

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de RELIZANE
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences Biologiques



جامعة غليزان
RELIZANE UNIVERSITY

POLYCOPIÉ DE COURS

Destiné aux étudiants de la 3^{ème} année Licence Ecologie et
environnement, Filière : Ecologie et environnement

Intitulé

Pollution de l'environnement

Elaboré par :

Dr. TAMERT Asma

Année universitaire : 2023/2024

Avant-propos

Ce polycopié de cours est réalisé conformément au programme officiel du module « Pollution de l'environnement »

Il est destiné et enseigné aux étudiants de troisième année licence en écologie et environnement. 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 sept chapitres. Dans le premier, nous présentons la nature et les modalités de la pollution. Le deuxième chapitre étudie les mécanismes de dispersion et la circulation des substances polluantes dans la biosphère. Le troisième chapitre traite les principaux polluants de l'air, leur effet sur l'organisme et leurs conséquences ; effet de serre, smog photochimique et trou d'ozone. Le quatrième 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. Le cinquième 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. Le sixième et le dernier chapitre traitent la pollution par les déchets solides et la pollution nucléaire et ses origines.

Table des matières

Chapitre I : Nature et modalités de la pollution

1. Définitions	01
2. Classification des pollutions	01
3. Les causes actuelles de la pollution	02
4. Types de pollutions	02
5. Les conséquences de la pollution	03
5.1. Les conséquences de la pollution sur la santé	03
5.1. Les conséquences de la pollution sur l'environnement	04
6. Comment lutter contre la pollution	05
6.1. Le recyclage	05
6.2. Traitement des eaux	06
6.3. Energies renouvelables	07
6.4. Être responsable	08

Chapitre II : Mécanisme de dispersion et circulation des substances polluantes dans la biosphère

1. Propriétés physiques	10
2. Durée de vie des polluants	10
3. Processus biogéochimiques : circulation atmosphérique des polluants, les mouvements de l'hydrosphère, transferts des substances dans le sol	11
3.1. Circulation atmosphérique	11
3.1.1. Circulation horizontale	11
3.1.2. Circulation verticale	12
3.2. Dispersion par les êtres vivants	12
3.2.1. La bioconcentration	12
3.2.2. La bioaccumulation	12

Chapitre III : La pollution atmosphérique

1. Les types de la pollution atmosphérique	14
1.1. Pollution de proximité et à l'échelle locale	14
1.2. Pollution à l'échelle régionale	14
1.3. Pollution planétaire	14
2. Les types des polluants atmosphériques	15
3. Problèmes environnementaux liés aux polluants atmosphérique	16
3.1. L'effet de serre : échelle mondiale	16
3.2. La destruction de la couche d'ozone	18
3.3. Acidification	19
4. Effets de la pollution atmosphérique	20
5. Pollution atmosphérique et santé : les personnes à risque	21

Chapitre IV : Pollution aquatique

I. Pollution chimique	22
I.1. Définition	22
I.2. Sources	22
I.3. Types	23
I.4. Conséquence de la pollution chimique des eaux	23
2. Pollution biologique	24
2.1. La pollution microbiologique des eaux	24
2.2. La pollution des eaux par des matières organiques fermentescibles (MOF)	25
2.3. Pollution par des espèces invasives : La Caulerpe "Caulerpa taxifolia"	25
2.4. Conséquence de la pollution par les polluants organiques en milieu lentique : Eutrophisation	27
3. La pollution thermique des eaux	28

Chapitre V : La pollution du sol

I. Introduction	30
2. Pollution d'origine agricole	30
2.1. Les pesticides	30
2.2. Les nitrates (NO ₃ ⁻)	31
3. Pollution d'origine industrielle et microbienne	31

Chapitre VI : La pollution par les déchets solides

I. Définition	33
2. Diversité des déchets solides	33
3. Conséquences de l'accumulation et de la dispersion	34
3.1. Les effets sur la santé	34
3.2. La détérioration du paysage	34
3.3. La détérioration de la faune et de la flore	35
3.4. Les pertes économiques	35

Chapitre VII : La pollution nucléaire

I. Introduction	36
2. Principaux types de radiations ionisantes	36
2.1. Définition	36
2.2. Types	36
2.3. Unités radiobiologiques	37
3. Effets biologiques des radiations ionisantes	37
3.1. Les modalités de contamination	37
3.2. Effets biologiques	37
3.3. Radiosensibilités des êtres vivants aux doses létales	38

Chapitre I

*Nature et modalités
de la pollution*

Chapitre I : Nature et modalités de la pollution

I. Définition

La pollution est toute modification anthropogénique d'un écosystème se traduisant par un changement de concentration des constituants chimiques naturels, ou résultant de l'introduction dans la biosphère de substances chimiques artificielles, d'une perturbation du flux de l'énergie, de l'intensité des rayonnements, de la circulation de la matière ou encore de l'introduction d'espèces exotiques dans une biocénose naturelle.

Le terme **polluant** a été défini comme un altéragène (élément) biologique, physique ou chimique, qui au-delà d'un certain seuil ou norme, développe des impacts négatifs sur tout ou partie d'un écosystème ou de l'environnement en général.

Le terme **nuisances** désigne l'ensemble de facteurs d'origine technique (bruits : circulation ; déchets solides : matières plastiques...) ou sociale (encombrement, voisinage...) qui nuisent à la qualité de la vie. A la différence des pollutions, les nuisances ne provoquent pas nécessairement d'effets néfastes sur la santé humaine et sont dépourvues de conséquences écologiques.

2. Classification des pollutions

On peut classer les pollutions à partir de nombreux critères.

- Selon la nature de l'agent polluant :

- **Physique** : rayonnements ionisants, réchauffement artificiel du milieu ambiant dû à une source de chaleur technologique
- **Chimique** : substances minérales, organiques abiotiques ou encore de nature biochimique
- **Biologique** : microorganismes pathogènes, populations d'espèces exotiques invasives introduites artificiellement par l'homme.

- D'un point de vue écologique : en prenant en considération le milieu (air, eau, sol), ou le compartiment de la biosphère afférent (atmosphère, hydrosphère, pédosphère) dans lequel ils sont émis et sur les biocénoses desquels ils exercent leurs perturbations

- D'un point de vue toxicologique : Considère le milieu ou la manière par laquelle les polluants contaminent les organismes. On distinguera, selon la voie de contamination : chez les végétaux une absorption stomatale, transfoliare, ou une translocation radiculaire. Chez les animaux on peut distinguer une contamination par inhalation (chez les espèces terrestres), par absorption transbranchiale (chez les espèces aquatiques), par ingestion (par voie orale) ou encore pénétration transcutanée à la suite du contact de la peau ou du tégument avec le polluant.

3. Les causes actuelles de pollution

a) La production d'énergie, cause principale de pollution

Les principaux aéropolluants produits par les combustions sont le SO₂ et Les NOX dont résultent les pluies acides, les smogs photochimiques et les particules solides.

b) La diversification des polluants chimiques et l'accumulation des déchets

Depuis la fin de la seconde guerre mondiale, la chimie organique a mis à notre disposition une multitude de nouvelles molécules de synthèse. On estimait dans les années 1990 que 120 milles molécules étaient commercialisés dans le monde et que chaque année étaient mises sur le marché de 500 à 1000 substances chimiques nouvelles. Parmi elles, les matières plastiques, les détergents....

L'un des aspects les plus redoutables de la pollution globale par les substances chimiques de synthèse tient en la croissance des rejets de polluants organiques persistants (POPs). Ces substances sont : Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), les solvants chlorés, les Polychlorobiphényles (PCB), les Pesticides organochlorés, les Dioxines ...

c) Pollutions dues à l'agriculture et l'élevage intensif

Une dernière cause majeure de pollution de la biosphère tient au développement d'un modèle d'agriculture et d'élevage réputés modernes. L'usage en agriculture intensive des pesticides de synthèse (insecticide, fongicide, herbicide) et la fumure minérale par apport de fertilisants azotés, de phosphate et de sels de potasse conduit à des progrès spectaculaires dans le rendement des cultures. En effet, ces produits, en plus des excréments des animaux d'élevage, génèrent une pollution insidieuse des eaux superficielles ou littorales et des nappes phréatiques.

4. Types de pollutions

Pollution de l'air

La pollution atmosphérique peut être définie comme la présence d'impuretés dans l'air pouvant provoquer un gêne notable pour les personnes et un dommage aux biens. La pollution atmosphérique est donc fortement influencée par le climat et tout particulièrement par le vent, la température, l'humidité et la pression atmosphérique.

Pollution des sols

La pollution du sol peut être diffuse ou locale, d'origine industrielle, agricole (suite à l'utilisation massive d'engrais ou de pesticides qui s'infiltrent dans les sols). Ces pollutions agricoles peuvent avoir plusieurs impacts sur la santé humaine, en touchant des nappes phréatiques d'une part et en contaminant par bioaccumulation les cultures poussant sur ces sols d'autre part.

Pollution de l'eau

La pollution de l'eau peut avoir diverses origines parmi lesquelles :

- Les exploitations agricoles industrielles : qui rejettent divers produits présents dans les engrais (comme des ions nitrates : NO_3^-) ou les produits phytosanitaires peuvent polluer les nappes phréatiques et entraîner la fermeture de points de captages d'eau potable si leur présence est trop importante
- L'industrie : Il s'agit essentiellement de produits chimiques et d'hydrocarbures (dégazage).
- Les eaux usées : C'est un milieu favorable pour la mise en place d'une microfaune bactérienne (développement des bactéries) qui si elles ne sont pas traitées correctement peuvent être une source de pollution de l'eau. La demande chimique et biologique en oxygène (DCO et DBO) seront utiles pour évaluer la teneur de la pollution dans le l'eau.

Pollution par type ou agents polluants

- Les pollutions liées aux transports, dont la pollution automobile et celle induite par les avions
- La pollution radioactive, (produits radioactifs (exemple : le phosphogypse ; catastrophe de Tchernobyl),
- La pollution électromagnétique, (pollution liée aux rayonnements ionisants et non ionisants).
- La pollution thermique
- La pollution lumineuse : désigne à la fois la présence nocturne anormale ou gênante de lumière et les conséquences de l'éclairage artificiel nocturne sur la faune, la flore, les écosystèmes ainsi que les effets sur la santé humaine. Elle est souvent associée à la notion de gaspillage d'énergie, dans le cas d'un éclairage artificiel mal adapté, s'il constitue une dépense évitable d'énergie.
- La pollution liée au tourisme (pour partie liée aux transports), au bricolage et à certains loisirs (ex : nautisme) ou festivités (ex : feu d'artifice).
- La pollution spatiale et la pollution par les armes ou explosifs

5. Les conséquences de la pollution

Elles se traduisent par l'**effet de serre**, les **pluies acides**, la **modification de la couche d'ozone**.

