10^{-(n+4)}$
					
Résultats	+ + +	+ + +	+ + -	+ - -	- - -
Nombre de tubes +	3	3	2	1	0
Combinaison possible	3	3	2		
Combinaison possible		3	2	1	
Combinaison possible			2	1	0

Exemple (tableau 8) : cinq dilutions ont étéensemencées à raison de trois essais par dilution ; trois combinaisons (de trois chiffres) sont possibles avec les résultats obtenus. Parmi les trois combinaisons de trois chiffres possibles (332 ; 321 ; 210), laquelle choisir ? Le nombre le plus élevé et inférieur à 330 est sélectionné ; dans cet exemple, il s'agit de 321. Si les dilutions sont insuffisantes, on peut utiliser des nombres caractéristiques comme 333, 332 ou 331.

Le nombre caractéristique de la série est reporté dans une table statistique de Mac Grady (tableau 9). On y lit le Nombre le Plus Probable (NPP) de microorganismes présents dans l'inoculum de la dilution correspondant au chiffre des centaines du nombre caractéristique. Exemple : 321 correspond au NPP de 15. Cela signifie qu'il y a statistiquement quinze bactéries dans l'inoculum de la dilution $10^{-(n+1)}$.

Le résultat est exprimé selon l'équation :
$$N = \frac{NPP \times k}{V}$$

N : nombre de micro-organismes par ml de produit ; **NPP** : nombre lu dans la table ; **K** : facteur de dilution (inverse de dilution) correspondant au chiffre des centaines du nombre caractéristique (combinaison retenue) ;

V : volume de l'inoculum (1ml en général).

Si le produit analysé est solide, on prépare une « suspension mère » de produit en introduisant « x » g de produit dans « 9 x » ml de diluant. Cela correspond à une dilution au 1/10 du produit. Le nombre de microorganismes par g de produit analysé est donc $N \times 10$.

D'autres méthodes préconisent le nombre caractéristique le plus faible portant de préférence «0» dans la colonne des unités (par exemple dans ce cas 210).

Tableau.9 Table de Mac Grady

Deux tubes par dilution		Trois tubes par dilution					
Nombre caractéristique	NPP	Nombre caractéristique	NPP	Nombre caractéristique	NPP	Nombre caractéristique	NPP
000	0,0	000	0,0	201	1,4	302	6,5
001	0,5	001	0,3	202	2,0	310	4,5
010	0,5	010	0,3	210	1,5	311	7,5
011	0,9	011	0,6	211	2,0	312	11,5
020	0,9	020	0,6	212	3,0	313	16,0
100	0,6	100	0,4	220	2,0	320	9,5
101	1,2	101	0,7	221	3,0	321	15,0
110	1,3	102	1,1	222	3,5	322	20,0
111	2,0	110	0,7	223	4,0	323	30,0
120	2,0	111	1,1	230	3,0	330	25,0
121	3,0	120	1,1	231	3,5	331	45,0
200	2,5	121	1,5	232	4,0	332	110,0
201	5,0	130	1,6	300	2,5	333	140,0
210	6,0	200	0,9	301	4,0		
211	13,0						
212	20,0						
220	25,0						
221	70,0						
222	110,0						

7.5 Autres méthodes d'évaluation de flores microbiennes

7.5.1 Spectrophotométrie

Le trouble d'une suspension microbienne (bactéries, levures) est proportionnel à la biomasse présente dans la suspension. Cette technique ne distingue pas la biomasse morte de la vivante, mais son intérêt principal est sa rapidité et sa facilité d'application. La mesure peut se faire à l'aide d'un spectrophotomètre en assimilant l'absorbance mesurée entre 600 et 650 nm à celle du trouble. Ce principe est également celui de la méthode des étalons de Mac Farland (solutions troubles obtenues traditionnellement par précipitation de sulfate de baryum). On peut comparer visuellement le trouble d'une suspension microbienne à celui d'un étalon artificiel pour en estimer sa concentration. En effet, le trouble développé par chaque étalon est assimilable à une concentration bactérienne selon le tableau de correspondance suivant :

Tableau.10 Concentration cellulaire approximative par spectroscopie

Etalon Mac Farland numéro	0.5	1	2	3	4
Chlorure de Baryum à 1% (ml)	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4
Acide sulfurique à 1% (ml)	9,95	9,9	9,8	9,7	9,6
Concentration cellulaire approximative (x10 ⁸ UFC/ml)	1,5	3,0	6,0	9,0	12,0
Absorbance à 600nm	0,132	0,257	0,451	0,582	0,669

7.5.2 Spectrométrie de masse

La spectrométrie de masse peut être utilisée dans les laboratoires de microbiologie comme une alternative ou un complément aux techniques d'identification de bactéries. L'analyse nécessite une colonie isolée, à partir de laquelle le spectre de masse obtenu est comparé avec la bibliothèque de spectres de l'appareil. Une identification est alors proposée avec une indication du niveau de confiance allant de 0 à 3. L'identification est correcte pour plus de 80% des isolats voire davantage. La lyse incomplète des bactéries peut-être l'une des causes d'une non-identification. L'enrichissement progressif de la bibliothèque de spectres contribue à réduire les erreurs d'identification de microorganismes rares.

7.5.3 Cytométrie de flux

Il s'agit d'une alternative rapide (24h) pour réduire le temps de stockage en industrie agroalimentaire pour remplacer la méthode traditionnelle lente. La technique est basée sur le marquage fluorescent des organismes viables présents dans le produit. L'échantillon à analyser est envoyé dans une veine liquide. Un rayon laser permet d'activer la fluorescence des bactéries vivantes. Un système optique permet de détecter et de mesurer l'émission de fluorescence. La comptabilisation des signaux détectés pour un volume d'échantillon donné permet de connaître le nombre de bactéries vivantes par unité de masse ou de volume de l'échantillon à analyser (Fig.22).

