**1- Pollutions et implications écologiques**

* 1. **Définition**

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

**1.2. Causes actuelles de pollution de la biosphère**

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

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

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

**1.3. Classification des pollutions**

**Selon la nature de l’agent polluant :** Physique, chimique et biologique

**D’un point de vue écologique :** en prenant en considération le compartiment de la biosphère afférent (atmosphère, hydrosphère, pédosphère) dans lequel ils sont émis et sur les biocénoses desquels ils exercent leurs perturbations.

**D’un point de vue toxicologique :** Considère le milieu ou la manière par laquelle les polluants contaminent les organismes. On distinguera, selon la voie de contamination ex : une contamination par inhalation, par absorption transbranchiale ou par ingestion

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

**3. Types de pollutions**

**Pollution de l’air, pollution de l'eau et pollution des sols**

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

**2.1. Propriétés physico-chimiques**

Les propriétés physico-chimiques des polluants organiques et métalliques permettent de comprendre et de prédire non seulement le devenir de ces molécules dans les différents écosystèmes (mobilité, dégradation abiotique et biotique) mais également leur capacité d’accumulation chez les organismes vivants.

**2.1.1. Propriétés physico-chimiques des polluants organiques**

**Polychlorodibenzo-dioxines (PCDD) et Polychlorodibenzo-furanes(PCDF) :** Solides à température ambiante, peu ou pas volatiles, dispersion sous forme gazeuse, dégradation par photo-oxydation atmosphérique, stabilité dans l’atmosphère, molécules fortement lipophiles.

**PCB « dioxines-like » :** Une faible volatilité, une forte lipophilicité et une persistance élevée (stabilité chimique, thermique et biologique).

**Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) :** Polluants prioritaires, la solubilité aqueuse de ces molécules tend à évoluer en sens inverse de la lipophilicité, en diminuant avec l’augmentation du poids moléculaire

**Les POP** sont semi-volatiles et circulent plus ou moins bien dans l’air. Ils sont lipophiles, avec attirance forte pour les tissus adipeux où ils se concentrent généralement. Ils ont également une durée de vie très longue.

**2.2.2. Propriétés physico-chimiques des polluants métalliques**

Dans l’environnement, les ETM sont retrouvés principalement associés à d’autres molécules (composés organiques ou inorganiques). Les complexes, ainsi formés, possèdent des propriétés physico-chimiques entrainement variables. Quoi qu’il en soit, les ETM ne sont pas lipophiles et se différencient ainsi des polluants organiques.

**2.2. Demi de vie des polluants**

Les différentes substances ont des durées de vie dans l’atmosphère qui sont extrêmement variables, très longue : de 50 à 200 ans pour le CO2, 10 ans pour le méthane ; 150 ans pour le protoxyde d’azote, de 65 à 130 ans pour les CFC. Quelques jours pour l’ozone, heurs à jours pour les COVM, jours à semaines pour les aerosols PM ≤ 1µm, minutes à jours pour les aerosols PM 1-10 µm

**2.3. Processus biogéochimiques :**

**2.3.1. Circulation atmosphérique des polluants**

**2.3.2. Mouvements de l’hydrosphère, transferts des substances dans le sol**

**2.3.3. Accumulation des polluants dans le sol**

**2.3.4. Transfère et concentration des polluants dans la biomasse**

* **Polluants organiques**

Les PCDD/F s’accumuler dans les tissus adipeux des organismes vivants et dans les cuticules des végétaux. Les HAP peuvent être dégradé chez les animaux.

Les aliments contaminés par les PCDD/F sont principalement les produits d’origines animales, les végétaux n’étant que très faiblement pollués. Contrairement aux aliments contaminés par les HAP qui sont d’origines végétales. Cette différence de contamination entre les animaux et les végétaux peut s’expliquer de deux manières. D’une part, la grande majorité des espèces végétales sont incapables de prélever les PCDD/F et les PCB dans le sol via leur système racinaire et de les transloquer vers les parties aériennes. Les végétaux donc sont polluées en HAP majoritairement suite à un dépôt atmosphérique de ces molécules ou à des éclaboussures de particules de sol. D’autres part, La durée et l’intensité d’exposition aux PCB et aux PCDD/F est plus importante pour les animaux que pour les végétaux. Comme ces produits sont des composés stables et persistants, ils ne sont donc pas ou peu métabolisés et s’accumulent dans les tissus et les réserves lipidiques.

* **Polluants métalliques**

Les formes organisées des éléments en traces représentent les éléments en traces intégrés dans la biomasse et, en particulier, dans les végétaux. Les éléments en traces sont transférés aux végétaux à partir des formes présentes dans la solution du sol, compartiment qui prend toute son importance. Les végétaux récoltés par l’agriculture, la foresterie ou le simple entretien paysager contribuent aux flux de sortie des éléments traces des sols. La contribution des végétaux à l’exportation des éléments en traces des sols pollués est très faible en dehors du cas particulier des plantes hyperaccumulatrices. Les éléments en traces ont donc tendance à s’accumuler dans les sols cultivés. Par contre dans le cas des hyperaccumulateurs (zinc, cadmium) ou celui d’élément en trace très mobiles (technétium), les flux par la biomasse peuvent être nettement plus élevés et, par exemple, atteindre plusieurs dizaines de kg par hectare pour le zinc ou 80% du technétium présent dans le sol. Les plantes représentent alors, dans des conditions particulières, un outil potentiel pour décontaminer les sols pollués.