5.1. Les conséquences de la pollution sur la santé

La **pollution de l'eau** peut avoir des conséquences sur la santé de l'homme.

Les maladies provenant de l'eau polluée tuent encore aujourd'hui des millions de personnes chaque année dans les pays pauvres.

Il s'agit de maladies provoquées par le fait de boire cette eau polluée et des maladies dues à un simple contact de la peau avec cette eau.

La pollution de l'air ou pollution atmosphérique peut être la cause de décès précoces.

Les effets chroniques de la pollution sur la santé sont deux à trois fois plus élevés que ceux estimés.

Près de 30000 décès anticipés sont attribués à la pollution atmosphérique. 7 à 20% des cancers seraient imputables à des éléments environnementaux (produits chimiques).

5.2. Les conséquences de la pollution sur l'environnement

Qu'elles soient chimiques, physiques ou biologiques, les pollutions entraînent des modifications du milieu.

Suivant leurs natures, les pollutions affectent la physiologie et le comportement des organismes exposés ou les caractéristiques des biotopes et donc, *in fine*, la composition et la structure des populations.

- **Altération des milieux**

Autrement-dit, les substances chimiques (métaux lourds, perturbateurs endocriniens, etc.) et les effets physiques (chaleur, lumière, radioactivité) d'une part affaiblissent les organismes et leur capacité à se reproduire et d'autre part altèrent les conditions du milieu (pH, oxygène, ultra-violets...).

- **Modification de présence des espèces**

L'ensemble de ces modifications engendre alors la disparition et l'apparition locales de certaines espèces et le développement de certains organismes au dépendant d'autres. L'introduction d'espèces invasives accroît encore plus ces déséquilibres.

- **Appauvrissement de la biodiversité et impact sur l'homme**

Cette transformation du milieu se traduit en général par un appauvrissement de la biodiversité puis par la perturbation du fonctionnement des écosystèmes.

L'affaiblissement et la disparition des services écologiques rendus par ces écosystèmes génèrent une dégradation généralisée du milieu de vie aussi bien pour les organismes que pour l'homme et ses activités.

6. Comment lutter contre la pollution

6.I. Le recyclage

Le recyclage est la réutilisation de matériaux après un premier service. C'est donc un procédé de traitement des déchets (provenant des industries et des déchets ménagers) qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. L'un des exemples qui illustre ce procédé est celui de la fabrication de bouteilles neuves avec le verre de bouteilles usagées. Il faut distinguer le recyclage organisé par l'homme pour les déchets qu'il produit et les cycles naturels.

Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures :

- La réduction du volume de déchets.
- La préservation des ressources naturelles car le recyclage permet d'éviter de puiser dans les ressources lors de la fabrication d'un nouvel objet.

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique.

- Le recyclage dit « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants.
- Le recyclage dit « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer.
- Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

Déroulement du recyclage :

Étape I : Collecte de déchets

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets.

Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement techniques. Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation.

La collecte sélective, dite aussi « séparative » et souvent appelée à tort « tri sélectif » est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même.



À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations. À ce stade, le verre brisé est systématiquement écarté pour éviter les risques de blessure.

Étape 2 : Transformation

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi.

Étape 3 : Commercialisation et consommation

Une fois transformés, les produits finis issus du recyclage sont utilisés pour la génération d'énergie (par combustion) ou la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés, pour être, en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés.

Voici ce qu'on fait avec les déchets :

- Les déchets organiques (qui proviennent des êtres vivants) sont décomposés par des microbes (ex : compostage, production de gaz méthane...) ou brûlés pour produire de la chaleur ou de l'énergie.
- Les déchets ultimes, c'est-à-dire ceux dont on ne peut plus rien tirer, sont mis dans des décharges contrôlées. Les déchets toxiques sont neutralisés chimiquement.
- Les métaux qui constituent une grande partie des machines et des ustensiles usagés, sont repris par l'industrie métallurgique pour fabriquer du métal neuf.
- Le verre récupéré permet la fabrication d'autres produits à base de verre.
- Les vieux papiers redonnent de la pâte à papier.

6.2. Traitement des eaux

Les méthodes utilisées pour le recyclage ont d'abord recours aux traitements classiques :

- L'eau passe dans des grilles qui retiennent les plus grosses impuretés ;

- Dans un grand bassin, l'eau est débarrassée des corps gras ou flottants qui viennent à la surface ;
- L'eau passe ensuite dans de bassins d'aération pour que les microbes agissent sur les matières organiques ;
- L'eau se décante dans des bassins ;
- L'eau est filtrée à travers des lits de sable ;
- Enfin on rend l'eau potable grâce au chlore ou un rayonnement ultraviolet qui permet d'éliminer les germes susceptibles de transmettre des maladies infectieuses.

Des traitements complémentaires sont ensuite mis en place, en fonction de la qualité de l'eau que l'on souhaite obtenir.

Le recyclage de l'eau est d'abord pratiqué pour les eaux résiduaires internes des industries : certaines d'entre elles recyclent leur eau, qui fonctionne ainsi en circuit fermé.

Mais le procédé est aussi utilisé pour les eaux usées : l'eau récupérée après traitement en station d'épuration reçoit un traitement supplémentaire afin d'être utilisée, essentiellement pour des usages qui ne nécessitent pas une eau potable : irrigation, réalimentation des nappes phréatiques, utilisations industrielles... mais l'eau recyclée peut aujourd'hui être potable également.

6.3. Energies renouvelables

Par « Energie renouvelable » on désigne des sources d'énergie autres que celles procurées par les hydrocarbures, le charbon et l'énergie nucléaire. Ce sont des sources d'énergie provenant de phénomènes naturels. Ce sont des énergies dites « propres » car elles ne polluent pas ; on les appelle aussi « énergies vertes ».

Le bois est une énergie renouvelable tant qu'on abat moins d'arbres qu'il n'en pousse, et que la forêt continue à jouer ses fonctions écologiques vitales.

Les énergies renouvelables proviennent :

-Principalement du Soleil : Rayonnement, cycle de l'eau, vents...

-De la chaleur interne de la Terre (provenant elle-même de la radioactivité d'éléments tel que l'uranium, le thorium et le potassium) : La géothermie

-De la rotation propre de la Terre par rapport au système Terre-Lune, c'est-à-dire l'énergie marémotrice.

Le bois, l'énergie solaire, l'hydroélectricité et l'éolien sont issus de l'énergie solaire. Seules la géothermie et l'énergie marémotrice échappent à cette règle.

On utilise:

- L'énergie solaire avec des panneaux solaires, pour chauffer et produire de l'électricité ;
- L'énergie hydraulique avec des moulins à eaux mais surtout des barrages, pour produire de l'électricité ;
- L'énergie éolienne avec des éoliennes, pour produire de l'électricité ;
- La combustion du bois dans des « chaudières » pour chauffer ;
- La géothermie qui utilise l'eau provenant des nappes phréatiques qui est chaude grâce à la chaleur émise par le centre de la Terre.

6.4. Être responsable

Pour respecter la nature et ne pas altérer l'environnement, nous nous devons d'être responsables.

Voici des exemples :

- Acheter du papier recyclé
- Prendre une douche plutôt qu'un bain, c'est diviser au minimum par trois sa consommation d'eau
- Ne pas trop chauffer son habitation car 1 degré de moins = 7% de consommation énergétique en moins.
- Prolonger la vie d'un objet en le réparant évite les déchets et peut faire des heureux !
- Réfléchir avant de jeter.
- Vider le grenier ou la cave n'implique pas automatiquement de remplir les poubelles. Il existe de nombreuses associations qui récupèrent les livres, les vêtements, les jouets, les appareils électroménagers et toutes sortes d'objets qui ne servent plus.
- Laver la voiture devant la maison, c'est envoyer directement dans les égouts ou dans la nature les hydrocarbures, les graisses et autres solvants. Les centres de lavages spécialisés sont équipés de bacs de décantation qui traitent ces éléments polluants. Attention cependant car il est facile de se laisser aller à la surconsommation d'eau dans ces centres, il faut rester vigilant !
- Utiliser des ampoules basse consommation : pour avoir autant de lumière en consommant moins
- Eviter de gaspiller
- Trier ses déchets
- Privilégier les déplacements à pied (ou en transport en commun)

- Choisir avec soin les espèces de poisson afin de ne pas participer à la surexploitation de certaines.
- Construire son habitation de la façon la plus écologique possible (isolement, panneaux solaire, géothermie...)

Chapitre II

*Mécanisme de dispersion
et circulation des substances
polluantes dans la biosphère*

Chapitre II : Mécanisme de dispersion et circulation des substances polluantes dans la biosphère

I. Propriétés physiques

Les propriétés physico-chimiques des molécules qui déterminent la dispersion des polluants

- **La solubilité** d'un composé dans l'eau est exprimée en mg/L à 20°C. Les composés de solubilité plus élevée sont normalement plus facilement lixiviables dans les eaux souterraines.
- **La pression de vapeur** est la pression à laquelle un liquide et sa vapeur sont en équilibre à une température donnée. Plus la pression de vapeur d'un liquide est élevée plus ce liquide s'évapore rapidement.

Calcul de la pression de vapeur

Le calcul approximatif de la pression de vapeur peut se faire à l'aide d'une formule issue de l'équation de Clapeyron,

$$\ln \frac{P_{sat}}{P_0} = \frac{M \cdot L_v}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)$$

Avec :

T_0 : température d'ébullition de la substance à une pression P_0 donnée, en K

P_{sat} : pression de vapeur, dans la même unité que P_0

M : masse molaire de la substance, en kg/mol

L_v : chaleur latente de vaporisation de la substance, en J/kg

R : constante des gaz parfaits, égale à 8,31447 J/K/mol

T : température de la vapeur, en K

Pour l'eau, par exemple :

$M = 0,018$ kg/mol

$L_v = 2,26 \times 10^6$ J/kg

$P_0 = 1013$ mbar

$T_0 = 373$ K

- **Rémanence** : désigne l'aptitude d'un polluant à demeurer dans le milieu
- **Le temps de ½ vie (DT 50)** temps nécessaire à l'élimination de 50% du polluant

2. Durée de vie des polluants

Chaque polluant à une durée de vie, qui est le temps au bout duquel sa quantité est divisée par « e (≈ 2.72) ». Plus elle sera longue, et plus son accumulation dans l'atmosphère sera importante et ce, à une échelle très grande. Nous appelons « temps de mélange » la période qui permet à une substance de se distribuer de façon homogène sur une partie ou la totalité de l'atmosphère. Ce temps de

mélange est de 1 à 2 mois pour une répartition à l'échelle d'un hémisphère, et de 1 à 2 ans pour un mélange inter hémisphérique.