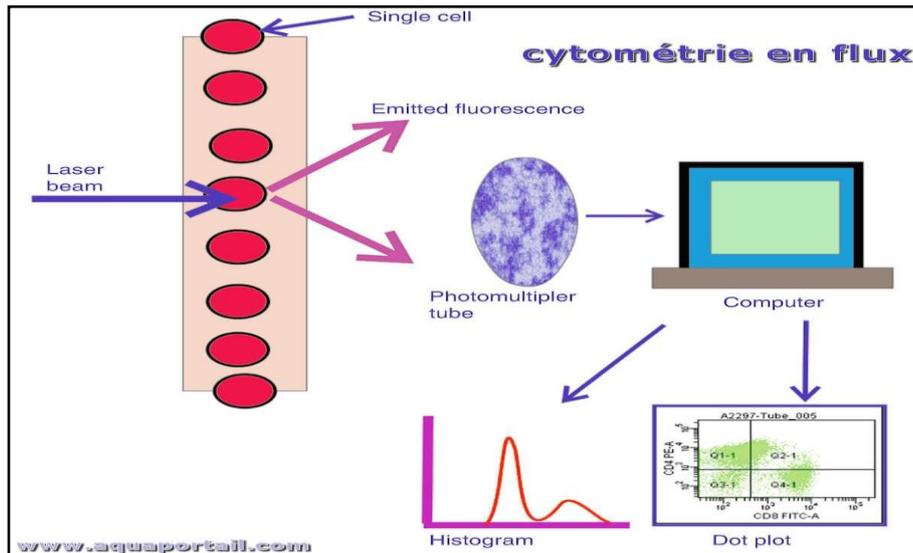


Fig.22 Cytométrie de flux

7.5.5 Impédancemétrie

L'évaluation de la qualité bactériologique à l'aide des techniques normalisées pose souvent des problèmes à l'industriel qui désire connaître rapidement la qualité de la matière première mise en oeuvre. L'impédance est une technique indirecte d'estimation d'une flore microbienne. Elle utilise les modifications de conductance d'un milieu de culture, en raison de la croissance et du métabolisme de la flore microbienne de l'échantillon. Ces modifications sont liées à la dégradation des substrats du milieu en molécules plus petites, plus mobiles et d'une charge électrique plus élevée comme celle des protéines en acides aminés ou des hydrates de carbone en lactate.

Généralement, cette production d'ions devient suffisante pour entraîner une modification significative de la conductance du milieu (seuil de détection) lorsque le niveau de la population microbienne atteint 10^6 à 10^8 micro-organismes/ml. Le temps (ou nombre de doublements de la population) nécessaire pour atteindre le seuil de détection sera d'autant plus grand que le niveau de germes initial sera faible. Il existe une relation linéaire décroissante entre le temps de détection du changement de conductance et le nombre initial de micro-organismes.

8. Protection de l'environnement: réglementation algérienne

Introduction

L'Algérie est confrontée actuellement à de sérieux problèmes de pollution. En effet, les pollutions engendrées par le rejet d'eaux industrielles non traitées, les émissions de gaz nocifs, la production de déchets dangereux et la dégradation de l'écosystème posent de sérieux problèmes environnementaux. Cette situation a poussé les autorités algériennes à faire preuve, dès les premières années de l'indépendance, à s'engager dans le domaine environnemental qui s'est traduit par un renforcement institutionnel et législatif (Tableau 11) ainsi que par l'adoption de plusieurs stratégies œuvrant à la protection des principaux secteurs de l'environnement [36].

8.1. Importance de la législation et du pouvoir législatif

- La législation : venant du latin *legifer*, qui établit les lois, Le mot "législation" était le nom donné au pouvoir donné à certaines autorités d'émettre des règles contraignantes. A notre époque il désigne d'une manière générale le corps des lois et des règlements en vigueur dans un état déterminé. La législation est l'ensemble des lois et des règlements en vigueur dans un pays, ou bien ceux relatifs à un domaine particulier (travail, commerce...). Elle comprend la constitution, les lois édictées par le pouvoir législatif, ainsi que les décrets, les arrêtés et, dans une certaine mesure, les circulaires qui émanent du pouvoir exécutif. La législation est aussi la science de la connaissance des lois.

- Le pouvoir législatif : dans la théorie de la séparation des pouvoirs de Montesquieu (1689- 1755) et dans les régimes démocratiques modernes, le pouvoir législatif est, avec le pouvoir exécutif et le pouvoir judiciaire, l'un des trois pouvoirs constituant un État. Le pouvoir législatif est, en général, dévolu à une ou deux assemblées élues au suffrage direct ou indirect. Le peuple, dans son ensemble, peut ponctuellement détenir une part du pouvoir législatif lorsque sont organisés des référendums.

8.2 Concepts généraux de réglementation législative

- **La constitution** : Une constitution, c'est un cadre légal et politique qui régit la dynamique entre une nation et ses gouvernants de même que l'organisation et le fonctionnement des pouvoirs publics. Elle regroupe habituellement une ou plusieurs lois importantes et d'autres sources écrites ou non écrites qui relèvent des usages. Elle est considérée comme la première source du droit.

- au domaine de la loi, c'est-à-dire les domaines sur lesquels le parlement, les députés (législateurs) doivent légiférer,

- au domaine du réglementaire, c'est-à-dire les domaines dans lesquels le gouvernement et les administrations déconcentrées peuvent adopter des règles par décret ou par arrêté.

- **Le droit** du latin directus, signifie direct, en ligne droite ;

Sens 1 : le droit est la faculté de réaliser une action, de jouir de quelque chose, d'y prétendre, de l'exiger. Exemples : le droit de vote.

Sens 2 : un droit est une taxe dont l'acquittement permet d'utiliser ou de réaliser quelque chose ou donne un droit d'entrée Ex : droit d'auteur,

Sens 3 : le droit est l'ensemble des règles et des normes générales qui régissent les rapports entre les individus et définissent leurs droits et prérogatives ainsi que ce qui est obligatoire, autorisé ou interdit.