**2.3.5. Elimination, dégradation et persistance des polluants**

Trois vois principales de dégradation de PCDD/F: hydroxylation, oxydation avec migration d’un atome de chlore, ou ouverture du cycle benzénique pour former un dihydroxydiphényl éther éventuellement suivie par une hydrolyse pour donner un catéchol.

La solubilité aqueuse et la lipophilicité des congénères des HAP influencent la persistance de ces molécules dans l’environnement. En effet, les HAP peuvent être dégradés dans l’air par photo-oxydation et oxydation chimique. Dans le sol, les principaux mécanismes de dégradation des HAP seraient les réactions biologiques. Leur dégradation se fait par les microorganismes et les animaux supérieurs. La principale différence est le degré de métabolisme : les micro-organismes sont dotés de complexes enzymatiques permettant l’ouverture des cycles benzéniques tandis que chez les mammifères la dégradation des HAP correspond à une hydroxylation suivie ou non par une conjugaison.

**3- Pollution atmosphérique**

Les polluants atmosphériques sont souvent divisés en deux catégories, primaires et secondaires. Les polluants atmosphériques primaires sont émis directement dans l’atmosphère, issus des sources de pollution (trafic routier, industries, chauffage, agriculture...). . Ils vont ensuite se disperser, se diluer, se transporter voire se transformer en d’autres composés dits « secondaires » comme l’ozone ou le nitrate d’ammonium.

**3.1. Principaux polluants atmosphériques**

**3.1.1. Polluants gazeux :** Comprennent les composés du soufre (dioxyde de soufre (SO2) et trioxyde de soufre (SO3)), le monoxyde de carbone, les composés de l’azote (monoxyde d’azote (NO), dioxyde d’azote (NO2), ammoniac (NH3)), les composés organiques (hydrocarbures (HC), composés organiques volatils (COV), hydrocarbures polycycliques aromatiques (HPA), aldéhydes), les composés halogénés et les dérivés halogénés (HF et HCl), le sulfure d’hydrogène, le sulfure de carbone et les mercaptants (odeurs)

**3.1.2. Polluants Organiques Persistants (POP) :** Il existe douze composés organiques toxiques à basse concentration. Ce sont des résidus industrielssouvent toxiques, mutagènes et cancérigènes, qui interfèrent avec notre système hormonal et sexuel. La liste la plus communément admise est la suivante: Trichloroéthylène (TRI), Trichloroéthane(TCE), Tetrachloroéthylène (PER), Dioxines et furanes (Diox), Hydrocarbures AromatiquesPolycycliques (HAP), Polychlorobiphényls (PCB) et Hexachlorobenzène (HCB)

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

Néanmoins, on distingue en particulier le mercure, le plomb et le cadmium.

Ces 3 métaux se distinguent des autres métaux souvent considérés comme des oligo-éléments pouvant être utiles. Les premiers sont tous très toxiques (effets sur le système nerveux) et ont une durée de vie très grande et une conductivité électrique élevée. Les métaux ne posent pas seulement un problème pour la pollution de l’air, mais aussi pour celle de l’eau et des sols.

**3.1.4. Particules :** Les aérosols comportent à la fois des particules solides (poussières) ou liquidesdispersés dans l’air par les diverses activités humaines. Elles sont généralement classées parordre de taille décroissante.

· Les particules de grand diamètre, supérieur à 10 µm, dites sédimentables.

· Les particules semi-fines peu ou pas sédimentables, de taille = 10 µm, dénommées PM10.

· Les particules fines, insédimentables de taille = 2,5 µm (PM2,5).

· Les particules inframicroscopiques, insédimentables = 1 µm (PM1).

L’examen de ces particules atmosphériques a permis de détecter toute sorte de polluants chimiques organiques ou inorganiques qui s’adsorbent à leurs surfaces, les rendant ainsi très nocives pour la santé humaine.

**3.2. Provenance ou sources**

**3.2.1. Sources 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, l’éruption volcanique, de même que la production d’embruns marins (particules).

**3.2.2. 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.

Une autre notion est également importante pour la caractérisation des sources et de leur distribution géographique : c’est la notion de **source ponctuelle**, qui caractérise plutôt les grands sites industriels: elles sont étudiées en conjonction avec des données concernant leur localisation, leur capacité, leur activité... Les **sources ponctuelles** (**Corinair).** La nomenclature Corinair permet de classer les émetteurs en fonction de 11 catégories principales comme suit :

Combustion dans les industries de l’énergie et de la transformation de l’énergie , combustion hors industrie , combustion dans l’industrie manufacturière, procédés de production, extraction et distribution de combustibles fossiles/ énergie géothermique, utilisation de solvants et autres produits, transports routiers, autres sources mobiles et machines, traitements et élimination des déchets, agriculture et sylviculture et autres sources et puits.

