

Chapitre 2 : Introduction à la pollution de l'environnement

1. Pollution de l'Environnement

La pollution de l'environnement et l'écotoxicologie sont des domaines interconnectés qui examinent l'impact des contaminants sur les écosystèmes et la santé des organismes vivants, y compris l'Homme. Alors que la pollution englobe une large gamme de substances nuisibles à l'environnement (comme les produits chimiques industriels, les déchets, les gaz à effet de serre et les métaux lourds). La pollution de l'environnement se définit comme l'introduction de substances ou de contaminants dans l'environnement qui modifient la composition, la structure ou les fonctions des écosystèmes. L'écotoxicologie se concentre spécifiquement sur les effets de ces polluants sur les organismes et leurs interactions dans les écosystèmes. Cette pollution peut avoir des origines anthropiques (liées aux activités humaines) ou naturelles. La pollution de l'environnement peut être divisée en plusieurs types en fonction du milieu affecté (air, eau, sol, etc.) et des polluants impliqués. Chaque type de pollution a des impacts spécifiques sur la santé humaine, la biodiversité, et l'équilibre écologique des écosystèmes.

2. Types et sources de pollution de l'environnement

2.1. Les Activités Humaines sont les principales Sources de Pollution de la Biosphère et Les Micropolluants :

Les activités humaines ont une influence considérable sur l'environnement et contribuent de manière significative à la pollution de la biosphère. De nombreuses activités génèrent des polluants qui affectent directement la faune, la flore, et les écosystèmes en général. Parmi ces polluants, les micropolluants sont une catégorie particulière, souvent invisibles et difficiles à éliminer, mais ayant des impacts environnementaux considérables. Voici les principaux types de pollutions et leurs sources :

2.1.1. Pollution de l'air : Émissions de gaz (CO₂, SO₂, NO_x), de particules fines (PM₁₀, PM_{2.5}) et de composés organiques volatils (COV).

Sources de la pollution de l'air :

- **Transports** : Les véhicules à moteur (automobiles, camions, avions) émettent des gaz d'échappement, tels que le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde d'azote (NO_x), et des particules fines (PM_{2.5}, PM₁₀).
- **Industries** : Les usines et centrales électriques libèrent des gaz toxiques, des produits chimiques et des métaux lourds dans l'atmosphère.
- **Agriculture** : L'utilisation excessive de pesticides et d'engrais entraîne des émissions de métaux lourds, d'ammoniac et d'azote dans l'air.
- **Déforestation et Feux de Forêt** : La déforestation et les incendies dégagent des particules fines et du CO₂, contribuant à l'effet de serre et à la pollution de l'air.

b. Conséquences de la Pollution de l'Air :

- **Santé Humaine** : Respirer de l'air pollué peut causer des problèmes respiratoires (asthme, bronchites, etc.), des maladies cardiovasculaires, et des cancers.

- **Changements Climatiques** : Les gaz à effet de serre (CO₂, méthane) contribuent au réchauffement climatique.

- **Effets sur les Écosystèmes** : La pollution de l'air peut causer des pluies acides, affectant les forêts et les écosystèmes aquatiques.

2.1.2. Pollution de l'Eau

- **Pollution de l'eau** : Contamination des ressources en eau par des substances chimiques (métaux lourds, pesticides, produits pharmaceutiques), des matières organiques, des nutriments (azote et phosphore) et des déchets. les Microplastiques : Des particules de plastique qui polluent les océans et affectent la faune marine.

a. Sources de Pollution de l'Eau

- **Industries** : Les usines produisent des déchets chimiques, des métaux lourds (Plomb, mercure, cadmium), des déchets et des déversements, utilisés en agriculture, et des solvants qui sont souvent rejetés dans les cours d'eau.

- **Agriculture** : L'usage d'engrais chimiques et de pesticides entraîne la contamination des eaux de surface et des nappes phréatiques.

