

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université 8 mai 1945 Guelma



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie des Procédés

Polycopié
Cours 3^{ème} Année Génie des procédés
Pollution Air, Eau, Sol

Dr. MERABET Noura

Année 2020

Avant-propos

Ce polycopié de cours est réalisé conformément au programme officiel du module « Pollution Air, Eau, Sol »

Il est destinée et enseigné aux étudiants de troisième année licence en génie des procédés. Le cours vise à donner aux étudiants une vision scientifique et multidisciplinaire relativement large des problèmes de pollution de notre environnement. La pollution est l'ensemble des rejets de composés toxiques libérés par l'homme dans le milieu récepteur (continental, océanique et atmosphérique). Certaines substances libérées sont d'origine naturelle mais présentent un danger pour les organismes et perturbent l'équilibre général de l'environnement. L'objectif du cours est d'initier les étudiants à une approche scientifiquement rigoureuse et critique de remédiation à l'environnement. A travers cette discipline le lecteur pourra acquérir une culture générale dans le domaine de la pollution de l'environnement, décrire, expliquer et prédire le comportement de la pollution de l'air, de l'eau et du sol dans les systèmes environnementaux.

Le présent manuel est rédigé sous forme de trois chapitres. Dans le premier nous présentons le concept environnement et le développement durable, les principaux polluants de l'air leur effet sur l'organisme et leur conséquences ; effet de serre, smog photochimique et trou d'ozone. Le deuxième chapitre traite le problème de la pollution des eaux à travers les mécanismes et les symptômes de leur pollution et décrit quelques méthodes de prévention.

En fin le troisième chapitre donne d'une manière implicite une base en sciences du sol, il décrit d'une manière explicite les différents polluants des sols et les techniques de décontamination des sites pollués.

Table des matières

Avant-propos

Chapitre I : Pollution de l'Air

I.1. Environnement	1
I.2. Pollution de l'environnement	1
I.2.1. Définition de la pollution	1
I.2.2. Origines des polluants et principaux éléments.	1
I.3. Développement durable:	3
I.3.1. Le développement durable depuis 1972	3
I.3.2. L'écologie, l'économie et le social:	3
I.3.3. Le principe de précaution comme principe d'action	4
I.3.4. Agir pour préserver l'environnement:	4
I.4. Consommation d'énergie primaires et émission de CO ₂	4
I.4.1. Consommation d'énergie primaire	4
I.4.2. Propriétés de CO ₂	5
I.4.3. Emission de dioxyde de carbone	6
I.5. Notions fondamentales de l'atmosphère et des paramètres météorologiques	8
I.5.1. Importance de l'atmosphère	8
I.5.2. Paramètres météorologiques	9
I.5.2.1. Humidité	9
I.5.2.2. Pression	9
I.5.2.3. Température	9
I.5.2.4. Vent	10
I.6. Evolution de la qualité de l'air et effet sur les organismes	10
I.6.1. Composition de L'air)	10
I.6.2. Evolution de la qualité de l'air	11
I.6.3. Effet de La pollution de l'air sur les organismes	12
I.7. Polluants chimiques	12
I.7.1. Différents types de polluants	13
I.7.1.1. Polluants surveillés	13
I.7.1.2. Les composés organiques volatiles (COV)	13
I.7.1.3. Les Produits Organiques Persistants (POP)	13
I.7.1.4. Les métaux lourds	14
I.7.1.5. Les particules	14
I.7.1.6. Ozone (O ₃)	14
I.8. Pollution par (NO ₂)	15
I.9. Quelques conséquences de la pollution de l'air	15
I.9.1. effet de serre :	15
I.9.2. Smog photochimique	16
I.9.3. Le trou d'ozone:	17

Chapitre II : Pollution des Eaux

II.1. Introduction	20
II.2. Le cycle de l'eau (cycle hydrolytique)	20
II.3. Source et quantité d'eau	21
II.4. Mesure de qualité des eaux	22
II.4.1. Qualité organoleptique	22
II.4.1.1. Couleur	22
II.4.1.2. Odeur	22
II.4.1.3. Saveur	22

II.4.2. Qualités physico-chimiques :	22
II.4.2.1. Température	22
II.4.2.2. Potentiel d'hydrogène pH	22
II.4.2.3. Turbidité	22
II.4.2.4. Résidu sec	22
II.4.2.5. Conductivité électrique	22
II.4.2.6. Dureté	23
II.4.2.7. Fer	23
II.4.2.8. Magnésium	23
II.4.2.9. Calcium	23
II.4.2.10. Sodium	23
II.4.2.11. Sulfates	23
II.4.2.12. Chlorures	23
II.4.2.13. Nitrates	24
II.4.2.14. Nitrites	24
II.4.2.15. Phosphates	24
II.4.2.16. Matières organiques	24
II.4.3. Qualité bactériologiques	24
II.4.3.1. Germes totaux à 37°C	24
II.4.3.2. Coliformes totaux	24
II.4.3.3. Coliformes Thermo-tolérants	25
II.4.3.4. Streptocoques fécaux (37°C)	25
II.5. Mécanisme et symptôme de la pollution des eaux courantes et des lacs	26
II.5.1. Introduction	26
II.5.2. Pollution selon le mode de répartition géographique	26
II.5.2.1. Les pollutions diffuses :	26
II.5.2.2. Les pollutions ponctuelles	27
II.5.3. Classification selon le type de polluant	27
II.5.3.1. Pollution physique	27
➤ Pollution mécanique	27
➤ Pollution thermique	27
➤ Pollution radioactive	28
II.5.3.2. Pollution chimique	28
➤ Pollution organique.	28
❖ Les détergents :	28
❖ Les pesticides :	28
❖ Les hydrocarbures :	28
➤ Pollution minérale.	28
❖ Les métaux lourds	28
❖ Les éléments minéraux nutritifs	29
II.5.3.3. La pollution microbiologique	29
➤ Les bactéries	29
➤ Les virus	29
➤ Les protozoaires	29
II.5.4. Classification selon l'origine de la pollution	29
II.5.4.1. Pollution domestique	29
II.5.4.2. Pollution urbaine	29
II.5.4.3. Pollution agricole	30
II.5.4.4. Pollution industrielle	30
II.5.4.5. Pollution par les eaux pluviales	30

II.6. Influence de la pollution des eaux sur les êtres vivants	30
II.6.1. Introduction	30
II.6.2. Maladies hydriques	31
II.6.2.1. Poliomyélite	31
II.6.2.2. Méningite	31
II.6.2.3. Choléra	31
II.6.2.4. Maladies de mains sales	31
II.6.2.5. Fièvre typhoïde	31
II.6.2.6. Hépatite A et E	31
I.7. Oxygénation et désoxygénation :	31
I.8. Eutrophisation des eaux :	32
II.9. Notion sur le traitement et l'épuration des eaux usées :	32
II.9.1. Introduction	32
II.9.2. Epuration mécanique	33
II.9.2.1. Dégrillage et tamisage :	33
II.9.2.2. Dessablage	33
II.9.2.3. Déshuilage	33
II.9.2.4. Décantation et flottation	33
II.9.3. Traitements biologiques	34
II.9.4. Epuration chimique	35
II.9.4.1. Rejet de l'eau épurée dans le milieu naturel	35
II.9.4.2. Séchage des boues	35
II.9.5. Les traitements complémentaires : azote, phosphore, désinfection	35
II.9.5.1. Élimination de l'azote	35
1. Nitrification	35
2. Dénitrification	35
II.9.5.2. Éliminations du phosphore "déphosphatation"	35
II.9.5.3. Désinfection	36
II.10. Prévention de la pollution des eaux :	36
1. Réaliser une épuration des eaux avant leur rejet direct	36
2. Réduire les risques de pollution accidentelle	36
3. Gestion agricole adaptée	36
4. Éviter les transferts aux milieux aquatiques	36
5. Réduire l'usage de substances dangereuses	36
6. Protéger les captages d'eau	37
7. Utiliser les détergents et les lessives écologiques	37

Chapitre III : Pollution des Sols

III.1. Bases en sciences du sol	39
III.1.1. Introduction	39
III.1.2. Observation du sol sur le terrain	39
III.1.2.1. Structure	40
III.1.2.2. Couleur	40
III.1.2.3. Texture	40
III.1.3. Les facteurs qui influent sur la formation du sol	40
III.1.3.1. La roche mère	40
III.1.3.2. La végétation	40
III.1.3.3. Le climat	41
III.1.3.4. Le temps	41
III.1.4. Les constituants des sols	41
III.1.4.1. Les constituants minéraux (matières minérales solides)	41

III.1.4.2. Les constituants organiques	41
III.1.4.3. Le gaz	41
III.1.4.4. La solution du sol	41
III.1.5. Les fonctions du sol	41
III.1.5.1. Fonction alimentaire	41
III.1.5.2. Fonction biologique	41
III.1.5.3. Fonction filtre et stockage	42
III.1.5.4. Fonction matériau	42
III.2. Causes et conséquences de la dégradation /pollution des sols	42
III.2.1. Généralités sur polluants présents dans les sols.	42
III.2.2. Polluants organiques	43
III.2.2.1. Classification	43
III.2.2.2. Dérivés pétroliers et BTEX	43
III.2.2.3. Solvants chlorés	44
III.2.2.4. Phénols et autres substances organiques	44
III.2.2.5. HAP, PCB, furanes et dioxines	44
III.2.2.6. Pesticides	45
III.2.3. Les éléments traces	45
Les alcalins	46
Les alcalino-terreux	46
Les métalloïdes	46
Les familles du scandium et du titane	46
Les métaux lourds	46
Les terres rares ou lanthanides	46
III.3. Comportement des éléments traces dans le sol.	47
III.4. Comportement des polluants organiques dans le sol	47
III.4.1. Sorption	47
III.4.2. Dégradation dans le sol	48
III.5. Analyse des risques et législations.	48
III.6. Techniques de décontamination et étude de cas	49
III.6.1. Procédés in-situ	49
III.6.1.1. Procédés microbiologiques	50
III.6.1.2. Procédés d'immobilisation	51
III.6.2. Procédés ex-situ	51
III.6.2.1 Procédés thermique	51
 Bibliographie	 52

CHAPITRE I
POLLUTION DE L'AIR

I.1. Environnement

De nos jours, l'environnement est une notion qui est utilisée sous différents aspects, souvent, l'environnement se rapporte à ce qui vit, c'est-à-dire aux hommes, aux animaux, aux plantes et aux microorganismes. Ces espèces vivantes dépendent les unes des autres et de leur milieu. L'environnement est donc l'ensemble de toutes les influences directes et indirectes exercées sur l'être vivant et de ses relations avec le reste du monde. Au sens les plus larges, à côté de l'environnement naturel, les environnements sociaux et intellectuels (économique, politique, social, industriel, culturel, etc.) en font également partie ; dans la suite le concept d'environnement sera utilisé dans son sens restreint.

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

- Influences dues à des facteurs abiotiques, sans vie, et biotiques, vivants,
- Influences climatiques, chimiques ou mécaniques,
- Influences naturelles et anthropogéniques, provoquées par l'homme, etc.

Souvent, on parle de biosphère (du grec bios, vie ; du latin sphaira, sphère, globe terrestre) à la place d'environnement et on pense alors à l'ensemble des zones de la terre peuplées des organismes vivants, êtres vivants, animaux, plantes et microorganismes (Figure I.1).

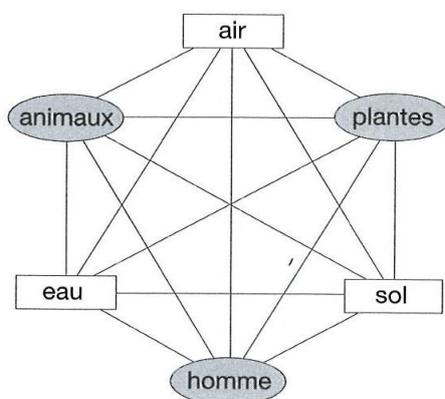


Figure I.1. Interactions entre l'homme et l'environnement (schéma simplifié)

I.2. Pollution de l'environnement

I.2.1. Définition de la pollution

C'est l'ensemble des rejets de composés toxiques libérés par l'homme dans le milieu récepteur (continental, océanique et atmosphérique). Certaines substances libérées sont d'origine naturelle mais présentent un danger pour les organismes et perturbent l'équilibre général de l'environnement.

I.2.2. Origines des polluants et principaux éléments.

Les trois causes principales de pollution sont :

- La production et la consommation des combustibles fossiles
- Les activités dues aux diverses industries chimiques
- Les activités agricoles (engrais et pesticide)

Il n'existe en fait qu'un nombre restreint de substances – inertes - introduites par l'homme dans l'environnement et n'ayant aucune action sur la biosphère. Tout élément ou composé chimique est pratiquement susceptible de devenir un polluant. On peut les classer selon différents critères (nature chimique, compartiment contaminé, source d'émission et organismes cibles.

Les principaux polluants sont indiqués dans le (tableau I.1).

Tableau I.1. Les principaux polluants de l'environnement

Symbole	Désignation	Description
SO ₂	Dioxyde de soufre	Résulte de la combustion du charbon et des fuels
NO _x	Les n oxyde d'azote	Gaz émis par les installations de combustion et les véhicules automobiles
CO	Le monoxyde de carbone	Produit essentiellement par les véhicules à moteur à explosion
CO ₂	Dioxyde de carbone	Le produit naturel de toute combustion responsable en majeure partie de l'effet de serre. Le reste étant dû au méthane et aux chlorofluorocarbure
	Hydrocarbure	Résultat de la combustion incomplète des carburants dans les moteurs qui génère des vapeurs d'hydrocarbure. C'est aussi le fruit de l'utilisation de certains solvants
HCl	Acide chlorhydrique	Il est présent dans l'atmosphère quand il y a combustion des PVC ou PCV9
Poussières	Particules	Solides ou en suspension dans l'air et constituent des polluants non gazeux
O ₃	Ozone	C'est un polluant secondaire, résultant de l'action du rayonnement solaire sur les divers polluants, augmentant par conséquent la présence la présence d'ozone dans l'air jusqu'à l'atteinte de teneurs toxiques
CH ₄	Méthane	C'est le principal composé organique volatile responsable de l'accentuation de l'effet de serre
CFC	Chlorofluorocarbure	Polluants les plus impliqués dans la dégradation de la couche d'ozone
	Pesticides	Sont des substances permettant de détruire les ravageurs des cultures, ils sont constitués d'une substance active et d'un adjuvant
	Métaux lourds	Plomb, Cadmium, Arsenic, Mercure
	Radio éléments	Est un élément chimique dont tous les isotopes connus sont des radio-isotopes.

I.3. Développement durable:

I.3.1. Le développement durable depuis 1972:

Les dates qui ont marqué l'évolution de la notion du développement durable sont les suivantes:

1972 : Le rapport de Meadows (club de Rome), ce rapport a permis de tirer une première conclusion:

"Le maintien d'un rythme de croissance économique et démographique, présente des menaces graves sur l'état de la planète et donc sur la survie de l'espèce humaine. Seul un état d'équilibre avec le maintien d'un niveau constant de la population et du capital permettrait d'éviter la catastrophe qui guette l'humanité (théorie de la croissance0)"

1972 : Première conférence internationale sur l'environnement humain à Stockholm (sous l'égide des nations unies). la déclaration de cette conférence est:

"Rien ne justifiait un conflit entre les nations développées et l'environnement que l'appui donné à une action en faveur de l'environnement, ne devait pas servir de prétexte pour fournir le développement"

La conclusion tirée était de proposer un modèle de développement économique compatible avec l'équité sociale et la prudence écologique. Ce modèle a été nommé le modèle " écodéveloppement "

1983 : Mise en place par les nations unies d'une Commission Mondiale pour L'environnement et le Développement (CMED)

1987 : Le rapport de Brundtland intitulé "notre avenir à tous". Dans ce rapport, on a désigné la pauvreté croissante au sud et la croissance économique soutenue du nord comme principales causes de la dégradation de l'environnement à l'échelle planétaire....)

1992 : La conférence de Rio. Dans cette conférence, Il a été tiré la conclusion suivante: *"à une diversité de situations et de cultures, doit correspondre la diversité des formes de développement"*

Après ces dates clés, la notion du développement durable a été traitée dans plusieurs manifestations, congrès et symposium internationaux. La définition de cette notion n'est plus l'ordre du jour mais plutôt les solutions à présenter pour éviter les catastrophes possibles et préserver l'environnement.

I.3.2. L'écologie, l'économie et le social:

Ces trois éléments sont considérés comme les piliers du développement durable. La préservation de l'environnement est envisagée sur le long terme. Par contre, la satisfaction des besoins sociaux est souvent considérée à court terme. Enfin, le réalisme économique, doit être concilié avec les deux autres éléments et surtout géré dans un cadre de globalité. La différence

dans les axes temporels, ainsi que de la nature de ces pôles fait que le compromis entre les trois est difficile à trouver.

