



Pollution de l'environnement



***Licence LMD (L3) : Spécialité :
Ecologie et Environnement***



Manuel Pédagogique

Présenté par Dr CHELLI A. Madjid

Avant-propos

Ce manuel pédagogique est conçu pour les étudiants de 3ème année de licence en écologie et environnement (L3EE). Il offre un panorama des connaissances permettant de comprendre la contamination des écosystèmes, les mécanismes d'accumulation des contaminants et les effets de ceux-ci sur les organismes vivants.

Notre ambition est qu'il soit bien plus qu'un simple support de cours : nous visons à en faire un outil de référence qui stimulera leur réflexion, aiguisera leur esprit critique et renforcera leur engagement en faveur de la préservation de la planète.

Face à une prise de conscience écologique désormais mondiale, une compréhension scientifique rigoureuse des mécanismes environnementaux est essentielle. C'est dans cet esprit que ce manuel a été conçu. Son objectif principal est de fournir aux étudiants un cadre structuré et complet pour appréhender la pollution sous tous ses aspects.

Au-delà de la description des polluants et de leurs effets, il s'attache à décortiquer les chaînes de causalité, les synergies entre les différentes formes de pollution (air, eau, sols) et leurs conséquences en cascade sur la biodiversité et la santé humaine.

À l'issue de cette unité d'enseignement, l'étudiant sera capable de décrire et d'expliquer le comportement des différentes formes de pollution dans les systèmes environnementaux. Il pourra identifier les processus impliqués en s'appuyant sur les principes physiques, chimiques et biologiques fondamentaux.

Le présent document est une synthèse personnelle élaborée à partir de l'étude d'ouvrages et de ressources numériques traitant de la pollution et des polluants. Je tiens à souligner que sa rédaction a été enrichie par la consultation d'une multitude de documents en ligne, dont la majorité ne figure pas dans la section

bibliographique. Si toutes ces sources numériques n'ont pas pu être intégrées, elles n'en ont pas moins constitué un terreau intellectuel essentiel à l'élaboration de cette synthèse.

Nous vous souhaitons une exploration stimulante et enrichissante de ces pages. Nous espérons qu'elles vous donneront les clés non seulement pour réussir vos examens, mais surtout pour devenir des acteurs compétents, éclairés et innovants dans la lutte contre la pollution, dont notre planète a besoin.

Avis aux étudiants

Ce cours est mis à disposition pour :

- ✓ Permettre aux étudiants de vérifier et d'approfondir le contenu des notes prises à l'amphithéâtre.
- ✓ Fournir une aide à celles et ceux qui, à la suite d'une absence ou d'un moment d'inattention, possèdent un cours incomplet, ils peuvent alors aisément se mettre à jour rapidement.
- ✓ Fournir aux étudiants qui le souhaitent des compléments scientifiques (parfois hors programme).

Ce cours ne correspond pas forcément à celui fait à l'amphithéâtre qui est le seul valide car le cours en ligne permet seulement de combler des lacunes.

En aucun cas cette version électronique ne peut remplacer le cours manuscrit et personnel de chaque étudiant, qui demeure obligatoire. Le plus simple et le plus efficace est de le faire pendant le cours.

Recommandations :

- Il est inutile d'essayer d'apprendre un cours avant de l'avoir compris.
- L'apprentissage par cœur est une tâche généralement inutile et inefficace.
- Les méthodes d'apprentissage sont diverses. Chaque étudiant doit trouver (inventer) celle qui lui convient le mieux.

« On fait la science avec des faits comme une maison avec des pierres, mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison. »

Henri Poincaré

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	01
Chapitre I : Quelques notions fondamentales sur l'environnement et la pollution	02
• I.1. Définitions /Généralités	02
• I.2. Nature et modalités de la pollution de la biosphère	05
• I.2.1. Les principales causes de pollution	05
• I.2.2. Nature de pollution	05
• I.2.3. Sources de pollution	06
• I.2.4. Types de pollution	07
• I.2.5. Classification des polluants	08
Chapitre II : Pollution et implications écologiques	11
• II.1. Définitions et concepts fondamentaux	11
• II.1.1. Qu'est-ce qu'un polluant ?	11
• II.1.2. Caractéristiques essentielles d'un polluant	11
• II.1.3. Sources de pollution : diffuses et ponctuelles	12
• II.1.4. Notions de capacité de charge de l'environnement	12
• II.2. Impacts sur les écosystèmes	12
• II.2.1. Perturbation des chaînes alimentaires et bioaccumulation	12
• II.2.2. Perte de biodiversité et extinction d'espèces	13
• II.2.3. Dégradation et fragmentation des habitats	13
• II.3. Implications sanitaires pour l'Homme	13
• II.3.1. Maladies respiratoires et cardiovasculaires	14
• II.3.2. Cancers et troubles de la reproduction	14
• II.3.3. Problématiques émergentes	14
Chapitre III : mécanismes de dispersion et de transformation des polluants dans la biosphère	16
• III.1. Durée de vie des polluants	16
• III.1.1. Persistance et biodégradabilité	16
• Les principaux polluants atmosphériques	16
• III.1.2. Stabilité et transformation	17
• III.2. Grands cycles biogéochimiques	18
• III.2.1. Cycle de l'eau : vecteur de transport et de dilution	18
• III.2.2. Cycle du carbone et la problématique du CO ₂	19
• III.2.3. Cycle de l'azote et l'eutrophisation	20
• III.3. Les voies de transfert et de transformation	21
• III.3.1. Transport atmosphérique (vents, précipitations)	21
• III.3.2. Transfert dans les sols et vers les nappes phréatiques	21
• III.3.3. Courants océaniques et la dispersion à grande échelle	22
• III.4. Transfert entre milieux et Effets sur la Biosphère	23
• III.5. Phénomène de bioaccumulation et bioamplification	24
• III.5.1. Mécanisme d'accumulation dans les tissus vivants	25
• III.5.2. Étude de cas : le mercure dans les poissons prédateurs	25
Chapitre IV : Pollution Atmosphérique	28
• IV.1. Définitions /Généralités	28
• IV.2. Les sources de pollution atmosphérique	30
• IV.2.1. Les Emissions Naturelles	31
• IV.2.2. Les Emissions Anthropiques	31

• IV.3. Les principaux polluants atmosphérique	33
• IV.4. Les facteurs influençant la pollution atmosphérique	35
• IV.5. Mécanismes de la pollution atmosphérique	35
• IV.6. Les types de pollutions atmosphériques	37
• IV.7. Les impacts de pollution atmosphérique	38
• IV.7.1. Effets de la pollution atmosphérique sur la santé	38
• IV.7.2. Effets de la pollution atmosphérique sur l'environnement	38
Chapitre V : Pollution du sol	44
• V.1. Définitions/Généralités	44
• V.2. Origines et nature de la pollution des sols	45
• V.2.1. Pollution agricole : pesticides, engrais de synthèse, lisier	45
• V.2.2. Pollution industrielle : métaux lourds, hydrocarbures	46
• V.2.3. Décharges sauvages et déchets plastiques	46
• V.3. Mobilité et transfert des polluants du sol	48
• V.4. Conséquences sur l'environnement et la santé	49
• V.4.1. Appauvrissement et perte de fertilité des sols	49
• V.4.2. Contamination de la chaîne alimentaire	49
• V.4.3. Pollution des eaux souterraines	49
• V.5. Méthodes de dépollution et de réhabilitation	50
• V.5.1. Techniques physico-chimiques (excavation, lavage)	50
• V.5.2. Bioremédiation : l'utilisation des plantes et des micro-organismes	50
Chapitre VI : : Pollution de l'eau	52
• VI.1. Définitions/Généralités	52
• VI.2. Pollution des eaux de surface (rivières, lacs)	53
• VI.2.1. Eutrophisation : mécanismes et zones mortes	54
• VI.2.2. Polluants chimiques : pesticides, PCB, résidus médicamenteux	54
• VI.2.3. Pollutions microbiologiques et matières organiques	55
• VI.3. Pollution des eaux souterraines et des océans	55
• VI.3.1. Contamination des nappes phréatiques par les nitrates et les solvants	55
• VI.3.2. Pollution marine : marées noires, déchets plastiques et microplastiques	55
• VI.3.3. Acidification des océans et son impact sur les écosystèmes marins	56
• VI.4. Traitement des eaux polluées	56
• VI.4.1. Stations d'épuration des eaux usées	56
• VI.4.2. Dessalement de l'eau de mer	57
Chapitre VII : Pollution nucléaire	59
• VII.1. Définitions/Généralités	59
• VII.2. Différentes sources de pollutions nucléaires	65
• VII.3. Différents types de déchets nucléaires	66
• VII.4. Impacts de la pollution nucléaire	67
• VII.4.1. Impacts sur l'Environnement	67
• VII.4.2. Impacts sur la Santé Humaine	69
• VII.5. Études de Cas sur la Pollution Nucléaire	71
CONCLUSION GENERALE	73
BIBLIOGRAPHIE	
GLOSSAIRE	

INTRODUCTION GENERALE

Le XX^e siècle a été marqué par un développement mondial sans précédent, une industrialisation continue et une explosion démographique. Si ces avancées ont transformé nos sociétés, elles ont également engendré de lourdes conséquences, contribuant à l'émergence de problèmes environnementaux à l'échelle planétaire. Parmi ces changements figurent des crises majeures telles que les changements climatiques, l'appauvrissement de la couche d'ozone ou encore l'épuisement des ressources naturelles.

Au cœur de ces défis se trouve la pollution environnementale, un fléau direct et tangible des activités humaines. Qu'elle soit de l'air, du sol, de l'eau ainsi que la pollution lumineuse et la pollution sonore ont de graves effets sur la biodiversité. D'autant plus que toutes ces pollutions interagissent et se cumulent. D'origine naturelle, domestique, industrielle ou agricole, elles entraînent une perturbation de l'ensemble des milieux. Ainsi, la pollution environnementale s'impose comme l'un des problèmes les plus urgents de notre temps, nécessitant une prise de conscience et une action collective immédiates.

Pour lutter efficacement contre la dégradation de notre environnement, la première étape fondamentale consiste à en comprendre les origines précises. Cela implique un processus rigoureux d'identification, de localisation et de quantification des diverses sources de pollution. Cette approche méthodique suit une logique implacable : on mesure pour comprendre, on comprend pour agir, et on agit en connaissant les effets de ses actions.

Ce cours propose une analyse approfondie des différentes formes de pollution, atmosphérique, hydrique, pédologique, nucléaire, de leurs origines, de leurs mécanismes et de leurs impacts. Il met également en lumière les solutions disponibles, qu'elles soient techniques, législatives ou biologiques, afin de mieux comprendre les enjeux de la prévention et de la gestion durable de l'environnement.

1

CHAP. I : QUELQUE NOTIONS FONDAMENTALES SUR L'ENVIRONNEMENT ET LA POLLUTION

I.1. Définitions /Généralités

❑ **Environnement** : L'ensemble des agents physiques, chimiques, biologiques susceptible d'avoir un effet direct ou indirect, immédiate ou différé sur un matériel ou sur son fonctionnement, mais aussi sur les êtres vivants et leurs activités.

❑ **Biosphère** : La biosphère est une partie de la surface de la terre et de l'atmosphère où toutes les plantes et tous les animaux peuvent survivre et se développer.

► La biosphère est subdivisée en différentes couches qui sont :

▪ **Hydrosphère** : L'hydrosphère est l'ensemble des zones d'une planète où l'eau est présente. Elle concerne aussi bien l'eau sous forme liquide, que sous forme solide ou gazeuse.

▪ **Lithosphère** : La lithosphère est la couche externe solide de la Terre. Elle comprend la croûte terrestre et la partie supérieure du manteau.

▪ **Atmosphère** : L'atmosphère est l'enveloppe gazeuse entourant une planète, en particulier la Terre que l'on appelle air.

► Les différents niveaux ou composants de la biosphère sont :

▪ **Biomes** : sont des grandes zones écologiques composées de leur flore et de leur faune. Elles sont définies par des facteurs abiotiques tels que le climat, la géologie, la végétation, les sols ou le relief.

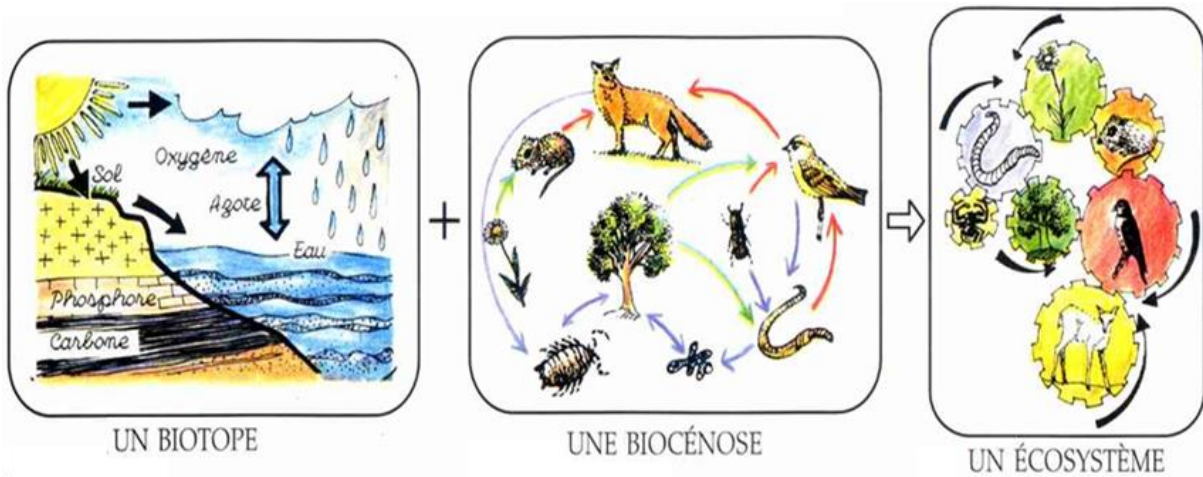
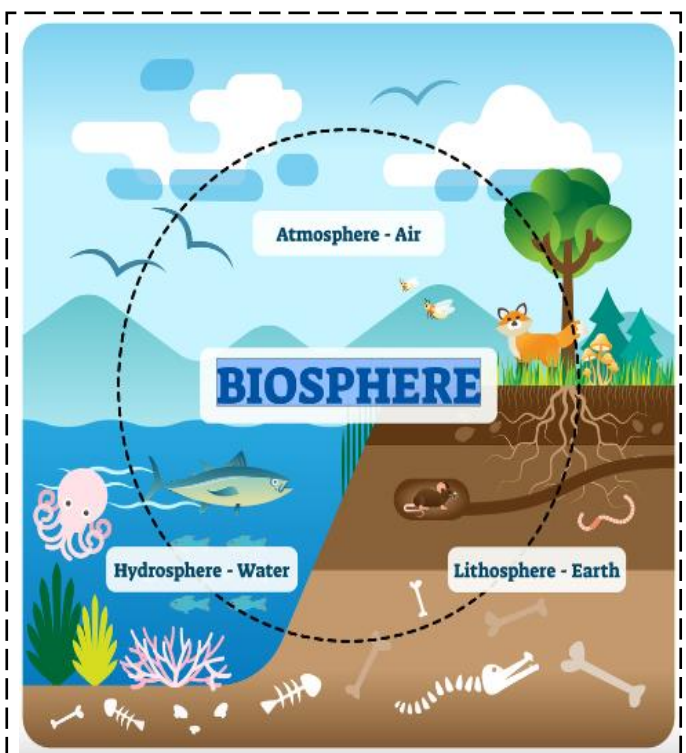
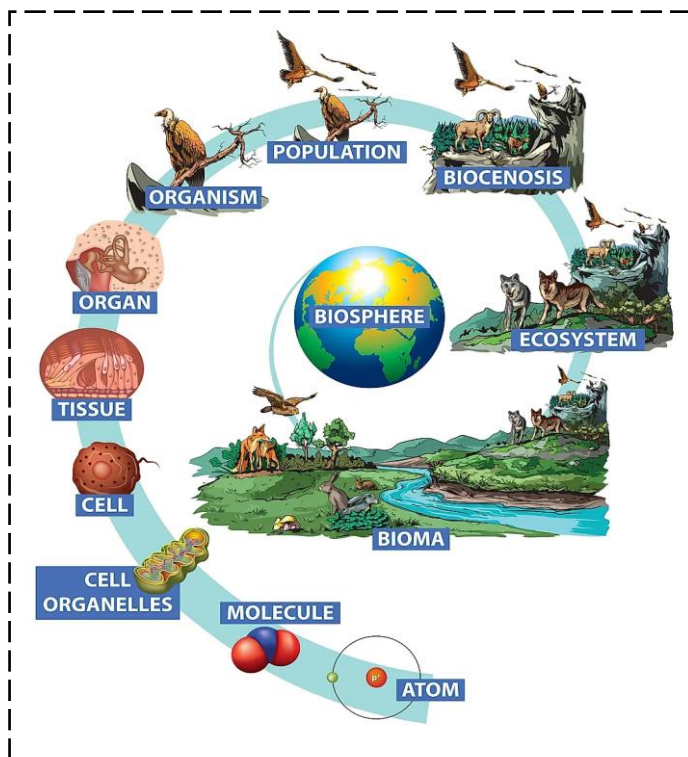
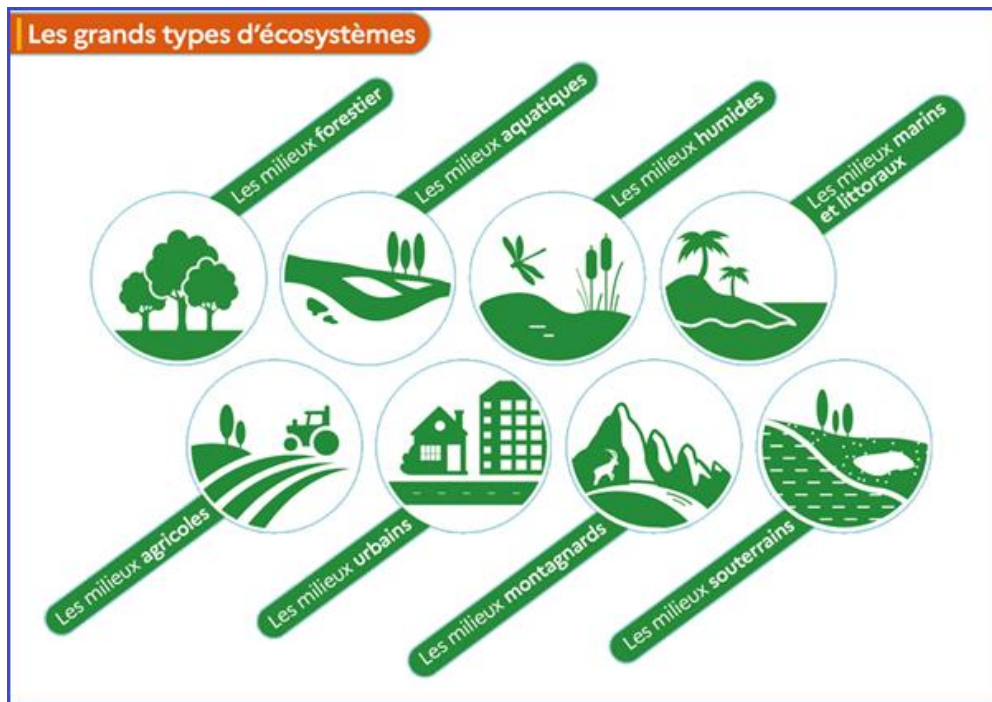
▪ **Ecosystèmes** : Ils comprennent tous les êtres vivants qui habitent une zone donnée dans laquelle ils interagissent entre eux et avec les éléments non vivants.

❑ **Biocénose** : La biocénose est l'ensemble des êtres vivants coexistant dans un espace écologique donné, plus leurs organisations et interactions. Ensemble, le biotope et la biocénose forment un écosystème.

❑ **Communauté** : groupe ou association de populations qui habitent une zone géographique à une période donnée.

❑ **Population** : groupe d'individus de la même espèce habitant une zone géographique pendant une période donnée.

❑ **Organisme** : une forme de vie individuelle, telle qu'un animal, une bactérie ou une plante.



❑ **Ecotoxicologie** : C'est l'étude des modalités de contamination de l'environnement par les agents polluants naturels ou artificiels produits par l'activité humaine ainsi que de leurs mécanismes d'action et effets sur les êtres vivants qui peuplent la biosphère.

❑ **Contamination** : La contamination est simplement la présence d'une substance qui ne devrait pas être là compte tenu de son origine (cas des substances créées par l'Homme) ou à des concentrations supérieures au fond géochimique.

❑ **Pollution** : La pollution est une dégradation de l'environnement par l'introduction dans l'air, l'eau ou le sol de matières n'étant pas présentes naturellement dans le milieu. Elle entraîne une perturbation de l'écosystème dont les conséquences peuvent aller jusqu'à la migration ou l'extinction de certaines espèces incapables de s'adapter au changement.

❑ **Polluant** : Un polluant est une substance liquide, solide ou gazeuse, qui se trouve dans un environnement dans lequel elle ne devrait pas exister, ou qui est présente dans son environnement habituel mais à un taux anormalement élevé, pouvant ainsi avoir un effet nocif, provoquer une nuisance ou une gêne.

► Tous les **polluants** sont des contaminants, mais tous les **contaminants** ne sont pas des polluants.

► **Polluant primaire** : Un polluant primaire est un polluant qui est émis directement dans la biosphère. Il s'agit par exemple : des oxydes de carbone ; oxydes de soufre ; oxydes d'azote ; hydrocarbures légers ; composés organiques volatils (COV) ; particules (PM10 et PM2.5) ; métaux (plomb, mercure, cadmium...).

► **Polluant secondaire** : Un polluant secondaire est formé par transformation chimique dans la biosphère à partir d'autres espèces chimiques, que l'on nomme précurseurs. Un précurseur peut être un polluant primaire ou ne pas être un polluant en soi.

- L'ozone est le principal polluant secondaire.
- L'acide sulfurique et l'acide nitrique qui se forment dans l'atmosphère sous l'action de l'humidité à partir, respectivement, de dioxyde de soufre et d'oxyde d'azote.

❑ **Métabolite** : Une substance chimique peut se transformer par le biais de réactions chimiques ou biologiques en de nouvelles substances appelées métabolites (ou « produits de transformation/dégradation »). Ces processus de transformation se déroulent dans l'air, dans les sols, dans l'eau mais aussi dans les organismes vivants. Les nouvelles molécules ainsi formées possèdent des propriétés différentes de la molécule mère, en termes de solubilité, de persistance dans l'environnement, de capacité à se bioaccumuler dans les organismes et de toxicité.

I.2 Nature et modalités de la pollution de la biosphère

I.2.1. Les principales causes de pollution

- ❖ De nos jours, les principales causes de pollution de l'environnement proviennent en premier lieu de la production et de l'utilisation des diverses sources d'énergie, puis des activités industrielles et, de l'agriculture.
- ❑ La pollution liée à la production et la consommation des combustibles fossiles
- ❑ Pollution due aux diverses activités liées aux industries chimiques
- ❑ Les déchets solides
- ❑ Pollutions d'origine agricole (engrais et pesticide)

I.2.2. Nature de pollution

- ❖ Il existe plusieurs manières de classer la pollution. Selon le type de polluant, on peut classer la pollution en trois catégories : pollution physique, pollution chimique et pollution biologique.