- **Pollution domestique** : Les eaux usées domestiques, les déchets organiques, et les produits ménagers peuvent contaminer les rivières et les lacs.

- **Fuites d'hydrocarbures** : Les déversements de pétrole dans les océans ou les rivières entraînent la contamination de l'eau et la destruction des écosystèmes aquatiques.

b. Conséquences de la Pollution de l'Eau

- **Santé Humaine** : L'eau contaminée par des pathogènes (bactéries, virus) peut provoquer des maladies digestives et des infections.

- **Perturbation et Mort de la Faune Aquatique** : La présence de métaux lourds ou de produits chimiques toxiques peuvent bioaccumuler dans les organismes aquatiques et tuent les poissons et autres organismes aquatiques.

- **Eutrophisation** : L'excès de nutriments (azote, phosphore) dans l'eau favorise la prolifération d'algues, réduisant ainsi la qualité de l'eau et la biodiversité.

2.1.3. Pollution des Sols : Déversements de produits chimiques, de métaux lourds et d'hydrocarbures dans le sol, affectant la qualité de l'agriculture et la biodiversité.

a. Sources de pollution des sols :

- **Agriculture** : Produits chimiques agricoles : les pesticides et engrais chimiques utilisés en grande quantité contiennent des substances polluantes qui s'infiltrent dans le sol et le contaminent l'utilisation excessive.

- **Industries** : Les déchets industriels contenant des métaux lourds (plomb, le cadmium, et le mercure), qui proviennent principalement des déchets industriels et des activités minières, et des produits chimiques sont souvent déposés dans des décharges non contrôlées.

- **Décharges et déchets solides** : L'accumulation de déchets non biodégradables, comme le plastique, pollue les sols et affectent la faune.

b. Conséquences de la pollution des Sols :

- **Destruction de la Fertilité du Sol** : La pollution du sol rend le sol moins fertile et incapable de soutenir une croissance végétale saine.

- **Contamination de la Chaîne Alimentaire** : Les produits chimiques et les métaux lourds dans le sol peuvent être absorbés par les plantes, affectant ainsi les animaux et les humains qui les consomment.

- **Perturbation des Écosystèmes** : Les sols pollués affectent la biodiversité, notamment la faune et la flore du sol, ainsi que les oiseaux qui se nourrissent au sol.

- **Perturbation de la faune** : Ces produits chimiques peuvent bioaccumuler dans les organismes aquatiques et terrestres

2.1.4. Pollution Sonore :

- **Pollution sonore** : Les émissions sonores industrielles et urbaines excessifs peuvent perturber la faune et nuire à la qualité de vie des populations

a. Sources de Pollution Sonore

- **Transports** : Le bruit des véhicules, trains, et avions est une source majeure de pollution sonore en milieu urbain.

- **Industries** : Les bruits d'usines, de machines et d'équipements industriels peuvent perturber l'environnement sonore.

- **Activités humaines** : Les concerts, chantier de construction, et d'autres activités humaines génèrent également des bruits perturbateurs.

b. Conséquences de la Pollution Sonore

- **Santé Humaine** : Peut causer des troubles du sommeil, du stress, des troubles cardiovasculaires, et des perturbations mentales.

- **Faune** : Le bruit perturbe les comportements des animaux, y compris leur communication, leur reproduction, et leur orientation.

2.1.5. Pollution Lumineuse :

a. Sources de Pollution Lumineuse :

- **Éclairage public excessif** : L'éclairage des rues et des grands bâtiments contribue à la pollution lumineuse dans les zones urbaines.

- **Éclairage industriel et commercial** : Les enseignes lumineuses, vitrines éclairées et installations industrielles génèrent de la lumière artificielle qui perturbe l'environnement naturel.

b. Conséquences de la Pollution Lumineuse :

- **Perturbation des Écosystèmes** : Elle perturbe les rythmes naturels des animaux nocturnes, comme les chauves-souris, insectes, et oiseaux migrateurs.