I.3.3. Le principe de précaution comme principe d'action

Le sommet de la terre à Rio (1992):

"Il ne faut pas attendre le stade des certitudes scientifiques pour commencer à prendre des mesures en vue de prévenir des risques menaçant l'environnement planétaire"

Le principe de précaution est apparu, dans le domaine de l'environnement, comme une reconnaissance de l'incertitude scientifique. Cette dernière accompagne les innovations technologiques ainsi que leurs conséquences dans le moyen et le long terme. En effet, le développement technologique a des effets indésirables et souvent imprévisibles. Citons à titre d'exemples, les effets des pesticides organochlorés, ceux des gaz à effet de serre. Les nouvelles technologies sont par conséquent, incapables à différents degrés, de maîtriser les risques de ces nouvelles technologies.

I.3.4. Agir pour préserver l'environnement:

Pour les environnementaux, les plus *radicaux*, il s'agit de ne plus perturber la nature. *Pour les grandes entreprises*, c'est une continuation plus ou moins finie de leur développement. *Pour certains*, le développement est la lutte contre la pauvreté et les inégalités. Il faut reconnaître que les besoins des pauvres sont des besoins immédiats, à assouvir immédiatement.

I.4. Consommation d'énergie primaires et émission de CO₂

I.4.1. Consommation d'énergie primaire

Sous le terme de sources d'énergies primaires on entend l'ensemble des composés se trouvant dans la nature à l'état brut, dont on peut extraire de l'énergie ; c'est le cas des sources d'énergie naturelles comme les combustibles fossiles, charbon et lignite, pétrole, gaz naturel, tourbe, schistes bitumineux. Parmi les sources d'énergie, on compte aussi les combustibles nucléaires comme l'uranium ainsi que les sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire et l'énergie géothermique l'énergie hydraulique, éolienne et la biomasse.

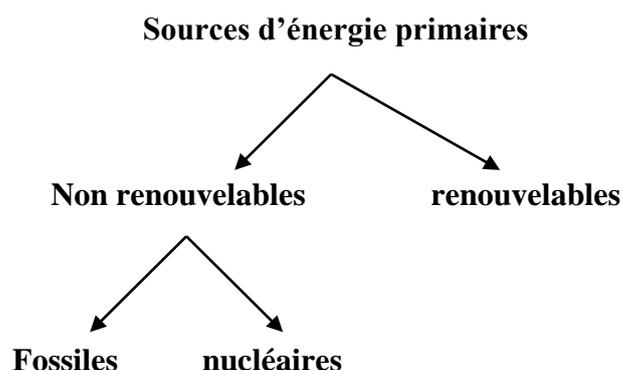


Figure I.2. Sources d'énergie primaires

Comme le plus souvent ces sources d'énergie primaires ne peuvent pas être utilisées telles quelles pour des raisons techniques, elles sont en grande partie transformées en sources d'énergie secondaires, par exemple en essence et en fioul (à partir du pétrole) ou en énergie électrique (à partir du charbon ou d'énergie hydraulique).

Plus un pays est civilisé et plus son industrie est développée, plus ses besoins en énergie, à des fins de consommation, sont importants (81 millions d'allemands utilisent 1,5 fois plus de charbon, de pétrole et de gaz que 930 millions d'indiens).

Parallèlement à la consommation en énergies primaires et par suite en combustibles fossiles, les émissions en dioxyde de carbone augmentent de manière exponentielle.

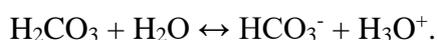
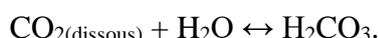
I.4.2. Propriétés de CO₂

Le dioxyde de carbone (CO₂) est un gaz incolore, incombustible inodore (CO₂, sublime à pression atmosphérique à 78.5 °C). Il est soluble dans l'eau (tableau I.2) ;

Tableau I.2 : Solubilité du dioxyde de carbone dans l'eau en fonction de la température

Température en °C	Solubilité (en ml/l)
0	1710
10	1190
20	880
25	757
60	270

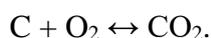
Le CO₂ dissous réagit avec l'eau selon



Avec des bases fortes, par exemple avec les anions O₂⁻ de nombreux oxydes, CO₂ réagit en formant des carbonates, par exemple :



A chaque combustion de carbone et de composés contenant de carbone plusieurs réactions ont lieu :



De plus, lors des processus de combustion, la réaction de CO₂ avec du charbon ardent, appelée l'équilibre de BOUDOUARD Joue un rôle ;



En effet cet équilibre est déplacé vers la droite à hautes températures (tableau I.3), ce qui contribue aussi à la formation de CO.

Tableau I.3. Composition du mélange gazeux d'après l'équilibre de BOUDOUARD pour différentes températures. ϕ rapport volumique

Température en °C	ϕ (CO ₂) (en %)	ϕ (CO) (en %)
450	98	2
600	77	23
700	42,3	57,7
800	6	94
1000	0,70	99,30

Parmi les composés participant au cycle naturel du carbone CO₂ est le plus stable énergétiquement ; c'est pourquoi il occupe une position clé. Le CO₂ est particulièrement résistant à la température, A 2000 °C, moins de 10 % de molécule de CO₂ sont fragmentées selon :



Quotidiennement, l'homme expire en moyenne plus de 700 g (> 350 l) de CO₂ ; la proportion volumique du CO₂ de l'air expiré est d'environ 4,0 % (tableau I.4).

CO₂ n'est pas véritablement toxique. Par inspiration, l'homme tolère jusqu'à 2,5 % de CO₂ en volume, des heures durant, sans grands dommages. CO₂ exerce un fort impact sur le centre respiratoire : la respiration s'accélère et devient plus profonde ; pour cette raison, l'oxygène utilisé pour des opérations de réanimation contient parfois 5 % de CO₂.

Pour des rapports volumiques de 8 à 10 %, des maux de tête se déclarent, ainsi que des vertiges ; on observe une augmentation de la pression artérielle et des comportements agités. Un taux supérieur à 10 + de CO₂ dans l'air respiré conduit à des évanouissements, à des convulsions, et à des défaillances du système circulatoire sanguin. Pour des rapports volumique > 15 %, des paralysies, similaires à des ruptures d'anévrisme, apparaissent ; des rapports de 20 % sont mortels.

Tableau I.4. Air respiré (rapport volumique, en %)

	O ₂	CO ₂
Inspiré	20,946	0,0367
Expiré	15,80	4,00

I.4.3. Emission de dioxyde de carbone

Comme ressources en CO₂, l'atmosphère de la terre contient à peu près 2,35 10¹² T de CO₂, les océans en contenant environ 1,30 10¹⁴ T (au-delà de 50 fois plus)

Les émissions de dioxyde de carbone s'élèvent mondialement à environ 850 10⁹ t par an. Sur ce chiffre, environ 50 % proviennent de la respiration et de la décomposition biologique. La combustion des combustibles fossiles et les brûlis ne constituent qu'à peu près 2 à 4,5 % (tableau I.5) (On évalue les émissions de CO₂ provenant des termites aux environs de 50 10⁹

t/a ; elles correspondent à peu près au double de toutes les émissions anthropogéniques réunies !).

Tableau I.5 : Emissions globales de dioxyde de carbone

Source	Quantité (en 10^9 t/a)
Respiration, décomposition biologique	370 ... 520
Mers	300 ... 450
Combustion de combustibles fossiles, brûlis	20 ... 30

La faible contribution de la combustion émanant des combustibles fossiles – mesurée pour l'ensemble des émissions entre cependant pour beaucoup dans l'élévation du taux de CO_2 dans l'atmosphère. Mondialement, presque 80 % des énergies primaires produites, sont couvertes par les sources d'énergies fossiles. Le reste provient de l'énergie hydraulique, de l'énergie nucléaire et d'autres sources d'énergie

Avec 9,84 milliards de tonnes de CO_2 émises en 2018, la Chine est de loin le premier émetteur de CO_2 , devant les États-Unis et l'Inde. Par comparaison l'Algérie a émet 165,332 Million tonnes en la même année. (La figure I.3) représente les émissions de CO_2 par pays en millions de tonnes.

World fossil carbon dioxide emission 1970-2018

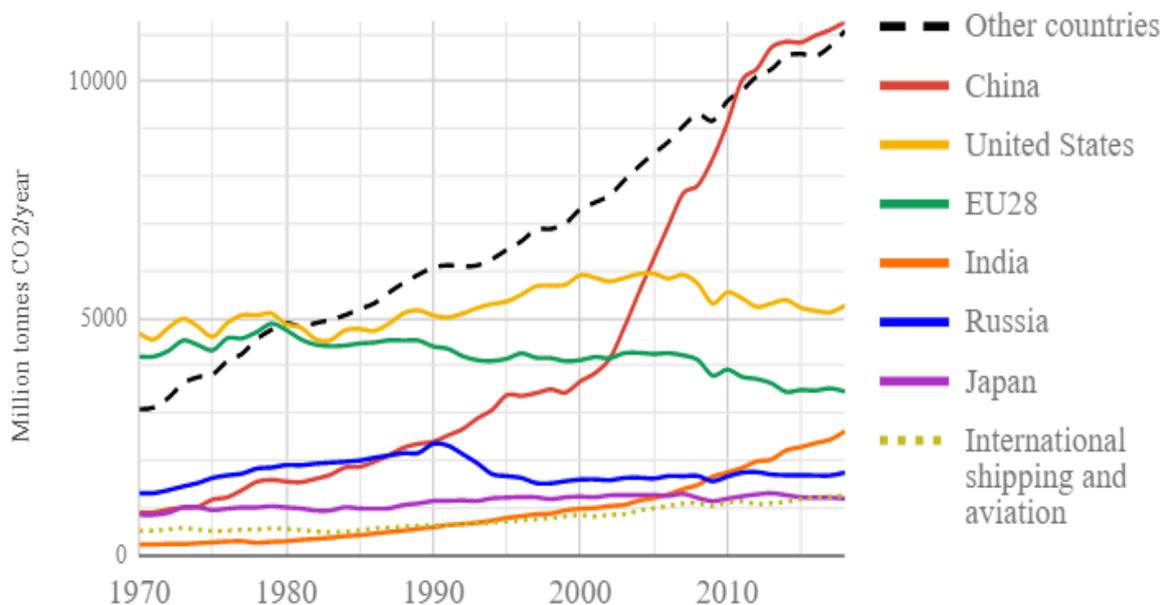


Figure I.3. Evolution des émissions de CO_2 à travers le monde en millions tonnes.

I.5. Notions fondamentales de l'atmosphère et des paramètres météorologiques

I.5.1. Importance de l'atmosphère

Sous le terme atmosphère (du grec *atmos*, vapeur, fumée ; du latin *sphaira*, boule, globe terrestre) on entend la couche constituée de gaz d'une portion du ciel ; on parle en particulier de l'atmosphère de la terre.

- **L'atmosphère** : subdivisée depuis le sol en *troposphère*, là où se manifeste la vie, où se trouvent les principaux processus concernant les fluctuations du temps, la *stratosphère*, la *mésosphère* et la *thermosphère* qui est la couche la plus élevée. (figure I.4)

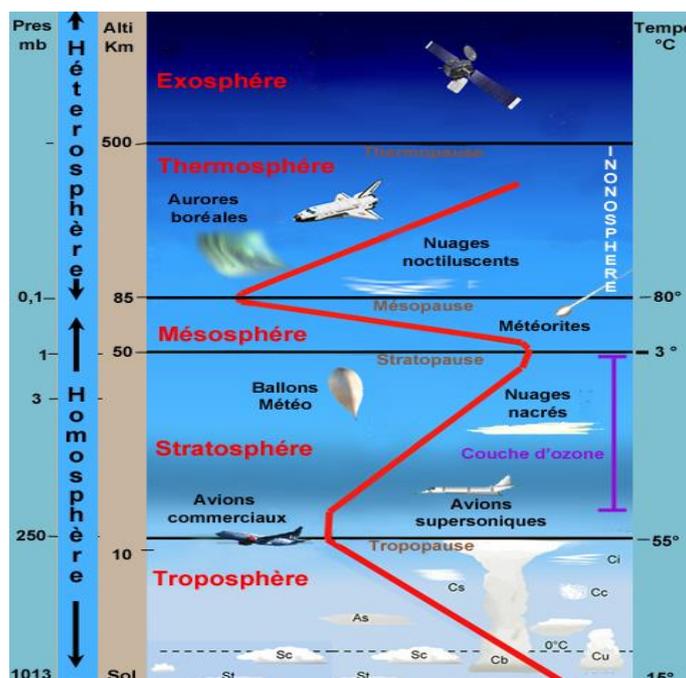


Figure I.4. Atmosphère de la terre

Les autres enveloppes de la terre sont :

- La lithosphère, son épaisseur moyenne est de 100 km couvrant la surface de la terre
- L'hydrosphère : son épaisseur moyenne est de 3800 m. Elle est formée essentiellement par l'eau liquide des océans (+97%), des glaciers, des calottes polaires, de l'eau de l'atmosphère, du sol, des fleuves, des nappes phréatiques, etc.
- La biosphère : ce sont les êtres vivants qui occupent une mince pellicule à l'interface entre la lithosphère et l'atmosphère.

Les variations survenant dans l'atmosphère sont d'une plus grande importance, pour l'environnement, que dans les domaines de l'eau ou des sols :

- L'atmosphère est le compartiment le plus important pour le transport des polluants. Les gaz et les liquides, mais les solides, par exemple les particules, sont également transportés par l'air.

- La masse de l'atmosphère est bien plus petite que celle des autres grands réservoirs tels que les sols ou l'ensemble des cours d'eau et des océans ; c'est pourquoi ce compartiment est particulièrement sensible aux petites quantités de substances, comme celles qui apparaissent par exemple lors des éruptions volcaniques ou à la suite activités humaines.
- Les périodes, pendant lesquelles la composition se modifie de manière sensible avec l'apport de polluants, sont particulièrement courtes pour l'atmosphère.

I.5.2. Paramètres météorologiques

Parmi les paramètres météorologiques on cite :

I.5.2.1. Humidité

Représente la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air. A une température donnée, l'air ne peut contenir qu'une certaine quantité de vapeur d'eau, qui correspond à un seuil. Quand ce seuil est atteint, on dit que l'air est saturé. Au-delà de ce seuil, l'excédent de vapeur d'eau se transforme en eau liquide. La teneur en vapeur d'eau de l'air n'est pas constante d'un point à un autre du globe et ne l'est pas non plus en un point donné au cours du temps. Cette teneur est régie par le mécanisme du cycle de l'eau. On définit une échelle de valeurs pour l'humidité dont les limites correspondent d'une part à l'absence de vapeur d'eau dans l'atmosphère (ce qui n'est rigoureusement jamais réalisé) affectée de la valeur 0% et d'autre part à la saturation, représentée par la valeur 100%.

I.5.2.2. Pression

Tout corps plongé dans un fluide, est soumis à une pression dont l'effet est perpendiculaire à la surface. La pression est une force par unité de surface. En météorologie, la pression est exprimée en hectopascals (hPa) ou en millibars (mb), unités équivalentes au poids d'une masse de 10,2 kg sur une surface d'un mètre carré.

L'atmosphère, composée de gaz, est maintenue autour de la Terre grâce à la gravitation. L'air subit la force d'attraction terrestre. Il a un poids qui se répartit sur la surface de la Terre: c'est la pression atmosphérique, Ainsi l'atmosphère exerce une pression sur la Terre et sur tout corps qui s'y trouve.

I.5.2.3. Température

Dans l'air, il existe des particules d'eau aux propriétés physiques différentes ; si bien que lorsque 2 particules d'eau se rencontrent, il y a interaction ce qui entraîne des échanges d'énergie très importants qui donnent naissance à la température. Ces transferts d'énergie peuvent avoir lieu grâce à la conduction : transfert de la chaleur d'un point à un autre sans que les propriétés physiques de la particule d'air soient modifiées. La température se mesure, soit en degré Celsius noté °C, soit en degré Kelvin noté K tel que :

$$T (\text{Kelvin}) = T (\text{Celsius}) + 273,15 \text{ K.}$$

I.5.2.4. Vent

Il s'agit de la direction d'où il vient. Par exemple un vent du Nord souffle du Nord vers le Sud. La direction est déterminée grâce à l'allure de la manche à air ou de manière plus précise à l'aide d'une girouette, en général graduée de 20 en 20 ° à partir du Nord. Ainsi, un vent à 180° est un vent du Sud. Un vent à 40° est un vent du Nord-Est. La direction du vent est approximativement parallèle aux lignes isobares (courbes qui relient les points de même pression). Plus le vent est fort plus ce parallélisme est vérifié. A partir d'une carte donnant les isobares on peut donc déterminer la direction du vent en tout point

I.6. Evolution de la qualité de l'air et effet sur les organismes

I.6.1. Composition de L'air)

L'air c'est un élément de grande importance : l'homme ne peut vivre plus de cinq minutes sans air. (Soit environ 13,5 kg), qu'un homme respire quotidiennement.