► *Pollution physique*

On parle de ce type de pollution quand le milieu pollué est modifié dans sa structure physique par divers facteurs. Il s'agit d'une pollution qui se traduit par la présence des particules de taille et de matière très variés dans le milieu (sol, air et l'eau).

► *Pollution chimique*

La pollution chimique résulte de la libération de certaines substances minérales toxiques dans l'environnement, par exemple : les nitrates, les phosphates, l'ammoniac et autres sels, ainsi que des ions métalliques. Ces substances exercent un effet toxique sur les matières organiques et les rendent plus dangereuses.

► *Pollution biologique*

Un grand nombre de micro-organismes peut multiplier dans le milieu (sol, air et l'eau) qui sert l'habitat naturel ou comme une simple moyenne de transport pour ces microorganismes. Les principaux organismes pathogènes qui se multiplient dans l'eau sont : les bactéries, les virus, les parasites et les champignons, on parle ainsi de la pollution bactérienne, viral ou parasitaire.

I.2.3. Sources de pollution

- ❖ La pollution peut avoir plusieurs origines. Selon la source du polluant, on peut classer la pollution en deux grandes catégories : Pollution Naturelle et la Pollution Anthropique. La pollution anthropique à son tour peut être classée selon la source d'émission en trois sous-catégories.

► *Origine naturelle*

Le contact de l'eau avec les gisements minéraux peut, par érosion ou dissolution, générer des concentrations inhabituelles en métaux lourds, Des évacuations volcaniques, des décharges sous-marines d'hydrocarbures.

► *Origine urbaine*

Liée aux moyens de transport et les rejets domestiques, les eaux de lavage collectif et de tous les produits dont se dégagent les habitants d'une agglomération...).

► *Origine agricole*

Liée aux cultures agricoles (pesticides et engrais) et à l'élevage intensif, bovin, ovin, volaille etc etc... (fumiers et purins)

► *Origine industrielle*

Le développement accéléré des techniques industrielles modernes a engendré une pollution très importante, notamment des rejets industriels rejetés par les entreprises en quantités variables...).

I.2.4. Types de pollution

- ❖ La pollution peut toucher plusieurs biotopes de la biosphère. Selon la matrice environnementale impliquée, on peut classer la pollution en trois autres grandes catégories, à savoir : Pollution Atmosphérique (Air), Lithosphérique (Sol) et Hydrosphérique (Eau).
démission en trois sous-catégories.

► Pollution de l'aire

La pollution atmosphérique concerne la dégradation de l'air que nous respirons à cause de substances polluantes qui se retrouvent dans l'atmosphère. Les principaux polluants atmosphériques sont les particules fines, le dioxyde de soufre (SO₂), l'ozone (O₃), les oxydes d'azote (NO et NO₂), les composés organiques volatils (COV), etc

► Pollution des eaux

La Contamination des eaux de surfaces ou souterraines par des déchets, des produits chimiques ou des micro-organismes. Les pollutions des eaux sont dues :

- À l'agriculture (à cause des pesticides et des engrais).
- Des rejets ménagers (médicaments et biocides rejetés via des eaux usées et que les stations d'épuration et le lagunage ne savent pas traiter).
- Aux marées noires mais surtout par les rejets d'hydrocarbures des bateaux.

► Pollution des sols

La notion de pollution du sol désigne toutes les formes de pollutions impactant n'importe quel type de sol (agricole, forestier, urbain...).

Un sol pollué devient à son tour une source possible de diffusion directe ou indirecte de polluants dans l'environnement, via l'eau, les envols de poussières, vapeurs gazeuses ou via une re concentration et transfert de polluants par des organismes vivants (bactéries, champignons, plantes à leur tour mangés par des animaux).

1.2.5. Classification des polluants

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

► Les polluants de nature physique

- La chaleur
- La radioactivité
- Le bruit
- La lumière

► Les polluants de nature chimique

- Les hydrocarbures liquides
- Les détergents
- Les plastifiants
- Les pesticides
- Les matières eutrophisantes : engrais azotés et phosphatés
- Les métaux lourds : (Cu, Zn, Pb.....)
- Les médicaments et cosmétiques :

► Les polluants de nature biologique

- Les toxines algales
- Les germes pathogènes
- Les parasites

► Les polluants de nature émergente

- Microplastiques
- Nanomatériaux

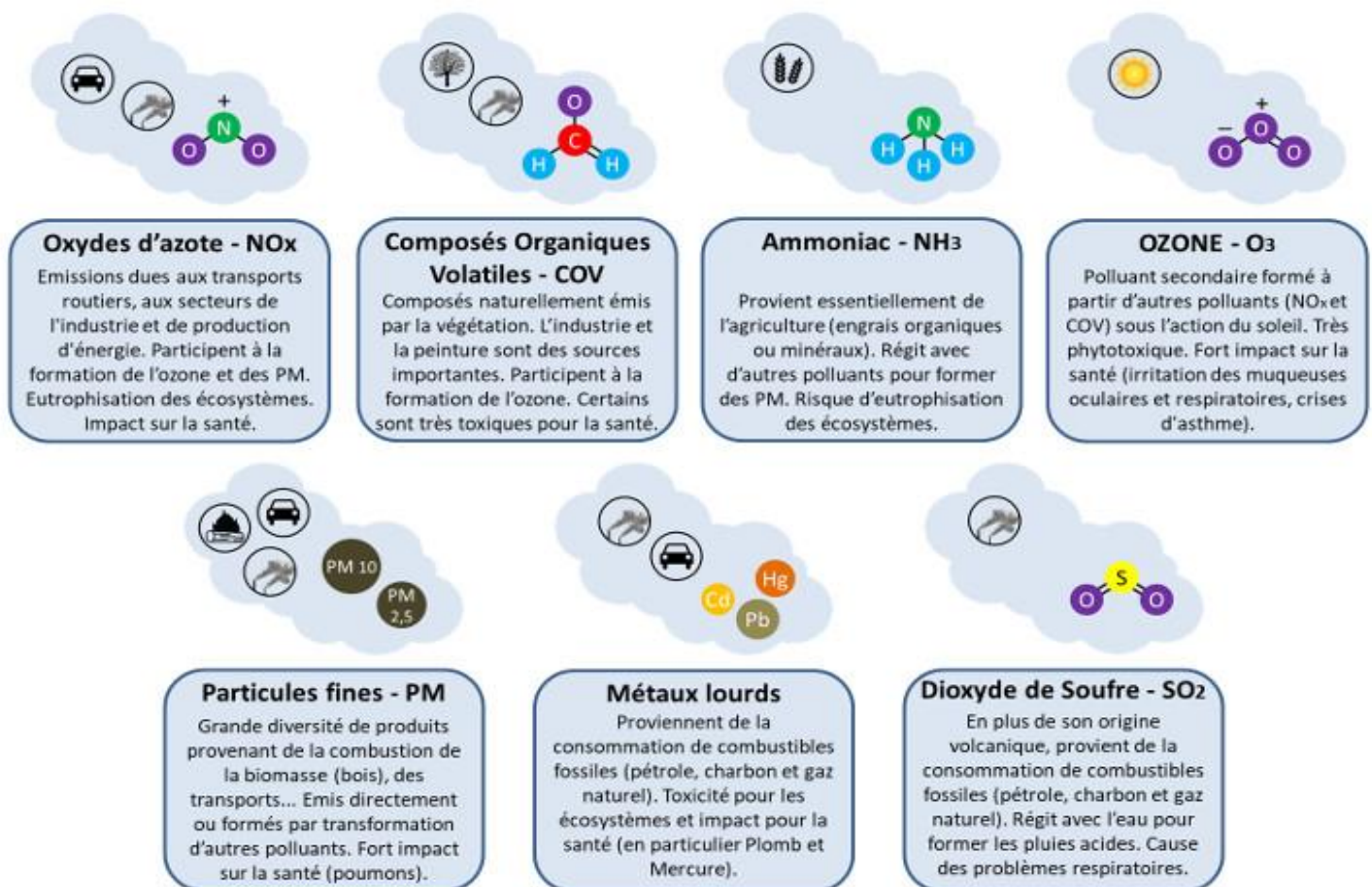
- ▶ **Les sources non-anthropiques ou naturelles :** Il s'agit des sources induisant des rejets de substances polluantes mais qui ne sont pas liées à l'activité humaine. Parmi ces sources, on peut également distinguer les sources biogéniques (liées à la présence d'organismes vivants) des autres sources. L'éruption volcanique (dégagement très important de produits soufrés) est un exemple de source naturelle, de même que la production d'embruns marins (particules).

❖ Parmi tous les émetteurs potentiels de polluants, on a tendance à distinguer deux grandes catégories d'émetteurs :

- ▶ **Les sources non-anthropiques ou naturelles**
- ▶ **Les sources anthropiques**

- ▶ **Les sources anthropiques :** Ces sources sont le fait de l'activité humaine. Parmi les sources anthropiques, on oppose souvent les sources fixes, émises par des installations ne se déplaçant pas, des sources mobiles liées aux transports.

Les principaux polluants de l'environnement



Unités de mesure de la pollution

● La concentration d'un polluant s'exprime de la façon suivante :

► Pour les gaz, en concentration relative :

- ✓ Ppm ou ppmv = Partie par million en volume 10^{-6} soit $1\text{cm}^3 / \text{m}^3$, c'est-à-dire : sur un million de molécules d'air, on trouve une molécule du polluant en question.
- ✓ Ppb ou ppbv = Partie par milliard (billion en anglais) en volume (10^{-9}) soit $1\text{mm}^3 / \text{m}^3$

► Pour les gaz et particules, en masse par unité de volume :

- ✓ $\text{mg} / \text{m}^3 = 10^{-3}$ g par m^3 d'air (milligramme)
- ✓ $\mu\text{g} / \text{m}^3 = 10^{-6}$ g par m^3 d'air (microgramme)
- ✓ $\text{ng} / \text{m}^3 = 10^{-9}$ g par m^3 d'air (nanogramme)

Introduction :

La pollution est une altération de l'environnement par l'introduction de substances ou d'énergie qui y sont normalement absentes ou qui dépassent les concentrations naturelles. Cette modification, souvent le sous-produit des activités humaines, dépasse la capacité des écosystèmes à absorber et à recycler ces substances, entraînant des conséquences profondes et durables sur le monde vivant, y compris l'espèce humaine. Ce chapitre a pour objectif de définir les concepts clés, d'analyser les impacts sur les écosystèmes et d'examiner les implications sanitaires pour l'Homme.

II.1. Définitions et concepts fondamentaux

II.1.1. Qu'est-ce qu'un polluant ?

- Un polluant est une substance, un organisme ou une forme d'énergie (comme la chaleur ou le bruit) introduit par l'Homme dans l'environnement, et dont la présence excède les seuils tolérables, provoquant des effets néfastes sur les ressources vivantes, les écosystèmes ou les biens matériels.

II.1.2. Caractéristiques essentielles d'un polluant

- **La Nature** : Un polluant peut être chimique (pesticides, métaux lourds), physique (déchets plastiques, radiations) ou biologique (bactéries pathogènes).
- **La Persistance** : C'est la durée pendant laquelle un polluant reste actif dans l'environnement sans se dégrader. Les polluants persistants (comme les PCB, les dioxines ou le DDT) peuvent subsister pendant des années, voire des décennies, et se déplacer sur de longues distances, les rendant particulièrement dangereux à l'échelle mondiale.
- **La Biodégradabilité** : C'est la capacité d'une substance à être décomposée par des micro-organismes (bactéries, champignons) en éléments simples et non toxiques (eau, CO₂). Un polluant hautement biodégradable (comme les déchets organiques) aura un impact limité dans le temps s'il est présent en faible quantité. À l'inverse, un polluant peu ou non biodégradable (comme le plastique) s'accumule indéfiniment.

II.1.3. Sources de pollution : diffuses et ponctuelles

- **Sources ponctuelles** : Ce sont des rejets identifiables et localisés géographiquement. Elles sont généralement plus faciles à contrôler et à réglementer.
 - ◆ *Exemples* : La cheminée d'une usine, un émissaire d'eaux usées, une fuite de cuve de stockage.
- **Sources diffuses (ou non ponctuelles)** : Ces rejets proviennent d'une large zone et ne peuvent être attribués à un point de rejet précis. Ils sont beaucoup plus difficiles à gérer.
 - ◆ *Exemples* : Le ruissellement des eaux de pluie charriant des pesticides et des engrais agricoles sur tout un bassin versant, les particules issues de l'usure des pneus et des freins sur les routes.

II.1.4. Notions de capacité de charge de l'environnement

- La capacité de charge (ou capacité d'absorption) est un concept fondamental en écologie. Il désigne la quantité maximale de polluants qu'un écosystème (une rivière, un sol, l'atmosphère) peut recevoir, diluer, dégrader ou recycler sans subir d'altération dommageable et irréversible.
 - ▶ **Fonctionnement** : Les écosystèmes ont des mécanismes naturels d'épuration (filtration par le sol, dégradation bactérienne, dilution, photolyse). Tant que l'apport de polluants reste en deçà de ce seuil, l'équilibre est maintenu.
 - ▶ **Dépassement** : Lorsque les rejets anthropiques dépassent cette capacité, les mécanismes d'épuration sont saturés. Les polluants s'accumulent, les fonctions écologiques sont perturbées et la résilience de l'écosystème est compromise. C'est le phénomène de pollution.

II.2. Impacts sur les écosystèmes

II.2.1. Perturbation des chaînes alimentaires et bioaccumulation

- La pollution ne se contente pas de contaminer un milieu ; elle se propage et s'amplifie à travers les réseaux trophiques.
 - ▶ **Bioaccumulation** : Processus par lequel un organisme absorbe une substance toxique (comme un métal lourd ou un pesticide) plus rapidement qu'il ne peut l'éliminer. La concentration du polluant augmente donc dans ses tissus au cours de sa vie.
 - ▶ **Biomagnification** : Phénomène par lequel la concentration d'un polluant augmente à chaque niveau de la chaîne alimentaire. Les prédateurs situés au sommet de la pyramide alimentaire (comme les rapaces, les ours polaires ou les humains) accumulent des concentrations extrêmement élevées, bien supérieures à celles trouvées dans le milieu environnant.

II.2.2. Perte de biodiversité et extinction d'espèces

- ⊙ La pollution est l'une des principales causes de l'érosion actuelle de la biodiversité.
- ▶ **Toxicité directe** : Les polluants peuvent tuer directement les organismes (e.g., marées noires asphyxiant la faune et la flore marines).
- ▶ **Affaiblissement et maladies** : Même à faible dose, l'exposition chronique affaiblit le système immunitaire des espèces, les rendant plus vulnérables aux maladies.
- ▶ **Modification des conditions de vie** : L'acidification des océans due au CO₂ menace les organismes à coquille calcaire (coraux, mollusques, plancton), base de nombreuses chaînes alimentaires marines.
- ▶ **Extinction** : Lorsqu'une population ne peut plus se reproduire ou survivre dans un environnement trop dégradé, elle disparaît localement (extinction locale) ou définitivement (extinction globale).

II.2.3. Dégradation et fragmentation des habitats

- ⊙ Au-delà de la contamination chimique, la pollution physique et les activités qui y sont liées dégradent la structure même des habitats.
- ▶ **Dégradation** : L'érosion des sols due aux pratiques agricoles intensives, l'eutrophisation des cours d'eau (excès de nutriments provoquant la prolifération d'algues et l'asphyxie du milieu) ou la salinisation des sols sont des formes de dégradation.
- ▶ **Fragmentation** : La construction d'infrastructures (routes, barrages, zones urbaines) pour soutenir le développement économique morcèle les habitats naturels en petites parcelles isolées. Cela empêche la circulation, la reproduction et la recherche de nourriture pour de nombreuses espèces, menant à l'isolement génétique et au déclin des populations.
- ⊙

II.3. Implications sanitaires pour l'Homme

- ⊙ L'Homme, en tant qu'espèce intégrée aux écosystèmes et au sommet de la chaîne alimentaire, n'est pas épargné par les conséquences de la pollution. C'est le concept "du berceau au berceau" qui se referme sur lui-même.

II.3.1. Maladies respiratoires et cardiovasculaires

- La pollution de l'air est un facteur de risque majeur pour la santé publique.
- ▶ **Polluants concernés :** Particules fines (PM2.5, PM10), ozone (O₃), dioxyde d'azote (NO₂), dioxyde de soufre (SO₂).
- ▶ **Impacts :**
 - ◆ **Respiratoires :** Aggravation de l'asthme, bronchites chroniques, infections pulmonaires, cancer du poumon.
 - ◆ **Cardiovasculaires :** Les particules fines pénètrent profondément dans les poumons, passent dans la circulation sanguine et favorisent l'inflammation, l'athérosclérose, les infarctus du myocarde et les accidents vasculaires cérébraux (AVC).

II.3.2. Cancers et troubles de la reproduction

- De nombreux polluants sont reconnus comme étant cancérigènes, mutagènes (altérant l'ADN) ou reprotoxiques (nocifs pour la reproduction).
- ▶ **Cancérigènes :** L'amiante (cancer du poumon, mésothéliome), le benzène (leucémies), les hydrocarbures aromatiques polycycliques - HAP (cancers de la peau, poumon), l'arsenic (cancers de la peau, poumon, vessie).
- ▶ **Troubles de la reproduction :** Certains métaux lourds (plomb, mercure) et solvants industriels peuvent entraîner une baisse de la fertilité, des fausses couches, des malformations congénitales et des troubles du développement neurologique chez l'enfant.

II.3.3. Problématiques émergentes

- La science identifie continuellement de nouvelles menaces plus subtiles mais tout aussi préoccupantes.
- ▶ **Perturbateurs endocriniens (PE) :** Ce sont des substances chimiques (bisphénol A, phtalates, certains pesticides) qui interfèrent avec le système hormonal. Même à des doses infimes, ils peuvent :
 - ◆ Perturber le développement fœtal et pubertaire.
 - ◆ Provoquer des infertilités.
 - ◆ Augmenter les risques de cancers hormonodépendants (sein, prostate, testicules).
 - ◆ Favoriser l'obésité et le diabète.

- **Résistance aux antibiotiques :** La surutilisation des antibiotiques en médecine humaine et vétérinaire, ainsi que leur rejet dans l'environnement (via les effluents hospitaliers et les élevages industriels), exercent une pression de sélection sur les bactéries. Les bactéries résistantes survivent et se multiplient, rendant les infections courantes de plus en plus difficiles, voire impossibles à traiter. C'est une menace sanitaire mondiale majeure du 21ème siècle.

Conclusion :

La pollution est un phénomène complexe qui dépasse la simple "salissure" de l'environnement. Elle résulte de l'introduction de polluants, aux caractéristiques variables, dont la quantité dépasse la capacité de charge des écosystèmes. Ses impacts sont en cascade : elle perturbe les chaînes alimentaires, réduit la biodiversité et dégrade les habitats. Enfin, en un retour tragique, ces altérations écologiques se traduisent par des conséquences sanitaires directes et graves pour l'humanité, des maladies bien identifiées aux menaces émergentes comme les perturbateurs endocriniens. Comprendre ces mécanismes est la première étape indispensable pour développer des stratégies de prévention, de remédiation et de transition vers un modèle de développement plus durable.

3

CHAP. III : MÉCANISMES DE DISPERSION ET DE TRANSFORMATION DES POLLUANTS DANS LA BIOSPHERE

Introduction :

La biosphère est une enveloppe dynamique et interconnectée qui entoure la Terre. Lorsqu'un polluant est rejeté dans l'environnement, il ne reste pas statique. Il est entraîné dans des flux naturels d'énergie et de matière. Comprendre les mécanismes de sa dispersion est fondamental pour évaluer son impact, souvent bien au-delà de son lieu d'émission. Ce chapitre explore les grands cycles naturels qui véhiculent les polluants, les voies physiques de leur transfert, et le phénomène de bioamplification qui concentre les toxines dans les chaînes alimentaires.

II. Durée de vie des polluants

- ❖ La durée de vie des déchets abandonnés dans l'environnement dépend de leur nature. Les éléments biodégradables, c'est-à-dire à base de matière organique (déchets verts, papiers, etc.) disparaissent en moins d'un an. En revanche, il faut 5 ans pour un chewing-gum, 10 ans pour que le métal rouille intégralement et de 100 à 1.000 ans pour les plastiques, polystyrènes et autres matières synthétiques assimilées. Le verre, quant à lui, peut résister plus de 4.000 ans.

① *Persistance et biodégradabilité*

- 🕒 **Biodégradabilité** : est la capacité d'un polluant à être dégradé biologiquement c'est-à-dire par l'action d'organismes biologiques.

- ▶ La biodégradabilité est très variable selon les conditions du milieu (température, humidité, pH, etc.) et selon la nature du composé. Prenons trois exemples :
- ❖ Les PCB (Polychlorobiphényles), polluants très persistants (faiblement biodégradables). Le temps de décomposition des PCB est compris entre 94 jours et 2 700 ans.
- ❖ Le toluène, un hydrocarbure utilisé dans l'industrie chimique, présente un temps de demi-vie dans le sol de seulement 0,5 à 1 jour : il est donc très rapidement biodégradé.
- ❖ Le benzène présente un temps de demi-vie de 5 à 16 jours dans le sol (il est rapidement biodégradé) mais de 10 jours à 10 ans dans une nappe d'eau souterraine (il est persistant).



01 à 05 mois



10 à 100 ans



100 ans



400 ans

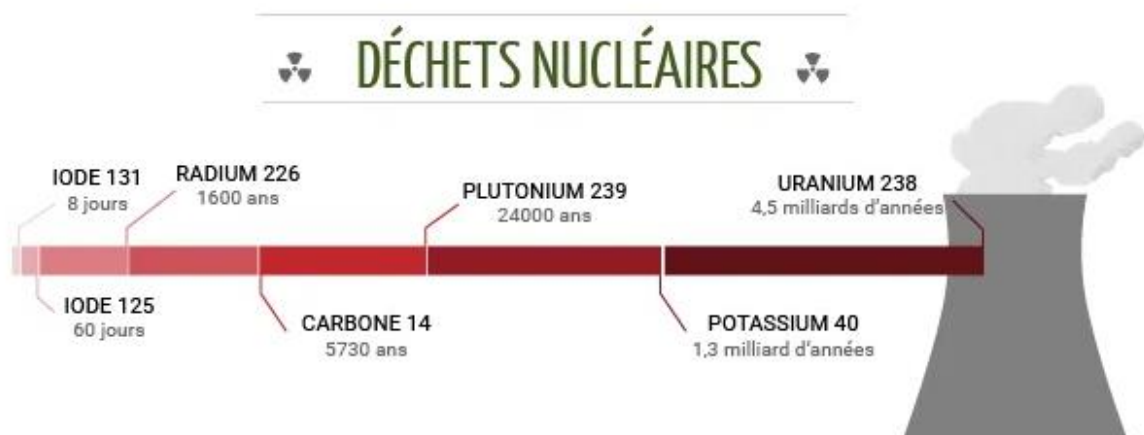


400 à 450 ans



100 à 1000 ans

- Les déchets nucléaires sont les déchets les plus longs à éliminer. Si l'iode 131 et l'iode 125 mettent respectivement 8 et 60 jours à disparaître, le carbone 14 met lui quelque 5.730 ans et l'uranium 238, pas moins de 4,5 milliards d'années.