Le droit est segmenté en différents sous-ensembles correspondant à un domaine de la législation.

Exemples : Droit civil, Droit pénal, Droit international, Droit commercial, Droit des affaires. Droit du travail, Droit privé, Droit public.....

- **Définition de loi**

Le mot loi est un terme générique pour désigner une règle, une norme, une prescription ou une obligation, générale et permanente, qui émane d'une autorité souveraine (le pouvoir législatif) et qui s'impose à tous les individus d'une société. Son non respect est sanctionné par la force publique. Par extension, la loi est l'ensemble des lois. Elle est la principale source du droit. Généralement, une loi est un texte adopté par le Parlement et promulgué par le Président de la République, soit sur proposition des parlementaires (députés ou sénateurs), soit à partir d'un projet déposé par le gouvernement Au pluriel, les lois sont des conventions, des codes, des règles qui régissent la vie sociale. Elles peuvent être écrites ou tacites. Ex : les lois de l'honneur, les lois de la guerre.

- **Ordonnance** : Ordonnance du latin ordinare, mettre en ordre, ranger, disposer, donner un ordre. Une ordonnance est ce qui est prescrit par une autorité compétente ou une personne ayant le droit ou le pouvoir de le faire :

- acte législatif émis par le pouvoir exécutif

- décision de justice prise par certaines juridictions ou par un juge d'instruction.

- prescription faite par un médecin ou un dentiste destinée à être suivie par le patient

- **Décision** : Action de décider quelque chose ou de se décider, après délibération individuelle ou collective. Ces décisions prises qui expirent au seuil d'une porte

- **Décret** : Un décret est un acte exécutoire émis par le pouvoir exécutif. C'est une décision qui ordonne ou règle quelque chose. Le décret, est l'une des manifestations du pouvoir réglementaire de

l'exécutif ou par une autorité souveraine. Sa portée peut être générale, lorsqu'il formule une règle de droit, ou individuelle lorsqu'il ne concerne qu'une seule personne (ex: une nomination).

On distingue : - les décrets autonomes, sur des sujets qui ne relèvent pas du domaine de la loi; - les décrets d'application qui précisent les modalités ou conditions d'application d'une loi, - les décrets de répartition qui (exemple : après le vote des lois de finances, répartissent les masses budgétaires entre les différents ministères).

- **Arrêté** : Un arrêté est une décision exécutoire à portée générale ou individuelle émanant d'un ou plusieurs ministres (arrêté ministériel ou interministériel) ou d'autres autorités administratives (arrêté municipal, préfectoral, etc.).

- **Circulaire** : Une circulaire est un texte destiné aux membres d'un service, d'une entreprise, d'une administration. On peut distinguer :

- les circulaires interprétatives : qui se contentaient de rappeler ou de commenter le texte (loi, décret surtout). Elles ne constituaient pas une décision, puisqu'elles ne créaient pas de règle nouvelle

- les circulaires réglementaires : qui ajoutaient des éléments au texte qu'elles devaient seulement commenter et ainsi créaient des règles nouvelles.

8.2 Textes législatifs pour la protection de l'environnement

Les textes ci-après (Tableau.3) résument les efforts consentis par l'état algérien pour prévenir notre environnement.

Tableau.11 Textes juridiques relatifs à la protection de l'environnement en Algérie [37]

Références	Intitule	Observation
PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT EN GENERAL		
<i>Décret n° 85-231 du 25 Août 1985</i>	Fixant les conditions et modalités d'organisation et de mise en œuvre des interventions et secours en cas de catastrophes.	Elaboration du plan d'organisation des interventions et secours. Art 3
<i>Décret n° 85-232 du 25 Août 1985</i>	Relatif à la prévention des risques de catastrophes.	Création d'une cellule de prévention des risques. Art 8
<i>Décret n° 87-91 du 21 avril 1987</i>	Relatif à l'étude d'impact d'aménagement du territoire	Contenu de l'étude d'impact d'aménagement du territoire. Art 4
<i>Décret exécutif n° 93-68 du 01 mars 1993</i>	Relatif aux modalités d'application de la taxe sur les activités polluantes ou dangereuses pour l'environnement.	Répartition des coefficients multiplicateurs affectés aux activités polluantes Art 3.
<i>Loi n° 01-19 du 2 Décembre 2001</i>	Relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets	L'adoption et l'utilisation des techniques de production plus propres, moins génératrices de déchets, l'abstention de mettre sur le marché des produits générant des déchets non biodégradables, l'abstention d'utilisation de matières susceptibles de créer des risques pour les personnes,