Par exemple, le méthane qui a une durée de vie de 4 ans est réparti de façon homogène sur l'ensemble de la planète, alors que les sources de ce polluant sont localisées dans des zones géographiques restreintes.

La diminution ou la disparition d'un polluant dans l'air peut s'expliquer par sa réaction et sa transformation en un nouveau composé chimique, par le « lessivage » de l'air par la pluie, par dépôt au sol...

Oxydes d'azote (NO_x) : 15 jours

Dioxyde de soufre (SO_2) : 5 jours

Fines particules : semaines

Composés organiques volatils : COV : 0,5 à 60 jours

Monoxyde de carbone (CO) : 2 mois

3. Processus biogéochimiques : circulation atmosphérique des polluants, les mouvements de l'hydrosphère, transferts des substances dans le sol

Les substances rejetées dans la biosphère ne restent pas toujours sur place. Dans la majeure partie des cas, elles sont transportées des sources de rejet par des courants atmosphériques et hydrosphériques. Des organismes interviennent également dans la dispersion des polluants.

3.1. Circulation atmosphérique

La circulation atmosphérique joue un rôle fondamental dans la dispersion des polluants ; toutes les substances sont susceptibles de passer dans l'atmosphère. Que ce soit les gaz, les solides sous forme de poussières, et les liquides sous forme de vapeur (eau, aérosol...). Les couches troposphériques jouent un rôle important dans cette circulation qui se fait soit verticalement, soit horizontalement.

3.1.1. Circulation horizontale

Elle dépend des régimes du vent. En Europe occidentale par exemple, les vents des secteurs Ouest entraînent les polluants vers l'Est. Ainsi, les pays scandinaves reçoivent les oxydes de soufre acidifiant leurs lacs provenant des régions fortement industrialisées de l'Ouest comme la Grande Bretagne, l'Allemagne, la France.

En Afrique de l'Ouest, les alizés du Nord-est (harmattan) ou alizé continental qui provient essentiellement du Sahara, recouvre entre décembre et février les régions méridionales d'une épaisse couche de poussière riche en organismes pathogènes, particulièrement les méningocoques.

3.1.2. Circulation verticale

En cas d'instabilité atmosphérique, l'air chaud s'élève parfois même à plus de 18Km au niveau des cellules de Harley. Ces courants ascendants entraînent les polluants en altitude.

La combinaison des mouvements ascendants et horizontaux favorise un mélange ou échange de polluants entre les 2 hémisphères.

La dispersion horizontale est lente au niveau de la stratosphère où les vents ont une vitesse plus faible (1cm/s de sorte qu'un polluant déposé à ce niveau y séjourne longtemps.

Notons cependant que les polluants ne restent pas indéfiniment dans l'atmosphère, ils sont ramenés au sol par la gravité, les précipitations ou transformés en d'autres substances.

3.2. Dispersion par les êtres vivants

Étant capable de se mouvoir, un animal contaminé dans une région peut se retrouver dans une autre région et peut être proie à d'autres organismes qui seront contaminés à leur tour et la pollution peut s'étendre sur plusieurs biocénoses.

3.2.1. La bioconcentration

De nombreux êtres vivants peuvent accumuler dans leurs tissus et supporter sans danger des substances diverses à des doses supérieures à celles du milieu ; ces substances peuvent être des substances naturelles, des substances organiques de synthèse, des métaux lourds, des radionucléides ...

Des algues brunes, les fucus laminaires peuvent concentrer dans leurs tissus de l'iode à des doses supérieures à celles de l'eau de mer. L'exploitation de l'iode a pendant longtemps été faite à partir des algues.

La concentration en polluant est très importante chez les saprophages (ex : annélides, décomposeurs), les lichens et les fruits de mers ce qui fait d'eux des bioindicateurs. Une analyse des polluants de ces organismes témoigne du niveau de pollution du milieu.

3.2.2. La bioaccumulation

C'est une accumulation des substances à travers la chaîne alimentaire.

Les substances peuvent être absorbées par les êtres vivants. Comme elles sont peu ou pas biodégradables, les doses absorbées restent intactes et augmentent d'un niveau trophique à une autre. On a alors une pyramide de concentration inverse à celle des biomasses.

Les métaux lourds s'accumulent au niveau des cellules hépatiques, les molécules liposolubles s'accumulent dans les graisses...

On appelle facteur de concentration (FC) le rapport de la concentration d'un polluant par la concentration du polluant dans le milieu.

On appelle facteur de transfert (FT) le rapport de la concentration du polluant dans un organisme de rang $n+1$ par sa concentration chez l'individu de rang n (l'organisme $n+1$ étant le prédateur de l'organisme n).

L'homme étant le super-prédateur, il est au sommet de la chaîne alimentaire et accumule dans son organisme, ses propres polluants en quantités. La bioaccumulation est responsable de beaucoup de cancers.

Par le jeu de des chaînes alimentaire et des courants atmosphériques et hydrosphériques, les polluants vont s'étendre à toute la biosphère.

Chapitre III

La pollution atmosphérique

Chapitre III : La pollution atmosphérique

I. Les types de la pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique se divise en trois catégories :

I.1. Pollution de proximité et à l'échelle locale

Elle concerne les sources d'émission de gaz ou d'autres substances indésirables le plus souvent produits en milieu urbain (industries, chauffage, trafic...). Elle affecte en premier lieu la santé des populations par son action directe à court terme mais exerce aussi une toxicité à plus long terme pour certaines pathologies : cancer, asthme, maladie cardiovasculaire.

I.2. Pollution à l'échelle régionale

Elle concerne les zones situées à quelques dizaines de kilomètres (voire des centaines de kilomètres) des sources d'émission de pollution. Elle regroupe souvent sous ce terme les deux phénomènes de pollution que sont les pluies acides et la pollution photochimique.

I.3. Pollution planétaire

Elle concerne les deux problèmes identifiés :

- la diminution (« trou ») de la couche d'ozone stratosphérique due essentiellement à l'action des composés halogénés (chlore, brome, iode) libérés par les activités humaines.
- l'augmentation de l'effet de serre liée à la production excessive de certains gaz (CO = monoxyde de carbone, CO₂ = dioxyde de carbone, COV = composés organiques volatiles) entraînera de graves changements climatiques (élévation de la température du globe et des modifications climatiques qui ont des conséquences pour la vie terrestre).

La pollution atmosphérique peut résulter soit d'une modification quantitative par la hausse de la concentration dans l'air de certains de ses constituants normaux (CO₂, NO₂, O₃), soit d'une modification qualitative due à l'introduction de composés étrangers à ce milieu (radioéléments, substances organiques de synthèse par exemple), soit encore, et c'est le cas général, d'une combinaison de ces deux phénomènes.

Avec la civilisation moderne, les quantités de substances rejetées dans l'atmosphère, altérant la composition normale de l'air, n'ont cessé d'augmenter. L'origine des différentes substances polluant l'atmosphère est des plus variées. La combustion des diverses formes du carbone fossile (charbon pétrole, gaz naturel) joue un rôle prépondérant dans la contamination de l'air.

Les différentes substances ont des durées de vie dans l'atmosphère qui sont extrêmement variables, ce qui explique que les problèmes de pollution se situent sur des différentes échelles de temps et d'espace très variables.

2. Les types des polluants atmosphériques

- **Les polluants primaires** sont les polluants que l'on trouve à l'endroit de l'émission. Par exemple, le CO est un polluant primaire.
- **Les polluants secondaires** sont des polluants qui ne sont pas émis, mais qui résultent de la transformation physico-chimique des polluants primaires au cours de leur séjour dans l'atmosphère. Par exemple, l'ozone résulte de réactions chimiques impliquant notamment les oxydes d'azote et les COV. Il est possible ainsi, de réaliser un inventaire d'émission pour les polluants primaires, mais pas pour les polluants secondaires.

Les polluants actuellement réglementés et font l'objet de mesures continues dans l'air réalisées par les associations de surveillance de la qualité de l'air. Ils sont divisés en deux catégories : les polluants en phase gazeuse et les polluants en phase particulaire. Les gaz représentent 90% de la masse des polluants atmosphériques et les particules les 10% restants. La proportion de ces dernières a tendance à diminuer car les efforts de réduction de la pollution atmosphérique ont prioritairement concerné au cours des vingt dernières années les particules (fumées émises par les usines, les chaufferies et les centrales thermiques, les échappements des moteurs diesels) car elles représentent la fraction la plus visible de la pollution de l'air.

- **Les polluants gazeux**

- le dioxyde de soufre : SO₂
- le monoxyde de carbone : CO
- le dioxyde d'azote : NO₂
- l'ozone : O₃
- le benzène : C₆H₆
- COV (composés organiques volatiles)

Les grandes familles de composés organiques volatiles

- 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 aromatiques mono ou polycycliques (assez abondants et réactifs, par exemple, benzène, toluène ...).

Parmi les aromatiques, les **hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP** constituent un groupe particulier en raison de leurs caractéristiques chimiques et toxicologiques (cancérogènes) et ils font l'objet d'une surveillance particulière du fait de leur dangerosité : ces composés sont très nombreux et les plus courants sont : fluoranthène, benzo(b) fluoranthène, benzo(k) fluoranthène, benzo(a)- pyrène, benzo(ghi)perylène, indeno.

- **Les polluants particuliers**

- les particules (PM10 et PM2,5)
- les hydrocarbures (Benzo(a)pyrène)
- le plomb : Pb
- le cadmium : Cd
- l'arsenic : As
- le nickel : Ni
- le mercure : Hg

Les métaux lourds

Les métaux lourds désignent en général les métaux dont le poids atomique est supérieur à celui du fer. Ces métaux sont parfois également désignés par le terme de métaux traces ou d'éléments traces métalliques. On considère en général les métaux lourds suivants : Arsenic (As), Cadmium (Cd), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), Mercure (Hg), Nickel (Ni), Plomb (Pb), Sélénium (Se), Zinc (Zn). Chaque métal possède des caractéristiques et un impact propre.

3. Problèmes environnementaux liés aux polluants atmosphériques

Les impacts de la pollution conditionnent la plupart du temps le choix des substances retenues dans un inventaire. L'échelle géographique pertinente pour analyser les phénomènes de pollution de l'air va du très local (par exemple odeurs, effets des particules, du benzène, ... sur la santé) à l'échelle mondiale (par exemple effet de serre, couche d'ozone), en passant par des phénomènes régionaux ou continentaux (pluies acides ou pollution photochimique). On classe souvent les effets en fonction de l'échelle qui les concerne.