**3.3. Niveau de la pollution atmosphérique**

La pollution atmosphérique se divise en trois catégories :

Pollution de proximité et à **l’échelle locale,** à **l’échelle régionale et a** **l’échelle planétaire** , cette dernière concerne les deux problèmes identifiés :

- la diminution (« trou ») de la couche d’ozone stratosphérique due essentiellement à l’action descomposéshalogénés (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 decarbone, CO 2 = dioxyde de carbone, COV = composés organiques volatiles) entraînera de graves changementsclimatiques (élévation de la température du globe et des modifications climatiques qui ont des conséquencespour la vie terrestre).

**3.4. Effet des différentes substances sur la santé humaine**

**CO :** Il constitue un poison pour tous les animaux à sang chaud. En cas d'inhalation, il se combine avec l'hémoglobine du sang, s’oppose à l'absorption de l'oxygène et provoque l'asphyxie. Etant inodore, le CO est un poison, qui ne provoque que des symptômes légers de maux de tête, de vomissements, ou de fatigue, suivis d'une perte de connaissance.

**SO2 :** Des concentrations importantes en dioxyde de soufre peuvent provoquer de nombreuses pathologies respiratoires. Il peut entraîner des inflammations bronchiques, une altération de la fonction respiratoire, et de symptômes de toux.

**NO et NO2 :** NO2 est toxique (40 fois plus que CO, 4 fois plus que NO) NO2 pénètre profondément dans les poumons. Les pics de concentrations sont plus nocifs qu’une même dose sur une longue période. NO est un gaz irritant pour les bronches, il réduit le pouvoir oxygénateur du sang.

**Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) :** Beaucoup d’entre eux sont cancérigènes et dangereux pour la santé humaine.

**Les peroxyacylnitrates (PAN) :** Les PAN sont très toxiques pour les végétaux et très irritants pour les yeux et les voies respiratoires.

**COV :** certains composés organiques tels que les aromatiques, les oléfines provoquent des irritations des yeux. Les aldéhydes sont de puissants irritants des muqueuses. Certains COV tels que le benzène, sont cancérigènes. Le benzene est un hydrocarbure monocyclique (C6H6 considéré comme le plus nocif en air ambiant) et/ou comme précurseurs de l’ozone secondaire.

**Les CFC :** Ce sont des composés très stables, non toxiques pour l’homme et qui en cela étaient très séduisants. Ils sont détruits par le rayonnement solaire dans la stratosphère et libèrent du chlore qui va entrainer des réactions conduisant à la destruction de l’ozone dans la stratosphère.

**PCB :** Une exposition accidentelle de courtes durée à ces **PCB** n’a pas de conséquences grave pour l’homme, il à été démontré qu’une exposition chronique à forte dose est associée à des irritations de la peau (chloracné) et rarement des affections hépatiques, neurologiques, des bronchites chroniques, des mots de têtes, des vertiges, des dépressions, des troubles de la mémoire et du sommeil, de la nervosité et de la fatigue, et de l’impuissance. De plus, les effets à long termes peuvent entrainer des dommages de foie, des effets sur la reproduction et la croissance, et les possibilités de cancer. Ce sont des produits cancérigènes pour l’homme et ont toute une série d’effet néfaste chez l’animal, notamment toxicité pour la reproduction, immunotoxicité et cancérogénicité.

Les effets des polluants ne se limitent pas aux cancers. Des affections cardiologiques et respiratoires sont induites tant par la pollution urbaine que par les poussières et les allergènes. Des affections neurologiques sont causées par le plomb et les pesticides, des maladies des reins par les métaux lourds (plomb, cadmium,..). Un niveau de bruit même très faible augmente la tension artérielle pendant le sommeil et pourrait avoir des conséquences cardiovasculaires. Les polluants atmosphériques et notamment les particules entrainent des réactions inflammatoires au niveau des poumons avec production excessive de radicaux libres, des réactions d’oxydation et un stress oxydatif. L’inflammation s’étend ensuite, altérant le système vasculaire, augmente la viscosité du sang et induisant des risques de coagulation. Ces modifications sont de plus susceptibles de déstabiliser des plaques d’athérome et de thrombose, le tout pouvant conduire à des maladies cardiovasculaires telles qu’une diminution d’apport sanguin à un organe, une obstruction des artères, un infarctus du myocarde.

Les études épidémiologiques montrent également que l’exposition chronique à la pollution atmosphérique augmente à long terme le risque de décès pour causes cardiovasculaires,

**ETM :** L’une des conséquences, en termes de santé, la plus fréquemment relevée après l’exposition humaine à ces molécules concerne les troubles du système gastro-intestinal.