2.2. Les sources naturelles de la pollution de l'environnement :

Bien que les activités humaines soient responsables de la majeure partie de la pollution actuelle, il existe aussi des sources naturelles de pollution qui peuvent avoir un impact sur l'environnement. Ces sources naturelles sont principalement liées à des phénomènes géologiques, biologiques et climatiques, et peuvent parfois produire des polluants à des concentrations importantes.

2.2.1. Sources Géologiques et Volcaniques : Les volcans sont une source naturelle majeure de pollution de l'air, de l'eau et du sol. En effet, lors des éruptions volcaniques, de grandes quantités de gaz et de cendres sont libérées dans l'atmosphère, et peuvent affecter de vastes zones.

a. Éruptions Volcaniques : Les éruptions volcaniques libèrent des substances telles que le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de carbone (CO₂), et des particules fines dans l'air, ce qui peut affecter la qualité de l'air, provoquer des pluies acides, et perturber le climat local et global.

- **Impact sur l'air** : Les cendres volcaniques et les gaz affectent directement la qualité de l'air. Les pluies acides formées par la réaction du dioxyde de soufre avec l'humidité dans l'air peuvent endommager les écosystèmes.

- **Impact sur les sols et l'eau** : Les cendres volcaniques peuvent modifier la composition chimique des sols et des cours d'eau.

Exemples de Volcans :

- Le volcan Eyjafjallajökull en Islande (2010) a causé des perturbations importantes à cause des nuages de cendres volcaniques.

2.2.2. Les Feux de Forêt Naturels : Les feux de forêt peuvent également être considérés comme une source naturelle de pollution. Bien que les feux de forêt soient souvent déclenchés par des conditions climatiques particulières (sécheresse, chaleur extrême, foudre), ces phénomènes libèrent une grande quantité de gaz à effet de serre et de particules fines.

Composés Libérés par les Feux de Forêt :

- Monoxyde de carbone (CO) et dioxyde de carbone (CO₂) : Ils sont produits en grande quantité lors de la combustion des végétaux.

- Particules fines (PM_{2.5}) : Les feux libèrent des particules microscopiques qui peuvent pénétrer profondément dans les poumons et affecter la santé humaine.

- Cendres et suie : La suie et les cendres peuvent se déposer dans l'eau et dans le sol, modifiant la qualité de l'eau.

Exemples de Feux de Forêt Naturels :

- Les feux de forêt en Australie (2020) ont été exacerbés par des conditions météorologiques extrêmes et ont eu un impact environnemental majeur.

- Les feux dans la forêt amazonienne sont souvent liés à des périodes de sécheresse exacerbées par le phénomène climatique El Niño.

2.2.3. Les tempêtes de Sable et la Poussière : Les tempêtes de sable et la poussière provenant de zones désertiques sont des sources naturelles de pollution atmosphérique, principalement dans les régions arides et semi-arides.

Impact des Tempêtes de Sable :

- Particules fines : Ces particules (PM10, PM2.5) sont de petites tailles et peuvent être inhalées par les humains et les animaux, créant des problèmes respiratoires.
- Transport de polluants : Les tempêtes de sable peuvent transporter des polluants chimiques, des métaux lourds et d'autres contaminants sur de longues distances.

Exemples :

- Les tempêtes de sable dans le désert du Sahara affectent une large zone de l'Afrique et peuvent même atteindre des régions comme l'Amérique du Sud ou les Caraïbes.
- Les tempêtes de poussière aux États-Unis dans les Great Plains peuvent également perturber la qualité de l'air.

2.2.4. Les Marées Noires Naturelles : Les marées noires, principalement causées par le déversement d'hydrocarbures dans l'océan, peuvent également être le résultat de sources naturelles. Ces déversements sont souvent dus à l'activité géothermique sous-marine, comme la libération d'hydrocarbures lors de fuites naturelles à partir de réservoirs sous-marins.