		notamment pour la fabrication des emballages. Art 6
<i>Loi n° 03-10 du 19 juillet 2003</i>	Relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.	Eviter et réduire les pollutions atmosphériques. Art 45 Fournir des effluents conformes à la réglementation. Art 50
<i>Loi n° 04-20 du 25 décembre 2004</i>	Relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.	Elaboration d'un plan interne d'intervention définissant l'ensemble des mesures de prévention des risques. Art 62
<i>Décret exécutif n° 05-240 du 28 juin 2005</i>	Fixant les modalités de désignation des délégués pour l'environnement	Désigner un délégué pour l'environnement dans l'entreprise ou l'établissement. Art 1
<i>Décret exécutif n° 05-315 du 10 septembre 2005</i>	Fixant les modalités de déclaration des déchets spéciaux dangereux.	La déclaration des déchets spéciaux dangereux aux autorités concernées. Art 2
<i>Décret exécutif n° 05-444 du 14 novembre 2005</i>	Fixant les modalités d'attribution du prix national pour la protection de l'environnement	Promotion de l'Etat des actions pour la protection de l'environnement. Art 2
<i>Décret exécutif n° 06-104 du 28 février 2006</i>	Fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux	Codification et nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux. Art 2
<i>Décret exécutif n° 06-198 du 31 mai 2006</i>	Définissant la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement.	Avoir l'autorisation et déclaration d'exploitation des établissements classés, étude ou d'une notice d'impact sur l'environnement, étude de danger. Art 5 Réaliser l'audit environnemental. Art 45
<i>Décret exécutif n° 07-144 du 19 mai 2007</i>	Fixant la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.	Avoir l'autorisation d'exploitation des établissements classés à savoir, selon le cas l'étude d'impact sur l'environnement, l'étude de danger, la notice d'impact sur l'environnement et le rapport sur les produits dangereux Art 2
<i>Décret exécutif n° 07-145 du 19 mai 2007</i>	Déterminant le champ d'application, le contenu et les modalités d'approbation des études et des notices d'impact sur l'environnement.	Contenu des études et des notices d'impact sur l'environnement. Art 6
<i>Décret exécutif n° 08-312 du 05 Octobre 2008</i>	Fixant les conditions d'approbation des études d'impact sur l'environnement pour les activités relevant du domaine des hydrocarbures	L'étude d'impact sur l'environnement est introduite préalablement à toute activité hydrocarbures par le contractant ou opérateur concerné, ci-après désigné demandeur, auprès de l'autorité de régulation des hydrocarbures. Art 2

PROTECTION DE L'ATMOSPHERE		
<i>Décret exécutif n° 03-410 du 5 novembre 2003</i>	Fixant les seuils limites des émissions des fumées, des gaz toxiques et des bruits par les véhicules automobiles.	Seuils limites d'émission de polluants et du bruit par les véhicules automobiles. Art 3-5
<i>Décret exécutif n° 06-02 du 7 janvier 2006</i>	Définissant les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique.	Les valeurs limites et les objectifs de qualité de l'air. Art 6
<i>Décret exécutif n° 06-138 du 15 avril 2006</i>	Réglémentant l'émission dans l'atmosphère de gaz, fumées, vapeurs, particules liquides ou solides, ainsi que les conditions dans lesquelles s'exerce leur contrôle.	Les limites d'émissions des polluants. Art4 Avoir un registre de résultats d'analyse. Art 11
<i>Décret exécutif n° 07-207 du 30 juin 2007</i>	Réglémentant l'usage des substances qui appauvrissent la couche d'ozone, de leurs mélanges et des produits qui en contiennent.	La production et l'exportation, l'importation l'utilisation des substances réglementées sont interdites qu'à titre dérogatoire. Art 3 -7,10 et 11
<i>Décret exécutif n° 07-299 du 27 septembre 2007</i>	Fixant les modalités d'application de la taxe complémentaire sur la pollution atmosphérique d'origine industrielle.	La répartition des coefficients multiplicateurs affectés aux activités polluantes. Art 3

PROTECTION DE L'EAU		
<i>Ordonnance n° 76-80 du 23 octobre 1976</i>	Portant code maritime.	Toute introduction par déversement, rejet ou immersion de substances ou d'énergies polluantes dans le milieu marin est interdit dans les limites du domaine public maritime (sauf dérogation). Art 212 Tout déversement de substances polluantes en mer provenant d'installations industrielles, terrestres, ou maritimes, devra faire l'objet d'une autorisation. Art 215
<i>Décret n° 88-228 du 05 novembre 1989</i>	Définissant les conditions, procédures et modalité d'immersion de déchets susceptibles de polluer la mer, effectuées par les navires ou aéronefs.	Interdiction ou Autorisation et permis d'immersion des déchets. Art 4 et 5
<i>Loi n° 01-20 du 12 décembre 2001.</i>	Relative à l'aménagement et au développement durable du territoire.	La promotion d'un tissu industriel articulé autour d'activités structurantes peu consommatrices
<i>Loi n° 02-02 du 5 février 2002</i>	Relative à la protection et à la valorisation du littoral	Toute implantation d'activité industrielle nouvelle, est interdite sur le littoral -sont exclues de la présente disposition, les activités industrielles et portuaires d'importance nationale - . Art 15
<i>Loi n° 05-12 du 04 Août 2005</i>	Relative à l'eau.	Cette loi fixe les principes et les règles applicables pour l'utilisation, la gestion et le développement durable des ressources en eau en tant que bien de la collectivité nationale
<i>Décret exécutif n° 06-141 du 19 avril 2006</i>	Définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels	Les valeurs limites de rejets d'effluents liquides. Art 3.

Décret exécutif n° 06-351 du 5 octobre 2006	Fixant les conditions de réalisation des voies carrossables nouvelles parallèles au rivage.	Le projet de voie carrossable nouvelle doit être prévu par un instrument d'urbanisme dûment approuvé et, notamment, les plans d'aménagement et d'urbanisme, les plans d'aménagement côtier, les plans d'aménagement forestier et les plans d'aménagement touristique. Art 3
Décret exécutif n° 07-206 du 30 juin 2007	Fixant les conditions et les modalités de construction et d'occupation du sol sur la bande littorale, de l'occupation des parties naturelles bordant les plages et de l'extension de la zone objet de	Elaboration d'étude d'aménagement du littoral. Art 2
Décret exécutif n° 07-300 du 27 septembre 2007	Fixant les modalités d'application de la taxe complémentaire sur les eaux usées industrielles.	La répartition des coefficients multiplicateurs affectés aux activités polluantes. Art 3
Décret exécutif n° 07-399 du 23 décembre 2007	Relatif aux périmètres de protection qualitative des ressources en eau.	Réalisation d'une étude technique pour la création et de la délimitation des périmètres de protection qualitative. Art 7 La réglementation des activités à l'intérieur des périmètres de protection qualitative est constituée de mesures d'interdiction, de limitation des activités ou de protection des ressources en eau. Art 18