② Stabilité et transformation

- S'il n'est pas biodégradé rapidement, le polluant peut :
 - ⊙ rester sous sa forme initiale : il est stable ;
 - ⊙ ou bien se transformer en un autre composé appelé métabolite ou « produit de dégradation ».
- En effet, ces transformations peuvent également avoir lieu directement dans le milieu (eau, air, sol, sédiment, etc.) sous l'effet des conditions physico-chimiques (température, lumière, présence d'autres composés...) et de l'activité microbienne. De même que dans les organismes vivants, le nouveau composé formé peut être plus ou moins toxique que le composé initial. Par exemple, le pesticide DDT peut se transformer en DDE sous l'effet de l'activité microbienne ; or le DDE est un composé encore plus toxique que le DDT.

III. Grands cycles biogéochimiques

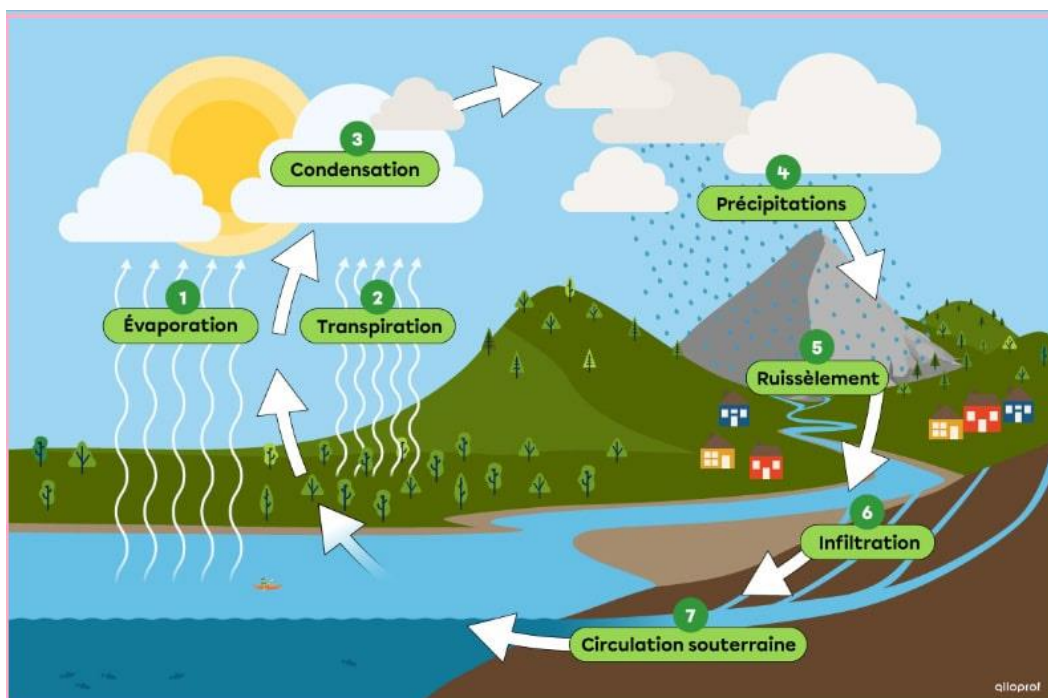
- Les cycles biogéochimiques décrivent le parcours des éléments essentiels (comme l'eau, le carbone et l'azote) entre les réservoirs de la planète (atmosphère, hydrosphère, lithosphère, biosphère). Les polluants "surfont" sur ces cycles naturels pour se disperser à l'échelle globale.

① Cycle de l'eau : vecteur de transport et de dilution

- L'eau est le solvant universel et le principal vecteur de transport des polluants.

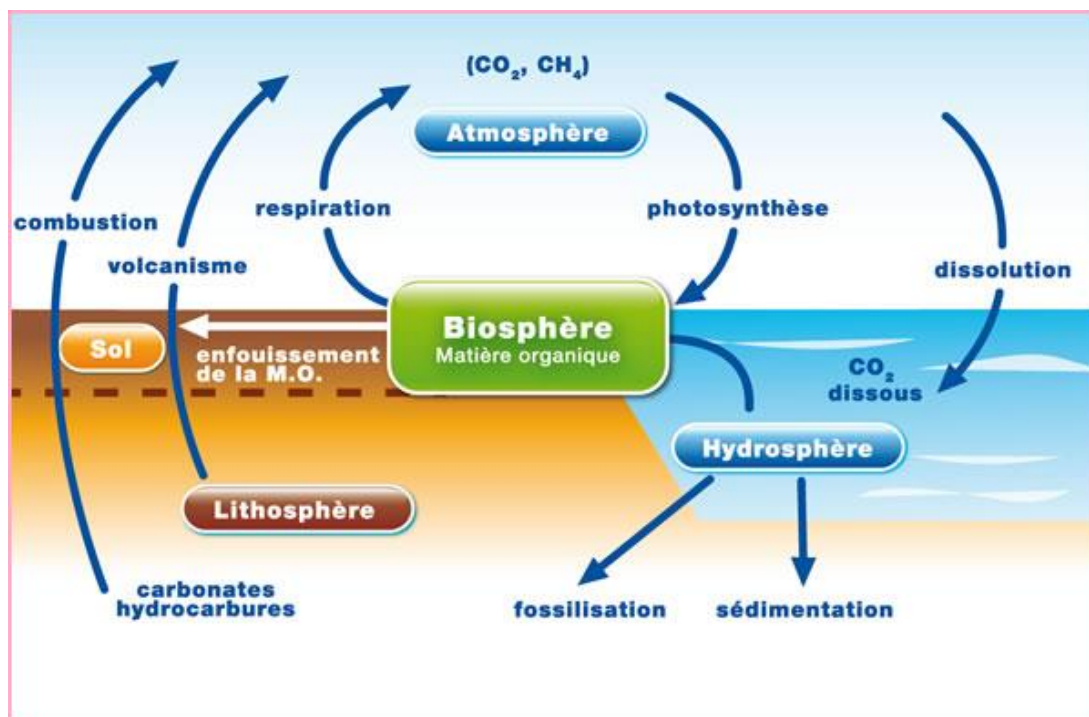
► Mécanisme :

- ♦ **Évaporation/Transpiration** : L'eau pure s'évapore, laissant souvent les polluants derrière elle. Cependant, certains polluants volatils (comme certains solvants) peuvent s'évaporer avec l'eau.
 - ♦ **Précipitations** : Les polluants atmosphériques (poussières, gaz) sont lessivés et entraînés vers le sol par les pluies (phénomène des "pluies acides").
 - ♦ **Ruissellement** : L'eau de pluie entraîne les polluants déposés sur les sols (pesticides, engrais, hydrocarbures) vers les rivières, les lacs et les océans.
 - ♦ **Infiltration** : L'eau percole à travers le sol, entraînant avec elle des polluants solubles (comme les nitrates) vers les nappes phréatiques, les contaminant pour des décennies.
- **Rôle dans la dispersion** : Le cycle de l'eau assure une dilution initiale des polluants, mais aussi leur transfert entre les milieux (de l'air au sol, du sol à l'eau) et leur concentration dans certains réservoirs (lacs, mers fermées).



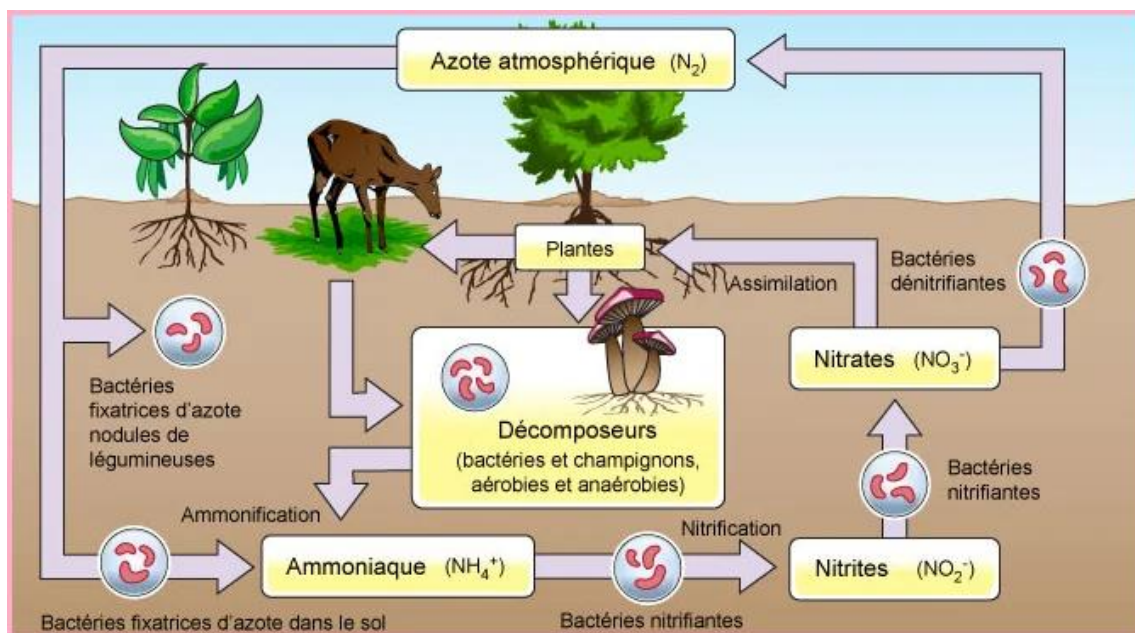
② Cycle du carbone et la problématique du CO₂

- Un Le cycle du carbone régle le climat de la planète. La perturbation de ce cycle par les activités humaines est au cœur du changement climatique.
- ▶ **Mécanisme naturel** : Le carbone circule entre l'atmosphère (sous forme de CO₂), les océans (dissous), la biomasse (via la photosynthèse et la respiration) et les réserves fossiles (charbon, pétrole, gaz).
- ▶ **Perturbation anthropique** : La combustion massive des énergies fossiles et la déforestation libèrent d'énormes quantités de carbone séquestré depuis des millions d'années, augmentant drastiquement la concentration de CO₂ dans l'atmosphère.
- ▶ **Le CO₂ comme polluant** : Bien que non toxique directement à faible dose, le CO₂ est un gaz à effet de serre majeur. Son excès dans l'atmosphère perturbe le bilan radiatif de la Terre, conduisant au réchauffement climatique, qui est lui-même un multiplicateur de risques (fonte des glaces, événements climatiques extrêmes, acidification des océans).



③ Cycle de l'azote et l'eutrophisation

- L'azote est présent dans la nature sous deux états : à l'état libre, sous forme de N_2 , où il constitue 78 % de l'air que nous respirons, à l'état combiné, sous forme minérale (ammoniaque, nitrite, nitrate) ou sous forme organique.
- ▶ **Mécanisme naturel** : Il implique la fixation de l'azote atmosphérique (N_2) par des bactéries, son incorporation dans la biomasse, sa minéralisation (ammonification), sa nitrification (transformation en nitrates) et sa dénitrification (retour à l'azote gazeux).
- ▶ **Perturbation anthropique** : L'industrie chimique (procédé Haber-Bosch) produit des engrais azotés en masse. L'agriculture intensive et les rejets urbains libèrent d'énormes quantités d'azote réactif (nitrates, ammonium) dans l'environnement.
- ▶ **L'eutrophisation** : C'est la conséquence directe de cette perturbation.
 - ◆ **Enrichissement** : Les nitrates et phosphates issus des engrais sont lessivés vers les cours d'eau et les lacs.
 - ◆ **Bloom algal** : Cet apport excessif de nutriments provoque une prolifération rapide d'algues (efflorescence algale).
 - ◆ **Appauvrissement en O_2** : Lorsque ces algues meurent et se décomposent, les bactéries décomposeurs consomment tout l'oxygène dissous dans l'eau.
 - ◆ **Zone morte** : Le manque d'oxygène (hypoxie) entraîne la mort de la vie aquatique (poissons, crustacés), créant des "zones mortes".



IV. Les voies de transfert et de transformation

- ❖ Au-delà des grands cycles, les polluants empruntent des voies de transport spécifiques et peuvent subir des transformations chimiques ou biologiques.

① *Transport atmosphérique (vents, précipitations)*

- ⊙ L'atmosphère est la voie de dispersion la plus rapide pour les polluants gazeux ou les particules fines.
 - ▶ **Vents** : Ils peuvent transporter des polluants sur des milliers de kilomètres. Les poussières du Sahara fertilisent l'Amazonie, mais les polluants persistants comme certains POPs (Polluants Organiques Persistants) ou les radionucléides de Tchernobyl ont fait le tour du globe.
 - ▶ **Précipitations** : Elles jouent un double rôle :
 - ❖ **Dépôt humide** : Les polluants sont dissous ou capturés par les gouttes de pluie, de neige ou de brouillard et ramenés au sol. C'est le mécanisme des pluies acides (SO₂, NO_x).
 - ❖ **Nettoyage de l'atmosphère** : Les précipitations éliminent temporairement les aérosols et les gaz solubles de l'air.

② *Transfert dans les sols et vers les nappes phréatiques*

- ⊙ Le sol n'est pas un simple filtre inerte ; il est un milieu complexe où les polluants peuvent être retenus, dégradés ou transférés.
 - ▶ **Rétention** : Les argiles et la matière organique (humus) peuvent fixer certains polluants (comme les métaux lourds ou certains pesticides), les empêchant temporairement de migrer.
 - ▶ **Lixiviation** : C'est le processus de lessivage du sol par les eaux de pluie ou d'irrigation. Les polluants solubles et non ou peu retenus par le sol (comme les nitrates ou certains herbicides) sont entraînés vers les profondeurs et finissent par rejoindre les nappes phréatiques, les rendant impropres à la consommation.
 - ▶ **Dégradation** : Les micro-organismes du sol peuvent biodégrader certains polluants organiques (hydrocarbures, pesticides), les transformant en substances moins toxiques.

③ Courants océaniques et la dispersion à grande échelle

- ⊙ Les océans sont le réceptacle final de la plupart des polluants transportés par les fleuves et l'atmosphère.
- ▶ **Courants de surface** : Pilotés par les vents, ils dispersent les polluants (comme les hydrocarbures lors des marées noires ou les microplastiques) sur de vastes distances.
- ▶ **Circulation thermohaline ("tapis roulant océanique")** : Ce lent mouvement des masses d'eau, entraîné par les différences de température et de salinité, peut transporter des polluants dans les profondeurs océaniques et vers les pôles, les intégrant dans les écosystèmes les plus reculés.
- ▶ **Accumulation** : Les polluants persistants qui ne se dégradent pas (plastiques, certains POPs) ont tendance à s'accumuler dans les gyres océaniques (grands tourbillons d'eau), formant des "continents" de déchets.

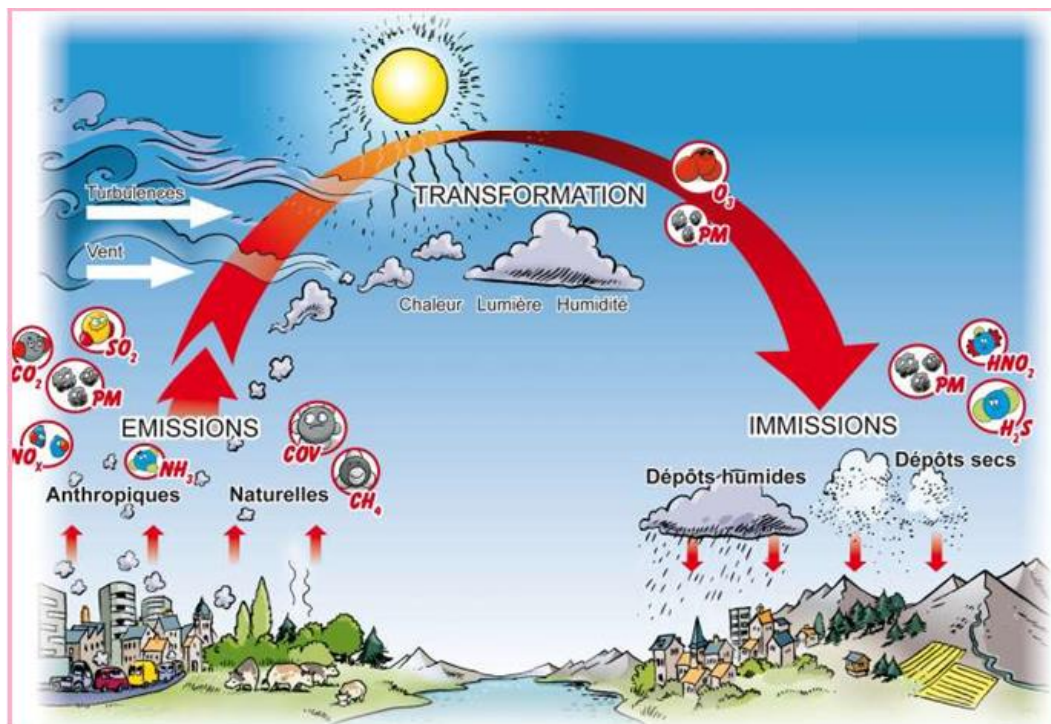
V. Transfert entre milieux et Effets sur la Biosphère

- ⊙ Les polluants ne restent généralement pas confinés à leur milieu d'émission initial ; ils peuvent passer d'un milieu à un autre.
- ▶ **Air vers sol/eau** : Les processus de dépôt (secs ou humides, comme les pluies acides) ramènent les polluants atmosphériques à la surface terrestre ou aquatique.
- ▶ **Sol vers air** : Certains composés volatils présents dans le sol peuvent se vaporiser et s'échapper dans l'atmosphère.
- ▶ **Sol vers eau** : Les polluants peuvent s'infiltrer dans le sol et contaminer les eaux souterraines ou être entraînés par ruissellement vers les eaux de surface.
- ⊙ **Effets sur la biosphère** :
 - ▶ Sur les sols : Contamination, érosion, désertification et dégradation des habitats.
 - ▶ Sur l'eau : Contamination des nappes phréatiques, acidification des eaux (pluies acides), impact sur la faune et la flore aquatiques
 - ▶ Sur l'air : Dégradation de la qualité de l'air, impact direct sur la santé humaine et contribue au changement climatique.
 - ▶ Sur la biodiversité : Réduction de la biodiversité, déséquilibres écologiques, altération des habitats.

► **Exemple d'un polluant directement introduit dans l'atmosphère**

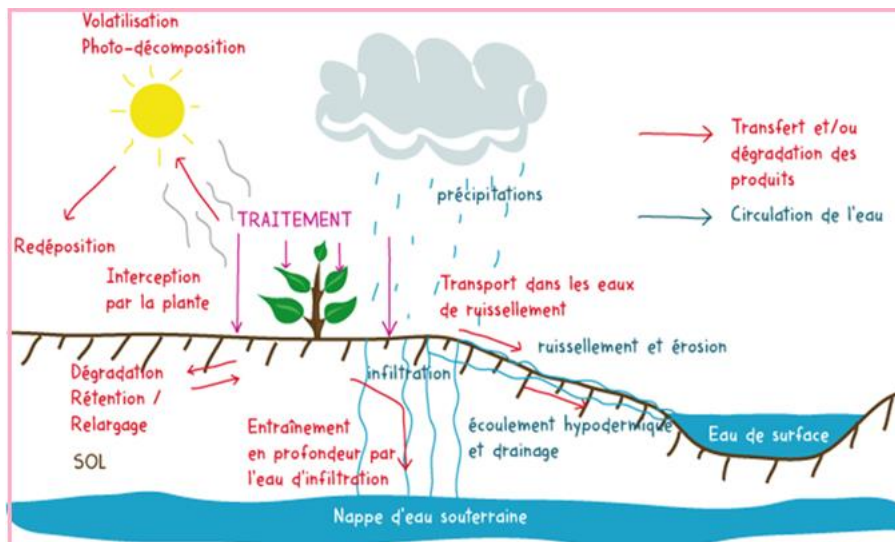
● Comme nous le montre le schéma ci-dessous, la pollution de l'air est régie par un processus comportant quatre étapes :

- ◆ Emission,
- ◆ Transport,
- ◆ Transformation chimique,
- ◆ Immission



► **Exemple d'un pesticide pulvérisé sur une culture**

- Sur le schéma ci-dessous, on voit que le pesticide se disperse dans :
- Le sol
 - Les nappes phréatiques, par infiltration
 - L'air, par volatilisation, où il peut être dégradé (on parle de photo-décomposition) et/ou redéposé à un autre endroit
 - Les eaux de surface (rivière, lac, etc.) par ruissellement



VI. Phénomène de bioaccumulation et bioamplification

► **Bioaccumulation** : Certains polluants (comme les métaux lourds ou les polluants organiques persistants) ne se dégradent pas ou très peu et s'accumulent dans la chaîne alimentaire et dans les organismes vivants (dits "polluants éternels").

► **Bioamplification** : est un processus écologique qui conduit à l'augmentation de la concentration d'un polluant dans les tissus vivants à chaque niveau de la chaîne alimentaire. Le mercure, par exemple, est capté par le plancton, puis passe aux petits prédateurs qui le mangent, et ainsi de suite, s'accumulant à chaque niveau de la chaîne alimentaire jusqu'à atteindre des concentrations élevées chez les grands prédateurs.

► **Adsorption** : Les polluants peuvent se fixer sur des particules du sol ou des sédiments (phénomène d'adsorption), ce qui peut limiter leur mobilité mais aussi les rendre disponibles pour ingestion par la faune.

① Mécanisme d'accumulation dans les tissus vivants

- ⊙ Ce phénomène concerne les polluants persistants (qui se dégradent très lentement), lipophiles (solubles dans les graisses) et bioaccumulables (qui s'accumulent dans les organismes plus vite qu'ils ne sont éliminés).
- ▶ **Bioaccumulation (au niveau de l'individu) :** Un organisme absorbe le polluant par son alimentation et son environnement (eau, air). Comme le polluant est lipophile, il se stocke dans les tissus adipeux (graisses) et n'est pas excrété. La concentration dans l'organisme augmente avec le temps.
- ▶ **Biomagnification (le long de la chaîne alimentaire) :**
 - **Niveau 1 (Producteurs) :** Le plancton ou les végétaux absorbent une faible concentration de polluant dans l'eau ou le sol.
 - **Niveau 2 (Consommateurs primaires) :** Un petit organisme (comme un poisson herbivore) mange une grande quantité de plancton. Le polluant présent dans toutes ses proies s'accumule dans ses tissus. La concentration est déjà plus élevée.
 - **Niveau 3 (Consommateurs secondaires) :** Un poisson carnivore mange plusieurs dizaines de poissons herbivores. Il ingère et accumule tout le polluant contenu dans ses proies.
 - **Niveau 4 (Super-prédateurs) :** Un grand prédateur (comme un thon, un ours polaire ou un humain) se trouvant au sommet de la chaîne consomme de nombreux poissons carnivores. La concentration du polluant dans ses tissus peut atteindre des niveaux des millions de fois supérieurs à ceux de l'eau environnante.