Origine Naturelle des Marées Noires :

- Certaines marées noires sont causées par des fuites de pétrole brut provenant de fissures dans le fond marin.
- Ces événements sont plus fréquents dans les zones géothermiques où le pétrole est naturellement extrait des roches sous-marines.

Exemples de Marées Noires Naturelles :

- Le golfe du Mexique a des fuites naturelles de pétrole provenant de réservoirs sous-marins.

2.2.5. Les Polluants Organiques Naturels : Les plantes, les algues et même certains animaux produisent des substances chimiques qui peuvent agir comme des polluants dans certains contextes.

Exemples :

- Algues : Les proliférations d'algues (marées rouges) produisent des toxines qui peuvent affecter la faune aquatique et parfois les humains.
- Plantes : Certaines plantes, comme les genêts, émettent des composés chimiques qui peuvent interférer avec d'autres végétaux ou organismes.

2.2.6. La Pollution liée à la Décomposition Organique : La dégradation naturelle des matières organiques, que ce soit dans les forêts, les sols, ou les océans, peut aussi entraîner la libération de certains gaz comme le méthane (CH₄) ou le dioxyde de carbone (CO₂). Ces gaz sont naturellement produits lors de la décomposition, mais en grande quantité, ils peuvent contribuer au réchauffement climatique.

2.2.7. Les pluies acides : sont un phénomène environnemental où les pluies (ou autres formes de précipitations comme la neige ou le brouillard) deviennent acides en raison de la présence de polluants atmosphériques. Ces polluants, principalement d'origine anthropique, réagissent avec l'humidité dans l'atmosphère pour former des acides qui sont ensuite précipités sous forme de pluie.

Formation des Pluies Acides : Les pluies acides se forment principalement à partir de deux polluants gazeux présents dans l'air :

-Dioxyde de soufre (SO₂) : le SO₂ est principalement émis par les industries, les centrales thermiques et les combustions fossiles. Lorsqu'il réagit avec l'oxygène de l'air, il forme du trioxyde de soufre (SO₃), qui se combine avec de la vapeur d'eau pour produire de l'acide sulfurique (H₂SO₄).

-Oxydes d'azote (NO_x) : Les oxydes d'azote (NO et NO₂) proviennent principalement des véhicules, des centrales électriques, et de l'agriculture. Ces oxydes réagissent avec l'oxygène et l'humidité pour former de l'acide nitrique (HNO₃).

Les acides sulfurique et nitrique se mélangent avec l'humidité de l'air et sont finalement précipités sous forme de pluies acides, mais peuvent aussi se retrouver sous forme de neige, de brouillard, ou de rosée acide.

Conséquences des Pluies Acides :

Les pluies acides ont un large éventail d'effets négatifs sur les écosystèmes, la faune, la flore, et même la santé humaine.

-Impact sur les Sols :

- Les pluies acides augmentent la concentration d'ions H⁺ dans le sol, ce qui rend le sol plus acide.
- Cette acidification réduit la disponibilité des nutriments essentiels pour les plantes et dissout des éléments comme le plomb et l'aluminium, qui deviennent toxiques pour les organismes.

-Impact sur les Eaux Douces :

- Les lacs et rivières peuvent devenir acidifiés à cause de l'accumulation d'acides sulfurique et nitrique. Cela nuit à la vie aquatique, notamment en réduisant la capacité des poissons et autres organismes aquatiques à survivre.
- Les poissons, en particulier ceux qui vivent dans des eaux moins profondes, sont vulnérables, car l'augmentation de l'acidité affecte leur système respiratoire et leur reproduction.

-Impact sur les Végétaux :

- Les plantes et arbres subissent des dégâts foliaires à cause de l'acidité des pluies. Les feuilles sont endommagées par l'acide, ce qui peut inhiber la photosynthèse et diminuer la croissance des plantes.
- Les forêts sont particulièrement vulnérables, car les arbres sont exposés à des niveaux d'acidité de plus en plus élevés, ce qui les rend plus sensibles aux maladies et aux infestations d'insectes.