PROTECTION DU SOL

Décret exécutif n° 93-161 du 10 juillet 1993	Réglementant le déversement des huiles et lubrifiants dans le milieu naturel.	Interdiction de déversement des huiles et lubrifiant dans le milieu naturel sans autorisation (dérogation). Art 2- 4.
Décret exécutif n° 02-372 du 11 novembre 2002	Relatif aux déchets d'emballages	Le détenteur de déchets d'emballages est tenu: - Soit de pourvoir lui-même à la valorisation de ses déchets d'emballages; - Soit de confier la prise en charge de cette obligation à une entreprise agréée; - Soit d'adhérer au système public de reprise, de recyclage et de valorisation, créé à cet effet. Art 3
Décret exécutif n° 03-451 du 1er décembre 2003	Définissant les règles de sécurité applicables aux activités portant sur les matières et produits chimiques dangereux ainsi que les récipients de gaz sous pression.	Avoir l'agrément préalable pour les activités professionnelles portant principalement sur les matières et produits chimiques dangereux et l'autorisation de transport. Art 4 et Art 14
Décret exécutif n° 03-478 du 9 décembre 2003	Définissant les modalités de gestion des déchets d'activités de soins.	Tri des déchets. Art 6, 9,11 et 12 Stockage dans des conteneurs et entreposage dans des locaux de regroupements. Art 15 Incinération conforme et autorisée. Art 24 - 26
Décret exécutif n° 04-409 14 décembre 2004	Fixant les modalités de transport des déchets spéciaux dangereux.	Le transporteur des déchets spéciaux dangereux doit justifier d'un brevet professionnel attestant qu'il a suivi une formation en la matière. Art 10 Avoir l'autorisation de transport des déchets spéciaux dangereux et de documents de

		mouvement de cette catégorie de déchets. Art 13
Décret exécutif n° 04-410 du 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.	Avoir le document de mouvement et le certificat d'acceptation préalable pour les déchets spéciaux. Art 15
Décret Présidentiel n° 05-119 du 11 Avril 2005	Relatif à la gestion des déchets radioactifs.	Le rejet dans l'environnement de matière radioactive sous quelque forme qu'elle soit est soumis à autorisation préalable du commissariat à l'énergie atomique, après étude d'impact radiologique. Art7

UTILISATION DES RESSOURCES NATURELLES

Loi n° 84-12 du 23 mai 1984	Portant régime général des forêts	Aucun atelier à façonner le bois, chantier ou magasin pour faire le commerce du bois ou produits dérivés du bois ne peuvent être établis sans autorisation à moins de 500 m du domaine forestier national. Aucune unité dont l'activité peut être une source d'incendie ne peut être établis à l'intérieur et à moins de 1 km du domaine forestier national sans autorisation. Les constructions et travaux dans le domaine forestier national sont effectués après autorisation. Art 27-31
Loi n° 99-09 du 28 Juillet 1999	Relative à la maîtrise de l'énergie.	Voir le texte d'application (Décret exécutif n° 05-495 du 26 décembre 2005 cité ci-dessous).
Loi n° 01-11 du 03 juillet 2001	Relative à la pêche et à l'aquaculture	Art 13 La capture, l'élevage, la manutention, la transformation, la distribution et la commercialisation des produits de pêche et de l'aquaculture sont exercés dans le cadre de l'utilisation durable des ressources biologiques.
Décret exécutif n° 05-495 du 26 décembre 2005	Relatif à l'audit énergétique des établissements grands consommateurs d'énergie.	Les établissements assujettis au présent règlement doivent désigner chacun un responsable chargé de la gestion de l'énergie. Art 17 Tout établissement assujetti est tenu de faire effectuer périodiquement, par un bureau d'audit énergétique agréé un audit énergétique. Art 18
Loi n° 07-06 du 13 mai 2007	Relative à la gestion, à la protection et au développement des espaces verts.	Toute construction ou infrastructure devant être implantée à une distance inférieure à cent (100) mètres des limites d'un espace vert est interdite. Art 15 L'abattage d'arbres sans permis est interdit.

8.5 Rôle des collectivités locales dans la protection de l'environnement

8.4.1 Acteurs impliqués dans la gestion de l'environnement

La nature et la complexité des actions à entreprendre en matière de restauration/conservation des ressources de l'environnement exigent l'implication et la mobilisation d'acteurs aux différents niveaux (national, régional et local). Ceux-ci peuvent être regroupés en trois grandes catégories:

- les acteurs publics (Etat, collectivités décentralisées),
- les acteurs non gouvernementaux (populations, société civile) ;
- les partenaires au développement, avec lesquels l'état et les acteurs non gouvernementaux signent des conventions de financement.

a. Acteurs publics : L'Etat, à travers ses institutions et structures politiques, administratives et techniques, doit garantir les conditions de mise en œuvre et de contrôle de la politique nationale de protection de l'environnement. Pour la mise en œuvre proprement dite, il sera appuyé par des acteurs publics et privés, auxquels il pourra déléguer certains de ses pouvoirs. Les collectivités territoriales décentralisées auront un rôle important à jouer, en raison du transfert d'un certain nombre de compétences, en vertu des Lois n° 95-034 du 12/04/1995 et 96- 050 du 16/10/96, dont la gestion, l'aménagement, la conservation et la sauvegarde de l'équilibre écologique de leurs territoires. Elles ont, en outre, l'autorité en matière de mise en œuvre des activités de développement économique, social et culturel d'intérêt régional et local. A ce titre, elles doivent non seulement participer à la définition et à la mise en œuvre des politiques, mais aussi des stratégies et programmes d'action correspondants.

b. Acteurs non gouvernementaux : La mise en œuvre des programmes d'action élaborés en concertation avec les populations et la société civile repose en grande partie sur la mobilisation et l'implication des acteurs non gouvernementaux et de la société civile, parmi lesquels on peut distinguer les individus et associations et les ONG nationales.