3.1. L'effet de serre : échelle mondiale

L'effet de serre est un phénomène avant tout naturel de piégeage par l'atmosphère du rayonnement de chaleur émis par la terre sous l'effet des rayons solaires. Il permet une température sur Terre bien supérieure à celle qui régnerait en son absence. Le groupe de gaz responsables de ce phénomène est présent dans l'atmosphère à l'état de traces ; il s'agit, pour l'essentiel, du gaz carbonique (CO₂), du méthane (CH₄) et du protoxyde d'azote (N₂O). C'est parce que les teneurs atmosphériques de ces gaz sont naturellement très faibles que les émissions dues aux activités humaines sont en mesure de les modifier

sensiblement, entraînant, a priori, un renforcement de l'effet de serre, et par suite, des modifications possibles du climat.

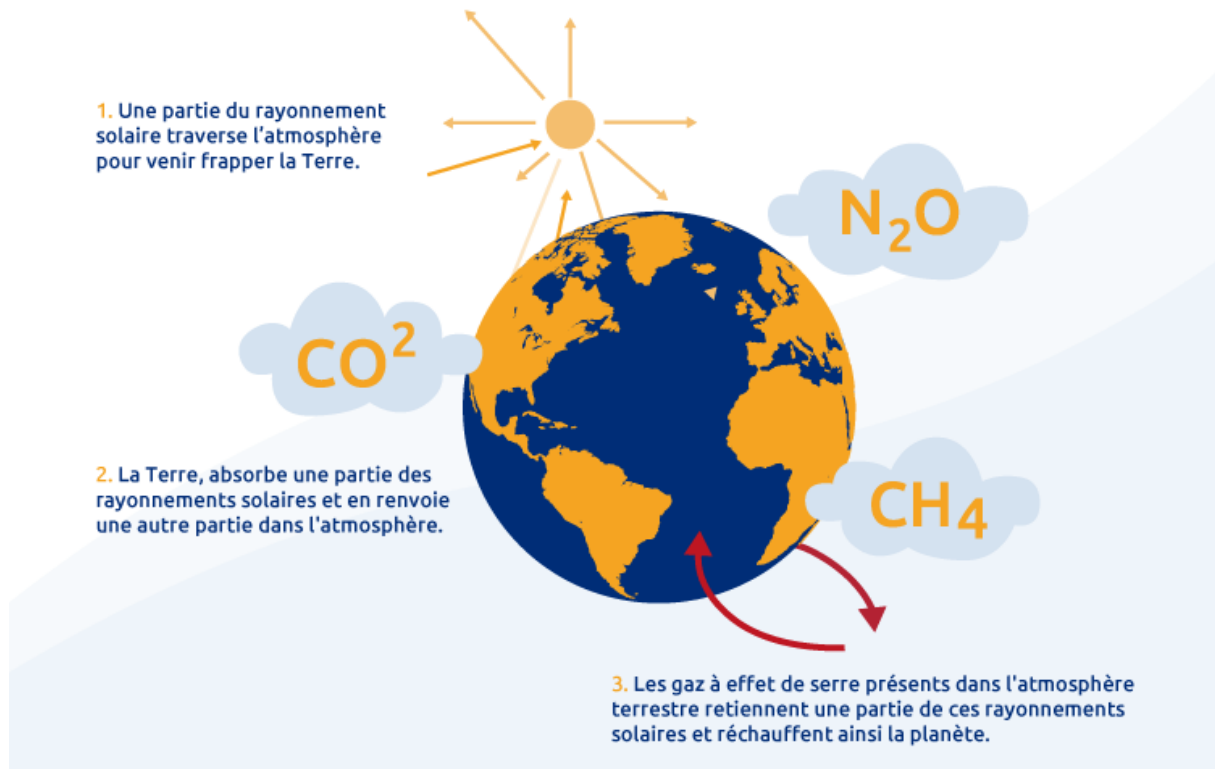


Figure 1 : Phénomène de l'effet de serre

Conséquences du réchauffement climatique dû à l'action de l'homme :

- Les prévisions suggèrent que les variations dans l'importance et la distribution des précipitations seront considérables. En conséquence certaines régions pourraient connaître un accroissement de l'aridité sur des surfaces étendues à savoir l'Amérique du Nord tempérée.
- En outre la hausse des températures moyennes diminuerait sensiblement le rendement des cultures, la chaleur étant un facteur limitant bien connu de la productivité primaire nette dans les écosystèmes tropicaux.
- L'accroissement de l'effet de serre induira de nombreux autres bouleversements climatiques aux conséquences désastreuses : augmentation de la fréquence des vents violents, de tempêtes, inondations aux latitudes tempérées et les cyclones dans les zones tropicales.
- Impact considérable sur les écosystèmes et leur biodiversité terrestres et marins : les plus affectés seront **les récifs coralliens**. En effet, les coraux sont des espèces sténothermes qui ne peuvent supporter qu'une faible élévation de la température moyenne des eaux superficielles.
- Une hausse continue du niveau moyen des océans : Dans un premier temps, cette hausse, estimée à quelques cm depuis le début du XXe siècle, résulte de la simple

dilatation thermique des couches supérieures de l'océan sous l'effet de l'accroissement de la température des eaux.

L'élévation du niveau moyen des mers qui a atteint au cours du dernier siècle une dizaine de cm est estimée comprise entre 0,15 cm et 1 mètre d'ici la fin XXIe

3.2. La destruction de la couche d'ozone

La couche d'ozone ou ozonosphère désigne la partie de la stratosphère contenant une quantité importante d'ozone. L'ozone quant à lui est un gaz incolore, très rare, présent dans toute l'atmosphère terrestre.

Entre 15 et 35 kilomètres au-dessus de la surface de la terre, se trouve la couche d'ozone. Elle concentre 90 % de l'ozone de l'atmosphère et intercepte la plus grande partie des rayons ultraviolets du soleil. Sans elle la vie serait impossible sur notre planète. Or, les scientifiques constatent l'apparition d'un « trou » dans cette couche protectrice en basse altitude. Son existence fut démontrée en 1913

L'homme rompt l'équilibre naturel entre la production et la destruction d'ozone stratosphérique. Il favorise la destruction de l'ozone en rejetant certains gaz qui, sous l'effet des rayons ultraviolets libèrent du chlore ou du brome qui décomposent l'ozone (O₃). Comme agent direct de destruction de la couche d'ozone, l'homme détruit la couche d'ozone par des agents chlorés comme :

- Les nombreuses mesures effectuées dans la stratosphère mettent en présence une forte concentration de composés chlorés tels que les chlorofluorocarbures (CFC), produits utilisés depuis les années 30 dans l'industrie et les produits de la vie quotidienne : les bombes aérosols, les systèmes réfrigérants, l'air conditionné, les solvants...
- D'autres gaz comme les oxydes d'azote émis par les voitures, les composés bromés et les composés halogénés contribuent également à la destruction de la couche d'ozone. Les gaz émis montent progressivement dans l'atmosphère pour atteindre les couches de la stratosphère. Ces gaz sont extrêmement stables et peuvent rester entre 50 ans et un siècle d'où leur fort pouvoir destructeur.

Des effets néfastes sur la santé :

La surexposition aux rayons ultraviolets peut entraîner des effets nocifs pour la santé :

- À court terme, augmentation des effets « coup de soleil » c'est-à-dire un dessèchement de la peau ainsi que des brûlures.
- À long terme, augmentation des cancers de la peau.
- Affaiblissement du système immunitaire : l'organisme est donc moins résistant aux maladies
- Affections oculaires : inflammation de la cornée ou la cataracte notamment.

Sur notre environnement :

Les effets nocifs sur l'environnement se manifestent par la croissance ralentie des végétaux la diminution de l'immunité face aux maladies infectieuses. Ce qui entraîne une diminution de la production agricole et sylvicole. Sans compter les retombées sur les écosystèmes naturels et en particulier les milieux aquatiques très sensibles à ce genre de phénomènes.

3.3. Acidification : échelle régionale/continentale (mésoclimats)

Ce phénomène se caractérise par la présence dans les eaux de pluies d'acides forts. Les concentrations sont parfois très élevées avec pour conséquence des pH anormalement bas pouvant être inférieur à 3 dans des cas extrêmes alors que dans les conditions naturelles le pH des pluies, dans les milieux continentaux en l'absence de pollution atmosphérique, est voisin de la neutralité et en tout cas supérieur à 6 comme en témoignent les archives glaciaires.

Les conséquences des pluies acides

- Principale conséquence visible : les pluies acides engendrent notamment un dépérissement à vaste échelle des forêts de conifères. Selon les observations, les arbres dépérissent, y compris le sol et la flore du sol devenu acide. Au niveau des arbres, les feuilles jaunissent adoptent une coloration anormale et finalement voient leur feuillage s'étioler totalement.
- Certains lacs situés sur terrains cristallins ont vu leur acidité augmenter significativement au point que certains lacs scandinaves pourraient ne jamais se remettre des pluies acides qui se sont abattues sur eux par le passé.
- Les pluies acides s'attaquent à certains métaux et provoquent l'érosion des bâtiments.
- Concernant notre santé, les pluies acides entraînent des problèmes respiratoires.
- Paradoxalement, les pluies acides ont alcalinisés les deux tiers des cours d'eau du Nord-Est américain (PH > 7).

En effet, l'acide dissout les roches calcaires et carbonatées qui dispersent alors leurs particules alcalines dans les cours d'eau.

Ce qui complique ensuite le traitement de l'eau potable.