-Impact sur les Infrastructures et le Patrimoine :

- Les pluies acides peuvent corroder des matériaux comme le calcaire, le marbre, le béton, et le métal, endommageant des monuments historiques et des infrastructures.
- Par exemple, les statues et bâtiments historiques en marbre ou en calcaire subissent une dégradation importante lorsqu'ils sont exposés à des pluies acides.

-Impact sur la Santé Humaine :

- Bien que les pluies acides ne représentent pas un danger direct pour la santé humaine, elles peuvent avoir des effets indirects en contaminant les ressources en eau potable.
- La pollution de l'air, qui produit des oxydes d'azote et du dioxyde de soufre, est liée à des problèmes respiratoires, des maladies cardiovasculaires et d'autres affections chroniques.

3. Causes de la Pollution Environnementale :

a. Activités Industrielles : Les industries, en particulier celles liées à l'exploitation des ressources naturelles (mines, extraction de pétrole, gaz), produisent une quantité importante de polluants, notamment des gaz d'échappement (CO₂, CO), des déchets chimiques, et des eaux usées industrielles.

b. Agriculture Intensive : L'usage excessif d'engrais chimiques et de pesticides a des effets directs sur les sols, les eaux et les écosystèmes. Cela inclut des problèmes comme l'eutrophisation des cours d'eau et la contamination des nappes phréatiques par des nitrates et des pesticides.

c. Urbanisation et Transports : L'expansion urbaine entraîne la construction de routes, la production de déchets solides, et l'émission de polluants atmosphériques (particules fines, gaz à effet de serre). L'usage massif des véhicules contribue largement à la pollution de l'air.

d. Déforestation : La coupe massive des forêts libère non seulement du CO₂ dans l'atmosphère, mais détruit également des habitats naturels essentiels pour de nombreuses espèces et perturbe les cycles hydrologiques.

e. Consommation de Plastique : La pollution par les plastiques est l'une des plus graves aujourd'hui, notamment à cause de leur non-biodégradabilité. Les microplastiques contaminent les océans, affectant la faune marine et remontent dans la chaîne alimentaire, y compris chez l'Homme.

4. Effets de la Pollution Environnementale :

Effets toxiques sur les organismes et les écosystèmes :

Les effets des polluants peuvent être observés à plusieurs niveaux d'organisation biologique : du niveau cellulaire et tissulaire, à celui de l'organisme individuel, et jusqu'aux communautés et écosystèmes. Ces effets sont causés par l'exposition à des substances chimiques qui perturbent les fonctions biologiques normales, entraînant des altérations qui peuvent affecter la survie, la reproduction, et la santé générale des organismes vivants :

-**Niveau individuel :** Modifications du comportement, perturbations physiologiques, mortalité.

- **Niveau populationnel :** Réduction de la fertilité, mutations génétiques, et disparition d'espèces.

-**Niveau écosystémique :** Déstabilisation de la structure des communautés biologiques et altération des fonctions des écosystèmes.

4.1. Effets Toxiques sur les Organismes (Individuels) :

a. Toxicité Cellulaire et Moléculaire :

Les polluants peuvent interférer avec les mécanismes cellulaires et moléculaires essentiels pour le fonctionnement des organismes. Les principales formes d'altération au niveau cellulaire comprennent:

-**Domages à l'ADN :** Les agents génotoxiques, tels que certains métaux lourds (arsenic, cadmium) et solvants organiques, peuvent provoquer des mutations génétiques, entraînant des cancers ou des malformations congénitales.

-**Oxydation cellulaire** : Les espèces réactives de l'oxygène (ROS) générées par des polluants comme les pesticides ou les métaux lourds peuvent endommager les membranes cellulaires, les protéines et l'ADN.