- Individus et mouvements associatifs : la société civile, représentée par les individus et les associations (organisations paysannes, organisations socioprofessionnelles,...) ont un rôle très important à jouer dans la protection de l'environnement au niveau local.
- ONG nationales : ont comme la société civile un rôle très important à jouer. Selon leurs domaines d'intervention, elles permettront d'appuyer les initiatives locales ou la mise en œuvre de certains aspects des programmes élaborés pour la protection de

l'environnement et que les individus et mouvements associatifs ne peuvent assumer seuls.

c. Partenaires au développement

Compte tenu de l'ampleur des besoins en matière de protection et gestion de l'environnement, et du fait de la faiblesse des capacités financières au niveau national (Etat, Collectivités décentralisées, populations, ONG nationales,...), il apparaît évident que les partenaires au développement (bailleurs de fonds/agences de coopération bi- ou multilatéraux, ONG internationales,...) continueront à être fortement sollicités.

8.4.2 Les collectivités locales et les compétences en matière d'environnement.

Les Communes : les communes sont en possession des compétences majeures en matière d'environnement. En plus du pouvoir de salubrité publique propre au maire, les communes sont chargées de l'approvisionnement en eau potable, de l'assainissement des eaux usées, de la collecte et du traitement des déchets, de la lutte contre la pollution de l'air et de la mise en valeur du littoral ainsi la protection des forêts et l'entretien des espaces verts.

- Gestion collecte et traitement des déchets
- Assainissement et Approvisionnement en Eau (distribution publique) l'entretien et l'exploitation des cours d'eau,
- Transports publics : afin de limiter la pollution aux horaires pendulaires,
- Espaces naturels : réaliser les inventaires du patrimoine naturel a sous sa responsabilité les parcs naturels régionaux et les réserves naturelles
- Urbanisme : schémas de cohérence écologique pour les futures trames vertes et bleues,

L'élimination des déchets industriels et spéciaux : Les politiques publiques doivent promouvoir un développement durable et, à cet effet, concilier la protection et la mise en valeur de l'environnement, le développement économique et le progrès social. Les moyens de lutte contre la pollution des eaux douces : pour dépolluer les fleuves, les rivières et les lacs et protéger les nappes phréatiques, les collectivités locales ont mis en place des stations d'épuration et développé des réseaux de collecte des eaux usées. Les moyens de lutte contre la pollution marine : contrôle la qualité des eaux littorales au large des côtes.

Les obligations en matière d'information sur la qualité de l'eau potable : Les communes doivent rendre publiques les données transmises par les préfets concernant la qualité de l'eau distribuée.

L'élimination des déchets : Les communes organisent l'élimination des déchets ménagers, ordures ménagères, déchets encombrants, déchets d'espaces verts, déchets dangereux (piles et accumulateurs, peintures et solvants, huiles de vidange, etc.).

L'élimination des produits électriques et électroniques : les équipements électriques et électroniques ne peuvent plus être mis à la poubelle avec les ordures ménagères.

8.6 Rôle du citoyen dans la protection de l'environnement

Le citoyen est une personne qui a, vis-à-vis de la collectivité dans laquelle il vit, à la fois des devoirs et des droits: il doit respecter des règles d'utilité commune, mais il participe à l'élaboration de ces règles. Cette combinaison de droits et de devoirs vaut aussi en matière d'environnement.

- L'environnement est de plus en plus considéré comme un patrimoine à protéger, c'est-à-dire comme une forme de droit : droit pour tous de profiter d'un cadre de vie préservé et d'un environnement sain, droit pour les générations futures d'en hériter sans qu'il ait été dégradé. Ce droit s'accompagne donc de responsabilités pour chacun d'entre nous. L'environnement n'est pas uniquement menacé par les abus de quelques personnes, mais par les effets d'un mode de vie et de développement économique dont nous profitons tous.
- Une attitude citoyenne vis-à-vis de l'environnement ne se limite donc pas à réclamer des règles pour le sauvegarder. Elle consiste aussi à modifier ses propres comportements. Ainsi, la plupart des règles de protection de l'environnement seront-elles sans effet si les citoyens ne prennent pas en charge leur mise en œuvre. Pour exemple le cas concret du traitement des déchets, qui prévoit la disparition des décharges actuelles. La nouvelle filière de traitement mise en place, beaucoup plus respectueuse de l'environnement que l'ancienne, exige un tri sélectif des déchets. Ce geste simple (jeter ses ordures dans des poubelles différentes selon leur nature, aller à la déchetterie dans certains cas) incombe aux citoyens : c'est une question de sens civique.
- Il en est de même en matière d'économies d'énergie, indispensables en particulier pour lutter contre le changement climatique (effet de serre). Les États signataires du traité appelé protocole de Kyoto ont pris l'engagement de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre, mais l'adoption d'un mode de vie moins consommateur en énergie reste, souvent, un choix individuel. Les États multiplient donc les incitations en direction des citoyens (campagnes d'information, avantages fiscaux si l'on s'équipe d'un chauffage moins polluant etc.).

8.6 Le rôle de l'opinion publique

- Agir en citoyen pour le respect de l'environnement, c'est aussi agir **ensemble**. La prise en compte des problèmes écologiques s'est faite, depuis 1960, en grande partie sous la pression de l'opinion publique et d'abord d'associations qui se sont consacrées à la défense de cette cause. Aujourd'hui encore, ces associations sont au centre de débats aussi divers que :
 - le débat international sur les risques de changement du climat sous l'effet des activités humaines et les évolutions nécessaires, dans l'industrie et la production d'énergie, pour les prévenir ;
 - le débat national sur l'utilité et les dangers de l'énergie nucléaire ;
 - les débats locaux, en général à l'échelle de la commune, sur l'aménagement du cadre de vie.