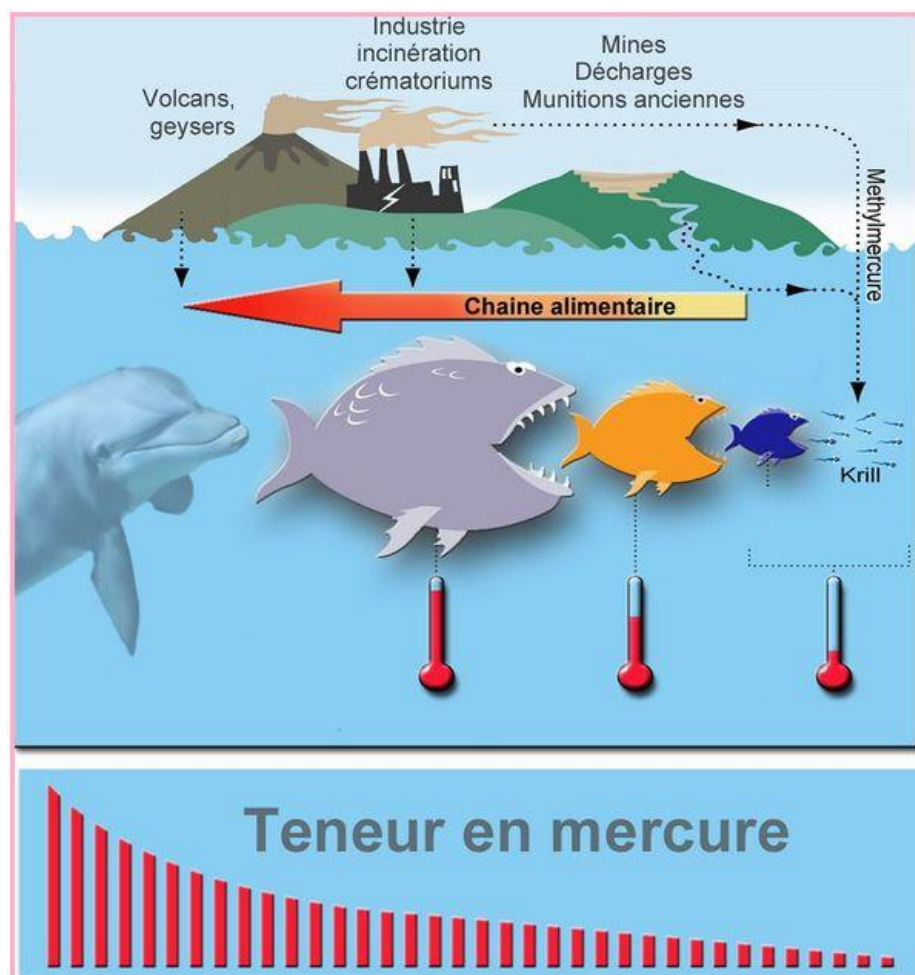
② Étude de cas : le mercure dans les poissons prédateurs

- ⊙ Le mercure (Hg) est un exemple parfait de bioamplification.
- ▶ **Source :** Émissions industrielles (centrales à charbon, incinérateurs), exploitation minière.
- ▶ **Transformation :** Le mercure inorganique (Hg^0) est rejeté dans l'air. Il retombe dans les océans et les lacs, où des bactéries le transforment en méthylmercure (CH_3Hg^+). Cette forme organique est extrêmement toxique pour le système nerveux et très bioaccumulable.

► **Bioamplification :**

- **Niveau 1 :** Le phytoplancton absorbe le méthylmercure de l'eau.
- **Niveau 2 :** Le zooplancton mange le phytoplancton.
- **Niveau 3 :** Les petits poissons (comme les anchois) consomment du zooplancton.
- **Niveau 4 :** Les poissons prédateurs de taille moyenne (comme le thon, l'espadon) mangent ces petits poissons.
- **Niveau 5 :** Les super-prédateurs (requins, marlins, mais aussi les humains) consomment ces poissons prédateurs.

- **Impact :** Les concentrations en mercure dans la chair des grands prédateurs marins peuvent dépasser les limites sanitaires, représentant un risque pour la santé humaine (notamment pour le développement neurologique des fœtus et des jeunes enfants). C'est pourquoi les autorités sanitaires recommandent de limiter la consommation de certains poissons prédateurs.



Conclusion :

Les mécanismes de dispersion des polluants révèlent l'extrême interconnectivité de la biosphère. Un rejet localisé peut, via les cycles de l'eau et du carbone, le transport atmosphérique et les courants océaniques, avoir un impact global. Le phénomène de bioamplification montre quant à lui que la dilution n'est pas une solution : les polluants persistants retrouvent un chemin pour se concentrer dans le vivant, menaçant la santé des écosystèmes et, in fine, la nôtre. Une gestion durable des polluants doit donc impérativement tenir compte de ces processus complexes pour être efficace.

Introduction :

La pollution atmosphérique est l'altération de la pureté de l'air due à la présence de substances chimiques, particulaires ou biologiques en concentrations suffisantes pour provoquer un effet néfaste sur la santé humaine, l'environnement ou le climat. Ce phénomène, largement amplifié par les activités humaines depuis la révolution industrielle, est à l'origine de problèmes environnementaux planétaires. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), 99% de la population mondiale respire un air qui excède les limites recommandées pour les polluants, entraînant environ 7 millions de décès prématurés chaque année. Ce constat alarmant place la pollution de l'air au premier rang des risques environnementaux pour la santé humaine. Dans cette analyse, nous définirons ce phénomène, identifierons ses principaux agents et évaluerons l'étendue de ses conséquences sur le vivant.

I. Définitions /Généralités

- **Définition de l'atmosphère :** L'atmosphère est une enveloppe gazeuse qui entoure la Terre. Elle protège la vie sur terre en absorbant les rayons ultraviolets émis par le soleil, réchauffe la surface terrestre grâce à l'effet de serre et réduit les écarts de température entre le jour et la nuit.
 - ▶ **L'atmosphère est un mélange de gaz :**
 - **Les gaz permanents :** l'azote (N), l'oxygène (O) et l'argon (Ar)
 - **Les gaz variables :** la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), l'ozone (O₃) et beaucoup d'autres
- Azote (78 %) Oxygène (21 %) •Argon (0,9 %) •Dioxyde de carbone (0,035 %) •Gaz rares (H₂, hélium, krypton, xénon) •Gaz polluants.) en quantités infimes, (oxydes de soufre, oxydes d'azote, ozone, oxydes de carbone etc

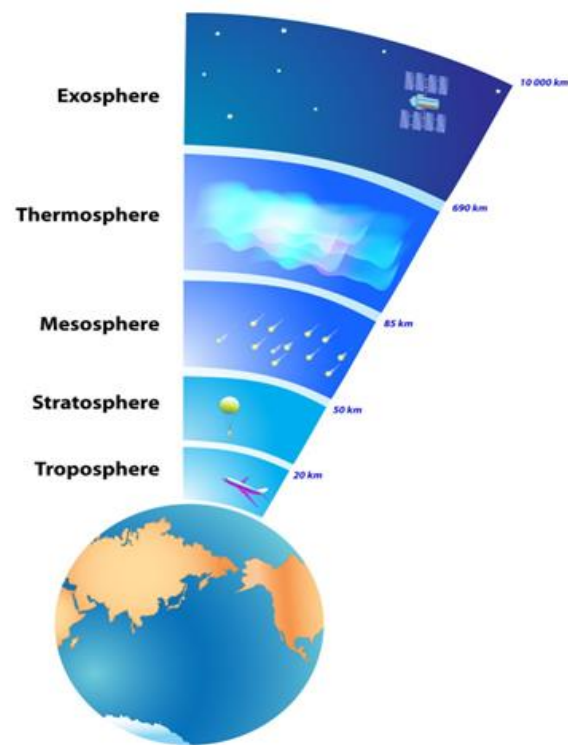
● Structure verticale de l'atmosphère

► L'atmosphère terrestre peut être découpée en quatre couches principales :

- **Troposphère,**
- **Stratosphère,**
- **Mésosphère**
- **Thermosphère.**

Au-delà des 4 couches citées ci-dessus, on trouve **l'Exosphère**, une couche qui assure la transition entre l'atmosphère et l'espace interplanétaire.

- La météorologie et la climatologie se produisent dans la couche la plus basse, la troposphère.



▪ La Troposphère :

Couche de l'atmosphère terrestre située entre la surface du globe et une altitude d'environ 8 à 12 kilomètres. La frontière entre la troposphère et la stratosphère s'appelle la **Tropopause**.

▪ La Stratosphère :

Couche de l'atmosphère située au-dessus de la troposphère et caractérisée par une faible croissance de la température avec l'altitude. La stratosphère s'étend, en moyenne, entre 12 et 50 km d'altitude. Elle renferme la quasi-totalité de l'ozone atmosphérique. La **Stratopause** est la limite entre la Stratosphère et la Mésosphère.

▪ La Mésosphère :

Couche de l'atmosphère située entre la stratosphère et la thermosphère. Elle est située entre 50 km et 90 km d'altitude, au-dessus de la stratosphère. La **Mésopause**, qui est la frontière entre la Mésosphère et la Thermosphère, est l'endroit le plus froid de la Terre.

▪ La Thermosphère :

Couche de l'atmosphère située au-dessus de la Mésosphère et caractérisée par une forte croissance de la température avec l'altitude. La Thermosphère est située entre 85 et 500 km d'altitude.

❖ **La Troposphère est la zone qui nous intéresse, vu qu'elle est le lieu principal de la pollution atmosphérique.**

🕒 **Définition d'un polluant atmosphérique :** Un polluant de l'air est une substance naturelle ou issue des activités humaines qui, lorsqu'elle est présente en quantité trop importante dans l'atmosphère, peut avoir des effets nocifs sur les êtres vivants.

🕒 **Définition de la pollution atmosphérique :** La pollution atmosphérique est définie comme l'altération de la composition naturelle de l'air par la présence de substances (agents chimiques, biologiques ou physiques) en concentrations anormalement élevées, susceptibles d'avoir des effets néfastes sur la santé humaine, l'environnement et les biens matériels.

▶ La pollution est définie selon deux critères distincts ou combinés :

- **Un critère Qualitatif :** *substance étrangère à la composition de l'air*
- **Un critère Quantitatif :** *où le polluant est un constituant normal de l'air qui dépasse les limites fixées ex : $CO_2 > 300ppm$.*

II. Les sources de pollution atmosphérique

❖ **Les principales sources de pollution atmosphérique selon (Florian, 2011) sont :**

🕒 **Les Sources Naturelles :**

- Combustion naturelle : Feux de forêts (CO , CO_2)
- L'éruption volcanique : (poussières, SO_2 ,)
- Processus de fermentation de la matière organique (gaz à effet de serre : CH_4 et N_2O)
- Les océans et les mers : $NaCl$, $CaCl_2$, $MgCl_2$, KBr

🕒 **Les Sources Anthropogéniques :** Ces sources sont le fait de l'activité humaine. Parmi les sources anthropiques, on oppose souvent les sources fixes, émises par des installations ne se déplaçant pas, et des sources mobiles liées aux transports.

- Les moyens de transport (routier, aérien, maritime, ferroviaire ..)
- Industrie (centrales électriques, Incinérateurs...)
- Agriculture (engrais, élevage...)
- Secteurs résidentiels (chauffages, produits sanitaires...)

① Les Emissions Naturelles :

Ce sont essentiellement le dioxyde de soufre (SO_2) et le dioxyde d'azote (NO_2). Ces composés proviennent principalement des éruptions volcaniques, des feux de forêt, des tempêtes de sable et de poussière ainsi que des décompositions organiques. On peut aussi citer dans les sources naturelles de pollution les végétaux, dont le cycle de vie produit de nombreux composés toxiques (H_2S , CH_4).

❖ Parmi les sources naturelles de la pollution de l'air, on trouve :

➤ **Les volcans :** qui envoient dans l'atmosphère d'énormes quantités de gaz et de particules qui peuvent rester le plus longtemps en suspension dans l'atmosphère.



➤ **Les incendies de forêts :** dus à la foudre ou à une éruption volcanique), qui provoquent le dégagement de la fumée, et rejettent de grandes quantités de gaz (dioxyde de carbone CO_2 , monoxyde de carbone CO , ...)



➤ **Les tempêtes de sable et de poussière :** qui surviennent en général lorsque des vents forts soulèvent dans l'atmosphère de grandes quantités de sable et de poussière d'un sol sec et nu.



② Les Emissions Anthropiques :

Ce sont des polluants provenant de l'activité humaine à savoir : les industries de transformation, le secteur agricole, les moyens de transports ainsi que les ménages.

Les principaux polluants émis sont : le dioxyde de soufre (SO_2) ; les oxydes d'azote (NO et NO_2); le monoxyde de Carbone (CO); les composés organiques volatils (COV) et les particules fines

❖ Parmi les secteurs d'activité humaine susceptibles d'émettre des polluants atmosphériques, on trouve :

➤ **Les émissions industrielles :** L'industrie est à l'origine des émissions spécifiques dues aux processus de traitement ou de fabrication employés. En quantités variables, selon les secteurs industriels, elle est émettrice de monoxyde et de dioxyde de carbone, de dioxyde de soufre, d'oxyde d'azote, de poussières, de composés organiques volatils (COV).



➤ **Les émissions domestiques :** Au niveau individuel ou tertiaire (chauffage des logements ou des bureaux), la combustion de carburants fossiles (charbon, fioul lourd, etc.) produit d'importantes émissions polluantes. Le dioxyde de carbone (CO₂), dont la concentration croissante dans l'atmosphère contribue à l'effet de serre, le (CO), (SO₂), les (NO_x), les poussières, les métaux lourds, etc. sont concernés.



➤ **Les émissions agricoles :** Le développement de l'agriculture intensive contribue à la pollution atmosphérique. Ses émissions (essentiellement l'ammoniac, le méthane, le protoxyde d'azote, le monoxyde de carbone et les pesticides) sont liées à la décomposition des matières organiques, aux animaux d'élevage et à l'utilisation massive d'engrais et de pesticides.

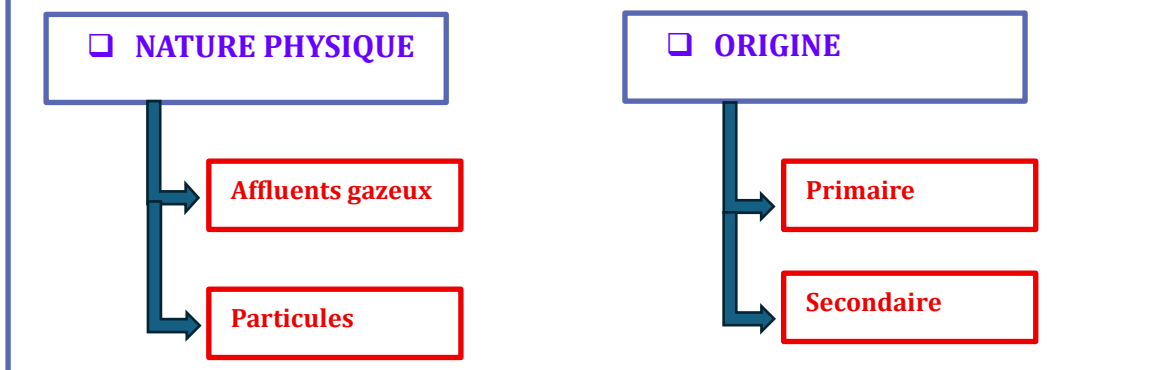


➤ **Les émissions dues aux transports :** La pollution due aux transports est essentiellement perçue dans les villes en raison de la densité du trafic. Le transport routier est la première source d'émissions de CO₂, principal responsable du réchauffement climatique. Le trafic routier est également responsable de la majorité des particules fines qui polluent l'air extérieur.



III. Les principaux polluants atmosphérique

❖ Les polluants atmosphériques sont classés de deux manières à savoir :



❑ Selon leurs caractéristiques physico-chimiques

⦿ Les Polluants Gazeux :

▶ Oxydes d'azote (NO_x - principalement NO et NO_2) :

- **Sources** : La combustion à haute température (moteurs de véhicules, centrales thermiques, chaudières industrielles). L'azote de l'air (N_2) et l'oxygène (O_2) se combinent pour former du NO , qui s'oxyde ensuite en NO_2 .
- **Impacts** : Irritation des voies respiratoires, précurseur du smog photochimique et des pluies acides.

▶ Dioxyde de soufre (SO_2) :

- **Sources** : Principalement de la combustion de combustibles fossiles soufrés (charbon, fioul lourd) dans les centrales électriques et les industries.
- **Impacts** : Irritant pulmonaire puissant, précurseur majeur des pluies acides. Contribue à la formation de particules fines secondaires (sulfates).

▶ Monoxyde de carbone (CO) :

- **Sources** : Issu d'une combustion incomplète des combustibles carbonés. Les principales sources sont les véhicules à moteur, le chauffage au bois non performant et les processus industriels.
- **Impacts** : Gaz très toxique pour l'homme et les animaux. Il se fixe sur l'hémoglobine du sang à la place de l'oxygène, provoquant une asphyxie cellulaire (intoxication mortelle en milieu fermé).

⊙ **Particules :**

❖ Les particules en suspension (PM pour Particulate Matter) sont un mélange complexe de microparticules solides et/ou liquides en suspension dans l'air.

▶ **Définition et tailles :**

- **PM10 :** Particules dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres (μm). Elles peuvent pénétrer dans les voies respiratoires supérieures (nez, gorge).
- **PM2.5 :** Particules fines dont le diamètre est inférieur à 2,5 μm . Beaucoup plus dangereuses, elles peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires et même passer dans la circulation sanguine.

▶ **Sources :**

- **Primaires :** Usure des pneus et des freins, érosion des sols, combustion (moteurs diesel, chauffage au bois, incendies), chantiers.
- **Secondaires :** Formation dans l'atmosphère à partir de gaz précurseurs comme le SO_2 , les NO_x et l'ammoniac (NH_3).

▶ **Impacts :** Problèmes respiratoires (asthme, bronchite), maladies cardiovasculaires, cancers du poumon. Elles ont aussi un impact sur le climat en influençant la formation des nuages et en absorbant ou réfléchissant le rayonnement solaire.

❑ **Selon leurs origines :**

Polluant primaire

Polluants directement émis dans l'air

- ✓ H_2S / SO_2
- ✓ NO / NO_2
- ✓ NH_3
- ✓ CO / CO_2
- ✓ COV (par ex, HCHO , C_6H_6),
- ✓ Particules
- ✓ Métaux (Pb , Hg , Cd , As ...)
- ✓ POP (pesticides, dioxines, furanes...)

Polluant secondaire

Polluants formés chimiquement dans l'air à partir de polluants primaires

- ✓ O_3
- ✓ NO_2
- ✓ HCHO
- ✓ H_2SO_4
- ✓ HNO_3 ...

- ◎ **Polluants primaires** : Ce sont des substances émises directement dans l'atmosphère par des sources identifiables.
 - **Exemples** : Monoxyde de carbone (CO) issu des pots d'échappement, dioxyde de soufre (SO₂) des cheminées d'usines, particules en suspension (PM) de la combustion du bois ou des chantiers.
- ◎ **Polluants secondaires** : Ils ne sont pas émis directement, mais se forment dans l'atmosphère par des réactions chimiques entre des polluants primaires (souvent sous l'effet du rayonnement solaire).
 - **Exemples** : L'ozone troposphérique (O₃) se forme à partir des oxydes d'azote (NO_x) et des composés organiques volatils (COV). Les pluies acides résultent de la transformation du SO₂ et des NO_x en acides.

IV. Les facteurs influençant la pollution atmosphérique

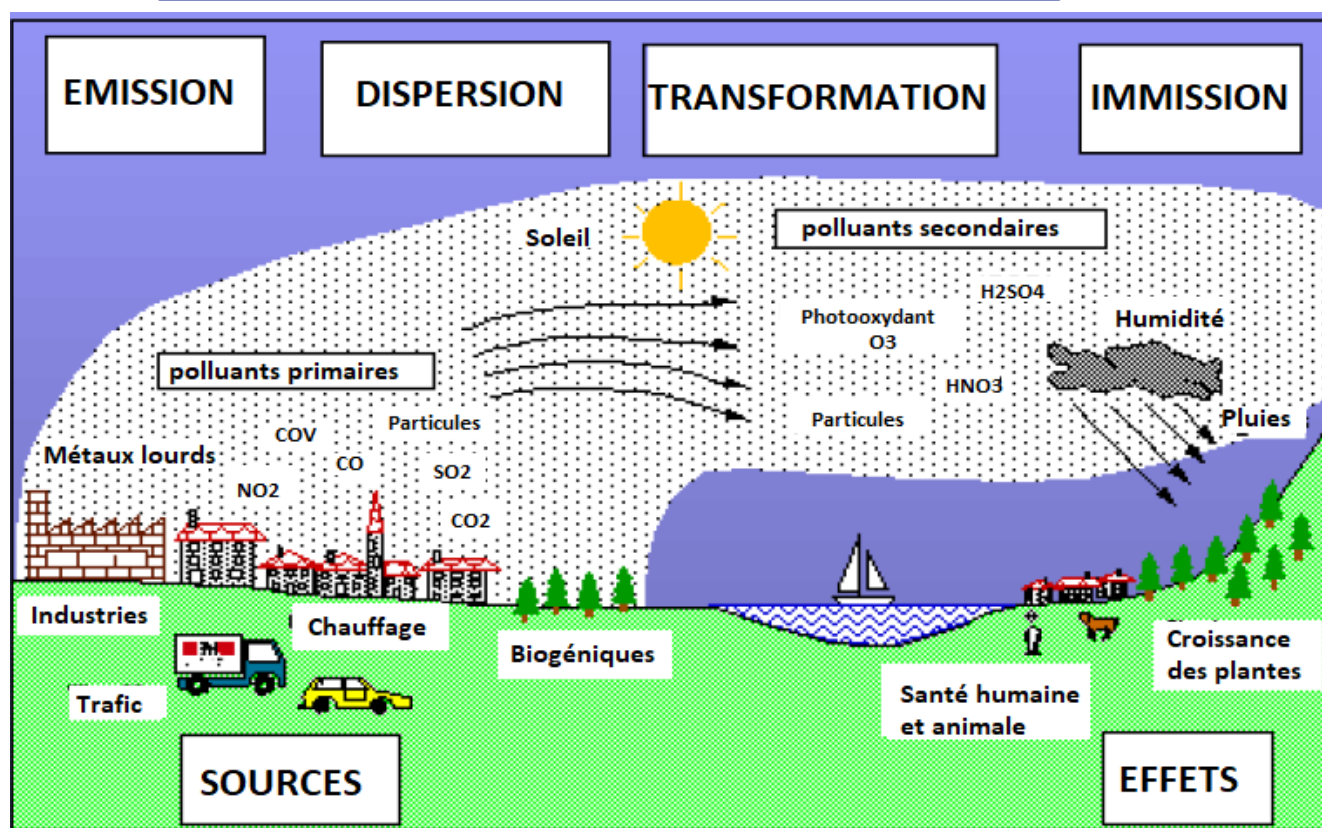
- ❖ Les conditions météorologiques et la situation géographique agissent sur la dispersion et la transformation des polluants dans l'atmosphère.