**3.5. Conséquences écotoxicologiques de la pollution atmosphérique**

**a) Dioxyde de Soufre**

Les dommages causés par le SO 2 aux arbres et aux plantes cultivées dans les zones exposées en permanence à la pollution de l’air par ce composé se caractérisent en premier lieu par des lésions foliaires qui s’étendent entre les nervures. On note parmi les plus sensibles les espèces fourragères, luzerne en particulier etdiverses composés (laitues, ..). Puis viennent les céréales et les crucifères. En revanche, le maïs, la vigne, pommier, prunier, poirier, seraient assez pollu-tolérantes à ce gaz. Il s’agit d’altérations nécrotiques provoquéespar l’accumulation de sulfites (H 2 SO 3) puis de sulfates (H 2 SO 4 ) dans le parenchyme foliaire.

**b) action de l’ozone**

Des forêts peuvent être exposées à une pollution de l’air par des composés s’étant formés dans des atmosphères polluées soumises à des smogs oxydants. L’ozone est très toxique de façon générale pour les végétaux, en particulier pour les conifères et les plantes cultivées. Ses effets se manifestent à partir de 20 ppb et il provoque à 100 ppb le dépérissement de nombreux végétaux.

Par exemple, chez les arbres à feuilles caduques, les dégâts de l’ozone se manifestent par l’apparition de petites taches nécrotiques grisâtres.

Chez les plantes cultivées, l’ozone provoque des troubles de la respiration, une vacuolisation des cellules foliaires puis une défoliation totale de la plante.

**c) effet des NOX**

Parmi les oxydes d’azote, le seul qui présente une phytotoxicité est le NO 2 . Néanmoins, il est beaucoupmoins écotoxique que l’ozone. Des études ont montré un effet drastique des phyto-oxydants (Ozone + PAN +NOx) sur la productivité primaire forestière : des arbres âgés de 30 ans situés en zone polluée se sont avérésavoir une productivité cinq fois plus faible que celle d’arbres du même âge situés dans des zones moinsexposées.

**d) fluor**

S’il est présent dans l’air à des concentrations anormalement élevées dues à des émissions polluantes, il contamine la végétation selon deux modalités :

· Les dérivés gazeux du fluor pénètrent directement dans les plantes par les stomates

· Les autres retombent au sol sous forme de particules amenées par les dépôts secs ou dissoutes dans les eaux pluviales et s’accumulent peu à peu dans le système foliaire par la voie radiculaire.

L’intoxication fluorée des Phanérogames se traduit par l’apparition de nécroses apicales du parenchyme foliaire, d’abord grise puis devenant gris-verdâtre et enfin marron.

Le fluor est aussi celui qui cause les dommages les plus fréquents chez les animaux domestiques par voie alimentaire. C’est par contamination de la chaîne trophique des animaux d’élevage que le fluor provoque une intoxication à long terme des bovins, ovins et autres animaux domestiques causant une maladie dénommée fluorose (dents moins résistants, déformations osseuses, cachexie : affaiblissement profond de l’organisme, baisse de la production laitière).

Un autre effet méconnu de la pollution fluorée tient en sa nocivité pour les ruchers (nids d’abeilles). En effet, le fluor est un puissant insecticide pour les abeilles.

**e) les pluies acides**

Les pluies acides se produisent quand le dioxyde de soufre (SO2) et les oxydes d’azote(NOx) sont rejetés dans l’atmosphère, se combinent avec la vapeur d’eau atmosphérique pour former des acides forts comme l’acide sulfurique (H2SO4) ou l’acide nitrique (HNO3). Ces deux acides baissent dramatiquement le pH des eaux de pluie, ce qui conduit à l’affaiblissement des arbres(augmentation de la sensibilité des arbres aux attaques d’insectes et aux maladies) par des actions indirectes, résultent d’un ensemble d’effets se manifestant au niveau foliaire, racinaire, à celui de la physiologie des arbres exposés, commençant par un jaunissement des feuilles suivi d'une, chute de ces dernières en proportion plus ou moins importante selon la gravité du phénomène. Cette défoliation est directement responsable d'une baisse de l'activité photosynthétique.

Une autre cause de diminution de productivité des forêts exposées aux pluies acides résulte de l'accroissement du lessivage des éléments minéraux nutritifs des sols combiné à une baisse d'activité des micro-organismes nitrifiants. Ainsi, le bilan global du cycle de l'azote se traduit par une diminution des quantités d'azote nitrique disponibles dans les sols forestiers. Une forte baisse de pH engendre un accroissement de la perte par lessivage d'ions nutritifs (Ca2+, Mg2+, K+) au niveau de la biomasse foliaire.

La combinaison des dépôts d’azote et des pluies acides est responsable d’une diminution de la densité des champignons, les arbres seraient beaucoup plus susceptibles de s’affaiblir et de mourir pendant les années de sècheresse. Les retombés acides peuvent endommager les arbres dans certaines régions et conduire à leur mort sur de vastes zones, ce qui entraine des couts énormes en termes d’impact sur la reproduction de bois, la qualité de l’eau et les loisirs.

L’acidification des cours d’eau consécutives aux pluies acides a également altéré le fonctionnement de la litière via un impact sur le décomposeur microbiens et les détritivores invertébrés (Dangles et al. 2004).