- **Perturbation des fonctions enzymatiques** : Des substances comme les organophosphorés inhibent les enzymes nécessaires à des processus vitaux (par exemple, l'enzymatique acétylcholinestérase), perturbant ainsi la transmission nerveuse et les fonctions corporelles.

-**Stress oxydatif** : L'augmentation des ROS peut induire un état de stress oxydatif, endommageant les cellules et affectant leur métabolisme normal.

b. Toxicité Systémique :

-Les polluants chimiques peuvent affecter plusieurs organes et systèmes dans les organismes :

- **Système nerveux** : Des substances comme les métaux lourds (plomb, mercure) ou certains pesticides peuvent endommager le système nerveux, provoquant des troubles cognitifs, des altérations comportementales, ou des troubles moteurs.

-**Système respiratoire** : L'exposition à des polluants atmosphériques comme les gaz d'échappement (oxydes d'azote, dioxyde de soufre) ou les particules fines (PM2.5) peut entraîner des maladies respiratoires, comme l'asthme, la bronchite chronique et d'autres troubles pulmonaires.

- **Système cardiovasculaire** : Certaines substances, comme les perturbateurs endocriniens (bisphénol A, phtalates), peuvent affecter le métabolisme du cholestérol, la pression sanguine, et la fonction cardiaque.

- **Système immunitaire** : Les polluants chimiques peuvent affaiblir le système immunitaire des organismes, les rendant plus vulnérables aux infections et aux maladies.

c. Toxicité Reproductive :

-**Perturbateurs endocriniens** : Ces substances chimiques, présentes dans certains pesticides, plastiques, et produits chimiques industriels, interfèrent avec les hormones du corps. Cela peut entraîner des troubles de la reproduction, des anomalies du développement, et des effets sur la fertilité.

-**Altération de la reproduction** : Des polluants comme le cadmium ou le mercure peuvent affecter la production d'ovules ou de spermatozoïdes, ou encore perturber les cycles hormonaux chez les organismes.

***Effets sur la Santé Humaine** : Les maladies respiratoires, les cancers, les maladies cardiovasculaires, et les troubles neurologiques sont fortement liés à l'exposition à des polluants environnementaux, en particulier les particules fines et les gaz toxiques.

4.2. Effets Toxiques sur les Écosystèmes les populations et la biodiversité :

- **Effets sur la Biodiversité** : La pollution détruit les habitats naturels, menace la faune et la flore, et peut mener à l'extinction d'espèces.. La perte de biodiversité est souvent le résultat de la pollution, car les espèces les plus sensibles aux polluants peuvent disparaître, réduisant ainsi la résilience des écosystèmes.

L'exposition à des polluants peut réduire la biodiversité des écosystèmes en éliminant ou en perturbant les populations d'organismes, qu'il s'agisse de plantes, d'animaux, ou de micro-organismes. Par exemple :

-Les espèces aquatiques, en particulier, sont gravement menacées par la pollution de l'eau et l'acidification des océans.

-**Eutrophisation** : L'excès de nutriments (nitrates, phosphates) provenant de l'agriculture peut entraîner une prolifération d'algues dans les milieux aquatiques, consommant tout l'oxygène et tuant les poissons et autres formes de vie aquatique.

- **Réduction de la diversité des espèces** : Les polluants chimiques peuvent causer des extinctions locales ou des baisses de population, menaçant des espèces sensibles, en particulier les organismes aquatiques ou les insectes pollinisateurs.**Perturbation des Relations Trophiques** : -Les substances toxiques peuvent altérer les chaînes alimentaires et la structure des communautés écologiques :

- **Bioaccumulation et biomagnification** : Les polluants comme les métaux lourds ou les POPs (persistant organic pollutants) se bioaccumulent dans les organismes et sont ensuite transférés à travers les niveaux trophiques, où leur concentration augmente, affectant ainsi les prédateurs au sommet de la chaîne alimentaire (par exemple, les poissons prédateurs, les oiseaux carnivores, ou les mammifères).