- ❖ Les conditions météorologiques ont un fort impact sur la qualité de l'air pour les raisons suivantes :
 - ▶ La température et l'ensoleillement influent sur les réactions chimiques des polluants,
 - ▶ La pluviométrie participe au phénomène de lessivage de l'atmosphère,
 - ▶ La direction et la force des vents impactent la dispersion des polluants,
 - ▶ Les conditions météorologiques influent sur les besoins et les comportements (chauffage accru, circulation automobile...) et donc les émissions.

V. Mécanismes de la pollution atmosphérique

- ❖ L'existence d'un polluant dans l'atmosphère est rythmée par cinq étapes :
 - ▶ *Son émission dans l'atmosphère ;*
 - ▶ *Sa dispersion et son transport par le vent ;*
 - ▶ *Ses interactions avec d'autres substances ou radiations*
 - ▶ *Son interaction avec d'autres milieux, par dépôt ou immission ; Ses effets sur les milieux récepteurs.*

Etapes de la pollution atmosphérique



❖ Ces étapes sont comme suit :

➤ *L'émission :*

Consiste à rejeter dans l'air ambiant, à partir d'une source connue (naturelle ou anthropique, fixe ou mobile) des polluants dits « primaires ».

➤ *Le transport et la dispersion :*

Ils sont liés aux caractéristiques de l'émetteur : hauteur des émissions, géographie environnante, l'agglomération, etc.

Ils sont également liés aux phénomènes météorologiques : température, vitesse et direction du vent, pression atmosphérique, humidité et les précipitations. Ces phénomènes permettent le déplacement des émissions, leur transformation chimique dans les masses d'air, ainsi que leurs éventuelles retombées plus ou moins lointaines du lieu d'émission, sous forme sèche (dépôts particuliers sur le sol, les végétaux, le bâti, etc.) ou humide (précipitations, lessivage, etc.).

➤ **La transformation :**

Durant le transport et la dispersion, les polluants primaires, présents en mélange dans l'atmosphère subissent des transformations chimiques, liées notamment aux conditions d'ensoleillement, conduisant à la formation de polluants dits « secondaires » par l'intermédiaire de radicaux libres générés (peroxyl, hydroperoxyl, et radical nitrate). C'est le cas de l'Ozone (O₃) photochimique, produit à partir de la photodissociation dans les basses couches atmosphériques (ozone troposphérique) produit, selon la longueur d'onde d'excitation, de l'oxygène moléculaire plus de l'oxygène atomique à l'état excité ou à l'état fondamental. Tandis que la photodissociation du NO₂ produit de l'oxygène atomique à l'état fondamental et du NO.

➤ **L'immission :**

Elle représente l'incorporation et l'accumulation d'un polluant, dans un milieu récepteur (atmosphère, eau, sols, organismes vivants).

VI. Les types de pollutions atmosphériques

- ⊙ Les effets de la pollution atmosphérique sur la santé et l'environnement peuvent se ressentir à différentes échelles géographiques :
 - ▶ Pollution de proximité et à l'échelle locale
 - ▶ Pollution à l'échelle régionale
 - ▶ Pollution planétaire

① **Pollution de proximité :**

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 (exemple fluor).

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

③ Pollution planétaire :

Elle concerne les problèmes en relation avec :

- 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).

VII. Les impacts de pollution atmosphérique

① Effets de la pollution atmosphérique sur la santé :

- ❖ La pollution atmosphérique peut avoir divers effets à court et à long terme sur la santé. Ainsi, la pollution de l'air entraîne de nombreuses maladies respiratoires et cardio-vasculaires, tels que : la pneumonie, la bronchite, l'asthme, les infections des voies respiratoires, le cancer du poumon, la toux, la dyspnée

② Effets de la pollution atmosphérique sur l'environnement :

- ❖ Les principales conséquences de la pollution de l'air sur l'environnement sont :
 - La formation des pluies acides
 - L'effet de serre
 - La dégradation de la couche d'ozone

☐ *Pluies acides :*

- ▶ **Formation :** Les pluies acides sont causées par la dissolution d'acides forts dans l'eau de pluie. Les principaux responsables sont :
 - **L'acide sulfurique (H_2SO_4) :** Formé par l'oxydation du dioxyde de soufre (SO_2) dans l'atmosphère.
 - **L'acide nitrique (HNO_3) :** Formé par l'oxydation des oxydes d'azote (NO_x).
- ▶ **Impacts :**
 - **Sur les écosystèmes aquatiques :** Acidification des lacs et rivières, entraînant la disparition d'espèces de poissons et d'invertébrés sensibles.
 - **Sur les forêts :** L'acidification des sols libère des ions aluminium (Al^{3+}) toxiques pour les racines des arbres et lessive les nutriments essentiels (ex : magnésium). Cela affaiblit les arbres et les rend plus vulnérables aux maladies.
 - **Sur les matériaux :** Corrosion des bâtiments, des monuments historiques en calcaire ou en marbre, et dégradation des métaux.
- ❖ **Les pluies normales ont un pH de 5,6. On parle de pluies acides lorsque leur pH est inférieur à 5,6.**

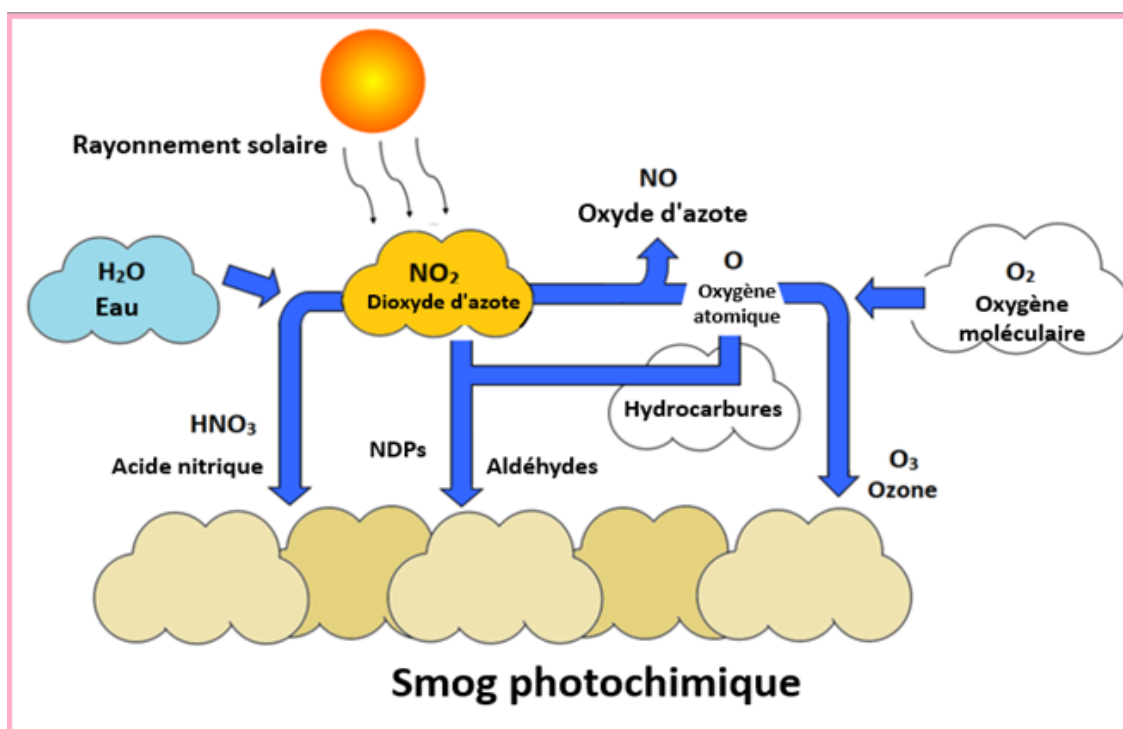


☐ *Smog photochimique et l'ozone troposphérique :*

- ▶ **Définition :** Le "smog" (contraction de smoke et fog) photochimique est un brouillard brunâtre caractéristique des grandes agglomérations, composé principalement d'ozone (O_3) troposphérique et d'autres oxydants.
- ▶ **Mécanisme de formation :** C'est un phénomène typiquement estival qui nécessite :
 - **Des précurseurs :** les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatils (COV) émis par les véhicules et les industries.
 - **Un agent déclencheur :** le rayonnement solaire intense (rayonnement UV).

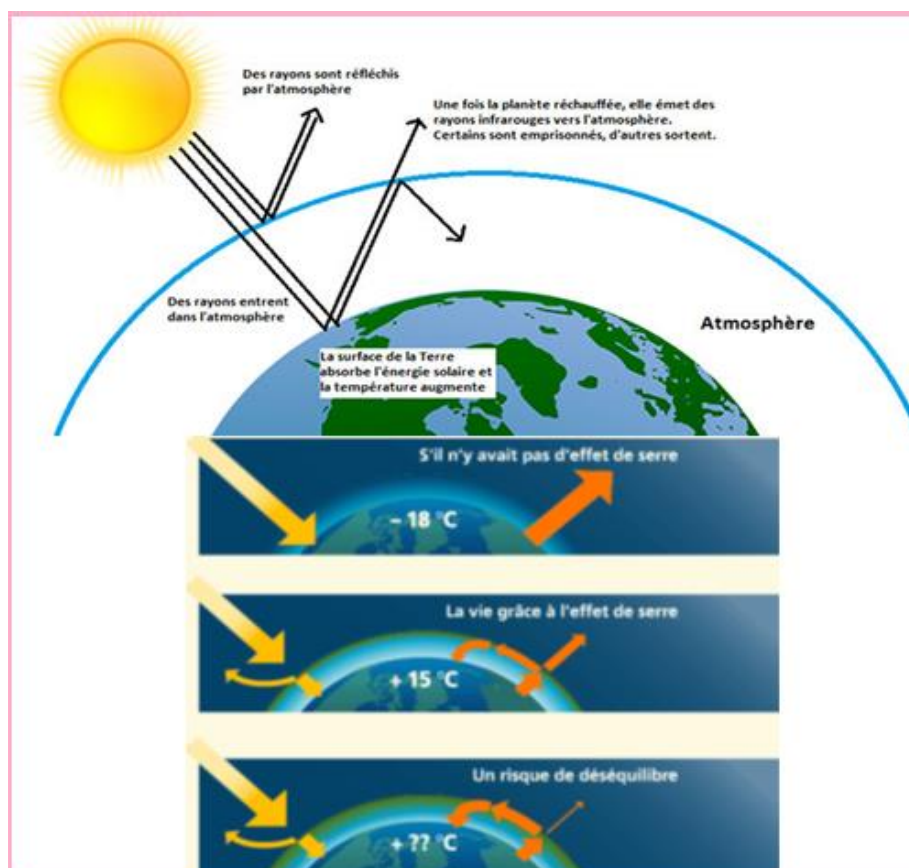
Sous l'effet des UV, les NO_x et les COV entrent dans un cycle complexe de réactions chimiques qui aboutit à la formation d'ozone (O_3).

- ▶ **Impacts :** L'ozone troposphérique est un puissant oxydant. Il provoque des irritations oculaires et des voies respiratoires, aggrave l'asthme et réduit le rendement des cultures agricoles.



❑ **Changement climatique : rôle des gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O) :**

- ▶ **Principe de l'effet de serre :** C'est un phénomène naturel essentiel à la vie sur Terre. Certains gaz dans l'atmosphère, les Gaz à Effet de Serre (GES), piègent une partie du rayonnement infrarouge émis par la Terre, maintenant une température moyenne propice à la vie (environ 15°C). L'activité humaine amplifie considérablement cet effet.
- ▶ **Les principaux GES anthropiques :**
 - **Dioxyde de carbone (CO_2) :** Principal GES.
Source : combustion des énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz), déforestation.
 - **Méthane (CH_4) :** Pouvoir réchauffant environ 25 fois supérieur à celui du CO_2 sur 100 ans.
Sources : élevage de ruminants (fermentation entérique), riziculture, décharges d'ordures, fuites de gaz naturel.
 - **Protoxyde d'azote (N_2O) :** Pouvoir réchauffant environ 300 fois supérieur à celui du CO_2 .
Sources : utilisation d'engrais azotés en agriculture, certains processus industriels.
- ▶ **Conséquences :** Augmentation de la température globale, fonte des glaces et montée du niveau des mers, perturbation du cycle de l'eau (sécheresses, inondations), acidification des océans, perte de biodiversité.



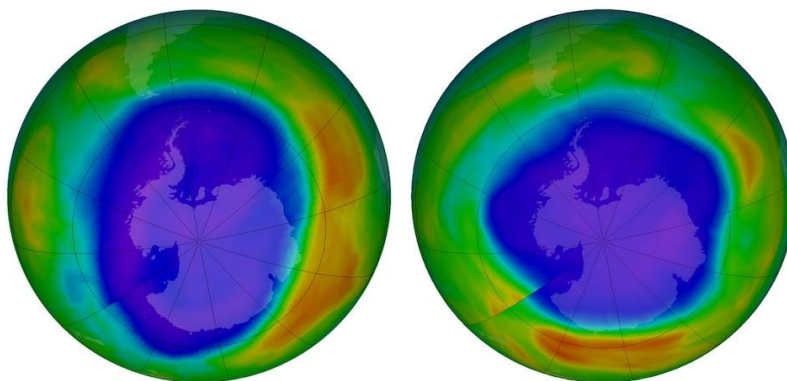
❏ *Destruction de la couche d'Ozone :*

- ▶ **Contexte :** La couche d'ozone stratosphérique, située entre 15 et 35 km d'altitude, absorbe la plus grande partie des rayons UV-B et UV-C du soleil, nocifs pour le vivant.
- ▶ **Molécules responsables :** Les principaux responsables sont les chlorofluorocarbures (CFC), utilisés autrefois comme réfrigérants, propulseurs dans les aérosols et solvants. Ils sont stables, non toxiques et peu réactifs dans la basse atmosphère, ce qui leur permet de monter lentement jusqu'à la stratosphère.
- ▶ **Mécanisme de destruction :**
 - **Libération du chlore :** Sous l'effet des rayons UV-C en haute altitude, les molécules de CFC se décomposent et libèrent des atomes de chlore (Cl).
 - **Réaction en chaîne :** Un seul atome de chlore peut détruire des dizaines de milliers de molécules d'ozone (O₃) en servant de catalyseur dans les réactions suivantes :
$$\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{ClO} + \text{O}_2$$
$$\text{ClO} + \text{O} \rightarrow \text{Cl} + \text{O}_2$$
L'atome de chlore (Cl) est régénéré et peut recommencer le cycle. Ce phénomène est responsable du "trou" dans la couche d'ozone observé chaque printemps au-dessus de l'Antarctique.
- ▶ **Conséquences sanitaires et écologiques :** L'amincissement de la couche d'ozone entraîne une augmentation du rayonnement UV-B atteignant la surface de la Terre, avec des conséquences graves :
 - **Sanitaires :**
 - ✓ *Cancers de la peau : Augmentation des risques de carcinomes et de mélanomes malins.*
 - ✓ *Problèmes oculaires : Augmentation des cas de cataractes et d'affections de la cornée.*
 - ✓ *Affaiblissement du système immunitaire.*
 - **Écologiques :**
 - ✓ *Impact sur la végétation : Altération de la photosynthèse et réduction de la croissance de certaines cultures (ex : soja, riz).*
 - ✓ *Impact sur les écosystèmes aquatiques : Les UV-B endommagent le phytoplancton, base de la chaîne alimentaire marine, ce qui peut perturber tout l'écosystème océanique*

Quelques solutions pour limiter la pollution de l'air

❖ *Pour limiter la pollution de l'air, nous pouvons par exemple :*

- ▶ Utiliser des moyens de transports non polluants ;
- ▶ Utiliser des moyens de transports en commun à la place de la voiture ;
- ▶ Encourager l'utilisation des énergies renouvelables (solaire, éolienne) ;
- ▶ Augmenter la superficie des espaces verts (jardins, forêts, ...) ;
- ▶ Placer les filtres dans les cheminées des usines.



Conclusion :

La pollution atmosphérique est un enjeu complexe et multiforme, allant des problèmes locaux de santé publique (smog, particules) à des perturbations globales du système Terre (changement climatique, trou dans la couche d'ozone). La compréhension scientifique de ces mécanismes, comme celle acquise pour les CFC, a permis la mise en place de réglementations internationales (Protocole de Montréal). Elle souligne la nécessité de poursuivre les efforts de réduction des émissions polluantes pour protéger à la fois la santé humaine et les équilibres environnementaux planétaires.

Introduction :

Le sol est une ressource non renouvelable à l'échelle humaine, un écosystème complexe et dynamique qui assure des fonctions vitales : production de nourriture, filtration de l'eau, support de la biodiversité et stockage du carbone. La pollution des sols, définie comme l'altération de leur qualité par l'introduction de substances chimiques ou d'agents biologiques en concentrations toxiques, constitue une menace grave et souvent invisible pour l'environnement et la santé publique. Ce chapitre a pour objectif d'identifier les principales sources de cette pollution, d'en analyser les impacts et de présenter les méthodes disponibles pour y remédier.

I. Définitions/Généralités

- ⦿ Le sol est la couche superficielle meuble de la lithosphère terrestre, présentant une épaisseur variable de quelques centimètres à plusieurs mètres. Il est constitué par un mélange de matériaux minéraux et organiques, qui sert de support et milieu naturel pour la croissance des plantes.
- ⦿ la formation d'un sol résulte de l'altération d'une roche superficielle sous l'influence : du climat (provoque une érosion) et de la végétation et d'organismes vivants (formation d'humus).

Le sol est donc fait de :

- ❑ Particules organiques de matières végétales et animales en décomposition provenant d'organismes végétaux et animaux vivants.
- ❑ Particules minérales telles que du sable, de l'argile, des pierres ou du gravier, qui faisaient partie autrefois de roches plus grosses.

- Un sol typique est un mélange de quatre éléments principaux :
 - **Les Matériaux Minéraux (45%)** : Issus de l'altération de la roche-mère (sable, limon, argile). Ils donnent sa structure au sol et sont une source de nutriments pour les plantes.
 - **L'Eau (25%)** : Elle est essentielle pour la vie des plantes et des organismes du sol. Elle dissout les nutriments pour les rendre disponibles.
 - **L'Air (25%)** : Présent dans les pores du sol, il est vital pour la respiration des racines et des organismes aérobies.
 - **La Matière Organique (5%)** : C'est la partie "vivante". Elle comprend :
 - ⊕ **La matière organique morte** (feuilles, racines en décomposition).
 - ⊕ **L'humus** : substance stable, noire et spongieuse qui retient l'eau et les nutriments.
 - ⊕ **Les organismes vivants** (vers de terre, bactéries, champignons, insectes).

II. Origines et nature de la pollution des sols

- ❖ La pollution des sols est multifactorielle et résulte principalement des activités humaines. On peut classer ses origines en trois grandes catégories.

① *Pollution agricole : pesticides, engrais de synthèse, lisier*

- ▶ **Pesticides (herbicides, fongicides, insecticides)** : Conçus pour éliminer les organismes indésirables, ils peuvent persister dans le sol, tuer les micro-organismes bénéfiques et les vers de terre, et s'infiltrer vers les nappes phréatiques. Leur dégradation peut produire des métabolites parfois plus toxiques que la molécule mère.
- ▶ **Engrais de synthèse** : L'épandage excessif d'engrais azotés (nitrates) et phosphatés conduit à :
 - **L'eutrophisation** : le lessivage des nitrates vers les cours d'eau et les nappes.
 - **L'acidification des sols** : qui libère des éléments toxiques comme l'aluminium et dégrade la structure du sol.
- ▶ **Lisier et effluents d'élevage** : S'ils sont épandus en excédent par rapport à la capacité d'absorption des sols et des cultures, ils deviennent une source de pollution par les nitrates, les phosphates, les pathogènes et les hormones, contaminant les sols et les eaux.

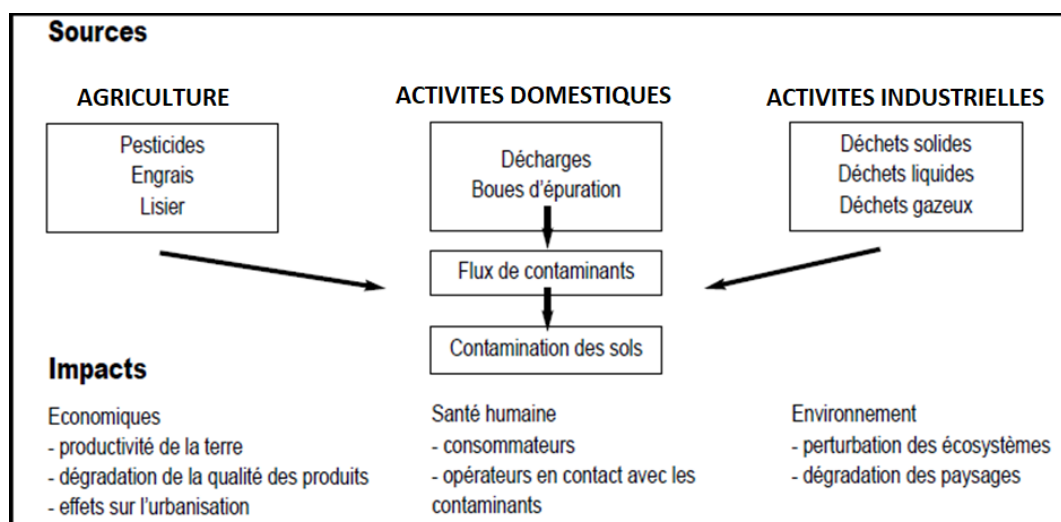
② Pollution industrielle : métaux lourds, hydrocarbures

- ▶ **Métaux lourds** : Ils sont non biodégradables et s'accumulent dans les sols.
 - **Plomb (Pb)** : Provenant des fonderies, des batteries et (historiquement) de l'essence. Il est neurotoxique.
 - **Cadmium (Cd)** : Issu des industries métallurgiques, des engrais phosphatés et des batteries. Il est cancérigène et toxique pour les reins.
 - **Mercure (Hg)** : Utilisé dans l'industrie chimique et libéré par la combustion du charbon. Il est très toxique pour le système nerveux.
- ▶ **Hydrocarbures (pétrole, carburants, solvants chlorés)** : Ces polluants issus des fuites de réservoirs, des accidents ou des rejets industriels sont toxiques pour la faune du sol, réduisent la perméabilité du sol et peuvent contaminer les eaux souterraines. Certains composés, comme les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), sont cancérigènes.