Les pluies acides, à leur tour, réduisent le pH des sols humides et des masses d’eau tels les étangs et les lacs, et elles augmentent aussi les concentrations en métaux toxiques comme l’aluminium. L’augmentation seule de l’acidité induit des dommages à de nombreuses espèces végétales et animales. Comme l’acidité de masses d’eau augmente, de nombreux poisson, ne parviennent pas à se produire ou meurent. Avec des maladies introduites (Walker et al . 2010) et la destruction et la fragmentation des habitats (Luquet et al 2012), l’augmentation de l’acidité et la pollution de l’eau sont deux facteurs qui contribuent à la diminution spectaculaire des populations d’amphibiens de par le monde (nourris 2007). La plupart des espèces d’amphibiens dépendent de plans d’eau pour au moins une partie de leur cycle de vie, et une baisse de pH de l’eau provoque une augmentation correspondante de la mortalité des œufs et des jeunes individus. L’acidité inhibe également le processus de décomposition microbienne, en abaissant le taux de recyclage des minéraux et la productivité des écosystèmes.

Le problème des pluies acides est en régression dans de nombreuses régions en Europe et aux Etats-Unis, en raison d’un meilleur contrôle de la pollution, mais dans les pays émergent comme la Chine, l’acidité des pluies augmente à la mesure que les pays brulent des combustibles fossiles pour alimenter leur développement industriel rapide.

**3.6. Problèmes environnementaux liés aux polluants atmosphériques**

**3.6.1. Effet de serre : échelle mondiale**

L’effet de serre est un phénomène avant tout naturel de piégeage par l’atmosphère du rayonnement de chaleur émis par la terre sous l’effet des rayons solaires. Il permet une température sur Terre bien supérieure à celle qui régneraient en son absence. Le groupe de gaz responsables de ce phénomène est présent dans l’atmosphère à l’état de traces; il s’agit, pour l’essentiel, de la vapeur d’eau (H2O), du gaz carbonique (CO2), du méthane (CH4) et du protoxyde d’azote (N2O). C’est parce que les teneurs atmosphériques de ces gaz sont naturellement très faibles que les émissions dues aux activités humaines sont en mesure de les modifier sensiblement, entraînant, a priori, un renforcement de l’effet de serre, et par suite, des modifications possibles du climat.

L’homme, par ailleurs, a introduit de nouveaux gaz à effet de serre très puissants dans l’atmosphère : leschlorofluorocarbones (CFC) également responsables de la destruction de la couche d’ozone. Enfin, l’ozonetroposphérique, formé à partir des émissions d’oxydes d’azote(NOx) et de Composés Organiques Volatils (COV) joue également un rôle important.

**3.7.2.Rôle du réchauffement climatique dans l’évolution des polluants atmosphériques**

Les variations météorologiques régionales affectent la qualité régionale de l’air, notamment urbaine et doivent être gérées à l’échelon de la région affectée.

Les prévisions concernant l’augmentation de température d’ici la ﬁn du siècle varient suivant es projections d’émission des facteurs responsables de l’effet de serre :de 0,3 à 1,7 ◦C en cas de baisse des émissions actuelles ou jusqu’à 2,6 à 4,8◦C en cas de poursuite ou d’augmentation des émissions actuelles.

Les pics de concentration d’ozone ambiants sont observés pendant les mois d’été, quand les conditions météorologiques régionales favorisent la production photochimique, comme les valeurs élevées de la température, les hautes pressions persistantes, la stagnation de l’air et le ciel clair. Au-dessus de 32◦C, une association forte a été mise en évidence entre la température et des valeurs d’ozone ambiant > 75 ppb.

C’est pendant la période estivale et en particulier pendant les pics d’ozone que le retentissement sur la morbidité et la mortalité respiratoire est le plus à craindre. Les fronts froids propres terminent ces épisodes en refoulant l’air chaud de la surface du sol.

Sans diminution des gaz à effets de serre à leur niveau actuel, l’Environmental Protection Agency (EPA) projette aux États-Unis en 2100 une diminution annuelle moyenne

légère de la concentration d’ozone ambiant de 1,3±0,5 ppb, mais avec une augmentation dans les zones polluées et à population dense.

Sans diminution des gaz à effets de serre, l’EPA projette aux États-Unis une augmentation moyenne annuelle de la concentration des PM 2,5 atmosphériques des PM 2,5 de 0,3±0,1.g/m3en 2050 et de 0,7 ±0,1.g/m3 en2100. L’augmentation pendant les mois d’été (juin-août) pourrait atteindre 3,0 g/m3dans la région est des États-Unis.

Les concentrations de particules ﬁnes sont affectées par les feux de forêts notamment. Les modèles climatiques montrent qu’avec une augmentation de la température de1 ◦ C, les risques de feux de forêts ont augmenté de 2 à 6 fois entre 1950 et 2003, dans la plupart des états américains à l’ouest du Mississipi. Bien que les feux de forêts soient le plus souvent localisés, la fumée dégagée peut s’étendre sur de grandes distances. Il a été estimé que 339 000 décès prématurés/an en moyenne dans le monde, sont attribuables à la pollution dégagée par les feux de forêt, notamment du fait des particules.