L'air n'est jamais propre ou pur, dans le sens où il ne contiendrait que de l'azote, de l'oxygène, du gaz carbonique, de l'eau et des gaz rares (tableau I.7). Déjà avant l'existence des hommes, l'atmosphère contenait des composés, que nous décrivons aujourd'hui comme des polluants de l'air. De tels polluants naturels provenaient par exemple de l'activité volcanique et de la végétation ou résultaient des feux de forêt.

Tableau I.7 : Composition de l'atmosphère sèche au voisinage de la surface terrestre

Composé	Formule	Proportion volumique
Azote	N ₂	78,084 %
Oxygène	O ₂	20,946 %
Argon	Ar	0,934 %
Dioxyde de carbone	CO ₂	367 ppm ^{b)}
Néon	Ne	18,18 ppm
Hélium	He	5,24 ppm ^{c)}
Méthane	CH ₄	1,7 ... 1,8 ppm
Krypton	Kr	1,14 ppm
Dihydrogène	H ₂	0,5 ppm
Oxyde nitrique	N ₂ O	0,3 ppm ^{d)}
Xénon	Xe	87 ppb
Monoxyde de carbone ^{a)}	CO	30 ... 250 ppb
Ozone ^{a)}	O ₃	10 ... 100 ppb
Dioxyde d'azote	NO ₂	10 ... 100 ppb
Monoxyde d'azote	NO	5 ... 100 ppb
Dioxyde de soufre	SO ₂	< 1 ... 50 ppb
Ammoniac	NH ₃	0,1 ... 1 ppb
Formaldéhyde	HCHO	0,1 ... 1 ppb
Chlorométhane	CH ₃ Cl	620 ppt

Tétrachlorométhane	CCl ₄	100 ... 200 ppt
Acide nitrique ^{a)}	HNO ₃	50 ... 1000 ppt
Hexafluorure de soufre	SF ₆	0,5 ppt
Peroxyde d'hydrogène	H ₂ O ₂	≤ 5 ppt
Sulfure d'hydrogène	H ₂ S	≤ 0,5 ppt

^{a)} Gaz mineur avec des concentrations volumiques fluctuantes.

^{b)} Progression relative actuellement : 0,3 à 0,6 % par an.

^{c)} Progression relative actuellement : 1,0 % par an.

^{d)} Progression relative actuellement environ 0,2 à 0,3 % par an.

ppm : (partie par million), égal à 10⁻⁶ : 1 ppm = 1 mg/kg ;

ppb : *part per billion* (partie par milliard), égal à 10⁻⁹ : 1 ppb = 1 µg/kg ;

ppt : *part per trillion* (partie par billion), égal à 10⁻¹² : 1 ppt = 1 ng/kg ;

Les principaux constituants de l'air sont l'azote, N₂ (teneur volumique 78,084 %), et l'oxygène, O₂ (20,946 %) ; l'argon avec 0,934 % est un constituant secondaire. Ces trois éléments constituent ensemble une concentration volumique de 99,964 % ; les autres éléments avec une teneur volumique inférieure à 0,04 % constituent les gaz mineurs : le dioxyde de carbone, CO₂, avec une teneur d'environ 370 ppm occupe le premier rang.

La composition de l'atmosphère n'est pas la même en tous les points ni au cours du temps ; elle peut dépendre de nombreux facteurs, entre autre :

- De l'altitude (exemple : la répartition verticale des CFC).
- De la latitude (exemple : la répartition horizontale du CO₂).
- De la période prise en compte au cours d'une journée (exemple : les variations de la teneur volumique en ozone au cours d'une journée).
- Du domaine concerné (exemple : la mer par rapport au continent, la ville par rapport à la campagne).

Malgré leur faible concentration, quelques gaz mineurs peuvent avoir des effets significatifs sur l'environnement.

I.6.2. Evolution de la qualité de l'air

Souvent on détermine des zones d'après la qualité de l'air qu'elles contiennent. Sous le terme de zones polluées, celles qui contiennent les principales sources de pollution atmosphérique, qu'elles soient de nature urbaine ou industrielle. Sous le terme de zones non polluées on englobe les zones rurales, qui sont plus ou moins éloignées des sources principales. (figure I.5).

Les régions qui se trouvent très éloignées des sources d'émission, on parle de zones à air pur. Chaque pollution de telles zones est le résultat d'un transport « naturel » par le vent, la pluie, la neige ou les poussières.

A proximité de la terre, la composition de l'atmosphère varie fortement entre différentes zones polluées, par exemple entre les villes et les zones rurales. L'excès de pollution provient

principalement de la circulation des véhicules, des émissions liées aux sources d'énergie ; et de l'industrie.

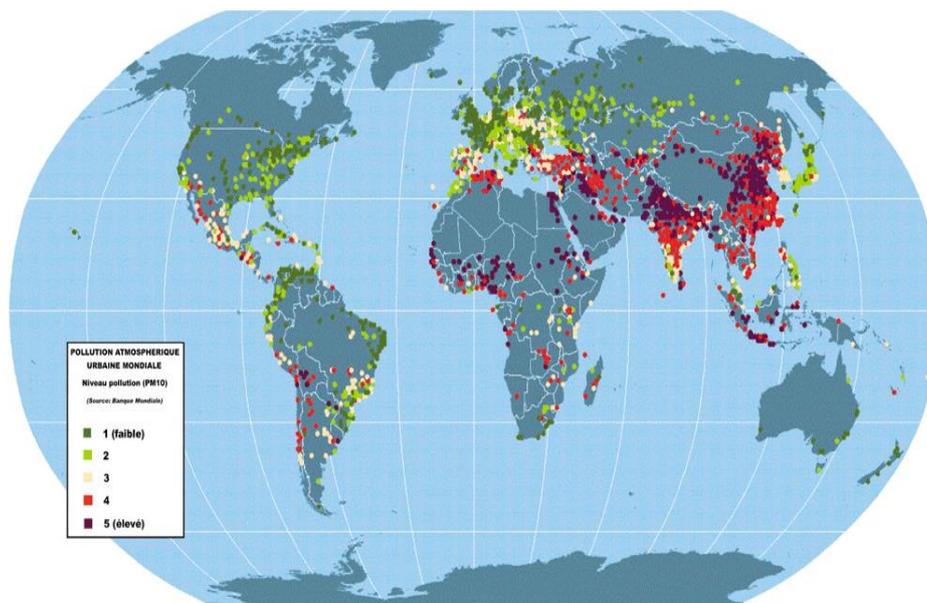


Figure I.5. Pollution Atmosphérique Urbaine Mondiale

I.6.3. Effet de La pollution de l'air sur les organismes

La pollution de l'air est un ensemble de gaz nocifs à l'homme et aux animaux ; parmi ces gaz, nous retrouvons en grande quantité le dioxyde de carbone (CO_2), le diazote (N_2) plus d'autres gaz.

Le phénomène de pollution de l'air a pris aujourd'hui une ampleur sans précédent : il n'affecte plus notre atmosphère terrestre de manière localisée, mais au contraire génère des changements à l'échelle de la terre entière. Les principaux facteurs recensés sont les particules solides et liquides dans l'air, chargées de sulfates, nitrates, ammonium, composés organiques et métaux lourds. Cette pollution Porte atteinte à la santé des organismes (animaux et des hommes) ... Plus de 75000 cas de décès par an, causés par des maladies pulmonaires, cardio-vasculaires ou vasculaires cérébrales sont enregistrés en Chine.....

I.7. Polluants chimiques

Il existe deux familles de polluants chimiques:

- Des polluants dits « primaires », qui sont émis directement : monoxyde d'azote, dioxyde de soufre, monoxyde de carbone, poussières, métaux lourds, composés organiques volatils, hydrocarbures aromatiques polycycliques ;
- Des polluants dits « secondaires », issus de transformations physico-chimiques de gaz sous l'effet de conditions météorologiques particulières : ozone, dioxyde d'azote, certaines particules, etc.

I.7.1. Différents types de polluants

I.7.1.1. Polluants surveillés

Les polluants réglementés par le code de l'environnement et les directives européennes 2004/107/CE et 2008/50/CE :

- Dioxyde de soufre (SO₂) ;
- Oxydes d'azote (NO_x), dont dioxyde d'azote (NO₂) ;
- Ozone (O₃) ;
- Particules (PM₁₀ et PM_{2,5}) ;
- Monoxyde de carbone (CO) ;
- Benzène (C₆H₆) ;
- Plomb (Pb), arsenic (As), cadmium (Cd), nickel (Ni), mercure (Hg) ;
- Hydrocarbures aromatiques polycycliques 6 (HAP).

I.7.1.2. Les composés organiques volatiles (COV)

Les COV regroupent une multitude de substances Les hydrocarbures. Il est fréquent de distinguer séparément le méthane (CH₄) qui est un COV particulier, naturellement présent dans l'air, des autres COV pour lesquels on emploie alors la notation COVNM (Composés Organiques Volatils Non Méthaniques).

Les émissions des COV sont dues à certains procédés industriels impliquant la mise en œuvre de solvants (chimie de base et chimie fine, parachimie, dégraissage des métaux, application de peinture, imprimerie, colles et adhésifs,

On peut distinguer différentes familles de COV :

- Les alcanes (saturés, abondants, par exemple propane)
- Les alcènes (liaison doubles, très réactifs)
- Les diènes et les terpènes (multiples doubles liaisons)
- Les aromatiques mono ou polycycliques (assez abondants et réactifs, par exemple, benzène, toluène ...)
- Les composés oxygénés (aldéhydes, cétones, esters, alcool ...).
- Les hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP (cancérogènes)

I.7.1.3. Les Produits Organiques Persistants (POP)

Il existe douze composés organiques toxiques à basse concentration. Ce sont des résidus industriels souvent toxiques, mutagènes et cancérogènes, qui interfèrent avec notre système hormonal et sexuel. La liste la plus communément admise est la suivante : Trichloroéthylène (TRI), Trichloroéthane (TCE), Tetrachloroéthylène (PER), Dioxines et furanes (Diox), Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), Polychlorobiphényles (PCB) et Hexachlorobenzène (HCB). Ils sont semi-volatiles et circulent plus ou moins bien dans l'air, en fonction de la température

I.7.1.4. Les métaux lourds

Les métaux lourds désignent en général les métaux dont le poids atomique est supérieur à celui du fer. Les « métaux lourds » d'un point de vue purement chimique, sont les éléments de la classification périodique formant des cations en solution ce sont des métaux. D'un point de vue physique, le terme « métaux lourds » désigne les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes (environ 65 éléments), caractérisés par une forte masse volumique supérieure à 5 g.cm^{-3} . D'un autre point de vue biologique, on en distingue deux types en fonction de leurs effets physiologiques et toxiques : *métaux essentiels* et *métaux toxiques*.

Les métaux essentiels sont des éléments indispensables à l'état de trace pour de nombreux processus cellulaires et qui se trouvent en proportion très faible dans les tissus biologiques Certains peuvent devenir toxiques lorsque la concentration dépasse un certain seuil. C'est le cas du cuivre (Cu), du nickel (Ni), du zinc (Zn), du fer (Fe).

Les métaux toxiques ont un caractère polluant avec des effets toxiques pour les organismes vivants même à faible concentration. Ils n'ont aucun effet bénéfique connu pour la cellule. C'est le cas du plomb (Pb), du mercure (Hg), du cadmium (Cd). Le terme métaux lourds implique aussi une notion de toxicité. Le terme « éléments traces métalliques » est aussi utilisé pour décrire ces mêmes éléments, car ils se retrouvent souvent en très faible quantité dans l'environnement

I.7.1.5. Les particules

La composition chimique des particules est également un paramètre très important pour les études de pollutions atmosphériques, elle regroupe une variété importante de substances. Le terme de particules désigne en général la fraction des composants (liquides ou solides) en suspension dans le milieu gazeux. Souvent, les particules sont classées en fonction de leur granulométrie : Particules en suspension (TSP) : masse totale de particules.

- **PM 10** : masse des particules dont le diamètre aérodynamique moyen est inférieur à $10 \mu\text{m}$.
 - **PM 2,5** : masse des particules dont le diamètre aérodynamique moyen est inférieur à $2,5 \mu\text{m}$.
 - **PM 1,0** : masse des particules dont le diamètre aérodynamique moyen est inférieur à $1 \mu\text{m}$.
 - * **Ultrafines** : particules dont le diamètre aérodynamique moyen est inférieur à $0,1 \mu\text{m}$.
 - * **Nanoparticules** : particules de diamètre aérodynamique moyen inférieur à $0,05$ ou $0,03 \mu\text{m}$.
- Certains, comme le cadmium, l'arsenic, le nickel et le chrome hexavalent sont cancérogènes.

I.7.1.6. Ozone (O₃)

L'ozone (O₃) est un gaz indispensable à la vie terrestre. Naturellement présent dans l'atmosphère, il forme une couche dans la stratosphère (de 12 à 50 km au-dessus du sol), qui protège des rayons ultraviolets (plus de 97 % des rayons ultraviolets sont interceptés par cette couche). Dans les basses couches de l'atmosphère (troposphère, de 0 à 12 km au-dessus du sol), l'ozone est en revanche un polluant atmosphérique nocif pour la santé humaine, les animaux et les végétaux, à cause de son caractère oxydant.

L'ozone est un polluant secondaire, résultant de transformations photo-chimiques complexes entre certains polluants comme les oxydes d'azote (NO_x), le monoxyde de carbone et les composés organiques volatils (COV). Il est irritant pour l'appareil respiratoire et les yeux et s'associe à l'augmentation du taux de mortalité durant les épisodes de pollution. Il affecte les végétaux et réduit le rendement des cultures par une perturbation de la photosynthèse. Il contribue à l'effet de serre.

I.8. Pollution par (NO₂)

Les oxydes d'azote (NO_x) regroupent le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂). Ils sont émis lors de la combustion (chauffage, production d'électricité, moteurs thermiques des véhicules...). La chimie de l'azote (fabrication de nitrate d'ammonium...) ou l'utilisation de produits nitrés dans les procédés industriels (verrière...) sont également des émetteurs. Enfin, l'utilisation des engrais azotés entraîne des rejets de NO_x. Les émissions d'origine humaine peuvent localement devenir très largement prépondérantes.

Les volcans et les éclairs sont aussi susceptibles de créer les conditions favorables à la formation d'oxydes d'azote. De même, les sols naturels secs peuvent émettre du monoxyde d'azote au cours du processus biologique de transformation de l'azote du sol.

Une fois dans l'air, le monoxyde d'azote (NO) devient du dioxyde d'azote (NO₂).

Le NO₂ est un gaz oxydant puissant, qui pénètre facilement dans les poumons. A des concentrations dépassant 200 µg/m³ sur de courtes périodes, il provoque des irritations et des inflammations de l'appareil respiratoire et une augmentation de l'hyperréactivité bronchique chez les asthmatiques.

Les NO_x sont également précurseurs d'autres polluants : dans certaines conditions climatiques et d'ensoleillement, ils réagissent avec certains polluants selon des processus physico-chimiques complexes intervenant dans l'atmosphère. Ils réagissent en particulier avec les composés organiques volatils (COV) pour conduire à la formation d'ozone (O₃) troposphérique ou avec l'ammoniac (NH₃) pour conduire à la formation de particules secondaires.

Les principaux effets sur l'environnement des NO_x sont :

- L'acidification des milieux, qui peut influencer de façon importante les milieux aquatiques ;
- L'eutrophisation (apport excédentaire d'azote dans les milieux naturels et notamment les sols voir chapitre II) qui conduit à une réduction de la biodiversité.

I.9. Quelques conséquences de la pollution de l'air

I.9.1. Effet de serre

L'effet de serre, est un effet naturel, à l'origine, bénéfique à la vie humaine puisqu'il permettait à l'eau de rester dans l'état liquide et minimisait le risque de glaciation. Il s'agit des gaz contenus à l'état de trace dans l'atmosphère qui sont principalement (vapeur d'eau, CO₂, méthane, composés sulfurés et composés azotés). L'augmentation de la concentration en

Gaz à Effet de Serre (GES) dans l'atmosphère, due à l'activité humaine conduit à la présence d'effet de serre ADDITIONNEL. Pour évaluer la croissance rapide des (GES), il suffit d'observer la croissance actuelle des éléments qui le constituent :

L'effet de serre additionnel a pour effet un réchauffement global de la planète. Depuis 1990, la planète a connu une hausse globale de sa température, passant de 0,3 à 0,7°C en 20 ans. Le groupement Intergouvernemental d'Etude du Climat GIEC annonce une augmentation moyenne de la température allant de 1,4 à 5,8°C de la température moyenne du globe. Cette augmentation n'est pas uniforme bien au contraire, on va assister à des événements extrêmes (tempête, cyclone, canicule, sécheresse, coup de froid, etc.). Le cycle de l'eau va être modifié ce qui conduira à une sécheresse accrue dans certaines zones ; inondation et crues dans d'autres. Ils préconisent certains déséquilibres si la température augmente de 2,5° d'ici la fin de ce 21 siècle : • Augmentation moyenne de 65cm des niveaux marins (inondation et disparition de certaines zones côtières • Fonte de 50% des glaciers mondiaux • Changement dans les débits des rivières et les niveaux des lacs • Augmentation générale des températures et des précipitations, favorisant le développement des maladies et des parasites.