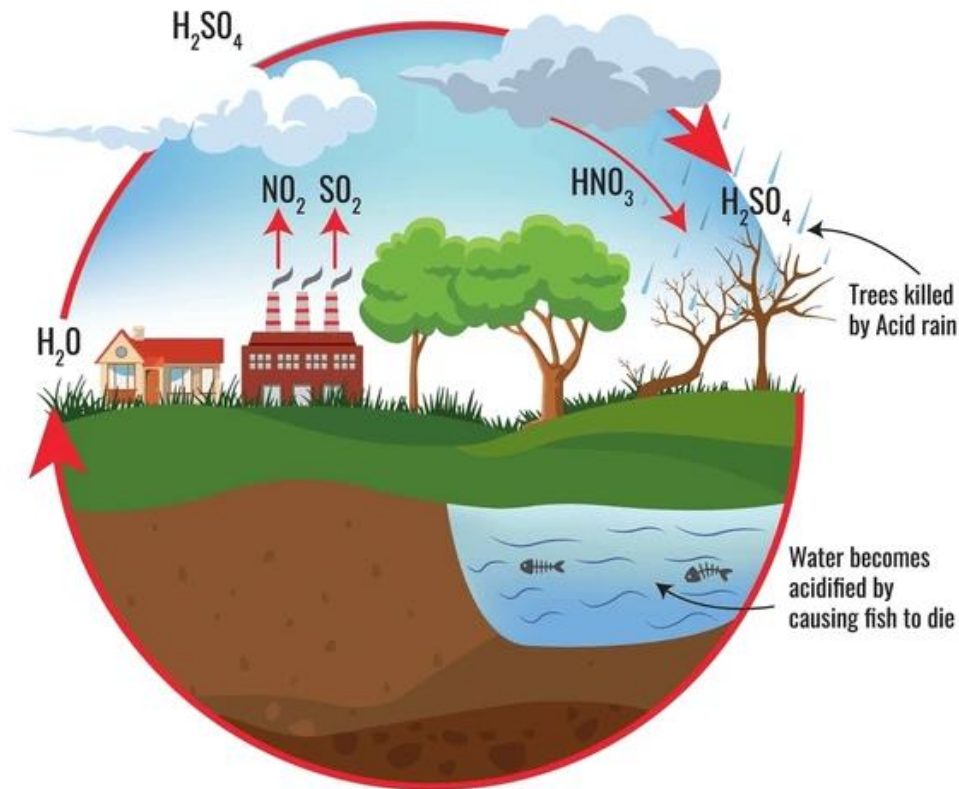


Figure 2 : Les conséquences des pluies acides

4. Effets de la pollution atmosphérique

✚ Sur la végétation

La pollution atmosphérique cause beaucoup de dégâts sur les végétaux. L'augmentation des gaz polluants perturbe les arbres, qui se mettent à fabriquer des branches déformées. Parmi les premières victimes, les sapins et les épicéas qui se mettent à jaunir. Les particules grasses de Diesel bouchent aussi les pores des feuilles. La plante respire mal et sa photosynthèse est perturbée.

De plus, des études ont montré que l'ozone faisait chuter le rendement de certaines cultures agricoles. Mais c'est sans compter avec les pluies, les neiges et les brouillards acides qui, eux aussi, causent de nombreux dommages. Les pluies acides sont le fruit d'une rencontre entre un nuage de pluie et un nuage de pollution. Le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote vont se dissoudre dans l'eau. Une fois dissous, ils se changent en acides. Acide sulfurique pour le soufre et acide nitrique pour l'azote. Ces acides sont particulièrement corrosifs : les feuilles sont brûlées et le sol perd de sa fertilité.

Sur les populations humaines

La pollution a un impact sur notre santé. Les personnes âgées et les enfants sont les plus sensibles. Par ailleurs, les citadins sont considérés comme une population à risque, à cause de l'importante circulation automobile et des rejets industriels.

La pollution atmosphérique affecte la santé. Trois millions d'êtres humains meurent chaque année à cause de la pollution de l'air, soit 5 % des décès annuels mondiaux, selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS). La pollution atmosphérique est également responsable d'allergies et de maladies respiratoires. Les effets de cette pollution sur l'organisme humain dépendent de multiples facteurs : intensité de la pollution, âge des individus, région, etc.

5. Pollution atmosphérique et santé : les personnes à risque

Les personnes âgées et les enfants jusqu'à 12 ans sont plus sensibles à la pollution atmosphérique, car leur organisme est moins bien protégé. Enfin, les personnes dites « sensibles » (qui souffrent d'allergie, de maladie cardiorespiratoire et les fumeurs) doivent également faire attention. Lorsque les pics de pollution sont atteints, il est recommandé à ces personnes à risque de ne pas sortir. Plus généralement, les citadins sont considérés comme une population à risque, à cause de l'importante circulation automobile et des rejets industriels.

Risques à court terme de la pollution atmosphérique

Lors d'une période de forte pollution atmosphérique et durant les quelques jours qui suivent, les études montrent une augmentation des hospitalisations, due notamment à une hausse des crises cardiaques (mortelles ou non).

Risques à long terme sur la santé

Un individu soumis à la pollution atmosphérique sur une longue durée, même à faible dose, risque davantage d'être touché par une maladie cardiopulmonaire (infarctus du myocarde, asthme, etc.). Les risques de cancer sont également plus importants. La pollution atmosphérique contribue à une baisse de la fertilité, à une augmentation de la mortalité infantile et à un affaiblissement du système immunitaire.

Pense-bête : l'activité sportive est déconseillée lors des pics de pollution, car elle provoque une forte ventilation qui augmente notamment les risques d'inflammation des poumons.

Chapitre IV

La pollution aquatique

Chapitre IV : Pollution aquatique

Dans les pays industrialisés, l'eau douce est polluée par les phosphates (détergents), les nitrates et pesticides (pratiques agricoles), les métaux lourds (industries, agriculture, pluies acides), les hydrocarbures (industrie pétrolière et transports), les rejets d'eaux chaudes des centrales thermiques, les radio-isotopes provenant des installations nucléaires, etc.

Dans les pays en développement, les eaux contaminées par des virus, déjections animales et humaines, provoquent des maladies diarrhéiques (5 millions d'enfants de moins de 1 an meurent chaque année), dysenterie, choléra, fièvre typhoïde, hépatite A.

Par ailleurs, environ 90% des eaux de canalisation et 70% des eaux de déchets industriels sont déversées sans faire l'objet d'une épuration préalable, ce qui pollue les ressources disponibles en eau.

Un préalable de développement durable doit s'assurer que les écosystèmes aquatiques ne soient pas contaminés.

Les types de pollution de l'eau

I. Pollution chimique : Les micropolluants dans l'environnement aquatique

I.1. Définition

Un « micropolluant » est un polluant présent en quantité très faible dans l'environnement, soit de l'ordre du microgramme par litre ($\mu\text{g/l}$) ou du nanogramme par litre (ng/l), mais toujours en quantité plus élevée que naturellement. On parlera plus spécifiquement de xénobiotique lorsque ce polluant est étranger à la biocénose et donc issu uniquement de l'activité humaine.

On distingue généralement les micropolluants inorganiques, constitués des métaux lourds, des micropolluants organiques comme les pesticides, médicaments, hydrocarbures, biocides, etc.

I.2. Sources

On peut distinguer trois principaux types de sources de pollution des eaux de surface par les micropolluants :

- Une source agricole et forestière : pesticides et antibiotiques,
- Une source urbaine :
- Une source industrielle

A cette liste s'ajoutent aussi les sites contaminés (anciens sites industriels, anciennes décharges, etc.) ainsi que la pollution par les eaux de pluie : les gouttes d'eau lessivent l'atmosphère des particules et des polluants qu'elle contient.

I.3. Types

On peut distinguer deux types de pollution du milieu aquatique par les micropolluants : une pollution continue ou une pollution intermittente. Ces deux types de pollution sont liées au type d'émission des micropolluants.

-L'émission continue : concerne les substances que l'on rencontre dans les eaux d'usage domestique (eaux usées) et qui sont utilisées quotidiennement. Il s'agit des substances incluses dans les produits cosmétiques, les produits de nettoyage... On trouve également dans cette catégorie les médicaments, les antibiotiques et les hormones de synthèse.

-L'émission intermittente : est liée essentiellement au temps de pluie. Elle concerne les substances qui sont appliquées, sont contenues ou se déposent sur les surfaces (sols agricoles, routes, jardins, façades, toits. etc.) et qui sont entraînées par les eaux de pluie. En milieu urbain, ces eaux ruissellent sur les surfaces et sont collectées par les réseaux d'assainissement.

I.4. Conséquence de la pollution chimique des eaux

*** Effets des substances organiques de synthèse**

Dans les eaux de surface il semble que la stabilité des médicaments soit très variable. Cependant, comme ces substances sont déversées de manière plus ou moins continue, les organismes sont soumis à la pollution de façon constante durant plusieurs générations. Cette pollution ne semble pas toxique à court terme car les concentrations engendrant des effets aigus sont relativement élevées et donc peu susceptible d'être rencontrées dans le milieu aquatique. Actuellement, il n'est donc pas possible d'exclure que les médicaments puissent avoir des effets à long terme sur le milieu aquatique.

Ainsi, le 17 α -éthinyloestradiol, hormone de synthèse utilisée dans les pilules contraceptives est supposé pouvoir engendrer des effets sur les communautés de poissons aux concentrations détectées dans l'environnement, soit de l'ordre de quelques ng/l.

*** Les pluies acides**

Les pluies acides modifient les équilibres chimiques des milieux récepteurs, en particulier lorsque ceux-ci sont déjà naturellement acides (pas d'effet tampon). Ceci peut se répercuter par :

- Des atteintes sur la faune et la flore aquatique
- Des carences nutritives engendrant des chutes de rendement
- Des lésions visibles chez les végétaux
- Des jaunissements et la défoliation des arbres
- L'impact le plus important de la forte baisse du pH des eaux naturelles est la dissolution de l'aluminium. En effet, à partir de $\text{pH} < 6$, la solubilité de cet

élément dans les biotopes aquatiques augmente considérablement et il s'ensuit une régression rapide de l'ensemble de la communauté

- L'acidification des lacs et des rivières entraîne une disparition des poissons.

*** Mercure**

La pollution des eaux continentales ou marines par le mercure a donné une illustration spectaculaire des redoutables conséquences écotoxicologiques.

*** Plomb**

Le saturnisme (maladie correspondant à une intoxication par le plomb) dû à la contamination des écosystèmes limniques par les plombs de chasse menace de nombreuses espèces essentiellement d'oiseaux d'eau dont beaucoup sont rares ou en danger. Trois plombs suffisent pour provoquer la mort chez le cygne.

*** Hydrocarbures**

La pollution par les marées noires et autres causes de rejets d'hydrocarbures en milieu marin constitue une importante cause de perturbation des écosystèmes océaniques.

- Le pétrole est très toxique pour les autotrophes marins. Il exerce une diminution de la production primaire du phytoplancton en inhibant la photosynthèse.
- Le pétrole provoque un raccourcissement des chaînes trophiques marines lié à la disparition du zooplancton de grande taille, ainsi que les jeunes saumons qui s'en nourrissent. A la base du réseau trophique, le microphytoplancton est remplacé par du nanoplancton, tandis que les Crustacés sont remplacés par des méduses.
- La flore et la faune benthiques littorales sont très affectées par les marées noires (lors de naufrage) et dans certains cas par une pollution chronique : destruction des récifs coralliens et des phanérogames, mortalité des Invertébrés benthiques, des Crustacés et des Lamellibranches
- Les marées noires et la contamination chronique par le pétrole provoquent la mort des populations d'oiseaux littoraux et aquatiques migrateurs, voire des nombreuses espèces de Mammifères marins.

2. Pollution biologique

Les agents biologiques de pollution de l'eau sont les **micro-organismes** et les **matières organiques fermentescibles**.