- Mais l'action collective des citoyens ne s'adresse pas seulement aux autorités politiques. De plus en plus, elle passe par les comportements de consommation, par l'acte d'achat, pour conduire l'industrie et l'agriculture à prendre davantage en compte les équilibres écologiques dans leur mode de production : acheter en priorité les produits qui ont été fabriqués en dégradant le moins possible l'environnement. Après des campagnes de boycott, cette démarche a pris un caractère moins contestataire : ce sont aujourd'hui les producteurs eux-mêmes, en tout cas en Europe et en Amérique du Nord, qui cherchent à valoriser leurs produits en faisant de la protection de l'environnement un argument de publicité. Tout ne peut cependant pas se passer seulement entre le producteur et le consommateur : l'État doit aussi intervenir en fixant et en faisant respecter des règles qui empêchent la publicité, en ce domaine, d'être mensongère.

Conclusion générale

L'abondance de la littérature scientifique est telle que le lecteur doit déployer un effort laborieux pour pouvoir cerner ce sujet si complexe. D'où la motivation de l'auteur d'entreposer entre les mains de nos étudiants le présent support de cours dont l'objectif est de faire le point sur les différents aspects de la problématique sans prétention d'exhaustivité.

Dans ce développement, l'intérêt était porté particulièrement sur la circonscription des principaux aspects de la pollution en mettant l'accent sur l'identification des sources et la nature des polluants, leurs comportements dans les différents compartiments (air, sol et eau) ainsi que le mécanisme de leur transfert et leurs impacts sur les écosystèmes.

En effet, la complexité du problème de la pollution anthropique paraît prendre ses sources dans un ensemble complexe où se mêlent les besoins de la population, les pressions économiques, les choix techniques et les intérêts politiques.

Depuis quelques années des efforts considérables ont été consentis mais plus dans la prise de conscience que dans les actions concrètes. Mais les résultats réels, sont plus lents que souhaités et prévus. La pollution de l'eau par les rejets industriels ou urbains est en recul notable et la superficie des espaces protégés augmente. Par contre la pollution d'origine agricole se développe de plus en plus. L'avenir reste sombre car presque tous les indicateurs de la qualité écologique sont au rouge et la plupart semblent devoir se dégrader (détérioration des sols, pollutions des nappes phréatiques, croissance de la quantité des déchets et dissémination des points noirs de pollution).

Il est à craindre qu'à cette allure, notre siècle léguera aux générations futures beaucoup de problèmes non résolus ou traités concernant les milieux naturels ou les infrastructures : déchets nucléaires et toxiques non ou mal éliminés, métaux lourds et pollutions chimiques (pesticides, engrais azotés) emmagasinés dans les sols, dans les sédiments ou dans les océans, bâtiments à « désamianter », plates-formes pétrolières ou centrales nucléaires à démanteler, gaz à effet de serre accumulés dans la haute atmosphère, biodiversité appauvris et sols érodés par une exploitation trop intensive, espaces et paysages artificialisés, friches agricoles, industrielles ou urbaines.

En conséquence, nous en arrivons à la conclusion que seule une approche intégrée de la gestion du capital naturel pourrait permettre de parvenir à des avantages socio-économiques et écologiques optimaux à travers la mise en œuvre des exigences dictées par les accords des assises dédiées au développement durable ratifiés par notre pays.

Références bibliographiques

- [1] WHA (2015) Health and the environment: addressing the health impact of air pollution
- [2] Guy Landrieu (1994) Les impacts des énergies fossiles sur l'environnement HAL id ineris- 34p
- [3] B. Commoner (1972) The closing circle: Confronting the environmental crisis. Londres, Jonathan cape.
- [4] Ramanathan V., Crutzen P. J., Leleieveld J., et al. (2001) « Indian ocean experiment : an integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze », J. Geophys. Res., 106, p. 371-398.
- [5] G.castany (1998) " Hydrogeologie :Principe et méthodes " Dunod. 236p.
- [6] F.Ramade (2022). Eléments d'écologie Ecologie appliquée : Action de l'homme sur la biosphère, Dunod 800p.
- [7] Bryant J., Burke L., Mcmanus J., Spalding M., (1998) Reefs at risk : a map based indicators of threats to the world coral reefs. Washington, WRI-UNEP .1998.
- [8] Hunt. EG, Bischoff A.I. (1960); Inimical effects wildlife periodic DDD applications Clear Lake. California Fish Game 46, 1, 91- 105pp.
- [9] Robinson J., (1967) Residues of dieldrin in the british environment. In Abstr. 6* Cong. Int. Prot. Végétaux, Vienne.
- [10] Risebrough R.W., (1971) « Chlorinated hydrocarbons». In /mpingment of man on the ocean, Hood (ed), New York, Wiley intersciencePub., pp 259-286.
- [11] Shaw R.W. et Munn RE. (1971). « Air pollution meteorology ». In /ntroduction to the scientific study of atmospheric pollution,McCormac B.M., Dordrecht, Riedel Ed .pp 51-96.
- [12]Organisation mondiale de la sante (OMS) https://www.who.int/fr/health-topics/air-pollution#tab=tab_1.
- [13] COLEACP manuel de formation gestion durable de l'air (2020) 164.p
- [14] *Rapport SECTEN* (2022): Contexte, définition et cadre réglementaire. *Citepa*, 33p
- [15] J.-C. Dalphin et al. (2016) : La pollution atmosphérique et ses effets sur la santé respiratoire. Document d'experts du groupe pathologies pulmonaires professionnelles environnementales et iatrogéniques (PAPPEI) de la Société de pneumologie de langue française, Revue des Maladies Respiratoires 33, pp 484-508.
- [16] Cherchar.I (2021) *Pollution du sol* Département de pharmacie 7p
- [17] Lévêque, C. (1996) : Les écosystèmes aquatiques. Ed. Hachette, Paris. 159p
- [18] Synthèse association santé et environnement.(2010) : Pollution de l'eau. Origines et impacts 7p
- [19] F. Cambi, Méthodes et instruments d'échantillonnage et d'analyse dans l'étude de la pollution