I.9.2. Smog photochimique

Le smog est une pollution provenant de « smoke », fumée, et de « fog », brouillard. En 1952 Londres se trouva plongée dans ce brouillard acide formé dans les conditions du smog : dans l'atmosphère, SO_2 est oxydé en acide sulfurique, H_2SO_4 , pour ce type de smog issu de dioxyde de soufre/acide sulfurique et de fumée, on parle de smog Londonien, également de smog d'hiver, parce qu'il se forme principalement en hiver.

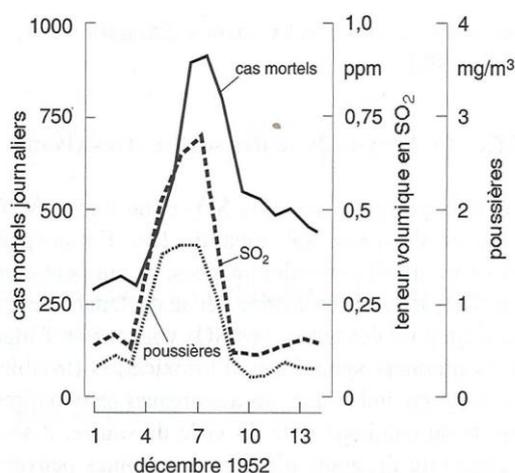


Figure I.4. Catastrophe du smog Londonien (1952)

On connaît une autre sorte de smog : le smog photochimique (appelé aussi smog d'été ou smog de Los Angeles). Les photo-oxydants (O_3 , NO_x , OH , H_2O_2 , HNO_3 ... etc.) sont les composés les plus importants de ce smog, qui, pour cette raison, réagissent de manière oxydante, contrairement au smog de Londres qui a des propriétés réductrices.

Pour qu'un smog photochimique puisse apparaître, d'un point de vue chimique, il faut que :

- Des hydrocarbures et/ou du monoxyde de carbone et ;
- Des oxydes d'azote, NO_x ,

Soient présents simultanément, en plus des conditions d'inversion et du rayonnement solaire. Les émissions de l'industrie pétrochimique peuvent aussi être à l'origine de ce smog. La circulation des véhicules est le fournisseur principal des hydrocarbures et des oxydes d'azote.

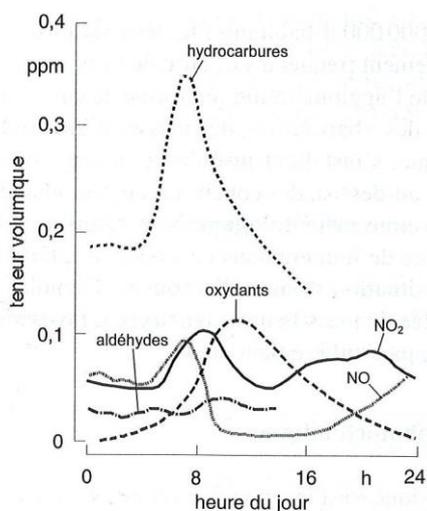


Figure I.5. Teneurs en NO , NO_2 , hydrocarbures, aldéhydes et oxydants dans le smog photochimique mesurés réalisées dans les années 50 ; Los Angeles

Lors d'une circulation particulièrement dense, la teneur en NO_x est élevée : dans ce cas, lors de la décomposition de CO , il se forme principalement de l'ozone (voir branche gauche du schéma réactionnel).

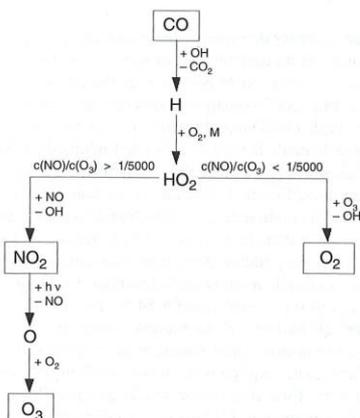


Figure I.6. Destruction de CO dans la troposphère.

I.9.3. Le trou d'ozone

Se trouvant à près de 90% dans la stratosphère, la couche d'ozone se trouve entre 15 et 40 km d'altitude. Il s'agit d'un dérivé de l'oxygène qui joue un rôle important pour la biosphère en absorbant une partie du rayonnement solaire ultra-violet et en éliminant les courtes longueurs d'onde comprises entre 240 et 300 nanomètres. Ces rayonnements et ces ondes sont reconnus à l'origine de maladies cancérigènes et mutagènes, susceptible de détruire les cellules

vivantes. En 1985, on découvre un trou dans l'ozone d'une surface supérieure à celle des Etats Unis d'Amérique au-dessus du pôle sud. Les premiers accusés dans l'apparition de ce trou sont les CFC (Chlorofluorocarbure), gaz très utilisé dans l'industrie avant 1987, remplacé par le HCFC (Hydro chlorofluorocarbure) moins nocifs. La chine continue à produire des CFC.

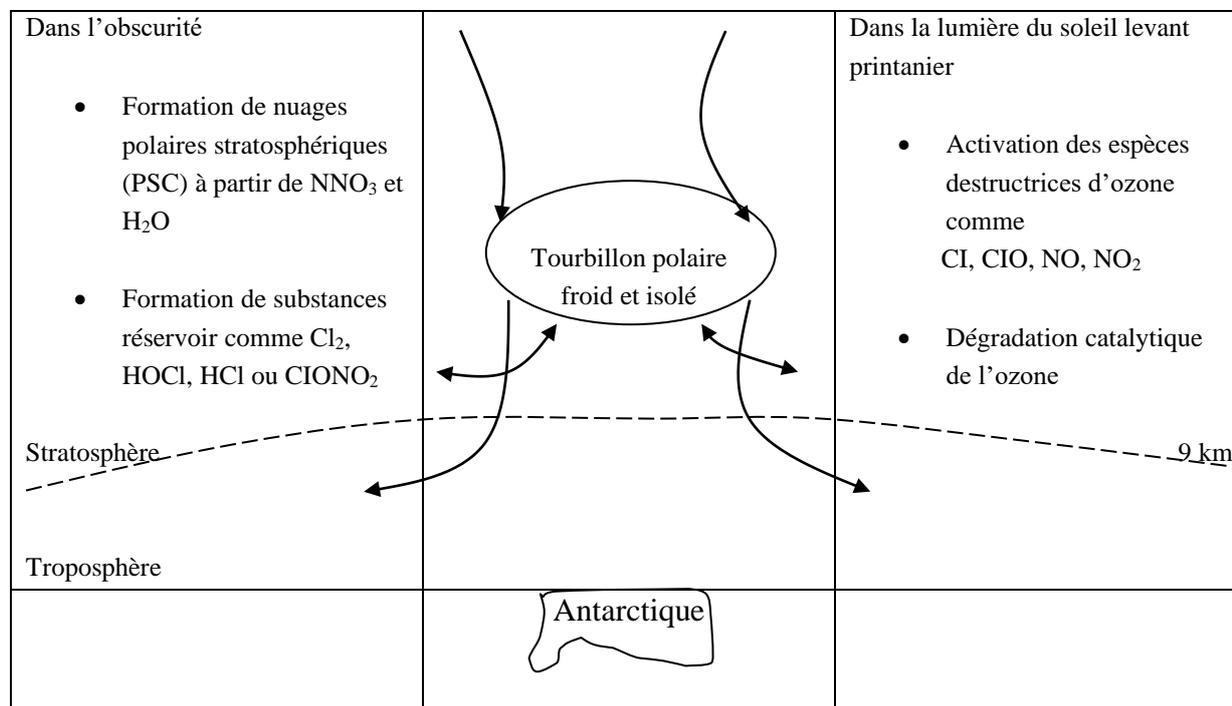


Figure I.7. Météorologie et chimie du trou d'ozone au-dessus de l'antarctique

La température basse rend possible la formation de surfaces solides, sur lesquelles une partie des réactions hétérogènes ont d'abord eu lieu. Il se forme des nuages polaires stratosphériques particuliers $1 \mu\text{m}$ de cristaux d'acide nitrique tri hydraté ($\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ; de cette manière l'azote actif est alors extrait de la stratosphère. A l'intérieur des nuages il se forme des composés solides – substances réservoir – telles que ClONO_2 , Cl_2 , HOCl , ou HCl ; des espèces à potentiel catalytique fort telles que Cl ou NO_2 sont « stockées » sous cette forme inactive, pour un temps déterminé.

La destruction catalytique massive de l'ozone commence quand les premiers rayons solaires exercent leur influence ; dans la lumière du soleil, de grandes quantités d'espèces chimiques catalytiquement actives vis-à-vis de la dégradation de l'ozone sont libérées en un temps relativement court à partir des substances réservoir.

CHAPITRE II
POLLUTION DES EAUX

II.1. Introduction

La présence de l'eau sur terre est la principale caractéristique de cette planète.

Les eaux douces sont difficilement estimables. En effet, 97% sont contenues dans le sol et les couches profondes de la terre. Aussi la quantité d'eau piégée dans les calottes glaciaires est mal connue. La ressource est abondante mais très inégalement répartie. Sa qualité aussi diffère, limitant ainsi son usage ou exigeant des traitements onéreux pour la rendre potable ou à la limite utilisable dans certains secteurs économiques.

II.2. Le cycle de l'eau (cycle hydrolytique)

Le **cycle de l'eau** est un modèle qui représente le parcours entre les grands réservoirs d'eau, liquide, solide ou de vapeur d'eau sur la terre.

De l'océan à la terre, le cycle de l'eau est principalement lié à l'évaporation, celle-ci générant de la vapeur d'eau qui est transportée sur les continents sous forme de pluie. Cette étape présente l'originalité de ne déplacer que l'eau dans l'atmosphère. En effet, lors de l'évaporation, la quasi-totalité (certains éléments volatils, tels que le mercure (Hg) ou des molécules organiques s'évaporent aussi) des minéraux reste dans l'océan. Ceci conduit à une concentration des éléments minéraux dans l'eau de mer (figure II.1).

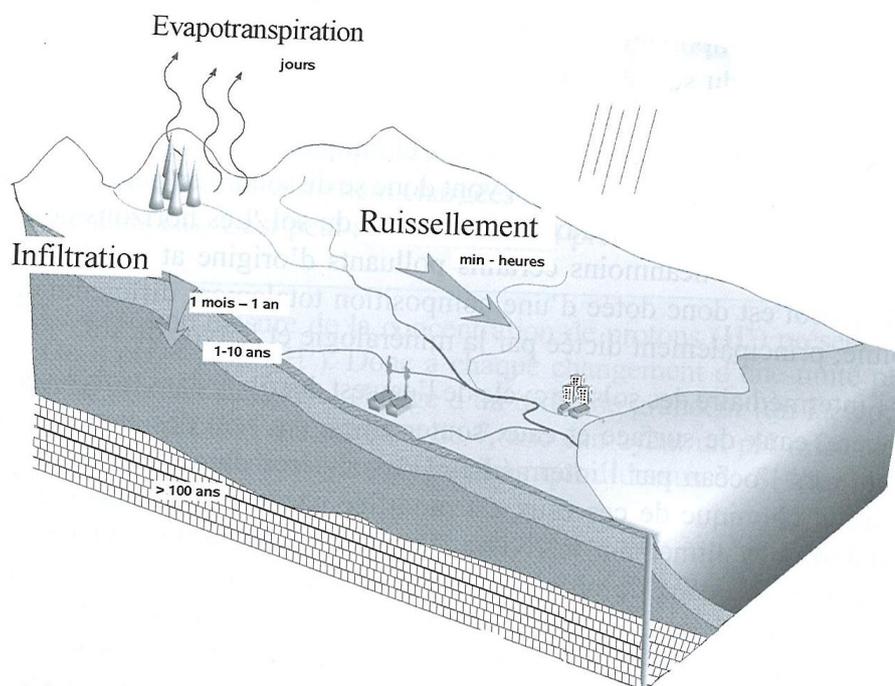


Figure II.1. Cycle de l'eau

L'eau retourne à l'océan en suivant deux voies : les eaux de surface ou les eaux souterraines, ces deux voies sont très liées, en raison des échanges entre rivières et aquifères en de nombreux points du parcours. Les sols représentent une étape importante dans ce processus, car ils redirigent les flux d'eau dans trois directions :

Une partie de l'eau va s'écouler en surface vers les rivières, ce phénomène est appelé *ruissellement* ;

Une autre partie va s'évaporer directement ou être absorbée par les plantes et ensuite libérée dans l'atmosphère par transpiration, le phénomène global est appelé *évapotranspiration*.

Enfin, l'eau résultante reste dans le sol et descend progressivement jusqu'aux eaux souterraines, ce phénomène est nommé *infiltration*.

Ces trois phénomènes se produisent sur des échelles de temps très différentes, le ruissellement durant quelques heures, pendant et juste après les précipitations. L'eau issue d'un événement pluvieux demeure un à plusieurs jours dans le sol avant d'être éliminée par évapotranspiration. Lors de l'infiltration, l'eau met un à plusieurs mois avant d'atteindre l'aquifère selon les caractéristiques et l'état du sol ainsi que sa profondeur.

Par l'intermédiaire des sols, le cycle de l'eau est distribué dans trois réservoirs : atmosphère, eaux de surface et eaux souterraines.

II.3. Source et quantité d'eau

L'hydrosphère (du grec hydro-, eau ; sphaira, boule, globe) est l'enveloppe aqueuse de la terre, c'est-à-dire la partie de l'environnement qui est avant tout constituée d'eau : les océans, les lacs, les cours d'eau, les nappes phréatiques, la place polaire et les glaciers. Moins de 3 % de l'hydrosphère se trouvent sur les continents sous forme de glace, de neige, de lacs, de fleuves ou de nappe phréatique, plus de 95 % de l'eau se trouvent dans les océans.

L'eau à l'état liquide, solide ou gazeux est composée de plus abondant à la surface de la terre ($1409 \times 10^6 \text{ km}^3$). L'ensemble des réserves d'eau, qu'on trouve dans divers endroits, se répartit entre plusieurs réservoirs (tableau II.1). la quantité de l'eau dans l'atmosphère est d'environ 0,001 %, l'eau des océans correspond à environ 300 fois la masse de l'ensemble de tous les constituants de l'atmosphère.

Les nappes phréatiques ne comportent qu'une faible quantité d'eau (0,67 %). La plus petite quantité d'eau se trouve dans l'atmosphère – la biosphère mise à part – essentiellement dans la basse troposphère ; il s'agit d'une petite quantité d'eau sous forme gazeuse mais ayant une fonction importante vis-à-vis du cycle de l'eau.

Tableau II.1 – la réserve en eau de la terre. – au total ($1409 \times 10^6 \text{ km}^3$)

Domaine de l'hydrosphère	Volume de l'eau (en 10^6 km^3)
Les mers	1370
La glace et la neige (pôles entre autres)	29
Les nappes phréatiques	9.5
Eaux de surface (lacs et fleuves)	0,13
Atmosphère	0,013
Biosphère	0,0006

II.4. Mesure de qualité des eaux

II.4.1. Qualité organoleptique

II.4.1.1. Couleur

C'est un paramètre traduisant une nuisance d'ordre esthétique, la coloration des eaux peut avoir une origine naturelle, d'eutrophisation ou industrielle.

II.4.1.2. Odeur

L'odeur d'une eau est généralement un signe de pollution ou de la présence de matières organiques en décomposition en quantité souvent si minime qu'elles ne peuvent être mises en évidence que par les méthodes d'analyse. Le sens olfactif peut seul les déceler, dans une certaine mesure.

II.4.1.3. Saveur

Toute eau possède une certaine saveur qui lui est propre et qui est due aux sels et aux gaz dissous. Si elle renferme une trop grande quantité de chlore, l'eau aura une saveur saumâtre, si elle contient de forte quantité de sels de magnésium, l'eau aura un goût amer.

II.4.2. Qualités physico-chimiques

II.4.2.1. Température

C'est une caractéristique physique importante, elle joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la détermination du pH. Selon leurs températures, les eaux naturelles sont classées comme suit ; hypothermies, hyperthermies.

II.4.2.2. Potentiel d'hydrogène pH

Il est inférieur ou supérieur à 7 suivant que l'eau est acide ou basique. Il n'a pas de la signification hygiénique mais il représente une notion importante de la détermination de l'agressivité de l'eau et la précipitation des éléments dissous.

II.4.2.3. Turbidité

Elle donne une idée sur la teneur en matière en suspension. Les eaux troubles sont chargées de substances finement divisées (grains de silice, matière organique, limons...), elles forment parfois d'importants dépôts dans les tuyauteries et dans les réservoirs.

II.4.2.4. Résidu sec

Le résidu sec donne une information sur la teneur en substances dissoutes non volatiles (le taux des éléments minéraux). Cette teneur peut varier Suivant l'origine de l'eau.