2.1. La pollution microbiologique des eaux

La pollution microbiologique des eaux se traduit par une forte contamination par de nombreux agents pathogènes, bactéries, protozoaire et virus. Elle soulève dans bien des cas de redoutables problèmes d'hygiène publique qui ne sont pas limités aux seuls pays du tiers-monde.

- De façon générale, l'eau de boisson et celle utilisée pour la préparation des aliments constituent la principale cause de pathologie des populations humaines.
- La pollution par des matières organiques permet à de nombreuses espèces de germes pathogènes de se multiplier dans des proportions élevées
- Les eaux usées des anciens abattoirs rejettent de germes aérobies et de germes anaérobies, dont plusieurs espèces pathogènes.
- Le rejet des eaux d'égout urbains en mer présente de sérieux risques bactériologiques pour les baigneurs et aussi pour les consommateurs de coquillages.

Cette extension incessante de la pollution microbiologique des eaux continentales et littorales a pour conséquence des affections telles que les colibacilloses ou les hépatites virales, dysenteries, y inclus du choléra, de la typhoïde, des shigelloses, des maladies virales entériques.

2.2. La pollution des eaux par des matières organiques fermentescibles (MOF)

Outre le rejet des égouts urbains, il faut mentionner ceux de diverses industries agroalimentaires hautement polluantes : abattoirs, laiteries, fromageries, sucreries, etc.

L'industrie du papier (papeterie) occupe une place de choix relativement à son potentiel intrinsèque de pollution des eaux. En effet, elle rejette des lessives riches en glucides, donc hautement fermentescibles. Une papeterie « moyenne » présente une capacité de pollution des eaux par les matières organiques fermentescibles (MOF) comparable à celle d'une ville de 500000 habitants, lorsqu'elle rejette à la rivière ses eaux usées sans épuration préalable.

La charge de pollution d'une eau par les MOF s'évalue par la demande biologique d'oxygène en 5 jours (DBO₅).

Selon la loi française, une eau n'est considérée comme potable que si sa charge organique correspond à une DBO₅ inférieure à 5 mg/l, sa teneur en oxygène dissous excède 4 mg/l, si sa charge microbiologique est inférieure à 50 germes coliformes par cm³, enfin elle si est exempte de résidus toxiques.

2.3. Pollution par des espèces invasives : La Caulerpe "*Caulerpa taxifolia*"

Caulerpa taxifolia est une algue marine à croissance rapide qui, à l'origine, ne poussait que dans les eaux chaudes. Elle est généralement utilisée comme plante décorative d'aquariums. Vers 1994, un type génétiquement modifié de *Caulerpa taxifolia* a été accidentellement relâché dans la Mer Méditerranée. Il possédait certaines caractéristiques morphologiques et physiologiques peu communes en comparaison avec les populations tropicales. Ayant de plus grandes et plus longues frondes (partie chlorophyllienne de l'algue) et une densité de population plus élevée, l'algue envahissante a fait preuve d'une adaptation à un plus grand éventail de températures, tout en sécrétant une concentration plus élevée en substances toxiques synthétisées. Aujourd'hui, l'invasion de cette algue a atteint une ampleur spectaculaire dans le bassin méditerranéen (plus de 30 000 ha

concernés). Formant d'épais tapis denses, cette algue est beaucoup plus compétitive que les autres, entraînant une perte de biodiversité importante. Les activités locales souffrent également de cette menace sur l'éco diversité ; la plongée sous-marine, le tourisme en général et l'industrie de la pêche sont déjà affectés par l'introduction de cette espèce allochtone dans diverses régions du globe.



Figure 3 : *Caulerpa taxifolia*

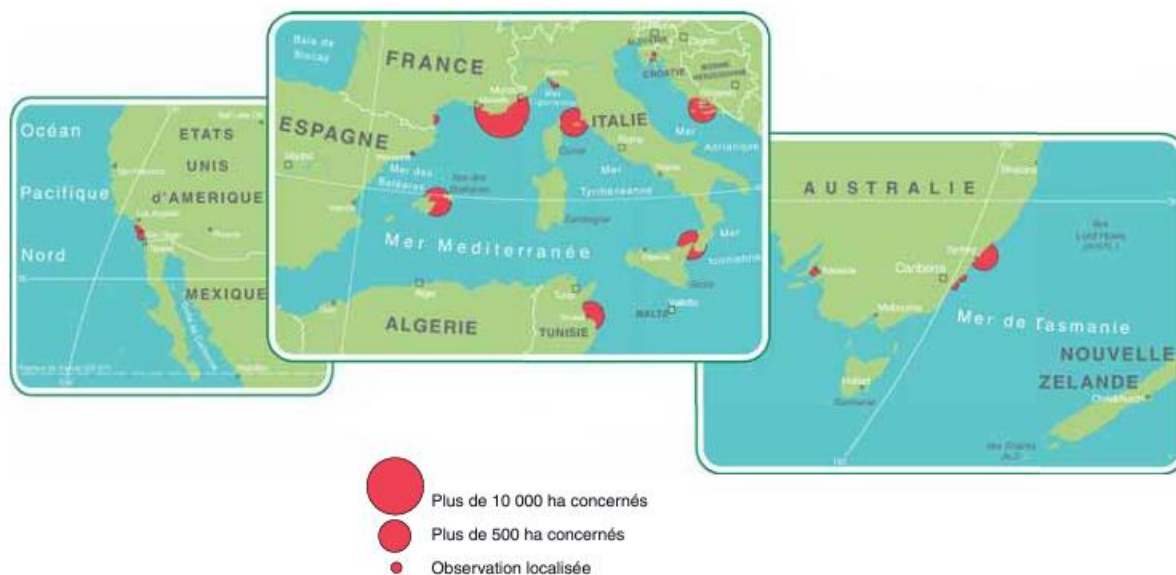


Figure 4 : Zones concernées par l'algue génétiquement altérée *Caulerpa taxifolia*

Conséquences de l'invasion de *Caulerpa taxifolia* :

L'expansion rapide de *Caulerpa taxifolia* le long des côtes méditerranéennes a été associée à la pollution par les eaux usées urbaines. De plus, elle se multiplie facilement en utilisant la propagation végétative. Sa dispersion est facilitée par les ancres de bateaux, les filets de pêche ou les eaux de ballast qui peuvent en transporter des fragments, en particulier vers

les ports, les marinas et d'autres lieux de mouillage. La colonisation à plus grande échelle est facilitée par les courants qui peuvent véhiculer des fragments dans de nouveaux secteurs établissent de nouvelles pousses.

Son mécanisme de défense chimique (l'algue produit les toxines répulsives) la rend désagréable aux herbivores généralistes. *Caulerpa taxifolia* déstabilise les biocénoses en envahissant et faisant concurrence à la flore indigène, de ce fait, menace la stabilité biologique de l'environnement marin. Avec son taux de croissance spectaculaire de 1 cm par jour, l'algue devient une menace importante pour les habitats protégés. La plupart des algues indigènes régressent et tendent à disparaître. La composition faunistique est fortement modifiée. Le nombre d'espèces de poissons ainsi que le nombre d'individus, la biomasse et leur poids moyen sont bien inférieurs dans les habitats colonisés par l'algue. En conclusion, d'un point de vue économique, l'invasion de cette algue a également eu des effets négatifs pour le tourisme et ayant un effet désastreux sur la plongée sous-marine. Le commerce de la pêche déplore également un manque à gagner non-négligeable par la perte de diversité piscicole et l'endommagement des filets de pêche.

2.4. Conséquence de la pollution par les polluants organiques en milieu lentique : Eutrophisation

L'eutrophisation est due à un apport excessif en nutriments et en matières organiques biodégradables issus de l'activité humaine. Elle s'observe surtout dans les milieux aquatiques dont les eaux sont peu renouvelées et stimulées par un apport soutenu en phosphore et azote. Cela peut se produire suite à des rejets excessifs de composés azotés ou phosphorés par voie d'égout ou bien encore par la modification des courants naturels (digues, détournement de cours d'eau).

Le phytoplancton et certaines plantes aquatiques croissent et se multiplient de manière excessive, ce qui conduit, lorsqu'elles se décomposent, à une augmentation de la charge naturelle de l'écosystème en matières organiques biodégradable. Les bactéries, qui dégradent cette matière organique, prolifèrent à leur tour, en consommant de plus en plus l'oxygène de l'eau.