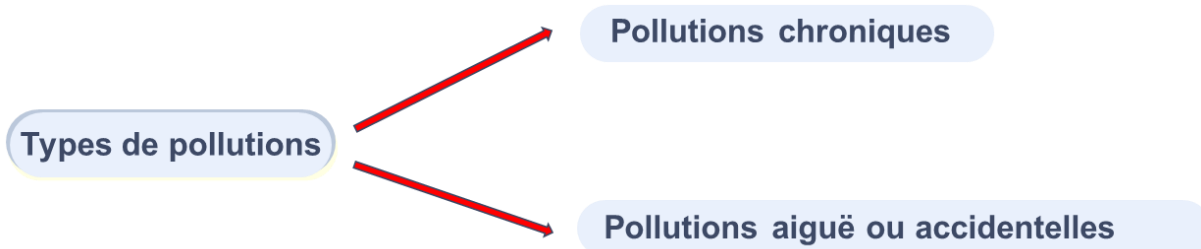
③ Décharges sauvages et déchets plastiques

- ▶ **Décharges sauvages** : Le dépôt illégal de déchets (ménagers, du BTP, électroménagers) introduit dans l'environnement un mélange complexe de polluants : métaux, solvants, produits chimiques divers qui peuvent s'infiltrer dans les sols et les eaux.
- ▶ **Déchets plastiques** : Les macroplastiques défigurent les paysages et perturbent la vie du sol. Les microplastiques (fragments < 5 mm) s'accumulent dans les sols, où ils :
 - Altèrent la structure et l'aération du sol.
 - Libèrent des additifs chimiques (phtalates, bisphénol A).
 - Servent de support à d'autres polluants (métaux lourds, pathogènes) et les transportent.

Les diverses formes de contamination du sol et leurs conséquences

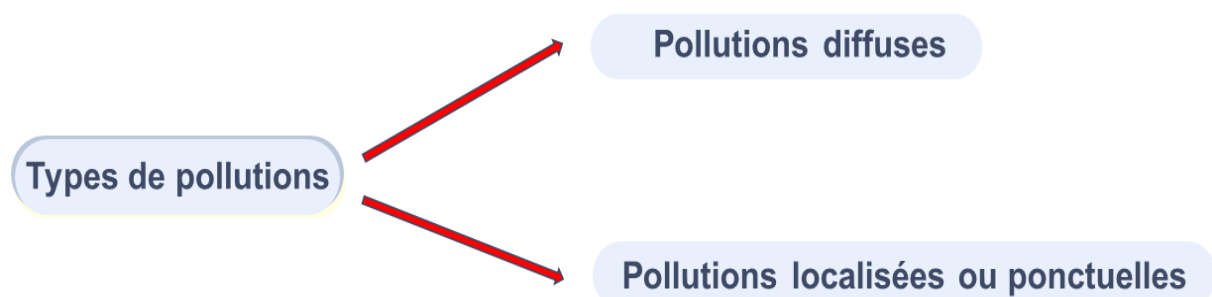


- En fonction de leur durée On distingue deux types de pollution :



- ❑ Dans le cas d'une exposition de longue durée (plusieurs années ou décennies), on parle d'exposition chronique (qui est généralement associée à de faibles doses).
- ❑ Dans le cas d'exposition de plus courte durée, on parle d'exposition accidentelle ou aiguë (quelques minutes à quelques heures).

- En fonction de leur étendue (surface) On distingue deux autres types de pollution :



- ❑ Les pollutions diffuses (sur de grandes surfaces de sols) : résultent d'épandages de produits solides ou liquides ; et des retombées atmosphériques
- ❑ Les pollutions localisées (sur des sites localisés) : Présence ponctuelle dans les sols de substances dangereuses : Déversements, fuites ou dépôt de déchets ; demeure très localisée et intense. Elle est en rapport avec des sites industriels, des dépôts de déchets ou à d'autres sites pollués de façon chronique ou accidentelle (métaux lourds, hydrocarbures, benzène, solvants organiques industriels).

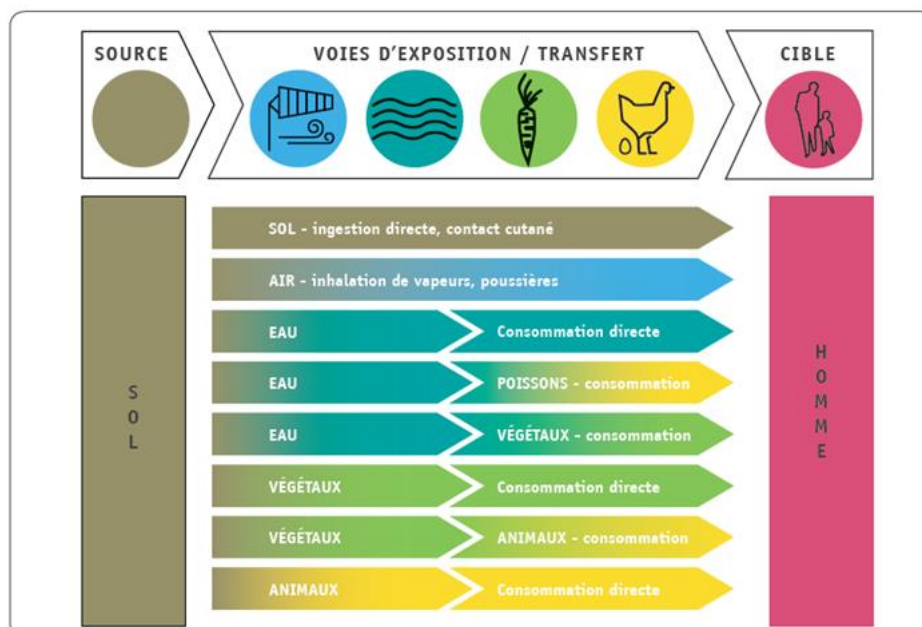
- ❖ Un sol pollué devient à son tour une source possible de diffusion directe ou indirecte de polluants dans l'environnement, via l'eau, les envols de poussières, vapeurs gazeuses ou via une reconcentrations et transfert de polluants par des organismes vivants (bactéries, champignons, plantes à leur tour mangés par des animaux).



III. Mobilité et transfert des polluants du sol

- ❖ Les métaux et certaines substances organiques peuvent faire l'objet de transferts et d'accumulations à des degrés variables dans les sols, les végétaux (racines, tiges, feuilles, fruits) et dans la faune du sol (par exemple vers de terre, escargots, petits mammifères). Lorsqu'ils sont sous forme liquide ou soluble, les polluants peuvent également migrer en profondeur et contaminer les eaux souterraines. Ces processus vont dépendre des propriétés des substances, des caractéristiques du sol (texture, perméabilité, pH, teneurs en matière organique, en eau, en calcaire). Enfin, sous l'action du vent, les particules fines de sol ou celles issues d'émissions (origines agricoles, ou industrielle) peuvent se disperser dans l'environnement. Un transfert des éléments minéraux et composés organiques vers les végétaux est alors également possible via les retombées atmosphériques sur les organes aériens. L'ensemble de ces apports conduit à une contamination des sols par une ou plusieurs substances.
- ❖ Le sol est un milieu de l'environnement en lien étroit avec les autres milieux (eau, air). Les possibilités d'exposition sont multiples, que ce soit par ingestion ou par inhalation et les plus fréquentes sont :
 - ❑ L'ingestion de produits végétaux alimentaires cultivés sur des terres polluées
 - ❑ L'ingestion d'eau, conséquence d'un transfert d'un produit présent dans le sol vers la nappe phréatique
 - ❑ L'inhalation de poussières émises par les sols pollués
 - ❑ L'inhalation, conséquence de la volatilisation éventuelle du polluant à partir du sol.

Voies et vecteurs d'exposition de l'Homme aux contaminants présents dans le sol



IV. Conséquences sur l'environnement et la santé

- ❖ Les impacts de la pollution des sols sont interconnectés et s'étendent bien au-delà du site contaminé.

① Appauvrissement et perte de fertilité des sols

- ▶ **Dégradation de la structure** : La mort des micro-organismes et de la faune du sol (comme les vers de terre) entraîne une perte de la structure grumeleuse du sol, le rendant plus compact, moins aéré et plus sensible à l'érosion.
- ▶ **Déséquilibre nutritif** : L'acidification ou la salinisation liée aux pratiques agricoles ou aux polluants affecte la disponibilité des nutriments pour les plantes.
- ▶ **Baisse des rendements** : À terme, un sol pollué et appauvri ne peut plus assurer une production agricole viable.

② Contamination de la chaîne alimentaire

- ⊙ C'est la conséquence la plus directe pour la santé humaine et animale.
- ▶ **Bioaccumulation** : Les polluants (notamment les métaux lourds et certains pesticides) sont absorbés par les plantes cultivées ou les organismes du sol.
- ▶ **Biomagnification** : En remontant la chaîne alimentaire, la concentration de ces substances toxiques augmente à chaque niveau trophique. L'homme, en tant que super-prédateur, se trouve ainsi exposé à des doses potentiellement dangereuses en consommant des produits animaux ou végétaux issus de sols contaminés. Cela peut entraîner des cancers, des maladies neurologiques, des troubles de la reproduction, etc.

③ Pollution des eaux souterraines

- ⊙ Le sol agit comme un filtre naturel. Lorsque sa capacité de rétention et de dégradation est dépassée, les polluants sont entraînés vers les nappes phréatiques par les eaux de pluie (phénomène de lessivage).
- ▶ Nitrates et pesticides sont les principaux responsables de la dégradation de la qualité des eaux souterraines, sources d'eau potable pour une grande partie de la population.
- ▶ Solvants chlorés et hydrocarbures peuvent former des panaches de pollution souterraine très persistants, rendant l'eau impropre à la consommation.

V. Méthodes de dépollution et de réhabilitation

- ❖ La dépollution des sols est un processus complexe, long et coûteux. Le choix de la technique dépend du type de polluant, de l'usage futur du site et du coût.

① Techniques physico-chimiques (excavation, lavage)

- ⊙ Ces méthodes sont souvent rapides mais invasives et destructrices pour l'écosystème du sol.
- ▶ **Excavation et confinement** : Elle consiste à déplacer la terre contaminée vers un site d'enfouissement technique (décharge de classe 1). C'est une solution radicale qui ne fait que déplacer le problème.
- ▶ **Lavage des sols** : Le sol excavé est traité sur place ou dans une unité mobile. On utilise de l'eau, parfois additionnée de solvants ou de tensioactifs, pour séparer les polluants des particules de sol. Efficace pour les polluants non miscibles à l'eau (hydrocarbures, métaux lourds sur les particules fines).

② Bioremédiation : l'utilisation des plantes et des micro-organismes

- ⊙ La bioremédiation utilise des organismes vivants pour dégrader, immobiliser ou extraire les polluants. C'est une méthode plus respectueuse de l'environnement, souvent moins coûteuse, mais généralement plus lente.
- ▶ **Utilisation des micro-organismes (bioatténuation, biostimulation) :**
 - **Bioatténuation** : On laisse agir les micro-organismes naturellement présents dans le sol.
 - **Biostimulation** : On optimise leurs conditions de vie (ajout de nutriments, oxygène) pour stimuler leur activité dégradatrice. Très efficace pour les hydrocarbures.
- ▶ **Utilisation des plantes (Phytoremédiation) :** Certaines plantes, dites "hyperaccumulatrices", ont la capacité extraordinaire d'absorber et de concentrer des polluants spécifiques dans leurs tissus.
 - **Phytoextraction** : Extraction des métaux lourds (ex : le Tabouret bleu pour le zinc et le cadmium).
 - **Phytodégradation** : Les plantes et leurs associés microbiens dégradent les polluants organiques.
 - **Phytostabilisation** : Les plantes immobilisent les polluants dans le sol, empêchant leur dispersion.
 - **Rhizofiltration** : Filtration des eaux polluées par les racines.

Conclusion :

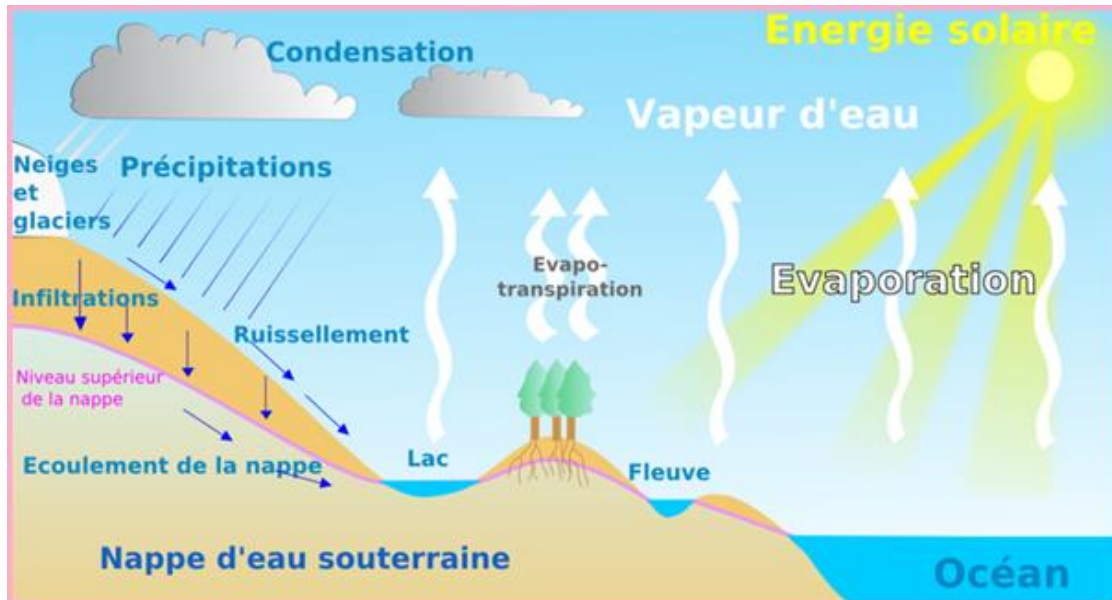
La pollution des sols est un enjeu environnemental majeur, étroitement lié à nos modes de production et de consommation. Ses effets, souvent discrets à court terme, peuvent être dramatiques et irréversibles à long terme. Face à cette menace, la prévention (réduction à la source, agriculture durable) reste la stratégie la plus efficace. Lorsque la pollution est avérée, un panel de techniques, allant des méthodes physiques lourdes aux solutions biologiques plus douces, permet de réhabiliter les sites dégradés, afin de rendre à cette ressource précieuse qu'est le sol ses fonctions écologiques et socio-économiques.

Introduction :

L'eau est une ressource essentielle à la vie, mais elle est vulnérable aux activités humaines. La pollution hydrique désigne la dégradation de la qualité de l'eau (de surface, souterraine ou marine) par l'introduction de substances ou d'énergie néfastes pour les écosystèmes et la santé humaine. Des rejets industriels chargés de produits chimiques toxiques, des eaux usées domestiques non traitées, et le ruissellement des pesticides et des engrais provenant de l'agriculture intensive sont parmi les principaux responsables. La pollution de l'eau, est une crise qui affecte directement notre santé, notre alimentation et l'avenir de notre planète, rendant sa compréhension et sa résolution plus urgentes que jamais. Ce chapitre explore les différentes formes de cette pollution et les méthodes pour y remédier.

I. Définitions/Généralités

- ▶ L'eau est présente sur Terre sous trois formes : liquide, solide et gaz. Elle recouvre 70 % de la surface de la Terre. Sur le volume d'eau présent sur Terre : Eau salée (mers et océans): 97,4% ; eau sous forme de glace (pôles et glaciers) : 2,1% et eau douce "accessible" (cours d'eau, lacs, nappes) : 0,5%.
- ▶ Entre les différentes sources d'eau et l'atmosphère, l'échange d'eau est permanent et forme ce que l'on appelle le cycle externe de l'eau. Le moteur de ce cycle en est le soleil : grâce à l'énergie thermique qu'il rayonne, il active et maintient constamment les masses d'eau en mouvement. Ce cycle se divise en 2 parties intimement liées :
 - Une partie atmosphérique qui concerne la circulation de l'eau dans l'atmosphère, sous forme de vapeur d'eau essentiellement ;
 - Une partie terrestre qui concerne l'écoulement de l'eau sur les continents, qu'il soit superficiel ou souterrain



► On appelle pollution de l'eau toute modification des caractéristiques de l'eau ayant un caractère gênant ou nuisible pour les usages humains, la faune ou la flore.

► On peut distinguer trois grandes familles de pollution :

Familles de polluants

Polluants physiques

Polluants chimiques

Polluants biologiques

► On distingue généralement :

- **La pollution ponctuelle** : Provenant d'une source localisée et identifiable (ex: rejet d'une usine, d'une station d'épuration, fuite d'un réservoir).
- **La pollution diffuse** : Provenant de vastes zones et difficile à localiser précisément (ex: ruissellement des pesticides et engrais agricoles, produits polluants lessivés par les pluies sur les villes).

II. Pollution des eaux de surface (rivières, lacs)

- ❖ Les eaux de surface sont les plus visibles et souvent les premières affectées par les rejets directs de polluants.

① *Eutrophisation : mécanismes et zones mortes*

- ▶ **Définition :** Processus naturel d'enrichissement des eaux en nutriments (azote, phosphore), mais fortement accéléré par les activités humaines (on parle alors d'eutrophisation anthropique).
- ▶ **Mécanisme :**
 - **Apport excessif de nutriments :** Provenant principalement des engrais agricoles, des eaux usées domestiques et des rejets industriels.
 - **Problème de prolifération algale :** Ces nutriments stimulent la croissance excessive d'algues et de phytoplancton à la surface de l'eau, formant parfois des "fleurs d'eau" ou "blooms algaux".
 - **Ombrage et mort de la végétation :** La couche d'algues empêche la lumière d'atteindre les plantes aquatiques profondes, qui meurent.
 - **Décomposition et appauvrissement en oxygène :** La décomposition des algues et des plantes mortes par les bactéries consomme une grande quantité d'oxygène dissous dans l'eau.
 - **Création de zones mortes (ou zones hypoxiques) :** Le manque d'oxygène (hypoxie) entraîne l'asphyxie et la mort de la faune aquatique (poissons, crustacés), créant des zones où la vie aérobie est impossible.

② *Polluants chimiques : pesticides, PCB, résidus médicamenteux*

- ▶ **Pesticides :** Issus de l'agriculture, ces produits phytosanitaires (herbicides, insecticides, fongicides) sont lessivés par les pluies et atteignent les cours d'eau. Ils sont conçus pour être toxiques et peuvent tuer des organismes non-cibles, perturber les chaînes alimentaires et, pour certains, être des perturbateurs endocriniens.
- ▶ **PCB (Polychlorobiphényles) :** Bien qu'interdits depuis les années 80, ces composés industriels, utilisés comme isolants dans les transformateurs électriques, sont persistants. Ils se dégradent très lentement, s'accumulent dans les sédiments et dans les tissus gras des organismes (bioaccumulation), remontant la chaîne alimentaire (biomagnification).
- ▶ **Résidus médicamenteux :** Les médicaments (antibiotiques, hormones, antidépresseurs) sont excrétés par l'organisme et passent partiellement au travers des stations d'épuration. Leurs effets à long terme, même à faible dose, sur les écosystèmes aquatiques (perturbation de la reproduction, antibiorésistance) sont une préoccupation majeure.

③ *Pollutions microbiologiques et matières organiques*

- ▶ **Pollution microbiologique** : Elle est causée par la présence de micro-organismes pathogènes (bactéries comme E. coli, virus, protozoaires) provenant principalement des excréments humains et animaux (eaux usées non traitées, fuites de fosses septiques, élevages). Elle rend l'eau impropre à la consommation et à la baignade (risques de gastro-entérites, hépatite, etc.).
- ▶ **Matières organiques** : Les rejets d'eaux usées domestiques, d'effluents agroalimentaires ou papetiers contiennent de grandes quantités de matières organiques (déchets alimentaires, cellulose). Leur décomposition par les bactéries consomme l'oxygène dissous, un processus similaire à celui de l'eutrophisation, pouvant conduire à l'anoxie (absence totale d'oxygène) du milieu.

III. Pollution des eaux souterraines et des océans

① *Contamination des nappes phréatiques par les nitrates et les solvants*

- ⊙ Les nappes phréatiques, sources d'eau potable cruciales, sont polluées par infiltration lente des polluants à travers le sol.
- ▶ **Nitrates** : Provenant majoritairement des engrais agricoles et des lisiers, les nitrates sont très solubles et s'infiltrant facilement. Une concentration élevée dans l'eau de boisson (>50 mg/L) présente un risque pour la santé (méthémoglobinémie ou "syndrome du bébé bleu").
- ▶ **Solvants chlorés et hydrocarbures** : Utilisés dans l'industrie (dégraissage des métaux, nettoyage à sec) et issus de fuites de réservoirs de stockage, ces produits sont souvent persistants et peu solubles. Ils peuvent former des "nappes de polluants" flottant sur la nappe phréatique et la contaminer pendant des décennies. Leur toxicité est élevée (cancérogène, mutagène).

② *Pollution marine : marées noires, déchets plastiques et microplastiques*

- ▶ **Marées noires** : Ces catastrophes écologiques résultent du naufrage de pétroliers ou de fuites de plateformes offshore. Le pétrole brut, en se répandant, forme une nappe qui étouffe la faune et la flore (oiseaux mazoutés, destruction des nurseries côtières comme les mangroves). Les produits de dispersion utilisés peuvent aussi être toxiques.

► **Déchets plastiques :**

- **Macroplastiques :** Sacs, bouteilles, filets de pêche abandonnés. Ils causent des enchevêtrements, des étouffements et la mort par ingestion pour de nombreux animaux marins (tortues, oiseaux, mammifères).
- **Microplastiques (<5 mm) :** Issus de la dégradation des macroplastiques, des poussières de pneus, des fibres synthétiques de vêtements ou des cosmétiques. Ils sont ingérés par le plancton, les poissons et les coquillages, entrant ainsi dans la chaîne alimentaire jusqu'à l'Homme. Ils peuvent aussi adsorber et transporter des polluants chimiques.

③ **Acidification des océans et son impact sur les écosystèmes marins**

- **Cause :** Ce phénomène est directement lié à l'augmentation du dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique d'origine humaine. Environ 30% du CO_2 émis est absorbé par les océans.
- **Mécanisme chimique :** Le CO_2 se dissout dans l'eau et réagit avec elle pour former de l'acide carbonique (H_2CO_3), qui libère des ions hydrogène (H^+), faisant baisser le pH de l'eau de mer.
- **Impacts :** L'acidification réduit la disponibilité des ions carbonate (CO_3^{2-}), essentiels pour de nombreux organismes marins (coraux, mollusques, plancton calcificateur) pour construire leur squelette ou leur coquille (en carbonate de calcium - CaCO_3). Elle fragilise donc les récifs coralliens, la production de coquillages et menace l'ensemble de la chaîne alimentaire marine qui en dépend.

IV. Traitement des eaux polluées

① **Stations d'épuration des eaux usées**

- ◎ Le traitement des eaux usées (urbaines et industrielles) est une étape cruciale pour limiter la pollution. Il se fait généralement en trois étapes :
- **Traitement primaire (physique) :** Il consiste à éliminer les gros déchets et les matières en suspension par dégrillage (retrait des gros déchets), déshuilage (élimination des graisses) et décantation (les particules lourdes se déposent au fond des bassins pour former des "boues primaires").