II.4.2.5. Conductivité électrique

C'est une mesure de la capacité de l'eau à conduire un courant électrique, donc une mesure indirecte de la teneur de l'eau en ions. Ainsi, plus l'eau contient des ions comme le (Ca^{2+}) ,

(Mg^{2+}), le (Na^+), le (K^+), les (HCO_3^-), le (SO_4^{2-}) et le chlorure (Cl^-), plus elle est capable de conduire un courant électrique et plus la conductivité mesurée est élevée.

II.4.2.6. Dureté

La dureté ou titre hydrotimétrique d'une eau est une grandeur reliée à la somme des concentrations en cations métalliques calcium, magnésium, aluminium, fer, strontium etc. présents dans l'eau, les deux premiers cations (Ca^{2+} et Mg^{2+}) étant généralement les plus abondants. Une eau à titre hydrotimétrique élevé est dit eau dure dans le cas contraire il s'agit d'une eau douce.

II.4.2.7. Fer

Il peut avoir pour origine des terrains traversés ou les pollutions industrielles, dans les eaux de distribution, il provient le plus souvent de la corrosion des conduites d'amenés. Il influe sur la qualité organoleptique de l'eau.

II.4.2.8. Magnésium

Il est un élément indispensable pour la croissance. Il intervient comme élément plastique dans l'os et comme élément dynamique dans les systèmes enzymatique et hormonaux.

II.4.2.9. Calcium

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous formes de carbonates. Composant majeur de la dureté de l'eau, le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables.

II.4.2.10. Sodium

Il n'existe pas de danger dans l'absorption des quantités relativement importantes de sodium sauf pour les hypertendus.

II.4.2.11. Sulfates

A fortes concentrations, les sulfates SO_4^{2-} provoquent des troubles gastro-intestinaux (chez les enfants). Ils confèrent à l'eau un goût désagréable.

II.4.2.12. Chlorures

Les chlorures existent dans toutes les eaux à des concentrations variables. Ils peuvent avoir comme origines les activités humaines et industrielles. Une présence excessive des chlorures dans l'eau d'alimentation, la rend corrosive pour les réseaux de distribution et nocive pour les plantes.

II.4.2.13. Nitrates

Les nitrates NO_3^- présents dans le sol, dans les eaux superficielles et souterraines résultent de la décomposition naturelle, par des microorganismes, de matière organique azotée telle que les protéines végétales, animales et les excréments animaux.

II.4.2.14. Nitrites

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

II.4.2.15. Phosphates

Les ions phosphates contenus dans les eaux de surface ou dans les nappes peuvent être d'origine naturelle comme la décomposition de la matière organique ; ou due aussi aux rejets industriels (agroalimentaire ... etc.), domestiques (poly-phosphate des détergents), engrais (pesticides ... etc.). En l'absence d'oxygène, les phosphates n'existent qu'à l'état de traces dans les eaux naturelles potables.

II.4.2.16. Matières organiques

Sont constituées par des produits de décomposition d'origine animale ou végétale, élaborés sous l'influence des microorganismes. Elles favorisent l'apparition de mauvais goût. Une eau riche en matière organique doit toujours être suspectée de contamination bactériologique ou chimique.

II.4.3. Qualité bactériologiques

Les micros organismes à dénombrer ou à rechercher dans l'eau sont d'origines diverses :

II.4.3.1. Germes totaux à 37°C

Certaines maladies infectieuses sont transmises à l'homme par absorption d'eau ou d'aliments pollués par une eau contenant des micro-organismes pathogènes. Les plus redoutables d'entre eux sont les salmonelles, responsables de la fièvre typhoïde et le vibron cholérique responsable du choléra.

II.4.3.2. Coliformes totaux

Selon l'organisation internationale de standardisation, il s'agit de bacilles gram négatifs (BGN) non sporulés oxydase négative aérobies ou anaérobies facultatifs, capables de fermenter le lactose avec production d'acide et de gaz en 24 à 48 heures à une température comprise entre 36°C et 37°C. Elles existent dans les matières fécales mais se développent également dans les milieux naturels.

II.4.3.3. Coliformes Thermo-tolérants

Il s'agit des coliformes possédant les mêmes caractéristiques que les coliformes mais à 44°C, ils remplacent dans la majorité des cas l'appellation : (coliformes fécaux) on cite là l'exemple de *E. coli*. leur présence dans l'eau indique une pollution fécale récente.

II.4.3.4. Streptocoques fécaux (37°C)

Il s'agit de Cocci à Gram positif (CGP) de forme sphérique ou ovoïde, se présentant en chainettes plus ou moins longues, non sporulées aéro-anaérobies facultatives, ne possédant ni catalase ni oxydase, ce sont des hôtes normaux d'homme, et ne sont pas considérés comme pathogène le (tableau II.2).

Tableau : II.2. Les normes algériennes de potabilité de l'eau

Paramètres	Unités	Normes Algériennes
Physico-chimiques		
pH	*	6.5-8.5
Conductivité à 25 °C	µs/Cm	3125
Température	°C	25 °C
Turbidité	NTU	5
Examen préliminaire		
Résidu sec à 105 °C	mg/L	2000
Titre Alcalimétrique simple	mg/L CaCO ₃	50
Titre Alcalimétrique Complete	mg/L CaCO ₃	500
Dureté Totale	mg/L CaCO ₃	500
Contrôle de la pollution		
Ammonium	mg/L	0.5
Nitrites	mg/L	0.1
Nitrates	mg/L	50
phosphates	mg/L	0.5
Minéralisation		
Calcium	mg/L	200
Magnésium	mg/L	150
Sodium	mg/L	200
Potassium	mg/L	20
Fer total	mg/L	0.3
Aluminium	mg/L	0.2
Chlorures	mg/L	500
Sulfate	mg/L	400

Bactériologie		
Germes totaux a 37 °C	UFC/ml	10
Coliformes totaux	UFC/100ml	0
Coliformes thermo tolérants	UFC/100ml	0
SF	UFC/100ml	0

II.5. Mécanisme et symptôme de la pollution des eaux courantes et des lacs :

II.5.1. Introduction

On appelle pollution de l'eau toute modification défavorable des propriétés physiques, chimiques ou biologiques, ou tout rejet de substances liquides, gazeuses ou solides dans l'eau de façon à créer une nuisance ou à rendre cette eau dangereuse d'utiliser.

La pollution de l'eau est due essentiellement aux activités humaines; par l'utilisation massive des engrais chimiques et des pesticides en agriculture ainsi que les rejets des eaux usées domestiques et industrielles dans la nature, ainsi qu'aux phénomènes naturels.

Les activités humaines ont engendré une contamination de la plupart des compartiments de l'environnement, seul l'océan profond et les aquifères profonds étant épargnés.

Les eaux concernées par la pollution peuvent être douces, saumâtres, souterraines ou superficielles. Il peut même s'agir de la pluie ou des rosées, de neige ou des glaces polaires.

Il existe plusieurs manières de classer la pollution des eaux, la première approche de classification est :

II.5.2. Pollution selon le mode de répartition géographique

II.5.2.1. Les pollutions diffuses :

Les pollutions diffuses sont épanchées sur de grandes surfaces, elles ont deux origines principales :

- La pollution atmosphérique provenant des industries et des transports qui se déplace sur des distances de quelques kilomètres à des centaines de kilomètres ;
- La pollution d'origine agricole comprenant engrais et pesticides épanchés à proximité du sol mais sur de très grandes surfaces.

Les pollutions diffuses impliquant des concentrations à la source beaucoup plus faible mais qui sont présentes sur de grandes étendues, les concentrations dans les aquifères étant du même ordre de grandeur que celles des sols (figure II.2).

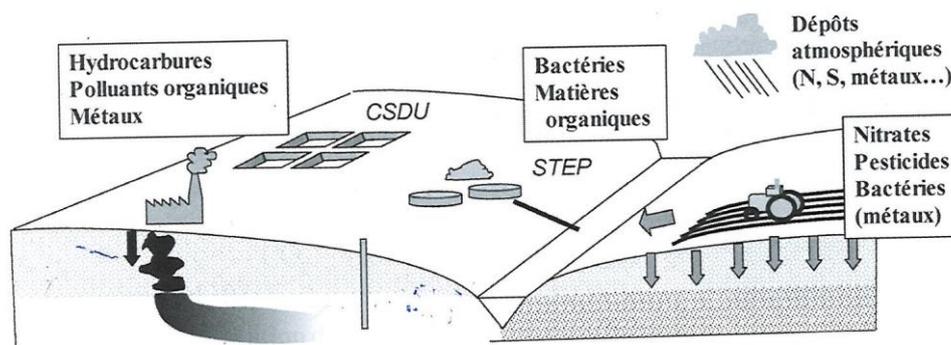


Figure II.2. Les grands types de pollution et leurs effets sur l'environnement

II.5.2.2. Les pollutions ponctuelles

Les pollutions ponctuelles sont épanchées sur des zones allant de quelques mètres carrés à un ou deux kilomètres carrés elles ont comme origines principales :

- Origine industrielle, infiltration de produits toxiques mal entreposés ;
- Fuites dans les réservoirs ou accidents lors du transport de matières dangereuses.

Bien que localisées, les quantités des pollutions ponctuelles sont souvent importantes, les concentrations dans les eaux pouvant aisément atteindre le g/L.

Les pollutions ponctuelles, constituées d'une source de taille restreinte mais concentrée.

II.5.3. Classification selon le type de polluant

Selon le type de polluant, on peut classer la pollution en trois catégories pollution physique, pollution chimique et pollution microbiologique.

II.5.3.1. Pollution physique

On parle de ce type de pollution quand le milieu pollué est modifié dans sa structure physique par divers facteurs. Elle regroupe la pollution mécanique, la pollution thermique et la pollution radioactive.

➤ Pollution mécanique

Elle résulte des décharges de déchets et de particules solides apportés par les eaux résiduaires industrielles, ainsi que les eaux de ruissellement.

Ces polluants sont soit les éléments grossiers soit du sable ou bien les matières en suspension (MES).

➤ Pollution thermique

Les eaux rejetées par les usines utilisant un circuit de refroidissement de certaines installations (centrales thermiques, nucléaires, raffineries, aciéries..); l'élévation de température qu'elle induit diminue la teneur en oxygène dissous.

Elle accélère la biodégradation et la prolifération des germes. Il se trouve qu'à charge égale, un accroissement de température favorise les effets néfastes de la pollution.

➤ **Pollution radioactive**

La pollution des eaux par des substances radioactive pose un problème de plus en plus grave, à un effet direct sur les peuplements aquatiques en raison de la toxicité propre de ses éléments et des propriétés cancérogènes et mutagènes de ses rayonnements.

II.5.3.2. Pollution chimique

Elle résulte des rejets chimiques, essentiellement d'origine industrielle, domestique et agricole.

La pollution chimique des eaux est regroupée dans deux catégories.

➤ **Pollution organique.**

C'est les effluents chargés de matières organiques fermentescibles (biodégradables), fournis par les industries alimentaires et agroalimentaires (laiteries, abattoirs, sucreries...), et par les effluents domestiques (déjections humaines, graisses,...etc.).

Les polluants organiques ce sont principalement:

❖ **Les détergents :**

Sont des composés tensioactifs synthétiques dont la présence dans les eaux est due aux rejets d'effluents urbains et industriels.

❖ **Les pesticides :**

On désigne généralement comme des produits utilisés en agriculture parmi les pesticides on cite : **les herbicides les fongicides les insecticides les organochlorésles pyréthriinoïdes ... etc.**

❖ **Les hydrocarbures :**

Provenant des industries pétrolières et des transports, qui sont des substances peu solubles dans l'eau et difficilement biodégradables, leur densité inférieure à l'eau les fait surnager.

➤ **Pollution minérale.**

La pollution minérale des eaux peut provoquer le dérèglement de la croissance végétale ou trouble physiologique chez les animaux.

Les polluants minéraux ce sont principalement.

❖ **Les métaux lourds**

Sont essentiellement le mercure (Hg), le cadmium (Cd), le plomb (Pb) l'argent (Ag), le cuivre (Cu), le chrome (Cr), le nickel (Ni) et le zinc (Zn).

Ces éléments, bien qu'ils puissent avoir une origine naturelle (roches du sous-sol, minerais), proviennent essentiellement de la contamination des eaux par des rejets d'activités industrielles diverses.

❖ Les éléments minéraux nutritifs

Sont les Nitrates et phosphates provenant pour l'essentiel de l'agriculture et des effluents domestiques, il est à l'origine du phénomène d'eutrophisation c'est-à-dire la prolifération excessive d'algues et de plancton dans les milieux aquatiques.

II.5.3.3. La pollution microbiologique

La pollution microbiologique résulte de la présence dans l'eau de microorganismes comme les bactéries, les virus, et les parasites, qui sont véhiculés par l'eau et sont responsables de beaucoup de maladies hydriques.

➤ Les bactéries

Les bactéries sont des organismes unicellulaires simples et sans noyau. Leur taille est comprise entre 0,1 et 10 μm .

➤ Les virus

Ce sont des organismes infectieux de très petite taille (10 à 350 nm) qui se reproduisent en infectant un organisme hôte.

➤ Les protozoaires

Les protozoaires sont des organismes unicellulaires munis d'un noyau, plus complexes et plus gros que les bactéries.

II.5.4. Classification selon l'origine de la pollution

Selon l'origine de la pollution, on distingue cinq catégories : pollution domestique, urbaine, agricole, pollution industrielle et pollution par les eaux pluviales.

II.5.4.1. Pollution domestique

La pollution domestique se caractérise par la présence des germes fécaux, de fortes teneurs en matières organique, des sels minéraux et des détergents, elle peut être responsable de l'altération des conditions de transparence et d'oxygénation de l'eau ainsi que du développement de l'eutrophisation dans les rivières.

Elle est due principalement aux rejets domestiques (eaux de lavage, huiles de vidange, matières fécales, etc.).

II. 5.4.2. Pollution urbaine

Ce sont les eaux des habitations et des commerces qui entraînent la pollution urbaine de l'eau. Les polluants urbains sont représentés par les rejets domestiques, les eaux de lavage collectif et de tous les produits dont se débarrassent les habitants d'une agglomération ainsi que les rejets industriels rejetés par les entreprises en quantités variables selon l'importance de l'agglomération et son activité.

Dans les polluants urbains on trouve les excréments, les restes d'aliments, les déversements d'abattoirs, les déversements hospitaliers, les lessives, les détergents, les insecticides, les hydrocarbures, les déchets de la petite industrie et divers produits toxiques.

II.5.4.3. 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 modernisation de l'agriculture et son intensification ont été généralement accompagnées d'une utilisation abusive et non rationnelle des engrais azotés, et des pesticides, qui entraînent non seulement la pollution des eaux mais aussi des perturbations des stations d'épuration biologiques ... etc.

II.5.4.4. Pollution industrielle

Le développement accéléré des techniques industrielles modernes a engendré une pollution des eaux très importante.

En effet, celle-ci est devenue plus massive est plus variée. Devant l'extrême diversité de ces rejets, une investigation propre à chaque type d'industrie est nécessaire.

Selon le type d'industrie, les polluants industriels peuvent contenir des matières organiques (azotées ou phosphorées), des graisses, des hydrocarbures, des acides et des bases ... etc.

II.5.4.5. Pollution par les eaux pluviales

Elles peuvent constituer la cause de pollution importante des cours d'eau, pendant les périodes orageuses.

L'eau de pluie se charge d'impuretés au contact des fumées industrielles, puis en arrivant au sol, l'eau de pluie va d'une part lessiver les surfaces sur lesquels elle s'écoule et d'autre part éroder les matériaux de surface. Les contaminants peuvent être dissous, soit être fixés sur les particules entraînées par l'eau.

II.6. Influence de la pollution des eaux sur les êtres vivants

II.6.1. Introduction

Les premières préoccupations de la pollution des eaux sont relatives aux atteintes à la santé humaine, bien plus qu'à la destruction des milieux ou la réduction de la biodiversité.

Il faut reconnaître toutefois, que plusieurs maladies infectieuses ont apparu. Malgré la recherche médicale qui a permis de vaincre certaines de ces maladies, elles restent parmi les premières causes de mortalité dans le monde. Leur diversité et leurs distributions à travers le monde dépend non seulement de leurs modes de transmission mais aussi des conditions d'hygiène et d'assainissement des populations concernés.

L'effet le plus tangible de la pollution des eaux sur la santé humaine est la propagation du cancer sous ses différentes formes ainsi que l'apparition de plusieurs formes d'allergies chroniques.

Parmi les maladies hydriques on peut citer à titre non exhaustif:

II.6.2. Maladies hydriques

II.6.2.1. Poliomyélite

La poliomyélite est une maladie infectieuse transmissible aiguë qui se transmet par l'intermédiaire de la nourriture et de l'eau contaminée par les matières fécales (excréments) des personnes infectées.

II.6.2.2. Méningite

Les méningites infectieuses de l'enfant représentent des maladies hétérogènes comportant d'une part les méningites virales et bactériennes.