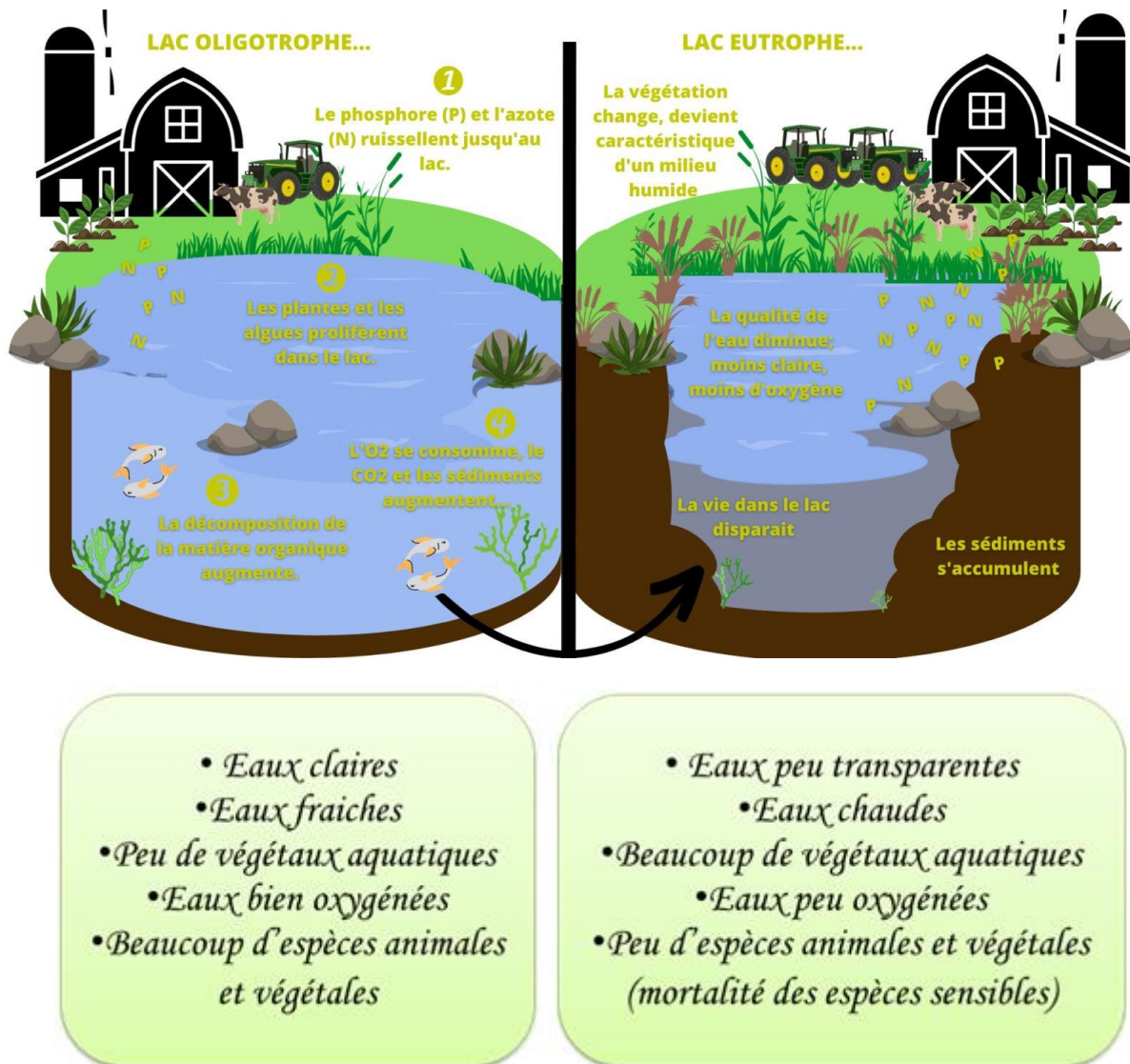


Figure 5 : Différences entre le milieu oligotrophe et le milieu eutrophe

3. La pollution thermique des eaux

Le rejet de chaleur dans l'environnement aquatique constitue de nos jours une forme de pollution physique du milieu naturel susceptible de provoquer de véritables bouleversements biocénétiques car il agit sur un facteur écologique primordial, la température du milieu.

En effet, l'utilisation des eaux continentales et littorales pour le refroidissement des centrales électriques conventionnelles ou nucléaires, les aciéries et d'autres industries lourdes se traduit par un rejet de chaleur dans l'environnement pouvant affecter la santé des écosystèmes aquatiques récepteurs.

Cette pollution thermique des eaux, improprement appelée « caléfaction » par certains biologistes, est un phénomène de nature physique.

En effet, il a pris un développement important au moment où se sont développés les programmes électronucléaires dans divers pays industrialisés.

Conséquences écologiques de la pollution thermique des eaux

- En règle générale, une centrale « moyenne » fonctionnant aux combustibles fossiles, élève de 5°C la température des cours d'eau
- L'élévation de la température des eaux diminue le taux d'oxygène dissous.
- La pollution thermique diminue aussi la teneur des eaux en azote et en gaz carbonique.
- Le réchauffement des eaux provoque une diminution de la concentration en ions calcium lesquels sont indispensables à l'ossification des poissons, la coquille des Mollusques ou l'exosquelette des Invertébrés marins
- L'échauffement des eaux diminue la diversité du phytoplancton et de façon plus générale de toute la flore algale.
- Les Invertébrés tant planctoniques que benthiques sont directement affectés par la pollution thermique. On cite, les cladocères, les copépodes, les larves d'insectes, les mollusques, les poissons

Les solutions à la pollution aquatique

Un moyen de protection des eaux : les stations d'épuration

Actuellement, il est nécessaire de nettoyer l'eau usée pour empêcher la destruction des écosystèmes aquatiques et pour rendre l'eau potable. Une station d'épuration est un dispositif qui permet d'éliminer la majorité des polluants néfastes contenus par les eaux d'origine urbaine ou industrielle. Le retraitement des eaux usées urbaines peut atteindre divers degrés d'épuration. On distingue des traitements primaires, secondaires, tertiaires voire quaternaires.

Chapitre V

La pollution du sol

Chapitre V: La pollution du sol

I. Introduction

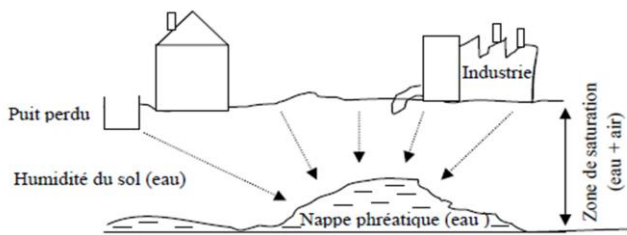
La pollution du sol peut être locale ou diffuse d'origine agricole, industrielle ou microbienne et qui touche le sol proprement dit ou l'eau souterraine.

Cette eau souterraine n'est pas limitée dans certaines dépressions mais se trouvant dans tout le sol, dans des interstices, des particules de roches et des sols ou dans les fissures de roches.

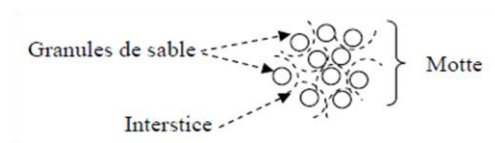
L'eau souterraine coule lentement à différents débits à travers des formations aquifères. A certains endroits, cette eau fait dissoudre le calcaire (CaCO_3) pour former des grottes.

Le niveau au-dessous duquel tous les interstices sont remplis d'eau s'appelle la surface de saturation. Au-dessus de cette surface se trouve la zone de saturation où les espaces du sol contiennent de l'air et de l'eau.

L'eau dans cette zone s'appelle l'humidité du sol.



Organisation des sols



Structure d'une motte

La pollution du sol est consécutive à l'utilisation massive d'engrais ou de pesticides qui peuvent avoir plusieurs impacts sur l'environnement en s'infiltrant dans les sols et la nappe phréatique qui peut contaminer aussi la culture.

La pollution du sol peut d'origine agricole ou d'origine industrielle microbienne.

2. Pollution d'origine agricole

Cette pollution s'intensifie avec le développement de l'agriculture moderne. Elle est difficile à quantifier car elle est souvent diffuse.

2.1. Les pesticides

Les pesticides, appelés encore biocides, sont des substances toxiques minérales ou organiques de synthèse ou naturelles destinés à protéger les végétaux contre les ravageurs qui sont des animaux qui diminuent considérablement la production des plantes cultivées.

Ils sont utilisés en quantité considérable depuis + de 50 ans. On les trouve partout parce qu'ils sont appliqués directement sur le sol ou par traitement préalable des semences.

Ils sont généralement composés d'une ou plusieurs substances actives auxquelles sont associées des adjuvants (= additifs) qui peuvent être toxiques. On peut classer les pesticides de diverses manières.

La toxicité dépend à la fois de la dose, des modalités de l'exposition, de degré d'absorption, de la nature des effets de la matière active et de ses métabolites.

L'utilisation des pesticides n'est pas sans danger pour la santé de l'homme, la sécurité alimentaire et même le revenu des paysans. Ces problèmes sont particulièrement graves dans les pays en train du développement.

Les pesticides causent chez l'homme diverses nuisances à savoir :

- La perte de l'appétit
- La fatigue
- Les maux de tête
- Le vomissement
- Les troubles digestifs
- Des irritations cutanées fréquentes (40% des cas)
- Des troubles respiratoires
- Des problèmes neurologiques, d'allergie, d'asthme et des cancers (la leucémie: cancer du sang, cancer du cerveau, des poumons, des reins...).
- Des troubles de comportement de reproduction
- Perturbation du système immunitaire et hormonale.

Les ouvriers agricoles sont les plus exposés professionnellement notamment ceux travaillant dans les points d'élevage intensifs (élevage des poules) mais aussi les travailleurs dans les industries chimiques.

2.2. Les nitrates (NO₃⁻)

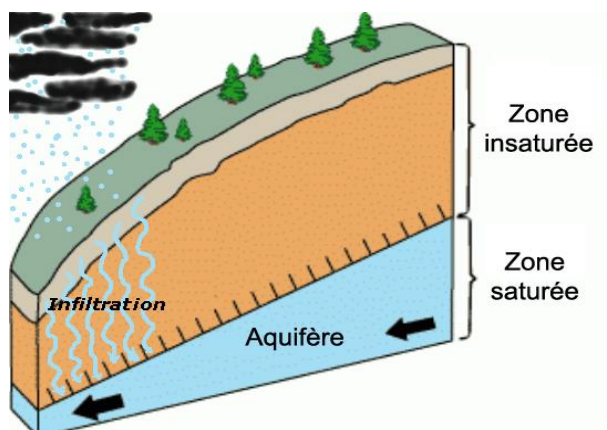
En fin d'hiver, la décomposition des plantes libère de l'azote qui sera disponible sous forme des sels azotés pour la prochaine culture. Les nitrates en excès, sont entraînés par le lessivage des sols en période pluvieuse. Ils ruissèlent vers les cours d'eau où s'infiltrent dans les nappes phréatiques. Ces engrais chimiques employés massivement pour augmenter les rendements altèrent la qualité des eaux souterraines. Ainsi, l'excès de nitrate peut provoquer une anémie mortelle.

3. Pollution d'origine industrielle et microbienne

Cette pollution est souvent ponctuelle touche l'eau souterraine.

Or, une nappe aquifère contaminée peu devenir inutilisable pendant des décennies et contaminer tout le réseau hydrologique.

Les risques de contaminations généralisés sont plus importants lorsque la pollution touche des aquifères de sables et de gravier.



L'eau souterraine dissout de nombreux composés et la plupart d'entre eux peuvent contaminer de grandes quantités d'eau.

Exemple : 1 litre suffit de contaminer 1 million litres d'eau souterraine.

Les sources de pollution industrielle et microbienne sont très variées.

Les contaminants provenant des fosses septiques peuvent créer de nombreux problèmes de contamination bactérienne et virale et provenant aussi de détergents et de produits de nettoyage.

Actuellement, il y a peu de surveillance de ce type de contamination.

Les liquides denses non aqueux sont des contaminants chimiques car ils sont plus lourds que l'eau et ils s'enfoncent donc très rapidement dans le sol. Ils sont utilisés dans le nettoyage à sec, la préservation du bois, l'usinage et peuvent être également déversés accidentellement par exemple lorsque les pneus sont brûlés.

Chapitre VI

La pollution par les déchets solides

Chapitre VI: La pollution par les déchets solides

I. Définition

On appelle un **déchet solide**, un déchet non fluide qui peut à cours du temps donner les **fluides**. Les déchets solides sont dangereux car ils sont très variés et n'ont pas tous les mêmes effets.

On peut classer ces déchets en fonction de leur **origine** mais aussi de leur **dégradabilité**.

On a constaté que la production de déchets solides est proportionnelle à l'accroissement économique du pays et que d'autre part, les produits peu dégradables augmentent en quantité dans les pays développés.

2. Diversité des déchets solides

- **Les ordures ménagères** : La plupart sont biodégradables car ils proviennent de l'alimentation.
- **Les divers détritrus** : Ils correspondent à des déchets d'emballage, papier, carton, plastique, métal et à des résidus de combustibles, de verre, de céramique.