-**Effets sur les interactions écologiques** : Les polluants peuvent affecter les interactions entre espèces, comme la compétition, la prédation ou la symbiose. Par exemple, l'exposition à des produits chimiques peut modifier les comportements de reproduction ou de migration des animaux.

-**Effets sur les populations** : Des perturbations dans les mécanismes biologiques, tels que la reproduction et la croissance, peuvent entraîner un déclin des populations.

-**Altération de la capacité de reproduction des animaux et végétaux** :

Exemple 1 : le pesticide DDT est à l'origine d'un amincissement de la coquille des œufs de grèbes (une espèce d'oiseaux) qui diminue le succès de la reproduction avec une mortalité accrue des petits.

Exemple 2 : les métaux lourds (cadmium, zinc, plomb, etc.) peuvent altérer la germination des graines de certains végétaux.

-**Affectation de la croissance et de la santé d'un organisme** :

Exemple : l'ozone (O₃) est un gaz très phytotoxique par ses effets directs fortement oxydants sur les différents processus physiologiques de la plante (photosynthèse, respiration, etc...). C'est le polluant le plus préoccupant actuellement au niveau de la végétation et des écosystèmes car il entraîne des pertes de rendement qui peuvent être de 5 à 10 %, et l'apparition de nécroses foliaires maintenant visibles dans les milieux naturels (Garrec, 2019).

-**Déséquilibre d'une population** :

Exemple : de nombreuses études ont mis en évidence un changement de sexe des poissons mâles (un phénomène qui se produit naturellement chez de nombreuses espèces de poissons) dû à la présence, dans l'eau, d'un cocktail de polluants se comportant comme des hormones sexuelles (certains pesticides, peintures pour les coques de bateaux, pilule contraceptive, etc.).

-Modification du comportement d'individus :

Exemple : une étude suédoise a mis en évidence que les résidus d'antidépresseurs présents dans l'eau des rivières altéraient le comportement des perches communes.

Les poissons présentaient une moindre sociabilité vis à vis des congénères, une plus grande activité ou encore un appétit plus important. Au-delà des effets sur la population de perches, le risque identifié est une perturbation de l'équilibre de l'écosystème dans son ensemble.

-Augmentation de la mortalité :

Exemple : une marée noire entraîne la mort de nombreux oiseaux et organismes aquatiques. Lors du naufrage du pétrolier Amoco Cadiz en 1978 en Bretagne, 20 000 oiseaux et poissons ont été retrouvés morts ou mazoutés.

-Perturbation des Équilibres Écologiques : -Les perturbations causées par des polluants peuvent entraîner des déséquilibres écologiques, comme :

- **Modification des cycles biogéochimiques :** Les polluants, en particulier les métaux lourds et les nutriments en excès, peuvent interférer avec les cycles naturels de carbone, d'azote et de phosphore, affectant la fertilité des sols et la santé des écosystèmes.
- **Changement des habitats naturels :** Les polluants peuvent modifier les conditions physiques des habitats (acidification des océans, contamination des sols et des eaux), perturbant les écosystèmes aquatiques ou terrestres.

-Effets sur les écosystèmes : La pollution peut modifier la structure et le fonctionnement des écosystèmes, perturbant les relations entre les espèces et leurs environnements.

Exemple : l'eutrophisation des plans d'eau due aux excès de nutriments (azote, phosphore) peut entraîner des proliférations algales et réduire la qualité de l'eau.

-Modification des conditions du milieu :

Exemple 1 : l'acidification des cours d'eau provoquée par le SO₂ et les NO_x émis par la combustion des énergies fossiles, qui entraîne une perte de la biodiversité.

Exemple 2 : le réchauffement climatique induit par les émissions de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, etc.),

-Changements Climatiques : Les émissions de gaz à effet de serre contribuent au réchauffement climatique, modifiant les systèmes climatiques globaux et provoquant des phénomènes météorologiques extrêmes (ouragans, sécheresses, inondations).