II.6.2.3. Choléra

Quand on absorbe de la nourriture souillée ou de l'eau non potable.

Le choléra est une infection intestinale aiguë causée par la bactérie *Vibrio cholerae* qui commence par une diarrhée aqueuse indolore, des nausées et des vomissements.

II.6.2.4. Maladies de mains sales

Les maladies de mains sales sont des risques sanitaires liés à la quantité insuffisante de l'eau (problème d'hygiène).

II.6.2.5. Fièvre typhoïde

La fièvre typhoïde est due à *S. enteritica*, sérovar *S. typhi*. (Bacille d'Eberth). Les fièvres paratyphoïdes sont dues à *S. paratyphi* A, B et C.

II.6.2.6. Hépatite A et E

Le virus de l'hépatite A (VHE A) et E (VHE) se transmet en général par voie fécal orale, soit par contact direct d'une personne à l'autre, soit par ingestion d'eau ou d'aliments contaminés.

I.7. Oxygénation et désoxygénation :

On peut modifier la quantité de dioxygène contenue dans l'eau ;

- Si la pollution augmente (égouts, nitrate dans les engrais, phosphate des lessives) la quantité de dioxygène diminue
- Si la pollution diminue (station d'épuration), l'eau est plus oxygénée et la qualité s'améliore.

Donc, les caractéristiques du milieu (température, agitation de l'eau, végétaux chlorophylliens, pollution...) modifient la quantité de dioxygène dissous dans l'eau et influent ainsi sur la répartition des êtres vivants.

I.8. Eutrophisation des eaux :

L'eutrophisation est l'ensemble des symptômes que présente un écosystème aquatique à la suite d'un apport excessif de nutriments - en particulier le phosphore et l'azote -

Ces nutriments peuvent provenir de certains produits de nettoyage comme des produits pour lave-vaisselle ou des détergents industriels, des rejets de pollution domestique, des engrais utilisés en agriculture ou des déjections des animaux. Ils constituent une vraie nourriture pour la flore aquatique (plantes aquatiques algues fixées ou en suspension dans l'eau) qui va donc se développer et se multiplier, révélant l'eutrophisation. La flore prolifère dans le cours d'eau et réduit la transparence de l'eau (eau verte ou bleue). Ce phénomène est accentué par les températures élevées, l'abondance de lumière et le faible renouvellement de l'eau.

Ces végétaux, en mourant, vont constituer un apport nutritif supplémentaire pour les bactéries. Elles vont se multiplier et consommer encore plus l'oxygène dissous dans l'eau. Ne pouvant plus respirer convenablement, les invertébrés benthiques et les poissons peuvent disparaître.

II.9. Notion sur le traitement et l'épuration des eaux usées :

II.9.1. Introduction

Les eaux usées, aussi appelées « effluents » ou « eaux polluées » sont des eaux altérées par les activités humaines à la suite d'un usage domestique, industriel, artisanal, agricole ou autre. Elles doivent être traitées.

Elles peuvent être parfois qualifiées d'« eaux grises » lorsqu'il s'agit d'eaux peu chargées en matières polluantes par exemple des eaux d'origine domestique, résultant du lavage de la vaisselle, des mains, des bains ou des douches. On parle d'« eaux noires » lorsqu'elles contiennent diverses substances plus polluantes ou plus difficiles à éliminer tels que des matières fécales, des produits cosmétiques, ou tout type de sous-produit industriel mélangé à l'eau.

Des traitements sont réalisés sur ces effluents par le réseau d'assainissement urbain. L'objectif des traitements n'est pas toujours de rendre l'eau potable : certains usages ne nécessitent pas d'eau propre à la consommation.

Par le terme épuration des eaux usées, on entend toutes les techniques, qui contribuent à diminuer la teneur en composés indésirables contenus dans les eaux usées par des procédés biologiques, chimiques et/ou mécaniques. En fonction du degré de pollution et de la qualité de l'eau désirés, à côté des stations d'épuration conventionnelles, il existe d'autres procédés d'épuration de l'eau comme la distillation, l'osmose inverse, l'électrodialyse, les échanges d'ions et l'adsorption.

Les stations d'épuration *conventionnelles* comprenant jusqu'à trois étapes (figure II.3) :

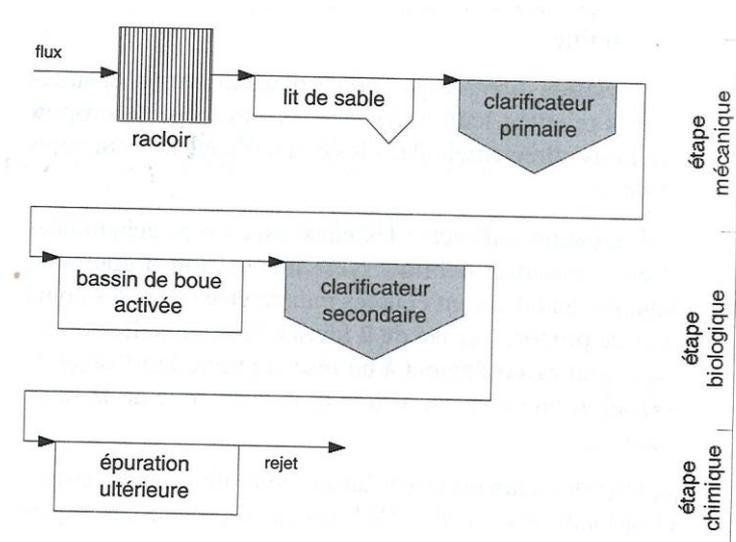


Figure II.3. Station d'épuration avec trois niveaux de traitement

- Une étape mécanique (physico-chimique)
- Une étape biologique,
- Une étape chimique.

II.9.2. Epuration mécanique

II.9.2.1. Dégrillage et tamisage

Le dégrillage et le tamisage permettent de retirer de l'eau les déchets insolubles tels que les branches, les plastiques, Pour ce faire, l'eau usée passe à travers une ou plusieurs grilles dont les mailles sont de plus en plus serrées.

II.9.2.2. Dessablage

Durant le dessablage le sable ou les graviers, plus lourds que l'eau, tombent dans le fond du dessableur. (Cela évite d'endommager les éléments constitutifs de l'installation d'épuration et principalement les pompes).

II.9.2.3. Déshuilage

Dans le même temps, le déshuilage consiste à récupérer les graisses et les huiles, plus légères que l'eau, qui se rassemblent à la surface des eaux usées.

II.9.2.4. Décantation et flottation

Près ce traitement primaire, l'eau s'écoule ensuite dans un grand bassin appelé décanteur. La surface et le fond sont raclés délicatement pour récupérer les graisses par-dessus et les graviers et le sable par-dessous. Ces deux principes s'appellent la *décantation primaire* et la *flottation*.

II.9.3. Traitements biologiques

Les traitements biologiques le plus simples consistent à éliminer les composés organiques tels que sucres, graisses, protéines, etc.

Les procédés biologiques regroupent toute une série de techniques ayant en commun le recours à des cultures bactériennes qui "consomment" les matières polluantes. Il existe deux grandes catégories de procédés biologiques artificiels :

- Les installations à "cultures libres", dans lesquelles la culture bactérienne est maintenue en suspension dans le courant des eaux usées à traiter ;
- Les installations à "cultures fixées", Peu utilisés où la culture bactérienne (appelée aussi "biofilm", "film biologique" ou "biomasse") repose sur un support (caillou, plastique, milieu granulaire fin).

Les installations à "boues activées" fonctionnent selon le principe des "cultures libres". Il s'agit d'un système d'épuration aérobie, (nécessitant un apport d'oxygène). La culture bactérienne est maintenue dans un bassin aéré et brassé. Les matières organiques contenues dans l'eau se transforment en carbone (sous la forme de dioxyde de carbone CO₂). Les résidus ainsi formés, sont appelés "boues" (tableau II.3).

Tableau II.3 : Composition chimique d'une boue activée typique (masse sèche)
– En moyenne 30 % de composés inorganiques et 70 % de composés organiques.

Elément	Proportion massique (en %)
C	50
O	20
N	14
H	8
P	3
S	1
K	1
Ca	0,5
Mg	0,5
Fe	0,2

Après un temps de séjour dans ce bassin d'aération, l'effluent est renvoyé dans un clarificateur, appelé aussi *décanteur secondaire*. *L'eau épurée* (séparée des boues par décantation) *s'en échappe par débordement pour aller rejoindre la rivière pendant que les boues décantées sont raclées sur le fond du bassin et évacuées*. Les traitements par boues activées éliminent de 85% à 95 % de la DBO5 (demande biologique ou biochimique en Oxygène sur 5 jours), selon les installations. La teneur en azote et en phosphore est abaissée respectivement d'environ 50% et 30%.

II.9.4. Epuration chimique

Comme types d'épuration chimique, on peut utiliser différentes méthodes, comme la floculation suivie de la précipitation, l'enlèvement des polluants organiques restants par oxydation, par exemple avec du peroxyde d'hydrogène ou par adsorption sur du charbon actif, afin de purifier davantage l'eau, en fonction de la teneur des composés à enlever.

II.9.4.1. Rejet de l'eau épurée dans le milieu naturel

Le rejet de l'eau épurée dans le milieu naturel marque la fin du traitement des eaux usées, l'eau peut enfin reprendre son cycle naturel. L'eau épurée n'est pas potable, elle est juste suffisamment propre pour pouvoir être rejetée dans le milieu naturel.

II.9.4.2. Séchage des boues

Les boues récupérées du décanteur et séchées peuvent être utilisées comme engrais dans l'agriculture, sinon elles sont envoyées en décharge publique ou incinérées.

II.9.5. Les traitements complémentaires : azote, phosphore, désinfection

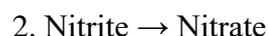
Pour satisfaire aux normes de rejet en zones sensibles, des traitements complémentaires doivent être mis en place.

II.9.5.1. Élimination de l'azote

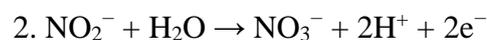
1. Nitrification

Si les réacteurs biologiques permettent un temps de contact suffisant entre les effluents et les bactéries, il est possible d'atteindre un second degré de traitement : la nitrification. Il s'agit de l'oxydation de l'ammoniaque en nitrite, puis en nitrate par des bactéries nitrifiantes.

De façon conceptuelle, la nitrification se déroule en deux étapes:



Au niveau chimique, le processus se déroule ainsi :



Une station d'épuration doit d'abord éliminer les composés organiques avant de pouvoir nitrifier.

2. Dénitrification : Une troisième étape facultative consiste à dénitrifier (ou dénitrater) les nitrates résultants de la nitrification. Les nitrates sont réduits en diazote (N_2) qui s'échappe dans l'air.

II.9.5.2. Éliminations du phosphore "déphosphatation"

Elle peut être réalisée par des voies physico-chimiques ou biologiques. En ce qui concerne les traitements physico-chimiques, l'adjonction de réactifs, comme des sels de fer ou d'aluminium, permet d'obtenir une précipitation de phosphates insolubles et leur élimination par décantation.

II.9.5.3. Désinfection

Les traitements primaires et secondaires ne détruisent pas complètement les germes pathogènes présents dans les rejets domestiques. Des procédés d'élimination supplémentaires sont donc employés lorsque les eaux traitées sont rejetées en zone de baignade, ou de pisciculture par exemple.

L'éventail des techniques de désinfection est assez large.

Le chlore est le désinfectant le plus courant, mais la désinfection peut également s'effectuer avec l'ozone, le brome et les ultraviolets (UV).

II.10. Prévention de la pollution des eaux

La prévention de la pollution des eaux passe essentiellement par l'application de bonnes pratiques par les usagers de l'eau et des milieux aquatiques sur tout le bassin versant.

Les principales mesures pour la protection des eaux à titre non exhaustif sont :

1. Réaliser une épuration des eaux avant leur rejet direct

Le rejet direct d'eaux usées dans le milieu naturel est interdit : les eaux usées doivent subir un traitement d'épuration pour éliminer les polluants qu'elles contiennent. Les quantités résiduelles après traitement doivent être suffisamment faibles pour être éliminées par l'autoépuration du milieu.

2. Réduire les risques de pollution accidentelle

Pour limiter les risques d'accident industriel, il faut prendre des précautions relatives à la sécurité de stockage des installations industrielles .la prévention des risques concerne aussi le transport des marchandises dangereuses. Elle concerne tous les transports : routier, ferroviaire, fluvial, maritime et aérien.

3. Gestion agricole adaptée

Prévention de l'érosion, par exemple, l'analyse du fumier et moins d'engrais et l'utilisation de pesticides) et l'évolution vers des pratiques agricoles raisonnées qui nécessitent moins de produits phytosanitaires comme l'agriculture biologique.

4. Éviter les transferts aux milieux aquatiques

La lutte contre la pollution diffuse peut limiter les transferts directs aux milieux aquatiques.

La lutte contre l'artificialisation et la réduction du phénomène d'érosion contribuent aussi à limiter ces transferts.

5. Réduire l'usage de substances dangereuses

Certaines substances sont dangereuses parce qu'elles ne sont pas biodégradables et elles sont cancérogènes. Il est alors préférable d'interdire leur production et leur usage comme les PCB, dioxines, certains pesticides comme le chlorodécone, etc.

6. Protéger les captages d'eau

Mettre en place la protection des captages d'eau est indispensable pour protéger la santé humaine et limiter les coûts des traitements de potabilisation, l'eau brute doit être de la meilleure qualité possible,

7. Utiliser les détergents et les lessives écologiques :

Comme les produits qui contiennent moins de phosphate qui provoque l'eutrophisation des rivières et les produits nettoyants naturels comme le bicarbonate de soude et le vinaigre.

CHAPITRE III
POLLUTION DES SOLS

III.1. Bases en sciences du sol

III.1.1. Introduction

Le sol est la principale interface dans l'environnement, entre l'atmosphère, la lithosphère et la biosphère. Ceci explique la complexité de sa composition et de son organisation. Les différents sols résultent de l'altération des roches-mères et de leur transformation sous l'action du climat et de l'activité des organismes végétaux et animaux. Leur développement résulte de l'action conjuguée de ces facteurs et du temps.

Les sols permettent l'ancrage des racines, ils retiennent l'eau le temps nécessaire pour que les plantes puissent l'utiliser, ils filtrent les eaux et protègent les nappes phréatiques. Les sols régulent aussi l'eau des fleuves et des nappes phréatiques, ils stockent les éléments nutritifs nécessaires à la vie. Les sols abritent des microorganismes innombrables, qui accomplissent de multiples transformations biochimiques comme la fixation de l'azote atmosphérique et la décomposition des êtres vivants morts. Ils participent au recyclage des éléments minéraux libérés au niveau de la roche-mère.

Les sols jouent un rôle particulièrement important dans le devenir des polluants ; en effet, en raison de leur composition chimique et de leur activité biologique, ils peuvent retenir et transformer des quantités élevées de polluants.

III.1.2. Observation du sol sur le terrain

Le sol est un volume qui pour être compris, doit être observé dans son épaisseur. Une coupe de terrain permet de l'observer directement, on peut constater visuellement qu'on a en fait plusieurs couches de couleur et de structure différentes (horizons). Dans ses horizons, le plus profond est celui correspondant à la roche mère, recouverte par d'autres couches supérieures. L'ensemble des horizons et leur structure constitue le profil pédologique, qui est en fait la coupe, et ce profil varie grandement suivant les différentes catégories de sols.

Afin de caractériser chaque horizon, on peut étudier les caractéristiques suivantes : La présence dans un horizon de certains caractères morphologiques spécifiques (constituants, texture, structure, couleur, ...) associés à divers autres éléments (positionnement par rapport aux autres

horizons, ...) ces caractéristiques ont permis aux pédologues de définir plus de 70 types d'horizons.

Chaque horizon est dénommé par des lettres: O, A, B, E, S, C, R, ... selon une nomenclature internationale. (figure III.1)

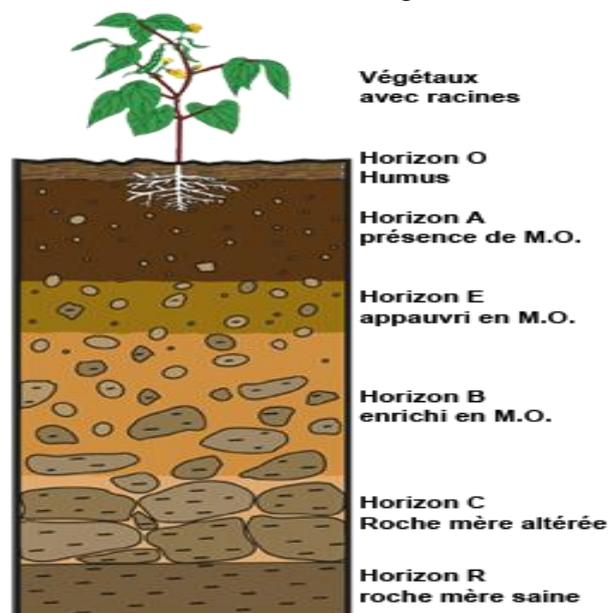


Figure III.1. Horizons et différenciation des sols

III.1.2.1. Structure

La structure est un paramètre de classification des sols car elle est un indice de l'évolution de ceux-ci.