L’accroissement de l’effet de serre induira de nombreux autres bouleversements climatiques aux conséquences désastreuses : augmentation de la fréquence des vents violents, de tempêtes, inondations aux latitudes tempérées et les cyclones dans les zones tropicales. L’élévation du niveau moyen des mers qui a atteint au cours du dernier siècle une dizaine de cm est estimée comprise entre 0,15 cm et 1 mètre d’ici la fin XXIe

**3.6.3. Réduction de la couche d’ozone « trou dans la couche d’ozone »**

L'ozone (O3) est une forme chimique particulière de l'oxygène. Il est spontanément généré dans la stratosphère par le bombardement de la molécule oxygèneO2 par les ultraviolets (UV) qui produit l’oxygène radicalaire (O), lequel réagit ensuite avec la molécule de dioxygène pour former l’ozone selon les réactions suivantes :

O 2 + hν → 2 O

O 2 + O → O 3

Près de 90% de l’ozone se trouve dans la stratosphère, notamment dans une couche située entre vingt et vingt- cinq kilomètres d’altitude. C’est le seul composant de la stratosphère qui absorbe le rayonnement ultraviolet venant du soleil. Il protège ainsi la vie sur terre, tant les hommes que les microorganismes ou le phytoplancton marin. Si la totalité de l'ozone comprise dans cette colonne d'air était ramenée à la température et à la pression de l'atmosphère standard (0°C et 1 atmosphère), on obtiendrait alors une couche d'environ 3 mm d'épaisseur.

La teneur en ozone stratosphérique s’exprime en unité Dobson (notée DU pour DobsonUniten anglais). Elle est définie comme une couche de 0.01 mm d'épaisseur à la températureet la pression de l'atmosphère standard. Donc, la colonne d'ozone au-dessus normale estd’environ 300 DU.

La couche d’ozone au-dessus de l’antarctique se réduit de façon naturelle pendant quelques mois chaque année (généralement pendant le printemps austral qui correspond à l’automne boréal). On parle de "trou" dans la couche d'ozone lorsque la valeur de la colonne intégrée en ozone est inférieure à 220 unités Dobson.

* **Causes de la destruction de la couche d’ozone**

La dégradation de cette couche d’ozone est le résultat d’une pollution lente et étendue de l’atmosphère. Elle est catalysée par le chlore dont la principale source est la famille des chlorofluorocarbones (CFC) produits par l’homme. Rawland et Molina (1973) ont décrit plus d’une centaine de réactions qui aboutissent la destruction de l’ozone dans la stratosphère dont les plus importantes sont les suivantes :

CFCl3CFCl2 + Cl

Cl + O 3ClO + O 2

Les CFC sont des composés très stables (leur durée de vie dans l’atmosphère se chiffre en siècle) qui montent lentement vers la stratosphère où ils catalysent la destruction de l'ozone. Au contact des rayons ultraviolets (UV), ces gaz libèrent leur chlore par photolyse. De plus, les cristaux de glace présents dans les nuages stratosphériques transforment les composés chlorés de l'atmosphère en chlore actif susceptible de détruire l'ozone. La destruction de l'ozone stratosphérique se produit dans les régions polaires lorsque les températures descendent en dessous de -80 °C. À ces températures des nuages se forment dans la basse stratosphère au sein desquels des réactions chimiques transforment des composés issus des CFC en composés actifs. Ces processus conduisent à une destruction rapide de l'ozone au retour de la lumière solaire au-dessus du pôle. Ces produits ont été ensuite remplacés par les HCFC (hydrochlorofluorocarbones) et les halons.

* **Conséquences de la destruction de la couche d’Ozone** et protocole de Montréal

Avec la diminution de la couche d’ozone, les rayons UV atteignant la surface de la terre ont augmenté sensiblement depuis 1979 sur toute la planète. Une exposition trop longtemps aux rayons UV entraine plusieurs problèmes de santé chez l’homme, notamment les cancers de la peau, les cataractes (opacification du cristallin) et l’affaiblissement du système immunitaire. D’après l’Organisation mondiale de la santé (OMS), chaque année, on compte dans le monde 2 à 3 millions de nouveaux cas de cancer de la peau dont plus de 130000 nouveaux cas de cancer mélanocytaires (mélanomes malins). On estime à 66 000 le nombre annuel de décès par mélanome et autres cancers de la peau.

Les écologues sont aussi préoccupés par ces taux élevés des rayons UV qui risquent d’endommager le fonctionnement des écosystèmes terrestres et aquatiques.