- ▶ **Traitement secondaire (biologique) :** L'objectif est d'éliminer la matière organique dissoute et les polluants biodégradables. Dans des bassins d'aération, des bactéries et micro-organismes (les "boues activées") sont mis en contact avec les eaux usées. En respirant, ils dégradent la pollution organique. Une seconde décantation permet de séparer l'eau épurée des boues biologiques.
- ▶ **Traitement tertiaire (ou avancé) :** Cette étape supplémentaire vise à éliminer des polluants spécifiques que les traitements précédents n'ont pas retenus :
 - Désinfection (par UV, ozone ou chlore) pour éliminer les pathogènes.
 - Dénitrification et déphosphatation pour lutter contre l'eutrophisation.
 - Filtration sur charbon actif pour retenir les micropolluants chimiques.

② *Dessalement de l'eau de mer*

- ◎ Face à la pénurie d'eau douce dans certaines régions, le dessalement de l'eau de mer est une solution technique.
- ▶ **Principales techniques :**
 - **Distillation thermique :** L'eau de mer est chauffée pour produire de la vapeur, qui est ensuite condensée pour obtenir de l'eau douce.
 - **L'osmose inverse :** Technique la plus répandue aujourd'hui. Elle consiste à forcer l'eau de mer à traverser une membrane semi-perméable sous haute pression, retenant les sels et les impuretés.
- ▶ **Enjeux et limites :**
 - **Coût énergétique élevé :** L'osmose inverse est moins gourmande que la distillation, mais elle reste très énergivore.
 - **Impact environnemental :** Le rejet de la saumure (concentré salin) dans le milieu marin peut localement augmenter la salinité et tuer la vie marine. Le prélèvement d'eau de mer peut aussi aspirer et tuer du microplancton.
 - **Coût économique :** L'investissement et le fonctionnement des usines de dessalement sont coûteux, ce qui se répercute sur le prix de l'eau produite.

Conclusion :

La pollution de l'eau est un défi multidimensionnel qui affecte tous les compartiments hydriques de la planète. Ses causes sont variées (agriculture, industrie, vie urbaine) et ses impacts sont profonds sur la biodiversité et la santé humaine. Si les solutions de traitement comme l'épuration sont essentielles, la prévention à la source (réduction des intrants agricoles, gestion des déchets, transition énergétique) reste la stratégie la plus durable pour préserver cette ressource vitale.

Introduction :

La pollution nucléaire désigne la contamination de l'environnement par des substances radioactives, issues principalement des activités humaines. Contrairement à la radioactivité naturelle, présente depuis la formation de la Terre, la radioactivité artificielle, apparue au XXe siècle, pose des défis inédits en raison de la puissance des radiations émises et de la très longue durée de vie de certains éléments. Ce chapitre explore les sources de cette pollution, ses impacts dévastateurs sur le vivant et les enjeux sociétaux qu'elle soulève.

I. Définitions/Généralités

► **Définition de la pollution nucléaire :** Contamination de l'environnement (air, eau, sol) par des substances radioactives, émises sous forme de rayonnements ionisants.

► **Fission nucléaire :**

La fission est le processus par lequel un noyau lourd (comme l'uranium-235 ou le plutonium-239) se sépare en deux noyaux plus légers, libérant :

- une grande quantité d'énergie
- des neutrons
- de la chaleur et des rayonnements

Fission = casser un noyau lourd → énergie + déchets radioactifs.

⇒ **Exemple :** Un neutron entre en collision avec un noyau d'uranium-235 → le noyau se casse → deux fragments + 2 ou 3 neutrons + énergie.

⚠ **Propriétés importantes :**

- Réaction utilisée dans :
 - ✓ les centrales nucléaires
 - ✓ les bombes atomiques (A)
- Peut entraîner une réaction en chaîne si les neutrons libérés fissionnent d'autres noyaux.

⚠ **Avantages / Inconvénients :**

- + Beaucoup d'énergie
- Déchets nucléaires radioactifs
- Risques d'accident (Tchernobyl, Fukushima, etc.)

► **Fusion nucléaire :**

La fusion consiste à combiner deux noyaux légers (souvent des isotopes de l'hydrogène : deutérium + tritium) pour former un noyau plus lourd (hélium) + énergie.

C'est le processus qui alimente le Soleil.

Fusion = assembler des noyaux légers → beaucoup d'énergie, très propre, mais difficile à contrôler.

⇒ **Exemple :** Deutérium (^2H) + Tritium (^3H) → Hélium (^4He) + neutron + immense énergie

⚠ **Propriétés importantes :**

- Nécessite des températures énormes (≈ 100 millions $^{\circ}\text{C}$)
- Extrêmement difficile à contrôler sur Terre
- Ne produit pas de déchets radioactifs à longue durée (avantage majeur)

⚠ **Applications :**

- En recherche : réacteurs expérimentaux
- Dans l'armement : bombe H (bombe thermonucléaire), où la fusion est déclenchée par une fission.

Comparaison Fission vs Fusion

Caractéristique	Fission	Fusion
Type de noyaux	Lourds (U-235, Pu-239)	Légers (H, D, T)
Ce qui se passe	Le noyau se casse	Les noyaux se combinent
Énergie libérée	Élevée	Beaucoup plus élevée
Déchets	Radioactifs et durables	Très peu, courte durée
Maîtrise technologique	Très maîtrisée (centrales)	En expérimentation
Exemple naturel	—	Soleil, étoiles

❖ L'énergie nucléaire trouve différentes applications :

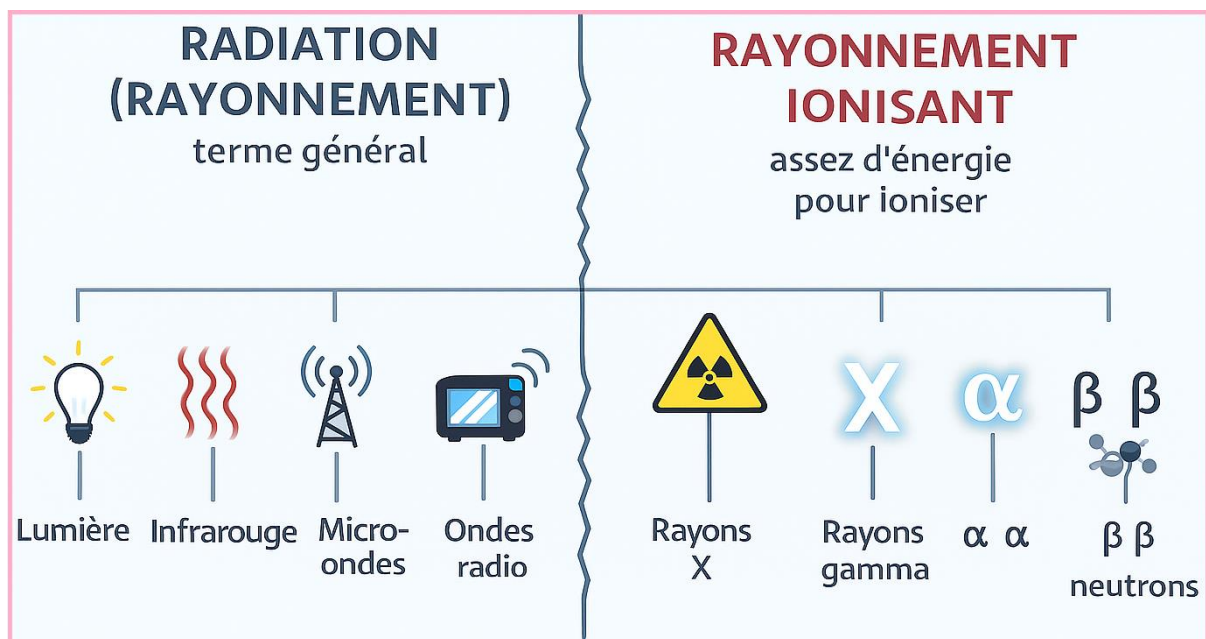
- ⊙ Militaires (bombes atomiques, propulsion de navires de guerre),
- ⊙ Civiles (électricité),
- ⊙ Médicales (imagerie, traitement).



- **Radiation** : Energie émise et propagée sous forme d'ondes à travers un milieu ou dans le vide
- **Ionisation** : Un type particulier de radiation qui possède une énergie suffisante pour arracher un électron à un atome ou une molécule.

Coparaision entre Radiation Vs Rayonnement ionisant

Terme	Signification	Ionisant ou non ?	Exemples
Radiation (rayonnement)	Terme général : toute émission d'énergie sous forme d'ondes ou de particules	Peut être ionisant ou non ionisant	Lumière, IR, micro-ondes, rayons X...
Rayonnement ionisant	Rayonnement avec assez d'énergie pour ioniser les atomes	Toujours ionisant	α , β , γ , X, neutrons



- **Période radioactive** : Temps nécessaire pour que la moitié des atomes se désintègrent.
 - **Exemple** : iode-131 (8 jours) vs plutonium-239 (24 000 ans).

► Le rayonnement résulte de l'émission d'énergie par une source, et il se déplace ensuite à travers un support, comme l'air, jusqu'à ce qu'il soit absorbé par la matière. Il existe deux grands types de rayonnement :

- Rayonnement non ionisant,
- Rayonnement ionisant.

⊗ **Rayonnement non ionisant** : Cette forme de rayonnement ne dégage pas suffisamment d'énergie pour ioniser les atomes ou les molécules. Les fours à micro-ondes, les systèmes de positionnement global (GPS), les téléphones cellulaires, les stations de télédiffusion, les téléphones sans fil, utilisent tous un rayonnement non ionisant. Parmi les autres formes de rayonnement non ionisant figurent le champ magnétique terrestre.

⊗ **Rayonnement ionisant** : Certains types de rayonnement possèdent suffisamment d'énergie pour arracher les électrons de leur orbite autour des atomes et perturber l'équilibre entre électrons et protons, ce qui a pour effet de charger positivement l'atome. Les molécules et les atomes chargés électriquement portent le nom d'ions. Tout rayonnement qui peut produire des ions est un rayonnement ionisant. Il existe plusieurs types de rayonnement ionisant. Les principaux sont les suivants :

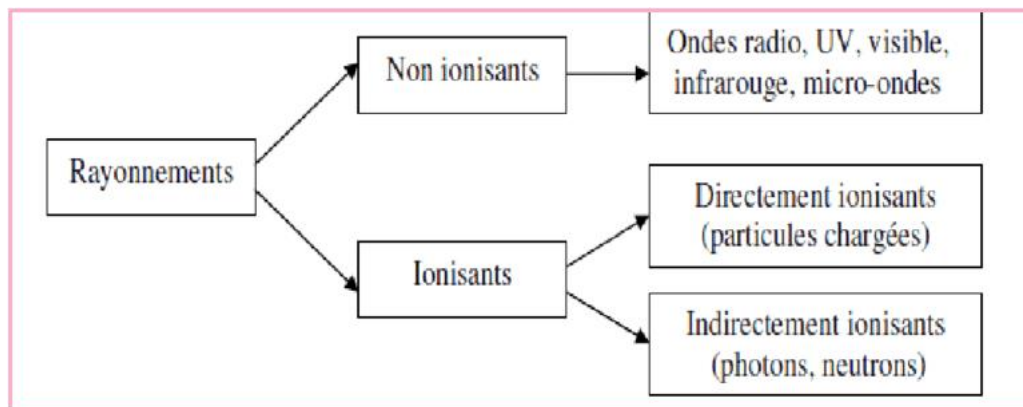
⇒ **Rayonnement alpha** : se compose de deux protons et de deux neutrons; et puisqu'elles n'ont pas d'électrons, elles portent une charge positive. Du fait de leur taille et de leur charge, les particules alpha peuvent à peine pénétrer dans la peau et sont complètement arrêtées par une feuille de papier.

⇒ **Rayonnement bêta** : se compose d'électrons de grande énergie éjectés du noyau d'un atome. Leur charge est négative et leur taille correspond environ à 1/7 000^e de la taille d'une particule alpha, si bien qu'elles sont plus pénétrantes. Il est néanmoins possible de les arrêter avec une protection minimale, comme une feuille de plastique.

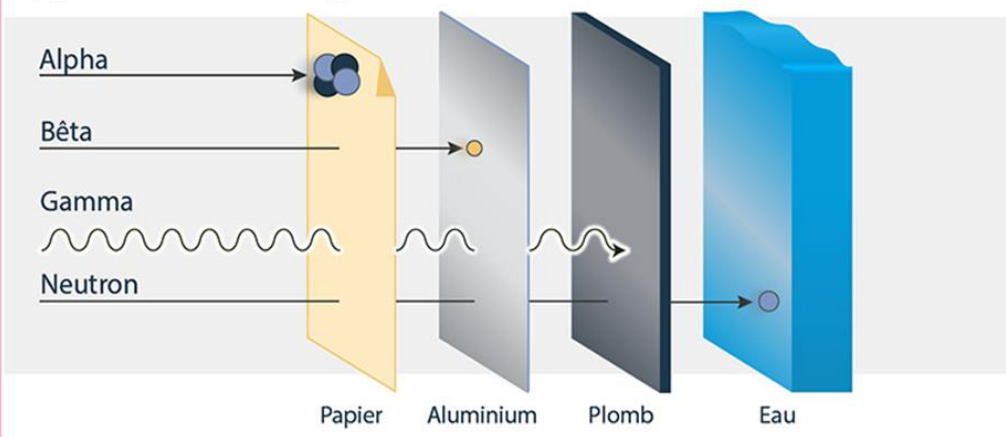
⇒ **Rayonnement gamma** : est un type de rayonnement très pénétrant. Il est généralement émis immédiatement après l'éjection d'une particule alpha ou bêta du noyau d'un atome. Puisqu'il n'a ni masse ni charge, il peut pénétrer dans le corps humain, mais sera absorbé par des matériaux plus denses, comme le béton ou le plomb.

⇒ **Rayons X** : se comparent aux rayons gamma et sont essentiellement produits par des moyens artificiels plutôt que par des substances radioactives.

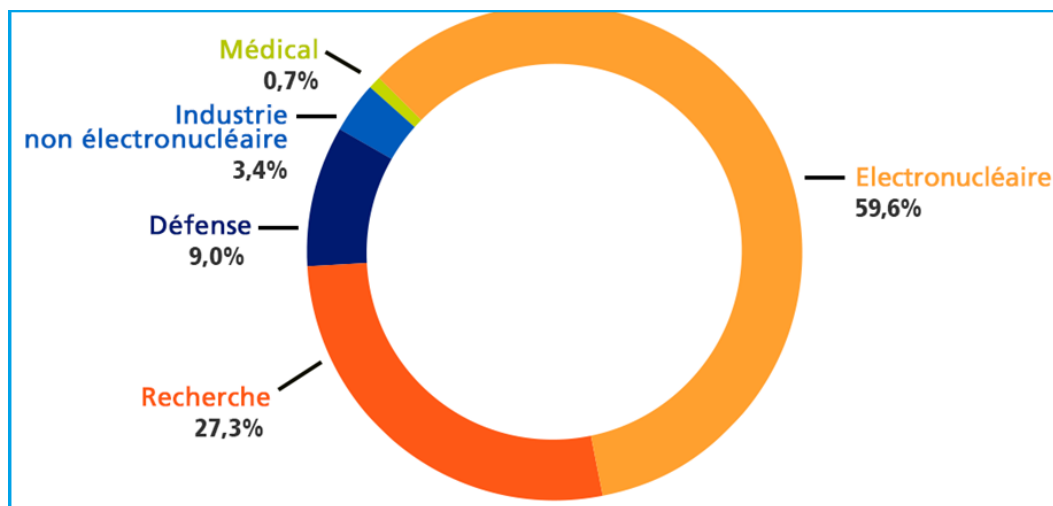
⇒ **Rayonnement neutronique** : se produit lorsque des neutrons sont éjectés du noyau par fission nucléaire et par d'autres processus. La réaction nucléaire en chaîne est un exemple de fission nucléaire, où un neutron éjecté d'un atome en fission provoque la fission d'un autre atome, qui éjecte encore plus de neutrons. Contrairement aux autres rayonnements, le rayonnement neutronique est absorbé par des matériaux qui comportent beaucoup d'atomes d'hydrogène, comme la paraffine et les plastiques.



Types de désintégration radioactive



- ▶ 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.
- ▶ La grande majorité des rayonnements ionisants proviennent résultante :
 - ⊙ - Essais d'engins nucléaires (bombes A et H), actuellement interdits
 - ⊙ - Accidents survenus à des installations nucléaires (ex. Tchernobyl)
 - ⊙ - Activité nucléaire civile en fonctionnement normal (électronucléaire, applications industrielles, scientifiques ou médicales) pollution atmosphérique par le radon (mines d'uranium) rejet de gaz radioactifs au niveau des centrales nucléaires.



► **Réaction nucléaire :**

C'est un processus physique qui modifie le noyau d'un atome, provoqué par l'action de particules (neutrons, protons, deutérons, etc.) ou de radiations (alpha, bêta et gamma). Ces phénomènes interviennent naturellement dans des noyaux de matière radioactive ou artificiellement lorsque les noyaux atomiques sont bombardés de particules ou de radiations. On distingue deux types de réaction nucléaire, la fission et la fusion.

Réaction nucléaire. Une réaction nucléaire peut libérer ou absorber de l'énergie.

► **Energie nucléaire :** C'est l'énergie libérée lors d'une réaction nucléaire. Elle provient de la conversion de masse en énergie selon la relation $E = mc^2$. Elle peut être produite de deux manières, par la fission, division du noyau de l'atome en plusieurs parties ou par la fusion de plusieurs noyaux. Elle est utilisée pour produire électricité, chaleur, propulsion de sous-marins, etc.

⊙ L'énergie nucléaire provient de deux processus physiques différents :

- Energie de fission (obtenue par la désintégration d'isotopes d'uranium ou du plutonium)
- Energie de fusion (obtenue par réaction de fusion d'atomes d'hydrogène)

❖ **Exemple de L'énergie nucléaire obtenue par fission de l'Uranium**

- ❑ L'énergie nucléaire est produite par la fission d'éléments radioactifs naturels comme l'uranium et le thorium. L'uranium peut être soumis à la fission dès son extraction à l'état naturel, tandis que le thorium doit d'abord être converti dans un réacteur nucléaire. Tous les isotopes de ces éléments sont radioactifs.
- ❑ L'uranium contient 99,2175% de ^{238}U , 0,72% de ^{235}U et 0,0055% de ^{234}U . L'uranium brut qui existe sous forme d'oxyde d'uranium U_3O_8 de couleur jaune est traité pour récupérer l'uranium pur. 1 tonne d'uranium brut donne 1 à 2kg d'uranium pur. Le reste est constitué de radon et d'autres produits qui doivent être traités en tant que déchets nucléaires.
- ❑ L'uranium extrait est converti en UF_6 puis enrichi avec de l'uranium 235 pour être transformé en combustible. Ce combustible est ensuite placé dans un réacteur, il subit une fission et est transformé en plutonium. Ce dernier est redirigé vers le réacteur après conversion. A la fin du cycle de vie de l'uranium, il devient sous forme de déchets. Les déchets nucléaires sont stockés de manière permanente

- ❖ Dans l'énergie nucléaire civile, le dégagement d'énergie, sous forme de chaleur, provoqué par la réaction de fusion transforme de l'eau en vapeur qui sert à faire tourner les turbines d'un générateur produisant un courant électrique. La production d'énergie nucléaire civile a lieu dans les réacteurs de centrales nucléaires.



II. Différentes sources de pollutions nucléaires

❖ La contamination radioactive est la contamination générée par la radioactivité. Elle peut avoir plusieurs origines :

• Naturelle • Industrielle • Militaire • Médicale • Accidentelle

① Origine 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. Il y a aussi les rayonnements cosmiques.

② Origine 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 des industries notamment alimentaires pour la stérilisation et la conservation des produits alimentaires.

② Origine 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 des industries notamment alimentaires pour la stérilisation et la conservation des produits alimentaires.

③ Origine Militaire :

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

④ Origine Médicale :

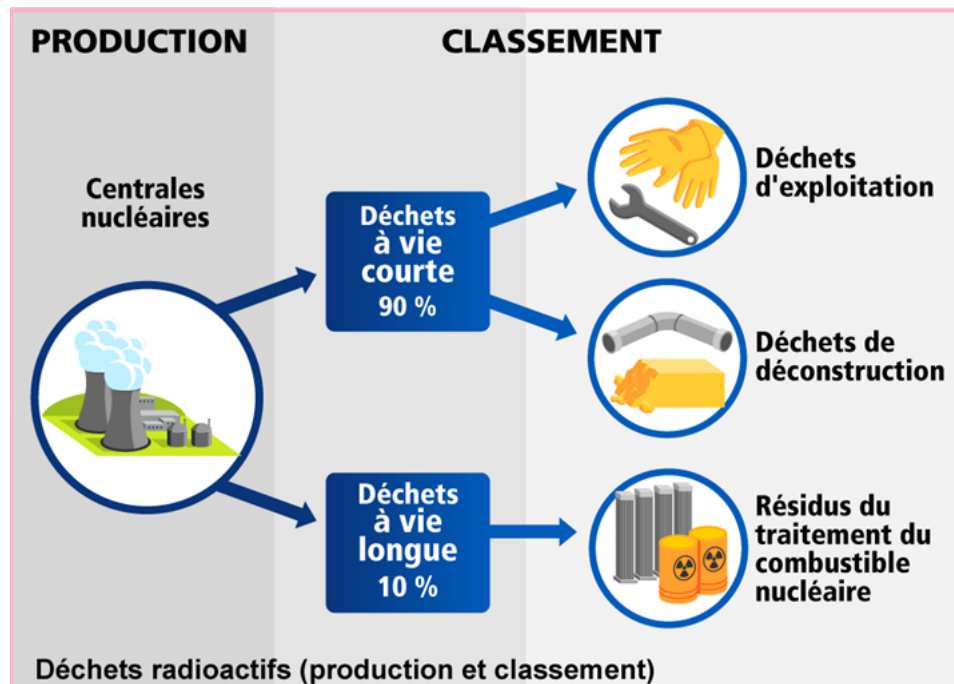
Cette pollution se déroule par l'utilisation de substances radioactives aux divers examens de radiographies et scintigraphie médicales ou dentaires et anticancéreuse. Elles pourraient contaminer les eaux via les urines des patients.

⑤ Origine Accidentelle :

Comme le Tchernobyl, 1986 et Fukushima 2011. Des éléments radioactifs peuvent se disperser parfois très loin de la zone d'accident dont les rayonnements atteignent l'organisme.

III. Différents types de déchets nucléaires

- ❖ Il faut savoir qu'il existe plusieurs types de déchets nucléaires. En effet les déchets nucléaires sont classés selon deux grands critères déterminants :
 - ⊗ Leur niveau de radioactivité
 - ⊗ Leur durée de vie (la radioactivité diminue avec le temps)
- ❖ En fonction de leur niveau de radioactivité et de leur durée de vie, on distingue deux familles de déchets nucléaires : les déchets « *à vie courte* » et les déchets « *à vie longue* ».