Les principales structures, par ordre de taille croissant sont les suivantes :

Compacte (pas de structure), pulvérulente, grumeleuse (agrégats 1mm – 1 cm), polyédrique (quelques centimètres), prismatique (éléments allongés > 15 cm). La présence, le nombre et l'état des éléments grossiers (graviers, concrétions) permet de déterminer l'avancement de l'altération des sols et la nature de la roche mère.

III.1.2.2. Couleur

La couleur de chaque horizon d'un sol est repérée très précisément à l'aide d'une charte de couleurs, en tenant compte de l'état humide ou sec de celui-ci. Cette couleur est la base de la différenciation des horizons, elle permet de connaître avec précision plusieurs paramètres de formation du sol.

III.1.2.3. Texture

Les propriétés physiques des sols sont fortement dépendantes de la taille des grains qui les constituent, ceux-ci sont groupés en famille de tailles très différentes. Les composants différenciés sont les argiles (< 2 µm), les silts (2 - 50 µm), les sables fins (50 - 200 µm), les sables grossiers (0,20 - 2 µm) et les graviers (> 2 µm). Le pourcentage de chacune de ces familles dans l'assemblage global définit la classe de texture du sol.

III.1.3. Les facteurs qui influent sur la formation du sol

Les facteurs les plus importants sont la nature de la roche mère ou matériau d'origine, la végétation, le climat et le temps.

III.1.3.1. La roche mère

La roche mère affleure à la surface du globe suite à des mécanismes géologiques (tectonique des plaques, volcanisme, glaciation, érosion...). D'origine géologique variée Une roche est constituée d'un assemblage de plusieurs minéraux identiques ou différents :

1. Les roches magmatiques comme le granite formées par l'assemblage de minéraux, de quartz micas et de feldspaths ;
2. Les roches sédimentaires comme le calcaire formées de gypse et calcite ;
3. Les roches métamorphiques formées de calcite et quartz ;

III.1.3.2. La végétation

Les débris végétaux s'étalent sur le sol, forment des litières (couches de matières organiques fraîches) qui se décomposent et se transforment en humus sous l'action des organismes et micro-organismes vivants dans le sol: bactéries, champignons, acariens, vers de terre, limaces, escargots, scarabées, fourmis, larves, taupes, mulots, Les matières organiques sont riches en carbone (C), hydrogène (H) et oxygène (O).

III.1.3.3. Le climat

Le climat joue un rôle important dans la formation et les caractéristiques des sols. Il a un impact sur la végétation. La température intervient dans la vitesse d'altération des roches et dans la vitesse de décomposition des matières organiques.

III.1.3.4. Le temps

Les sols se forment lentement. L'échelle de temps pour la formation d'un sol, pour qu'il arrive à maturité (développement complet des horizons) se mesure en milliers d'années. Le temps de formation d'un sol dépend du climat.

III.1.4. Les constituants des sols

Les principaux constituants du sol sont:

III.1.4.1. Les constituants minéraux (matières minérales solides)

Les minéraux dits primaires, comme le quartz, le mica, le feldspath sont séparés(sous l'influence de processus physiques) du granite (roche mère) qui se transforme en minéraux secondaires par altération chimique (hydrolyse). Les principaux minéraux secondaires sont : les argiles, les oxyhydroxydes de fer, d'aluminium, de manganèse, et de silicium.

III.1.4.2. Les constituants organiques

Les matières organiques solides formées de débris d'origines végétale et animale comme les feuilles mortes, les écorces, les bois morts, les cadavres d'animaux la litière forestière se décompose en humus) qui se transforme en minéraux solubles ou gazeux : CO_2 , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_3^- ,

III.1.4.3. Le gaz

Le gaz qui remplis les vides du sol (oxygène, azote, gaz carbonique);

III.1.4.4. La solution du sol

La solution du sol, formée d'eau et de substances minérales dissoutes.

III.1.5. Les fonctions du sol

Le sol assure plusieurs fonctions.

III.1.5.1. Fonction alimentaire

Le sol recouvert par la végétation est exploité par les racines des plantes qui puisent l'eau, l'air et les substances nutritives nécessaires à leur développement. Le sol nourrit les hommes. C'est une ressource renouvelable, qui dépend des conditions de son utilisation.

III.1.5.2. Fonction biologique

C'est aussi le lieu de vie et de reproduction de nombreux organismes vivants (vers de terre, fourmis, insectes, bactéries, champignons, larves, taupes, ...). Ces espèces assurent la fertilité physique et chimique des sols (évolution de la matière organique, aération du sol).

III.1.5.3. Fonction filtre et stockage

Le sol est un milieu poreux qui filtre l'eau de pluie qui le traverse. Le sol absorbe le CO₂ sous forme de matière organique.

III.1.5.4. Fonction matériau

Le sol contient des matériaux de construction (graviers, argiles, ..), des matériaux énergétiques (tourbe, ...), des minerais nécessaires à l'homme et à son environnement.

III.2. Causes et conséquences de la dégradation /pollution des sols**III.2.1. Généralités sur les polluants présents dans les sols.**

Un sol est pollué lorsqu'il contient une concentration anormale de composés chimiques potentiellement dangereux pour les êtres vivants. Beaucoup de substances qui parviennent dans le sol peuvent être dangereuses pour les microorganismes, les plantes, les animaux et aussi les êtres humains (quelques-unes de ces substances sont données (le tableau III.1).

Tableau III.1 : Quelques substances et groupes de substances avec un potentiel de dangerosité éprouvé pour le sol

Substances avec un potentiel de dangerosité éprouvé, qui sont largement répandues et/ou ont des effets particulièrement nocifs	Substances avec un potentiel de dangerosité éprouvé, mais avec une importance locale
Arsenic Aluminium Mercure Plomb Zinc Nickel Cuivre Acide nitrique/nitrates Acide sulfurique/sulfates Polychlorobiphényles (PCB) Polychloroterphényles (PCT) Polychloronaphalènes (PCN) Hexachlorobenzène (HCB) 1.1.1 – trichloro-2.2-bis (4- chlorophényl)-éthnae (DDT) et dérivés Pentachlorophénol (PCP) Hexachlorocyclohexane (HCH) Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) Hydrocarbures chlorés volatils (trichloroéthane, perchloroéthylène) Dibenzodioxines polychlorées (PCDD) et dibenzofuranes polychlorés (PCDF)	Chrome Thalium Cobalt Uranium Acide hydrofluorique, fluorures Cyanures Huiles Phénols Aromatiques nitrés Hydrocarbures aromatique, en particulier benzène, toluène, naphtalène

Le comportement des polluants dans le sol est déterminé par leurs propriétés telles que leur dérivabilité chimique ou biologique, leur volatilité ou leur facilité à être absorbés. Les polluants peuvent se répartir sur les parties solides du sol ou dans l'eau qu'il contient et être conduits vers les plantes en même temps que leurs substances nutritives ou en tant que nourriture et/ou être amenés par lessivage jusque dans la nappe phréatique. La dégradation des composés organiques naturels et synthétiques dans le sol a lieu avant par voie microbiologique et chimique, évidemment plus rarement par voie photochimique.

Dans ce qui suit, nous parlerons de quelques produits qui posent un problème direct pour le sol et donc pour les plantes.

III.2.2. Polluants organiques

III.2.2.1. Classification

Le regroupement des produits dans le contexte des sols pollués résulte à la fois de l'origine du produit, de sa fonction, ou d'une formulation chimique.

Les molécules organiques sont constituées principalement de carbone (C) et d'hydrogène (H) ainsi que d'halogènes (Cl, Br, F), substances particulièrement importantes dans le contexte des sols pollués. On peut distinguer en premier lieu deux grands groupes de molécules :

Les molécules cycliques ou aromatiques, la plus simple étant le benzène et les molécules qui ne contiennent pas de cycles, dites aliphatiques, par exemple des alcanes.

III.2.2.2. Dérivés pétroliers et BTEX

Les produits pétroliers les plus courants, utilisés comme combustibles, tels que le butane, le propane et l'octane, sont des chaînes aliphatiques de longueur variant de 2 à plus de 20C. Ces produits sont relativement peu toxiques, mais très répandus. Ils peuvent, à la suite de transformations, donner naissance à des produits peu biodégradables.

Les BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène, xylène) sont aussi des dérivés pétroliers, présents en proportion plus faible dans les essences. Ils constituent la pollution majeure sur les sites contaminés notamment au droit de stations essence ou de sites de stockage d'hydrocarbures. Ils sont tous constitués d'un noyau benzénique, sans substitution pour le benzène ou complété de radicaux CH₃ (pour les TEX) disposés différemment selon les molécules (figure III.2).

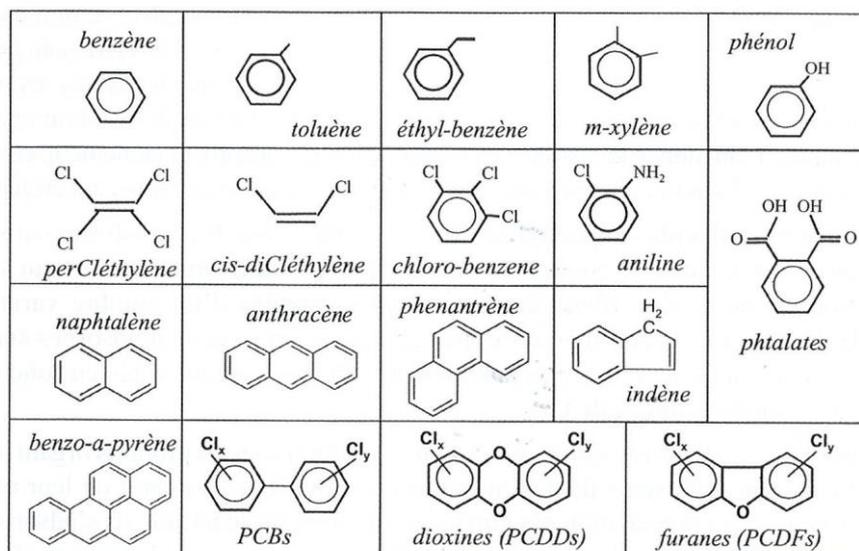


Figure III.2. Quelques formules des polluants organiques courants

III.2.2.3. Solvants chlorés

Les principaux solvants chlorés comportent un ou deux atomes de C, avec une simple ou une double liaison et un nombre variable d'atomes de Cl (1 à 6), comme le perchloréthylène (C_2Cl_4). Certains solvants sont aussi des dérivés chlorés du benzène. Ces produits proviennent des installations de nettoyage à sec, ou d'installation industrielles. Ils sont très répandus et constituent le second groupe de polluants par le nombre de sites contaminés. Par nature, ce sont des produits volatils (COV).

III.2.2.4. Phénols et autres substances organiques

Les phénols sont utilisés dans de nombreux procédés et notamment dans les peintures et apprêts. Ici c'est la composition chimique qui réunit les membres de ce groupe. Le noyau phénolique de base est constitué d'un cycle benzénique avec radical OH. Ils sont moyennement toxiques, assez facilement biodégradables et miscibles.

De nombreux autres groupes de substances d'origine industrielle sont présents dans les sols pollués, par exemple les dérivés benzéniques, les anilines (peintures), les quinones (chimie), les explosifs.

III.2.2.5. HAP, PCB, furanes et dioxines

Les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) sont des dérivés de nombreux processus chimiques et des produits de combustion de plastiques. Les HAP sont aussi présents dans le pétrole brut et dans le goudron, ainsi que dans les résidus les plus lourds des raffineries. Ils sont caractérisés par la juxtaposition de deux à huit cycles benzéniques. Etant donné leur taille ils sont non volatils, s'absorbent facilement, et sont très rémanents. Leur toxicité est assez élevée, plusieurs d'entre eux sont cancérigènes.

Les PCB (polychlorobiphényles) utilisés dans les transformateurs et sont aussi des résidus de combustion de certains produits organiques. (deux cycles phényles entourés d'un nombre variable de Cl). Ils sont fortement toxiques et très rémanents mais restent adsorbés sur la phase solide car ils sont très peu solubles. Les furanes (PCDFs) et surtout les dioxines (PCDDs) sont les produits organiques les plus toxiques présents dans l'environnement, en raison de leur effet cancérigène et leur forte adsorption dans les sols.

III.2.2.6. Pesticides

Les pesticides sont toutes les substances avec lesquelles on combat les plantes et les animaux qui sont nuisibles à l'homme, aux plantes et aux animaux qui lui sont utiles.

Selon les organismes qu'ils combattent, on peut répartir les pesticides, en différents groupes.

A côté des propriétés souhaitées, les pesticides peuvent aussi avoir des propriétés non souhaitées le (tableau III.2) représente la répartition des pesticides selon les organismes nuisibles qu'ils doivent combattre.

Tableau III.2 : Répartition des pesticides selon les organismes nuisibles qu'ils doivent combattre.

Nom	Organismes nuisibles à détruire
Acaricides	Mites
Algicides	Algues
Bactéricides	Bactéries
Fongicides	Champignons
Herbicides	Mauvaises herbes
Insecticides	Insectes
Nématocides	Nématodes
Rodenticides	Rongeurs

Le (tableau III.3) représente la superficies traitées par les pesticides (en %) dans le monde

Tableau III.3 : Superficies traitées par les pesticides (en %)

Plantation	Pourcentage
Fruits, céréales, pommes de terre, betteraves	> 99
Maïs	> 95
Fourrages, etc.	63
Près, trèfle, luzerne	≈ 5

III.2.3. Les éléments traces

Les éléments traces, et les métaux lourds en particulier, peuvent être toxiques

Les premières données importantes sur les éléments traces sont fournies par la classification périodique des éléments. Celle-ci permet de distinguer plusieurs groupes au sein des éléments traces.

Les alcalins : Li, Rb, Cs qui ont des dynamiques proches de Na et K ;

Les alcalino-terreux : Be, Sr, Ba, proches de Ca et Mg ;

Les métalloïdes : Si, B, As, Te ;

Les familles du scandium et du titane : Sc, Y, La, Ti, Zr, Hf ;

Les métaux lourds : Cr, Mn, (Fe), Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Ag, Cd, Sn étain), W (tungstène), Hg, Pb ;

Les terres rares ou lanthanides : de Ce (cérium) à Lu (lutécium) ;

L'étude des éléments traces concerne plus souvent le seul groupe des métaux lourds, les plus connus en raison de leur importance dans les pollutions.

Les métaux lourds sont des métaux ayant une densité $> 5 \text{ g/m}^3$ (tableau III.4) Ils peuvent se trouver dans l'air, dans l'eau et dans le sol.

En principe, certains métaux, peuvent être essentiels pour un organisme, par exemple une plante ou un animal, ou être « non nécessaires ». Ces métaux ne sont pas nécessaires à la vie, mais ils perturbent souvent le cours normal des processus métaboliques, même à l'état de traces.

Les métaux essentiels ont un comportement diversifié. On entend par là des métaux dont l'organisme a besoin dans des concentrations bien déterminées, s'il veut vivre « normalement » - sainement – et qui doivent lui être fournis par la nourriture.

Tableau III.4 Classification de quelques métaux lourds selon leur densité et leur toxicité

Métal	Plantes		Animaux		Densité (en g/cm^3)
Pt		T ^a)			21,40
Hg		T			13,59
Pb		T		T	11,34
Mo	E		E	T	10,20
Cu	E	T	E	T	8,92
Ni		T	E	T	8,90
Co			E		8,90
Cd		T		T	8,65
Fe	E		E		7,86
Sn			E		7,28
Cr			E		7,20
Mn	E	T	E		7,20
Zn	E	F	E		7,14
V	E				5,96

^a T = toxique, E = essentiel.

III.3. Comportement des éléments traces dans le sol

C'est la persistance des métaux qui est particulièrement prononcée dans l'environnement : contrairement aux polluants organiques, les métaux ne peuvent pas être dégradés biologiquement ou chimiquement. Les métaux et leurs composés sont souvent transportés sur de grandes distances par l'air ou l'eau sans subir de transformations. Dans l'environnement, un composé métallique peut seulement être transformé en d'autres composés, dans lesquels le métal subsistera ; et dans certains cas, ce ne sont que de telles réactions de transformation qui conduisent à des composés toxiques.

En ce qui concerne les métaux lourds, une autoépuration des sols n'est pas possible. Dans les sols, ils sont si solidement fixés aux argiles ou aux composés humiques. Pour cette raison, les métaux lourds s'accumulent souvent fortement dans le sol ou dans les sédiments.

Beaucoup de minéraux (argiles, oxydes métalliques) et les composés humiques possèdent des charges à leurs surfaces, avec lesquelles des ions métalliques peuvent se fixer et devenir alors échangeables.