**3.7.4. Changements climatiques**

♦ Selon Fortin (2001) (Canada), l’Organisation Mondiale pour la Santé et Santé

Canada ont identifié ***huit catégories d’effets sur la santé*** induit par les changements climatiques :

- la morbidité et la mortalité liées à la température (ex : Maladies liées au chaud et au froid, maladies respiratoires et cardiovasculaires);

- les effets de conditions météorologiques extrêmes (ex : dommages causés aux infrastructures de santé, traumatisme et maladie, stress social et psychologique dû aux Sinistres);

- les effets liés à la pollution atmosphérique ( ex : asthmes et autres affections respiratoires, crises cardiaques, maladies cardiovasculaires, cancer) ;

- la contamination de l’eau et la nourriture (ex : Infections dues à des micro-organismesentéropathogènes);

- les maladies infectieuses à transmission vectorielle (ex : nouveau profil de maladies causéespar des bactéries, virus et autres agentspathogènes) ;

- l’exposition accrue au rayonnement ultraviolet due à l’appauvrissement dela couche d’ozone (ex : lésions cutanées et cancer de la peau, cataractes, affaiblissements desdéfensesimmunitaires) ;

- les populations particulièrement vulnérables ;

- les impacts socio-économiques sur la santé et le bien-être des populations (ex :déterminants modifiés de la santé, risques pour les économies locales, fardeau général de la maladie).

**3.6.5. Les smogs**

Le terme « smog », contraction des mots anglais smoke (fumée) et de fog (brouillard,brume) désignela pollution de l’air urbain,il y a deux grandes sortes de smog :

**- Le smog industriel** (pollution par la fumée), cumule trois effets : des conditions météorologiques d’inversion (une couche chaude surmonte des couches plus froides près du sol et y confine les polluants qui s’y accumulent), des quantités élevées de dioxyde de soufre et de poussières issues notamment des installations de combustion du charbon, et une forte humidité atmosphérique- en fait du brouillard- qui catalyse la formation du SO2 en acide sulfurique.

En décembre 1952, 4000 londoniens moururentdans le pire incident industriel lié au smog au monde. 8000 autres moururent dans les deux mois qui suivirent.

Aujourd’hui, le smog industriel présente un grave problème dans de nombreuses villes industrielles des pays en développement.

-**Le smog photochimique**.

La lumière joue un grand rôle dans la formation des polluants secondaires à partir des différents polluants chimiques primaires. Les oxydes d’azote (NOx) et les COV sont impliqués dans sa formation. De l’ozone se forme au niveau du sol en présence de NOx (issus des échappements des automobiles) par réactions photochimiques. L’ozone ainsi formé réagit avec les différents polluants atmosphériques pour former plus de 100 polluants secondaires dont les PAN discutés précédemment. Ces smogs sont très irritants pour les yeux et les voies respiratoires et généralement plus important durant les mois d’été.

**4- Pollution des eaux**

**4.1. Différentes sources de pollution des eaux**

On distingue généralement trois sources principales de pollution: urbaine, industrielle et agricole.

**4.2. Typologies et origines des pollutions aquatiques**

**4.2.1. Pollution organique** est naturellement émise par les végétaux et animaux mais elle peut également être déversée par des élevages ou des industries. Son surplus dans le milieu entraîne alors une asphyxie de celui-ci du fait de sa biodégradation (pour la partie biodégradable) qui consomme de l'oxygène.

**4.2.2. Pollution induite par les métaux lourds**

**4.2.3. Pollution azotée et phosphatée**qui est responsable de fréquents dépassements de normes en Europe. Elle provient des eaux usées domestiques, des effluents industriels (agro-alimentaires, papeteries...) et principalement du lessivage des engrais et effluents d'élevage dans les zones agricoles. L'azote présent sous forme organique ou ammoniacale (NH 4+) dans les effluents se transforme en nitrate (NO 3-) dans le milieu naturel. Des nitrates peuvent également être rejetés par les stations d’épuration d’eaux résiduaires urbaines.

**4.2.4. Pollution microbienne**

**4.2.5. Pollution visuelle ou esthétique** **5.3.6. Pollution thermique** découlant d’un réchauffement des eaux principalement corrélé auxrejets des eaux de refroidissement.

**4.2.6. Pollution mécanique** est causée par des éléments en suspension (particules de charbon, d'amiante, de silice, de sable, de limon) provenant d'effluents industriels ou d'eaux usées.

**4.2.7. Pollution radionucléaire** due des centrales nucléaires et du traitement des déchets médicaux radioactifs

**4.3. Conséquences de la pollution des cours d’eau**

Les conséquences d’une pollution peuvent être classées en plusieurs catégories principales :

**4.2.1. Eutrophisation**

**4.3.2. Empoisonnement et dégradation de la flore et de la faune** par des composés toxiques (ex: par les hydrocarbures en plus des nitrates et des phosphates)

**4.3.3. Radioactivité des eaux** du fait du développement du déversement des résidus radioactifs dangereux.

**5. Modalités et conséquences de Pollution des sols par l’agriculture moderne**

Les effets de la pollution des sols dépendent de leur structure et de leur texture. Certains sols ont la capacité de filtrer, d'absorber et de recycler des quantités importantes de déchets ; dans d'autres sols, certains constituants toxiques ne sont pas retenus et se retrouvent dans les fleuves et dans les nappes phréatiques. Les sols sableux sont favorables au lessivage, alors que les sols argileux épais retiennent mieux les déchets. Ainsi toutes les activités humaines sur les sols doivent tenir compte des propriétés des sols et de la position de la nappe et des cours d’eau du milieu.