- ❖ On peut ainsi aboutir à un classement des déchets en trois catégories (A, B, C) qui font chacune l'objet d'une politique de gestion particulière

► **Les déchets de faible radioactivité, à vie courte : Type A**

Ces déchets représentent 90% de la totalité des déchets radioactifs. Ils sont à vie courte et d'activité faible ou moyenne. Ils contiennent essentiellement des radioéléments émetteurs de rayon bêta et gamma (Filtres, Gants et petit matériel venant de l'exploitation de centrales, de laboratoire de recherche ou des hôpitaux). Ils sont compactés et conditionnés dans des fûts de métal ou de béton. La période de leur radioactivité est inférieure à 300 ans et dont la radioactivité devient négligeable au bout de 300 ans.

► ***Les déchets de moyenne radioactivité, à vie longue : Type B***

Ils sont aussi appelés « déchets alpha » en raison du rayonnement qu'ils émettent, présentent une activité moyenne, mais qui peut durer des dizaines de milliers d'années. Ces déchets représentent un peu plus de 9% de la totalité des déchets radioactifs. Il s'agit des résines d'épuration, concentras, filtres, coques métalliques ayant contenu l'uranium. Ils proviennent principalement des usines de retraitement (boues, gaines de combustibles). Ces déchets sont traités en vue d'une réduction de leur volume, conditionnés dans des fûts de métal ou de béton. Une des options envisagées pour leur stockage final est de les enterrer en profondeur.

► ***Les déchets de forte radioactivité, à vie longue : type C***

Ces déchets sont aussi appelés « déchets vitrifiés » parce qu'on les coule dans du verre. Ce sont des déchets à très haute activité. Pendant quelques centaines d'années, ils émettent surtout des rayonnements bêta et gamma ; Ils émettent ensuite des rayonnements alpha.

Ils représentent environ 0.5% de la totalité des déchets radioactifs. Il s'agit principalement des cendres de la combustion de l'uranium- ou produits de fission- engendrés par les réactions nucléaires dans le cœur des réacteurs et récupérés dans les combustibles usés grâce aux opérations de retraitement. La radioactivité de ces déchets reste élevée pendant une longue période. Plusieurs étapes sont prévues : actuellement, les produits de fission sont stockés sous forme de liquide pendant environ cinq ans dans des cuves en acier inoxydables où ils perdent une partie de leur chaleur et de leur radioactivité.

IV. Impacts de la pollution nucléaire

① Impacts sur l'Environnement

❑ a. Contamination :

La pollution radioactive peut se disperser dans les trois grands compartiments environnementaux : l'air, le sol et l'eau. Selon la nature de l'accident et la quantité de radioéléments libérés, cette contamination peut persister pendant des décennies voire des siècles.

► ***Air :*** Lors d'un accident nucléaire ou d'une explosion, les radionucléides sont projetés dans l'atmosphère sous forme de poussières, d'aérosols ou de gaz. Les courants atmosphériques peuvent transporter ces particules sur de très longues distances, parfois plusieurs milliers de kilomètres. C'est ce qui explique que le nuage radioactif de Tchernobyl ait atteint toute l'Europe. Cette contamination atmosphérique constitue la première source d'exposition humaine et écologique dans les heures et les jours suivant l'événement.

- **Sol :** Le sol joue un rôle de réservoir pour les radionucléides comme le césium-137, le strontium-90, ou le plutonium. Ces éléments se fixent fortement sur les particules du sol, ce qui explique leur persistance à long terme.

La contamination du sol entraîne une :

- Baisse de la fertilité,
 - Inhibition de la croissance végétale,
 - Dangersité accrue pour l'agriculture et l'élevage.
- ⊗ Certaines zones contaminées après Tchernobyl ou Fukushima sont encore interdites d'accès, preuve de la longévité des isotopes impliqués.

- **Eau :** La contamination peut devenir particulièrement préoccupante lorsqu'elle atteint les nappes phréatiques, les rivières, les lacs, ou les océans. Les voies de transfert sont multiples :

- Infiltration depuis les sols,
 - Ruissellement après les pluies,
 - Déversement volontaire ou accidentel d'effluents radioactifs.
- ⊗ Les milieux aquatiques peuvent ensuite transporter ces radionucléides sur de grandes distances, affectant les écosystèmes marins et les ressources halieutiques.

☐ **b. Effets sur les Écosystèmes :**

► **Mort cellulaire et mortalité biologique :**

Dans les zones fortement irradiées, les doses reçues peuvent provoquer une destruction directe des cellules, entraînant la mort rapide d'organismes vivants.

Les plantes, les insectes, les microorganismes du sol et la microfaune sont souvent les premières victimes, ce qui perturbe profondément l'équilibre biologique.

► **Mutations génétiques :**

Les rayonnements ionisants peuvent altérer l'ADN des organismes, entraînant des :

- Anomalies morphologiques,
 - Réductions de fertilité,
 - Malformations,
 - Cancers.
- ⊗ La forêt rouge autour de Tchernobyl est un exemple emblématique : les arbres ont présenté des déformations, des modifications de croissance et une mortalité élevée pendant des années.

► **Bioaccumulation et biomagnification :**

Les radionucléides peuvent s'accumuler dans les organismes vivants, en particulier dans les :

- Plantes,
- Poissons,
- Champignons,
- Herbivores,
- Puis les prédateurs.

⊗ La concentration augmente à chaque niveau trophique, un phénomène appelé biomagnification. Les apex predators (loups, ours, rapaces, grands poissons) sont donc les plus exposés, ce qui perturbe durablement la chaîne alimentaire.

② **Impacts sur la Santé Humaine**

□ **a. Voies d'Exposition :**

► **Exposition externe :**

Elle se produit lorsqu'une personne se situe à proximité d'une source radioactive.

Elle concerne principalement :

- La peau,
- Les tissus superficiels,
- Les effets thermiques ou brûlures en cas d'exposition intense.

⊗ C'est une exposition généralement plus "facile" à gérer, car elle cesse lorsque l'individu s'éloigne de la source.

► **Exposition interne :**

C'est la forme la plus dangereuse, car elle implique l'entrée d'éléments radioactifs à l'intérieur du corps :

- Inhalation de particules (iode-131, césium-137),
- Ingestion d'aliments contaminés (lait, légumes, poissons),
- Absorption par les plaies ou la peau.

⊗ Une fois dans l'organisme, ces radionucléides irradient directement les tissus et peuvent y rester longtemps (ex. fixation de l'iode dans la thyroïde).

❑ **b. Effets à Court Terme (Doses Élevées) :**

Les expositions massives en un temps très court peuvent provoquer un syndrome d'irradiation aiguë (SIA). Le SIA se caractérise par :

- Des nausées et vomissements dans les minutes ou heures suivant l'exposition,
- Des brûlures cutanées,
- Une chute massive des globules blancs,
- Une destruction de la moelle osseuse,
- Des lésions gastro-intestinales sévères,
- Des troubles neurologiques en cas de dose extrême.

⊗ Sans traitement intensif (transplantation de moelle, transfusions, antibiothérapie), la mortalité peut survenir en quelques jours à quelques semaines.

❑ **c. Effets à Long Terme (Doses Faibles ou Chroniques) :**

Les effets retardés de l'exposition chronique, même à faibles doses, sont préoccupants car ils apparaissent souvent des années après l'exposition initiale.

▶ **Cancers radio-induits :**

Les tissus les plus sensibles sont :

- La moelle osseuse → leucémies,
- La thyroïde → cancers thyroïdiens (iode-131),
- Les poumons → cancers pulmonaires,
- Les seins et autres organes selon les doses accumulées.

⊗ Les populations exposées à Tchernobyl ont montré une augmentation nette des cancers de la thyroïde chez les enfants, liée à la consommation de lait contaminé.

▶ **Effets génétiques :**

Les radiations peuvent provoquer :

- Des mutations héréditaires,
- Des anomalies chromosomiques,
- Des risques accrus de malformations congénitales chez les descendants.

⊗ Bien que difficiles à quantifier, ces effets constituent une préoccupation majeure dans les zones contaminées à long terme.

V. Études de Cas sur la Pollution Nucléaire

❑ *Tchernobyl (Ukraine, 1986) :*

▶ **Contexte :**

Explosion du réacteur n°4 de la centrale de Tchernobyl, due à une erreur de manipulation et à une conception défaillante.

▶ **Impacts environnementaux :**

- Dépôt massif de césium-137, strontium-90 et iode-131.
- Création de la *forêt rouge*, zone où les pins ont rougi puis sont morts après l'irradiation.
- Contamination durable de plus de 150 000 km² en Europe.
- Perturbations génétiques chez les insectes, oiseaux, mammifères.

▶ **Impacts sur la santé humaine :**

- Augmentation des cancers de la thyroïde chez les enfants (iode-131 absorbé via le lait).
- Syndrome d'irradiation aiguë chez les premiers intervenants.
- Déplacements forcés de plus de 300 000 personnes.

❑ *Fukushima Daiichi (Japon, 2011) :*

▶ **Contexte :**

Un séisme de magnitude 9, suivi d'un tsunami, entraîne la perte de refroidissement de trois réacteurs et des fusions partielles du cœur.

▶ **Impacts environnementaux :**

- Rejets dans l'océan Pacifique de grandes quantités d'eau contaminée.
- Forte contamination du sol par le césium-137 dans un rayon de 20 à 30 km.
- Perturbations des écosystèmes marins (poissons, algues, mollusques).

▶ **Impacts sur la santé humaine :**

- Peu de cas d'irradiation aiguë, mais exposition chronique inquiétante.
- Stress psychologique majeur, suicides liés à l'évacuation forcée.
- Surveillance à long terme des enfants pour le cancer de la thyroïde.

Conclusion :

La pollution nucléaire représente l'une des formes de contamination environnementale les plus dangereuses et les plus persistantes. Contrairement aux polluants classiques, les radionucléides peuvent rester actifs pendant des décennies, voire des siècles, rendant les milieux contaminés pratiquement inhabitables. Les accidents majeurs comme Tchernobyl ou Fukushima ont montré que les retombées radioactives peuvent s'étendre à l'échelle planétaire, affectant durablement les sols, l'air, les ressources en eau et l'ensemble des écosystèmes.

Les impacts sur la biodiversité sont multiples : mortalité massive dans les zones à forte irradiation, perturbations génétiques, altérations physiologiques et bioaccumulation le long des chaînes alimentaires. Ces effets compromettent les équilibres écologiques et peuvent entraîner la disparition ou la modification profonde de certaines populations animales et végétales.

Ainsi, la pollution nucléaire, par sa dangerosité et sa persistance, constitue un défi majeur pour les générations présentes et futures, rappelant la nécessité d'un rapport responsable et maîtrisé entre l'humanité et le nucléaire.

CONCLUSION GENERALE

La pollution de l'environnement est un phénomène complexe qui résulte de l'interaction de nombreux facteurs naturels et anthropiques. Ses conséquences touchent directement les écosystèmes, les ressources naturelles et la santé humaine, mettant en danger l'équilibre écologique indispensable à la vie sur Terre. L'analyse détaillée des différents types de pollutions présentée dans ce cours que ce soit atmosphérique, des sols, des eaux, mais aussi nucléaire montre à quel point leurs sources, leurs mécanismes de dispersion et leurs effets sont variés, souvent interconnectés et parfois irréversibles.

Face à ces problèmes, les sociétés modernes sont appelées à développer des politiques de gestion environnementale fondées sur la prévention, la réduction à la source, le traitement des contaminants et la restauration des milieux dégradés. Les avancées technologiques, notamment dans le domaine de la bioremédiation, de l'épuration des eaux ou du suivi de la qualité de l'air, offrent des outils précieux, mais elles ne suffisent pas sans une réelle prise de conscience collective.

La lutte contre la pollution nécessite une approche intégrée, pluridisciplinaire et participative. Elle implique les gouvernements, les scientifiques, les industriels, les agriculteurs, mais également chaque citoyen à travers des comportements responsables et durables. Ce cours vise ainsi à fournir les connaissances nécessaires pour comprendre les enjeux environnementaux actuels et contribuer, à l'échelle individuelle ou professionnelle, à la protection et à la préservation de notre planète.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Alharbi, T., Alzahrani, A., & Ahmed, M. (2024). Pollution and health risk assessment of co-existing microplastics and heavy metals in urban dust of Riyadh city, Saudi Arabia. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1377811. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1377811>
2. Allag, F. (2016). Contribution à l'étude de la dispersion des polluants. Thèse de Doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas Sétif-1. 100 p.
3. Brunekreef, B., & Holgate, S. T. (2002). Air pollution and health. *The Lancet*, 360(9341), 1233-1242. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(02\)11274-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(02)11274-8)
4. Cardis, E., Hatch, M., & group, T. C. C. W. (2011). The Chernobyl accident – an epidemiological perspective. *Clinical Oncology*, 23(4), 251-260. <https://doi.org/10.1016/j.clon.2011.01.510>
5. Charpin D. et al. (2016). Pollution atmosphérique et santé respiratoire en France. *Revue des Maladies Respiratoires*, 33 (6) : 484-508.
6. Chevreuil, M. (2004). L'atmosphère, vecteur de micropolluants organiques aux écosystèmes. *L'actualité chimique*, n° 277-278. 40- 48.
7. Caillaud, D., Annesi-Maesano, I, Bourin,A., et al. (2019). La pollution atmosphérique et ses effets sur la santé respiratoire en France. *Revue des Maladies Respiratoires*, 36(10) :1150-1183.
8. Derraik, J. G. (2002). The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 44(9), 842-852. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)
9. Faburé J. Mouglin C. Rivet D & Siaussat D. (2022). *Ecotoxicologie : cours applications Sciences Sup.* Ed. Dunod, 192 p.
10. Forbes V.E. & Forbes T.L., 1997 -*Ecotoxicologie Théorie et applications*. INRA Editions, Paris, 256p.
11. Hinrichs R.A. & Kleinbach M. (2013). "Nitrogen oxides, photochemical smog and ozone," in *Energy : Its Use and the Environment*, 5th ed. Toronto, Ont. Canada : Brooks/Cole, 2013, ch.8, sec.C, 250-252.

12. Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A. (2020). The environmental impacts of fast fashion. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 189-200. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9>
13. Petrie, B., Barden, R., & Kasprzyk-Hordern, B. (2015). A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring. *Water Research*, 72, 3-27. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.053>
14. Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
15. Ramade, F. (1992). *Précis d'écotoxicologie*. Collection d'écologie 22, Masson, Paris, 300p.
16. Sarmah, A. K., Meyer, M. T., & Boxall, A. B. (2006). A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment. *Chemosphere*, 65(5), 725-759. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.03.026>
17. Tóth, G., Hermann, T., Da Silva, M. R., & Montanarella, L. (2016). Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment International*, 88, 299-309. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017>
18. Truhaut, R. (1977). *Ecotoxicology : Objectives, principles and perspectives*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 1(2), 151-173.
19. Tyler Miller G. & Hackett D. 2011. "Photochemical and Industrial Smog," in *Living in the Environment*, 2nd ed. USA : Nelson, 2011, ch.20, sec.3, 465-471.
20. Van der Werf H. (1997). Évaluer l'impact des pesticides sur l'environnement, *Courrier de l'Environnement de l'INRA*, n°3, 5-22.
21. Zhang, Y., Li, H., Chen, M., et al. (2023). Microplastic sources, formation, toxicity and remediation: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(4), 2159-2181. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01593-3>

SITOGRAPHIE :

- <https://ecotoxicologie.fr>
- <https://youmatter.world/fr/definition/pollution-definition-sources-consequences-sante-environnement-mesures/>
- <https://www.atmo-hdf.fr/article/effets-de-la-pollution-sur-lenvironnement-et-le-climat>
- <https://www.fondationbiodiversite.fr/wp-content/uploads/2022/02/FRB-fiche-pollution.pdf>
- <https://www.ilocis.org/fr/documents/ilo055.htm>
- https://sfrp.asso.fr/wp-content/uploads/2021/11/PERRONNET_K.pdf
- https://www.oag-bvg.gc.ca/internet/Francais/meth_gde_f_19283.html



Glossaire des abréviations et des termes techniques en pollution environnementale

Cd : Cadmium (métal lourd)

CO : Monoxyde de carbone

CO₂ : Dioxyde de carbone

COV : Composés Organiques Volatils

Cr : Chrome

DDT : Dichlorodiphényltrichloroéthane

GES : Gaz à Effet de Serre

H₂S : Sulfure d'hydrogène

HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques

Hg : Mercure (métal lourd)

NH₃ : Ammoniac

NH₄⁺ : Ammonium

NO₂ : Nitrites

NO₃ : Nitrates

Nox : Oxydes d'azote

O₃ : Ozone troposphérique

PCB : Polychlorobiphényles

Pb : Plomb (métal lourd)

PM₁₀ / PM_{2.5} : Particules fines $\leq 10 \mu\text{m}$ / $2.5 \mu\text{m}$

POPs : Polluants Organiques Persistants (Persistent Organic Pollutants)

SO₂ : Dioxyde de soufre

A

Acidification des océans : Diminution du pH des océans due à l'absorption de CO₂ atmosphérique.

Aérosols : Particules solides ou liquides en suspension dans l'air, naturelles (poussières, spores...) ou anthropiques (fumées industrielles, gaz d'échappement).

Affluents : Cours d'eau se jetant dans un autre cours d'eau plus important.

Adsorption : Fixation de substances à la surface d'un matériau.

Anthropique : Relatif aux activités humaines.

Aquifère : Couche de sol ou de roche contenant de l'eau.

Atomisation : Processus de dispersion de particules ou gouttelettes dans l'atmosphère lors d'activités industrielles ou agricoles.

B

Biodégradabilité : Capacité d'une substance à être décomposée par des microorganismes.

Bioaccumulation : Accumulation d'un polluant dans un organisme.

Biomagnification : Augmentation de la concentration d'un polluant le long de la chaîne alimentaire.

Bioremediation : Dépollution utilisant des micro-organismes ou des plantes.

C

Capacité d'autoépuration : Aptitude naturelle d'un écosystème à éliminer les polluants.

Capacité de charge environnementale : Quantité maximale de pollution qu'un écosystème peut absorber sans se dégrader.

Centrale nucléaire : Installation utilisant la fission de l'uranium pour produire de l'électricité.

Chaîne trophique : Ensemble des relations alimentaires entre espèces.

Compostage : Dégradation biologique des matières organiques.

Contaminant : Substance étrangère au milieu naturel.

Contamination radioactive : Présence de substances radioactives dans un environnement.

Courants océaniques : Mouvements d'eau contribuant à la dispersion des polluants en mer.

D

Décharge sauvage : Dépôt illégal de déchets.

Dégradation abiotique : Décomposition par des facteurs non vivants (UV, chaleur...).

Dégradation biotique : Décomposition par des organismes vivants.

Dégradation d'habitats : Perte de qualité d'un habitat liée aux activités humaines ou aux pollutions.

Dépôt atmosphérique : Transfert de polluants de l'air vers le sol ou l'eau.

Dessalement : Procédé d'élimination du sel contenu dans l'eau de mer.

Dose-réponse : Relation entre la quantité de toxique et l'effet observé.

E

Écotoxicologie : Étude des effets des substances toxiques sur les organismes et les écosystèmes.

Effet de serre : Réchauffement dû aux gaz à effet de serre.

Effluent : Eaux usées rejetées dans le milieu.

Endocriniens (perturbateurs) : Substances altérant le système hormonal.

Eutrophisation : Enrichissement des milieux aquatiques en nutriments provoquant une prolifération d'algues.

Excavation : Retrait mécanique de sols contaminés.

F

Fission nucléaire : Scission d'un noyau lourd en noyaux plus légers, libérant énergie et neutrons.

Flux polluant : Quantité de polluant transportée dans un milieu par unité de temps.

Fosses septiques : Systèmes d'épuration domestique des eaux usées.

Fragmentation des habitats : Division d'un habitat en zones isolées.

Fumées industrielles : Produits de combustion constituant des sources de pollution atmosphérique.

G

Granulométrie : Distribution de la taille des particules constituant un sol.

H

Hydrocarbures : Composés formés de carbone et d'hydrogène (ex. : pétrole).

Hypoxie : Faible concentration en oxygène dans un milieu aquatique.

I

Immission : Pollution reçue par un milieu (air, eau, sol).

Incidence sanitaire : Impact d'un polluant sur la santé humaine.

Infiltration : Passage de l'eau dans les sols.

Ionisation : Processus par lequel un atome ou une molécule acquiert une charge électrique.

Ionisants (Rayonnement) : Rayonnements capables d'arracher des électrons aux atomes.

L

Lessivage : Transport des polluants du sol vers les eaux souterraines par infiltration.

Lixiviation : Migration de polluants du sol vers les nappes phréatiques.

M

Métaux lourds : Éléments métalliques toxiques (Pb, Hg, Cd, As...).

Micropolluants : Polluants présents en très faible quantité mais très nocifs.

N

Nappe phréatique : Réservoir souterrain d'eau douce.

NOx (oxydes d'azote) : Polluants atmosphériques issus de la combustion.

Nuage radioactif : Masse d'air contenant des particules radioactives.

Nutriments : Éléments nécessaires à la croissance des organismes (N, P, K).

O

Oxydation : Réaction chimique avec l'oxygène.

Ozone troposphérique : Polluant secondaire formé sous l'effet du soleil.

P

PCB (Polychlorobiphényles) : Polluants organiques persistants très toxiques.

Persistance : Durée durant laquelle un polluant reste actif sans se dégrader.

Perturbateurs endocriniens : Substances altérant le système hormonal.

Pesticides : Substances destinées à éliminer les organismes nuisibles.

Phytoremédiation : Utilisation de plantes pour dépolluer les sols.

Pluies acides : Précipitations acides dues aux émissions de SO₂ et NO_x.

Polluant : Substance entraînant une altération du milieu.

Pollution diffuse : Pollution provenant de sources multiples non identifiables.

Pollution ponctuelle : Pollution provenant d'une source unique et identifiée.

POP (Polluants Organiques Persistants) : Polluants très stables et toxiques.

R

Radioactivité : Émission de particules ou ondes par des atomes instables.

Remédiation : Processus de dépollution d'un site contaminé.

S

Smog photochimique : Brouillard toxique formé par la lumière solaire et les polluants.

SO₂ (dioxyde de soufre) : Gaz irritant issu de la combustion.

Soluté / Solvant : Substance dissoute / liquide qui dissout.

Sorption : Processus d'absorption ou d'adsorption d'un polluant sur un support solide.

Station d'épuration : Installation de traitement des eaux usées.

T

Toxicité aiguë : Effet toxique rapide après une exposition courte.

Toxicité chronique : Effets toxiques provoqués par une exposition prolongée.

Trophique (chaîne) : Niveaux alimentaires d'un écosystème.

U

Ultraviolet (UV) : Rayonnement solaire pouvant déclencher des effets biologiques et réactions atmosphériques.

V

Valorisation : Transformation des déchets en ressources utiles.

Volatilisation : Passage d'une substance à l'état gazeux.

Z

Zones mortes (dead zones) : Zones océaniques appauvries en oxygène rendant la vie aquatique impossible.