**Tableau III.5 – Métaux dans les sols et les sédiments
- Liaisons et réactions qui conduisent à une libération
des métaux sous forme d'ions métalliques ou de complexes solubles.**

Forme de liaison, existence	Réactions
Liés sous forme d'ions et échangeables (liés à des argiles comme la kaolinite ou la montmorillonite)	$(S)^{-2}M^{+2} + M^{+2} \leftrightarrow (S)^{-2}M^{+2} + M^{+2}$. $(S)^{-2}M^{+2} + 2H^+ \leftrightarrow (S)^{-2}(2H^+) + M^{+2}$. $(S)^{-2}M^{+2} + n \leftrightarrow (S)^{-2} + ML_n^{+2}$.
Liés par adsorption (à des surfaces, par exemple d'oxyde de fer)	$(S)M^{+2} \leftrightarrow (S) + M^{+2}$. $(S)M^{+2} + n \leftrightarrow (S) + ML_n^{+2}$.
Composé (inorganique) peu soluble	$\left. \begin{array}{l} MCO_3 \\ MS \\ M(OH)_2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \xrightarrow{H^+} \\ \xrightarrow{nL} \end{array} \left \begin{array}{l} M^{+2} + \dots\dots\dots \\ ML_n^{+2} + \dots\dots\dots \end{array} \right $
Complexe avec des ligands (organiques)	$ML_n \xrightarrow{H^+} M^{+2} + \dots\dots\dots$

S : composés du sol ou des sédiments ; M : métal ; L : ligand.

Une des conséquences les plus sérieuses de la persistance des métaux est leur accumulation dans les chaînes alimentaires. Au bout de ces chaînes, les métaux peuvent atteindre des concentrations très élevées.

III.4. Comportement des polluants organiques dans le sol

III.4.1. Sorption

Le devenir des pesticides dans les sols est influencé par de nombreux facteurs parmi eux la matière organique joue un rôle important. En effet les pesticides, organiques pour la plupart, sont sorbés. (fixés, par la matière organique naturelle des sols).

Le devenir des pesticides est ainsi fortement lié à celui de la matière organique. Les pesticides vont donc rester proches de la surface du sol, zone dans laquelle la matière organique est localisée en majorité.

Même si la sorption par la matière organique est importante. Une désorption, bien que lente, est toujours présente.

III.4.2. Dégradation dans le sol

Les pesticides, en tant que molécules organiques peuvent être dégradés par les micro-organismes (bactéries, champignons).

La biodégradation dépend de nombreux facteurs. L'effet de la température du sol est notable sur les vitesses de dégradation comme pour tout processus biologique. Mesurent des vitesses de dégradation dix fois plus élevées à 25 °C jusqu'à 5 °C.

III.5. Analyse des risques et législations

L'analyse de risque et la spécificité du site.

Comprennent :

- La recherche des sites et sols pollués ;
- L'étude des sols (ou diagnostic initial), qui s'applique à un site considéré comme pouvant être potentiellement pollué ;
- L'évaluation simplifiée des risques (ESR), qui évalue entre autres leur impact potentiel sur des cibles définies ; le risque est défini par la combinaison de trois facteurs :
 - Le danger de la source polluante lié à la nature des substances polluantes présentes sur le site et à leur quantité. Ce facteur danger est symbolisé par la lettre D,
 - Le transfert des substances de la source vers les milieux, par la lettre T,
 - Une cible, l'homme seul ou l'environnement pris dans son sens large (homme, faune, flore, patrimoine bâti) selon le niveau de l'étude, symbolisée par la lettre C.

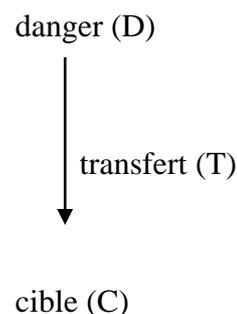


Figure III.3 : Principes de l'évaluation simplifiée des risques (ESR)

La combinaison de ces trois facteurs (figure III.3) permet d'évaluer le risque, symbolisé par R, selon l'expression.

$$R = f(D, T, C)$$

Le diagnostic approfondi, dont l'objectif est de collecter toutes les informations nécessaires à la mise en place de l'évaluation détaillée des risques, est mis en œuvre par des experts ayant de fortes compétences scientifiques concernant des domaines très variés comme la toxicologie, l'hydrogéologie, l'agronomie, l'analyse chimique, la modélisation, ... etc.

III.6. Techniques de décontamination et étude de cas

Quand on parle de procédé actif, il s'agit du vrai assainissement d'un site contaminé : le sol doit être décontaminé, les polluants et donc le danger qui peut provenir du site contaminé doivent être supprimés, selon la nature du problème posé on utilise des procédés différents. Par l'intervention d'un procédé in-situ, le sol pollué est assaini à l'endroit même (sans excavation ou sans que des portions de sol soient déplacées (figure III.4). Il est possible en principe d'utiliser des procédés physiques, chimiques, thermiques ou microbiologiques. Souvent on utilise des unités de nettoyage mobiles pour la terre, ou bien les opérations de nettoyage sont exécutées sur le terrain même.

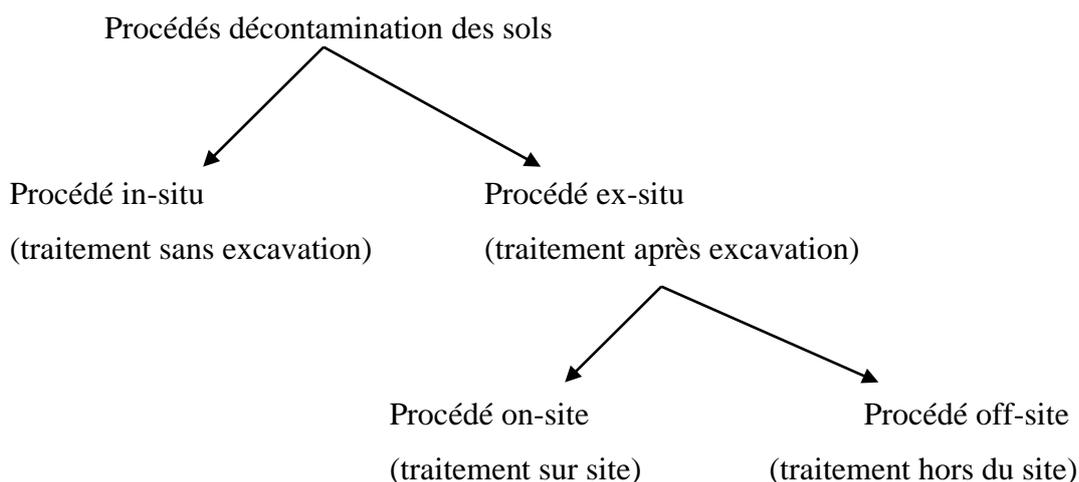


Figure III.4 Notions des différents procédés de décontamination

III.6.1. Procédés in-situ

A côté du pompage de l'air du sol (en angl. venting) on inclut les procédés microbiologiques (exemple, en angl. bioventing), ainsi que l'immobilisation.

Le venting consiste en l'élimination de produits organiques volatils, qui s'évaporent de la phase liquide non aqueuse et de la phase adsorbée sur le sol par extraction sous vide de l'air de la matrice poreuse du sol, extraction associée ou non à une ventilation forcée. Le pompage de l'air du sol est utilisé avant tout pour les hydrocarbures chlorés volatils. Après pompage, cet air est alors pollué et doit être traité de manière appropriée avant d'être rejeté. Les technologies les plus couramment utilisées sont les suivantes :

- L'adsorption sur charbon activé qu'il est ensuite nécessaire de régénérer ou d'incinérer est recommandée pour des effluents gazeux peu chargés en polluants (de 0,1 ... 100 ppm) ;
- L'oxydation catalytique fonctionne à des températures de 300 ... 500 °C. Elle est adaptée au traitement d'effluents avec des charges en polluants de 100 ... 10000 ppm).

- L'incinération : les hydrocarbures sont brûlés dans une torchère ou une chambre de combustion. Les procédés s'appliquent lorsque les effluents renferment de fortes concentrations en polluants (de 5000 ... 100000 ppm).
- Une nouvelle approche consiste en l'emploi de filtres biologiques avec garnitures (graviers, tourbe, granulés de charbon actif, ...) sur lesquelles sont fixés les microorganismes capables de dégrader les produits polluants.

III.6.1.1. Procédés microbiologiques

Les procédés microbiologiques sont en principe utilisables vis-à-vis des polluants biologiquement dégradables. Le bioventing est une technologie prometteuse qui est mise en œuvre pour stimuler la biodégradation in situ de polluants dans les sols, en fournissant à la microflore en place l'oxygène nécessaire. L'oxygène est fourni par l'injection d'air dans la zone contaminée. Il est nécessaire que les microorganismes utilisent les substances polluantes comme nourriture et les transforment en produits le moins polluants possibles comme CO₂ et H₂O et en biomasse. La plupart des composés organiques et particulièrement ceux qui se sont formés par biosynthèse (par exemple les huiles minérales contenant des hydrocarbures aliphatiques à chaîne courte) sont facilement dégradables dans des conditions aérobies (tableau III.6) les sols pollués contenant des huiles minérales (des essences), sont les plus épurés par voie biologique. Quelques substances inorganiques comme les cyanures, le soufre ou les thiosulfates sont également facilement dégradables. D'autres classes de substances sont décomposées nettement plus lentement ou presque pas décomposées, comme par exemple les hydrocarbures polyaromatiques contenant cinq noyaux aromatiques ou plus, ou les composés organiques chlorés comme les biphényles polychlorés (PCB), les dibenzodioxines polychlorées (PCDD) et les dibenzofuranes polychlorés (PCDF). Mais il y a des substances qui ne sont pas dégradables biologiquement, par exemple les métaux lourds ou certains polymères synthétiques comme le polytétrafluoroéthylène (PTFE) ou le polychlorure de vinyle (PVC).

Tableau III.6 Dégradabilité de polluants du sol par les microorganismes

Degré de dégradabilité	Composés, classes de composés
Facilement dégradables	Composés aromatiques (par exemple benzène, toluène, phénol) hydrocarbures alicycliques, alcanes, hydrocarbures polyaromatiques, certains hydrocarbures aromatiques chlorés (par exemple certains chlorophénols)
Difficilement dégradables non dégradables	D'autres hydrocarbures aromatiques chlorés, nitrophénol ; PCB, PCDD, PCDF ^a) Métaux lourds, certains polymères (par exemple PTFE, PVC)

^a Produit de dégradation du DDT (Dichloro-diphényl-trichloroéthane)

En ce qui concerne les procédés microbiologiques, à côté de la dégradabilité biologique, quelques autres conditions doivent être remplies ; par exemple la température et l'humidité doivent convenir, et l'oxygène doit être disponible en quantité suffisante.

III.6.1.2. Procédés d'immobilisation

Dans les procédés d'immobilisation, les polluants du sol sont « immobilisés » avant tout chimiquement, en les rendant insolubles par des processus d'adsorption, de précipitation ou d'échanges d'ions : par ce biais, on veut empêcher que les polluants soient lessivés et ensuite transportés. Pour cela on introduit dans le sol des substances chimiques adaptées (par exemple des composés qui précipitent des métaux sous forme d'hydroxydes).

III.6.2. Procédés ex-situ

Dans les procédés ex-situ, la terre contaminée est d'abord décoffrée puis traitée sur place (on-site) ou dans un autre lieu (off-site ; figure III.3) et réutilisée. Les procédés ex-situ sont plus coûteux que les procédés in-situ, particulièrement quand les polluants ont pénétré profondément dans le sol.

Une méthode ex-situ d'assainissement d'un sol consiste à échanger le sol contaminé (échange de sol). Pour cela, le sol pollué est enlevé ; ce sol excavé est déposé sur une décharge pour déchets spéciaux et remplacé par un sol non pollué. Par ce procédé, le problème non désiré est seulement transféré ; de nos jours on ne pratique presque plus l'échange du sol car cette opération est trop coûteuse.

Dans beaucoup de cas, ce sont les procédés de lavage et d'extraction de sol ainsi que les procédés thermiques qui sont utilisés. Dans les procédés de lavage et d'extraction de sol, les polluants ne sont pas détruits ni transformés, mais transférés dans une phase liquide puis concentrés. Par ce procédé, normalement, l'activité biologique du sol est détruite. On utilise de l'eau, des acides, des bases, des solvants organiques, en ajoutant parfois des tensioactifs. Ces extractions humides sont appliquées entre autres aux sols contenant des métaux lourds, des cyanures ou des hydrocarbures (halogénés).

III.6.2.1 Procédés thermique

Dans le procédé thermique selon le procédé choisi à des températures de 600 ... 1200 °C, le sol est pyrolysé ou brûlé ; dans certains cas on met en œuvre d'autres procédés en amont ou en aval, par exemple une postcombustion des gaz de fumées à 1200 °C. Mais le traitement thermique transforme le sol en un matériau calciné ; le sol qui était auparavant organique et vivant est alors un sol « mort ».

Aucun procédé n'est capable d'assainir « complètement » le sol par rapport à la concentration d'un polluant considéré. Le degré d'efficacité de chaque procédé dépend fortement de la composition du sol et du type de polluants. Souvent, suite à de tels procédés, les polluants ne sont que dilués dans le sol, et parfois transférés vers d'autres compartiments de l'environnement.

Références bibliographiques

- **Olivier A.**, « Chimie et pollutions des eaux souterraines », Ed. Lavoisier & Doc, 2015.
- **Bliefert, Perraud**, « Chimie de l'environnement Air, Eau, Sols, déchets » Ed. de boeck. 2011.
- **Emilian K.**, « Traitement des pollutions industrielles : Eau, air, déchets, sols, boues ».Ed. Dunod, 2009.
- **Bertrand G.** Utiliser l'eau de pluie, Editions Eyrolles, 2008, p 130.
- **Desjardins R.** Le traitement des eaux. 2^{ème} Édition, l'École polytechnique de Montréal. Montréal, 1997.
- **Rodier J.** Analyse de l'eau (eau naturelles, eaux résiduaires, eau de mer), 8^{ème} Edition, paris, 1996, p 1260.
- **Claude C.** Génie de l'environnement: le traitement de l'eau. Paris, 1999, p 9.
- **Banton O., Bangoy L.M.** Hydrogéologie, Multi-science environnementale des eaux souterraines, sainte- Foy: PUQ/AUPELF. Ed. Québec, 1997, p 460.
- **HADE A.** Nos lacs – les connaître pour mieux les protéger, Éditions Fide, 2002, p 360.
- **Coinl M.** La pratique de l'eau usage domestique collective à l'industrielle, Edition Lavoisier, 1981, p 349-350.
- **Rodier J.** L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, 8^{ème} Edition, Dunod, Paris, 1996, p 1335.
- **Tardat Henry M.** Chimie des eaux, 2^{ème} Edition, Les éditions du Griffon D'argile, 1992, p 213-215.
- **Paul R.** Eaux d'égout et eaux résiduaires industrielles: Épuration, utilisation, Société D'Éditions techniques, 1998, p192.
- **Leyral G., Ronnefoy C., Guillet F.** Microbiologie et qualité des industries Agro-alimentaire, Paris, 2002, p 245.
- **Defrance S.M.** L'eau dans tous ces états, Edition Ellipses. Paris. 1996, p 632.
- Eau potable, stage RMC, Volume N°2 1996.
- **Encyclopedia.** Industrial chemistry, Water in All men, Wiley-VCH Verlags, vol.8. épuration. Techniques, Sciences et Méthodes, 1995, p 81-118.
- **Mayet J.** La pratique de l'eau, Traitements aux points d'utilisation, le Moniteur, 2^{ème} Edition, Paris. 1994, p382.

- **Keck G., Vernus E.** Déchets et risques pour la santé , Techniques de l'Ingénieur G1110,T1 , Edition. Paris, 2000 ,p 2450.
- **Belhadj A.** Les épidémies d'origine hydrique dans le monde- Synthèse Technique- ENGRET centre de Montpellier et OIE de Limoges, 2001, p 1-16.
- **Shape F.** Recommandations sanitaires relatives à la désinfection des eaux usées urbaines, 1995, p 22.
- **Autret F., Duval G.** 2006. « Où en est le marché du CO₂ ? » Alternatives économiques.
- **Lévêque Ch., Sciama Y.** 2005. « Développement durable ». DUNOD. 226p.
- **Guesnerie R.** 2003. « Kyoto et l'économie de l'effet de serre » rapport du CAE. Téléchargeable de <http://www.cae.gouv.fr/spip.php?article90>
- **Guesnerie R.** 2005. « Pourquoi un marché de permis d'émissions ? Le cas du protocole de Kyoto » Cahiers français.

Sites Internet

<http://www.environnement-annuaire.net/>

<http://www.environnement.nat.tn/actualite/maj%20140509.pdf>

<http://www.environnement.nat.tn/structures.htm>

<http://www.vivreplus-construction.fr/developpement-durable/les-enjeux-dans-lebatiment>

<http://www2.cnrs.fr/presse/journal/2883.htm>

http://www.canalu.tv/canalu/producteurs/universite_rennes_2_crea_cim/dossier