- [20] R. Salghi, Analyses physicochimiques II : chromatographie, ENSA Agadir de l'air, Milan(Italie)
- [21] Professeur Jean-Louis CUQ, Chromatographie liquide, Université Montpellier 2
- [22] Dr. Martyna Kuske, Dr Jacques Nicolas, Les pollutions dans l'air à l'intérieur des bâtiments, Diagnostic Incidences sur la santé
- [23] Ecole des Mines de Saint-Etienne, Méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation : analyse des gaz
- [24] Organisation mondiale de la sante, (1976) Choix de méthodes pour la mesure des polluants de l'air, WHO Offset Publication N0 24
- [25] I. Zdanevitch Veille, (2000) technologique capteurs de gaz, INERIS DRC - 00-23446- AIRE - rap567-3.doc-IZd, Décembre
- [26] Genin B., Chauvin C., Menard F. (2003). Cours d'eau et indices biologiques: pollution, méthodes, IBGN. 2^{ème}Ed. Educagri . 220 p.
- [27] Markert BA, Breure AM, Zechmeister HG. (2003). Chapter 1 definitions, strategies and principles for bioindication/biomonitoring of the environment. Trace Metals Other Contam Environ. 6 pp 3–39.
- [28] Kaiser, J. (2001). Bioindicators and Biomarkers of Environmental Pollution and Risk Assessment (Enfield: Sciences publishers inc.).
- [29] Landres, P.B., Verner, J. and Thomas, J.W. (1988). Ecological uses of vertebrate indicator species: a critique. Conservation Biology, 2: 316-328.
- [30] Lagadic, L., Caquet, T., Amiard, J.-C. et Ramade, F. (1997).- Biomarqueurs en écotoxicologie - Aspects fondamentaux. Masson, Paris
- [31] Boucheseiche *et al.*, (2002) Boucheseiche C., Cremille E., Pelte T., Pojer K., 2002. Bassin Rhône - Méditerranée - Corse. Guide technique n°7, Pollution toxique et écotoxicologie : notion de base. Lyon, Agence de l'Eau Rhône - Méditerranée - Corse, p. 83
- [32] Ebert D. (2005). Ecology, Epidemiology and Evolution of Parasitism in Daphnia (S Paliwoda, Ed.).
- [33] Forbes EE, Dahl RE. (2005) Neural systems of positive affect: Relevance to understanding child and adolescent depression? Development and Psychopathology.;17:827–850.
- [34] Mouvet, C. (1986). Métaux lourds et mousses aquatiques, synthèse méthodologique. Rapport des Agences de l'Eau Rhône Méditerranée Corse et Rhin Meuse: 110pp
- [35] A. Ramdane. (2011) : La politique de protection de l'environnement en Algérie: Réalisations et échecs. Revue des Oasis Recherche et études, Université de Ouargla pp1-16.
- [36] D. Hamiti (2022) : L'intervention de l'Etat Algérien pour la prise en charge des problèmes environnementaux, Revue El kistas en Management- Economie et Finance pp160 – 175.
- [37] <https://www.joradp.dz/HAR/Index.htm>

Résumé

D'origine naturelle, domestique, industrielle ou agricole, la pollution des écosystèmes naturels est le résultat de l'introduction de substances polluantes extérieures dans le biotope. La dégradation de la santé humaine et le déclin de la biodiversité en sont les conséquences les plus dramatiques de ce fléau anthropogène.

Le contenu développé, met l'accent sur la nature des sources de pollutions et l'identification des substances polluantes aussi bien qualitativement que quantitativement par des méthodes d'analyse bien élaborées dans ce contexte.

Comprendre le comportement des substances polluantes, leurs implications écologiques ainsi que leurs mécanismes de dispersion dans la biosphère permet d'appréhender cette problématique qui ne cesse de prendre de l'ampleur.

D'autre part, l'engagement de l'état dans le domaine environnemental s'est concrétisé par la promulgation d'une panoplie de lois et de réglementations en matière de protection de l'environnement à la hauteur des menaces susceptibles d'être engendrées.

Mots clés : pollution, écosystèmes, dégradation, biodiversité, anthropogène.

Abstract

Whether of natural, domestic, industrial or agricultural origin, the pollution of natural ecosystems is the result of the introduction of external pollutants into the biotope. Deteriorating human health and declining biodiversity are the most dramatic consequences of this anthropogenic scourge.

The content developed highlights the nature of the sources of pollution and the identification of polluting substances both qualitatively and quantitatively by well-developed analytical methods in this context.

Understanding the behavior of polluting substances, their ecological implications and their dispersal mechanisms in the biosphere makes it possible to tackle this ever-growing problem.

On the other hand, the state's commitment to the environment has been reflected in the enactment of an array of environmental protection laws and regulations commensurate with the potential threats.

Key words: pollution, ecosystems, degradation, biodiversity, anthropogenic

ملخص

سواء كان من أصل طبيعي أو محلي أو صناعي أو زراعي، فإن تلوث النظم الإيكولوجية الطبيعية هو نتيجة لإدخال الملوثات الخارجية إلى الموطن الحيوي. إن تدهور صحة الإنسان وتناقص التنوع البيولوجي هما أكثر العواقب مأساوية لهذه الآفة البشرية المنشأ.

وقد أبرز المحتوى الذي تم تطويره طبيعة مصادر التلوث وتحديد المواد الملوثة نوعيا وكميا من خلال أساليب تحليلية متطورة في هذا السياق.

إن فهم سلوك المواد الملوثة وآثارها الإيكولوجية وآليات انتشارها في المحيط الحيوي يجعل من الممكن التصدي لهذه المشكلة المتزايدة ومن ناحية أخرى، انعكس التزام الدولة تجاه البيئة في سن مجموعة من قوانين وأنظمة حماية البيئة التي تتناسب مع التهديدات المحتملة .

الكلمات المفتاحية:

التلوث، النظم الإيكولوجية، تدهور، التنوع البيولوجي، البشرية المنشأ.