- **Les déchets à risque (toxique)** : Ce sont des déchets qui sont potentiellement toxiques. Ils correspondent à des produits chimiques (le reste de peintures, de piles) mais aussi tous les déchets hospitaliers et les déchets de certaines usines, c'est eux qui doivent faire l'objet du ramassage spécifique ou les pneus.



3. Conséquences de l'accumulation et de la dispersion

Les déchets éliminés sans précautions, ils risquent non seulement de dégrader les paysages, mais aussi de polluer l'environnement et d'exposer l'homme à des nuisances et des dangers dont certains peuvent être très graves.

3.1. Les effets sur la santé

Selon leurs propriétés, les déchets solides industriels présentent un risque pour la santé. Ils sont qualifiés de dangereux quand ils peuvent porter une atteinte directe à la santé de l'homme du fait qu'ils possèdent une ou plusieurs des caractéristiques énumérées ci-dessous :

- **Irritants** : Ils peuvent provoquer une réaction inflammatoire par contact immédiat, prolongé ou répété avec la peau ou les muqueuses.
- **Nocif** : Ils peuvent entraîner des risques de gravité limitée par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée.
- **Toxique** : Ils peuvent entraîner des risques graves, aigus ou chroniques, voire la mort, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée.
- **Cancérogènes** : ils peuvent produire le cancer ou en augmenter la fréquence par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée.
- **Infectieux** : Ils contiennent des micro-organismes viables ou leurs toxines, dont on sait ou dont on a de bonnes raisons, de croire qu'ils causent la maladie chez l'homme ou chez d'autres organismes vivants.
- **Tératogène** : Ils peuvent produire des malformations congénitales non héréditaires ou en augmenter la fréquence par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée.
- **Mutagène** : Ils peuvent produire des défauts génétiques héréditaires ou en augmenter la fréquence, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée.



3.2. La détérioration du paysage

Tout ce qui va à l'encontre de l'esthétique est nocif pour l'économie d'un pays lorsque la laideur des pollutions peut défigurer des paysages et lorsque la saleté qui envahit des plages pouvant compter parmi les plus belles, les transforme en un repoussoir pour le tourisme.

En effet, l'amoncellement de débris cause la détérioration du paysage et sa métamorphose, souvent préjudiciables au devenir d'une zone, voire d'un pays.

Le grand public et les écologistes accordent une importance à la protection des paysages et les nuisances engendrées par les déchets.

3.3. La détérioration de la faune et de la flore

Les déchets, de par les fumées qu'ils dégagent, constituent l'une des raisons ayant conduit à l'appauvrissement du milieu naturel qui se reflète dans cette régression marquée de la faune et la flore.

Certaines espèces d'oiseaux, en tant qu'excellentes indicateurs de la qualité de l'environnement naturel, sont en voie de régression, voire même de disparition totale d'un environnement sain.

3.4. Les pertes économiques

La production de déchets pose de sérieux problèmes d'élimination compte tenu des quantités en cause et de la toxicité de certains d'entre eux. Elle s'accompagne aussi d'un gaspillage important de matières.

Les entreprises coopèrent pour optimiser l'usage des ressources, notamment en valorisant mutuellement leurs déchets (les déchets d'une entreprise servant de matière première pour une autre)

Chapitre VII

La pollution nucléaire

Chapitre VII : La pollution nucléaire

I. Introduction

La pollution nucléaire appelée encore radioactive est particulièrement dangereuse pour l'homme car les radioéléments non biodégradables ont une durée de vie plus ou moins longue et se désintègrent en émettant des rayonnements dangereux créant des tumeurs. Ils ont donc un caractère cancérogène et mutagène.

Cette pollution a plusieurs origines :

Naturelle : La principale source de la pollution nucléaire est naturelle. 1/3 de l'irradiation reçue est due au radon qui est un gaz naturel radioactif plus abondant dans les régions granitiques provenant de la désintégration de l'uranium. On cite aussi les rayonnements cosmiques, les aliments (radionucléides)

Industrielle : Ce type de pollution aura lieu lors de la production de l'électricité nucléaire, du retraitement des déchets nucléaires et du stockage des produits radioactifs dans l'industrie médicale. Toutes ces sources de pollution créent un certain nombre de déchets radioactifs dans d'autres industries notamment alimentaires pour la stérilisation (en faible dose) et la conservation des produits alimentaires contre genres bactériens et les insectes nuisibles.

Militaire : Cette pollution se manifeste lors des essais aériens des bombes nucléaires mais aussi avec les épaves de sous-marins atomiques.

Médicale : Cette pollution se déroule par l'utilisation de substances radioactives aux divers examens de radiographies médicales ou dentaires et anticancéreuse.

Accidentelle : Lors d'accidents nucléaires comme le Tchernobyl des éléments radioactifs peuvent se disperser parfois très loin de la zone d'accident selon la manière dont les rayonnements atteignent l'organisme.

2. Principaux types de radiations ionisantes

2.1. Définition

* Radiation : Energie émise et propagée sous forme d'ondes à travers un milieu ou dans le Vide

* Ionisant : capable d'ioniser la matière (capable d'arracher un électron à un atome ou un groupe d'atomes)

2.2. Types

Les rayonnements ionisants sont particulièrement dangereux car ils produisent l'ionisation de la matière qu'ils traversent ; ils regroupent :

- les rayonnements cosmiques flux de noyaux atomiques et de particules de haute énergie circulant dans le vide d'origine solaire, galactiques ou extragalactiques. Ils sont caractérisés par une grande intensité énergétique et capable de traverser plusieurs couches de roches : exemple les protons.

- les ondes électromagnétiques : La lumière visible est un rayonnement électromagnétique, mais ne constitue qu'une petite tranche du large spectre électromagnétique.

Les plus énergétiques dans ce groupe sont :

- Les rayons X sont produits par des transitions électroniques et sont pénétrants (imagerie médicale),
- Les rayons γ émis lors de la désintégration et sont très pénétrants traversant plusieurs mètres. Ils peuvent être arrêtés avec quatre mètres de béton.
- Les rayons α peu pénétrants et qui peuvent traverser plusieurs cm : La désintégration alpha peut être vue comme une forme de fission nucléaire où le noyau père se scinde en deux noyaux fils dont l'un est un noyau d'hélium.

- Les neutrons : Ce sont des particules classées avec les rayonnements ionisants car ils peuvent produire des rayons ionisants.

Les propriétés de tous ces rayonnements dépendent en particulier de la nature des particules et de l'énergie influençant leur pouvoir de pénétration. Par exemples les rayons X et γ peuvent pénétrer plusieurs centaines de m dans l'air.

2.3. Unités radiobiologiques

* le Curie (C) : est la plus ancienne unité de rayonnement/ il correspond à la désintégration de $3,7 \times 10^{10}$ atomes par seconde.

* le Rad constitue l'unité fondamentale de la radiobiologie. Elle se définit comme la dose de rayonnement correspondant à l'absorption par l'organisme d'une énergie de 100 ergs (unité de mesure de l'énergie) par gramme de tissu

3. Effets biologiques des radiations ionisantes

3.1. Les modalités de contamination

* irradiation externe, due aux rayonnements présents dans le milieu ambiant

* irradiation interne consécutive à l'inhalation ou l'ingestion de radionucléides

3.2. Effets biologiques

Les cellules vivantes ne sont pas également sensibles aux radiations :

- Les procaryotes sont beaucoup plus résistants que les eucaryotes.

- Ce sont les cellules à fort index mitotique qui présentent la plus grande sensibilité aux radiations.

3.3. Radiosensibilités des êtres vivants aux doses létales

En dehors de leurs effets létales et stérilisants, les rayonnements ionisants sont potentiellement dangereux pour l'homme car ils s'éliminent très lentement de l'organisme. Ainsi, on définit la période biologique correspondant au temps nécessaire pour que le 1/2 d'une substance radioactive soit éliminé naturellement de l'organisme. De ce fait, il se produit pour les substances radioactives un phénomène de bioamplification dans les alimentaires terrestre et aquatique nécessitant une surveillance permanente des poissons consommés par l'homme à proximité installations nucléaires.

La DL50* : la radiosensibilité des espèces vivantes est d'autant plus forte que leur degré d'évolution et la complexité de leur organisme est plus grande. La DL50 consécutive à une seule irradiation est de l'ordre de million de rads chez les bactéries. Cependant, la DL50 de l'homme est de l'ordre de 500 rads.

* La **DL50** : La dose létale médiane ou la concentration létale médiane (CL50) est un indicateur quantitatif de la toxicité d'une substance. Cette notion s'applique également aux irradiations. Cet indicateur mesure la dose de substance causant la mort de 50 % d'une population animale donnée dans des conditions précises.

*Les références
bibliographiques*

Références bibliographiques

AGNU. 1992. « Rapport de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement », Assemblée générale des Nations Unies, Rio de Janeiro, 3-14 juin 1992, A/CONF.151/26 (vol. I), 12 août 1992.

BRGM. 2000. Gestion des sites (potentiellement) pollués. Évaluation simplifiée des risques et classification des sites. Version 2. Editions BRGM.

BRGM. 2000. Gestion et traitement des sites pollués. Diagnostic approfondi et évaluation détaillée des risques. Guide technique, Editions BRGM.

Debieche T. 2002. Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle, Mémoire présenté pour l'obtention de doctorat en Hydrogéologie et Environnement, U. F. R. des Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté.

Demeneix B. 2016. Comment la pollution altère notre intelligence et notre santé, Paris, Éditions Odile Jacob, coll. « Sciences », 2016, 416 p. (ISBN 978-2-7381-3391-5).

Djidel M. 2008. Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette d'Ouargla (Sahara septentrional, Algérie). Thèse de doctorat en hydrogéologie, université de Badji Mokhtar d'Annaba.

Genin, B., Chauvin, C., Ménard, F. 2003. Cours d'eau et indices biologiques : pollution, méthodes, IBGN. Educagri éditions.

Guyonne D. *et al.* 2001. Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes : Application dans un contexte d'évaluation détaillée des risques pour les ressources en eau, BRGM.

Jacobsson M., Trotz N. 1986. The Definition of Pollution Damages in the 1984 Protocols to the 1969 Civil Liability Convention and the 1971 Fund Convention. J. Mar. L. & Com., 17, 467

Jarrige F., Le Roux T. 2017. La Contamination du monde : une histoire des pollutions à l'âge industriel, Éditions du Seuil. 480 p.

Maurel A. 2001. Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce. Edition Lavoisier Paris.

Pellet. 1994. Polluants organiques courants : Caractéristiques physico-chimiques et comportement dans le milieu naturel. Rapport ANTEA.