**5.1. Pollution des sols par les pesticides**

Les pesticides sont épandus chaque année dans les champs. Quel que soit leur mode d'utilisation, la plupart des molécules employées atteignent le sol durant ou après le traitement ; leur devenir dépend donc des caractéristiques et du fonctionnement du sol.

Les pesticides peuvent ensuite être soumis à des phénomènes de transport, liés principalement à l'écoulement des eaux. Ces transports en surface (ruissellement) ou en profondeur (lixiviation) entraînent des pollutions des eaux, même si les quantités de pesticides mobilisées dans les processus de transfert ne concernent généralement qu'une faible fraction des quantités épandues.

**5.1.1. Devenir des pesticides dans le sol**

Malgré la complexité du comportement global, liée à la multiplicité de processus interconnectés et à la diversité des molécules, on peut regrouper les principaux processus qui vont conditionner le devenir d'un pesticide dans les sols et les eaux :

- mise en solution dans la solution du sol à partir d'une spécialité commerciale ou un produit formulé. Cette phase est particulièrement importante puisqu'elle correspond à l'apparition d'une forme mobile de la molécule, biodisponible pour les végétaux ou les micro-organismes. La mise en solution dépend de la solubilité de la molécule, qui peut elle-même dépendre de l'ambiance physico-chimique du milieu (température et pH par exemple), ainsi que du type de formulation ;

- absorption par la microflore du sol ou les végétaux dans le cas de produits systémiques (c'est-à-dire pénétrant dans les organismes pour agir de façon spécifique sur une de leurs fonctions métaboliques) ;

- adsorption sur la phase solide organo-minérale du sol, en fonction de constantes d'équilibre d'adsorption et de désorption caractéristiques de chaque produit, mais dépendant des conditions de milieu ;

- biodégradation par la flore microbienne du sol, qui peut utiliser ces produits organiques comme source de carbone. Cette biodégradation entraîne l'apparition de métabolites intermédiaires qui peuvent présenter des propriétés physico-chimiques et une toxicité différentes de celle du produit d'origine. La phase ultime de la biodégradation est la minéralisation avec production de gaz carbonique par les microorganismes;

- transport convectif et/ou diffusif dans la solution du sol en fonction des conditions pédoclimatiques qui vont déterminer l'intensité de ces processus, et éventuellement, volatilisation et émission dans l'atmosphère ;

- formation de "résidus liés", plus ou moins stables, qui peuvent constituer des formes d'accumulation de résidus organiques dans les sols aux évolutions à moyen terme malconnues, et peuvent ainsi être considérés comme des "bombes à retardement" potentielles vis-à-vis de l'environnement. De nombreuses hypothèses ont été avancées poure xpliquer les mécanismes de formation de ces "résidus liés"(liaison avec d'autres composés organiques, incorporation dans des structures cellulaires microbiennes...), mais globalement, leur importance est corrélée à la teneur et à la nature des matières organiques présentes dans les sols.

Au total, ces différents processus aboutissent à classer les phénomènes décrivant le devenir d'un pesticide selon deux concepts principaux : la rétention et la persistance.

La rétention d'un produit regroupe l'ensemble des mécanismes tendant à fixer le produit ou ses métabolites sur la phase organominérale; si la rétention est forte, la mobilité est faible, ce qui tend à diminuer les risques de pollution par transferts hydriques. La persistance (mesurée globalement par la demiviedu produit) regroupe l'ensemble des processus biologique sou physico-chimiques qui conditionnent la dissipation du produit et sa concentration dans la phase liquide ; plus unproduit est persistant, plus la probabilité d'être transporté estgrande et plus les risques de pollution des eaux sont élevés.

Les recherches actuelles visent à identifier le déterminisme de ces processus en tentant de définir une typologie des comportements des pesticides en fonction des conditions agronomiques et des facteurs de régulation associés au type de sol et aux conditions climatiques de leur utilisation. Face aux lacunes et incertitudes concernant les "résidus liés", il apparaît nécessaire de développer des recherches concernant l'identification de l'origine biologique et/ou physico-chimique des processus de stabilisation des pesticides dans les sols, pour estimer les risques d'accumulation et de réversibilité de ce phénomène de stockage.

**5.2. Pollution des sols par les engrais**

Le recensement des externalités induites par les produits phytosanitaires et les engrais azotés utilisés dans l’agriculture nécessite en premier lieu de décrire les flux de produits en présence. Cependant, cette description prend des formes fondamentalement différentes suivant les produits considérés. Dans le cas des engrais azotés, les externalités associées proviennent des différentes formes sous lesquelles l’azote contenu dans les engrais est libéré dans l’environnement : une description pertinente des flux en présence consiste donc à effectuer un bilan d’entrées et de sorties d’azote dans l’agriculture.

**5.2.1. Flux d'azote**

Le problème avec l'azote est double : d'une part, qu'il soit d'origine organique (effluents d'élevage, fumier, purin, lisier, fientes de volailles, etc.) ou synthétique (« engrais azotés » au sens restreint), une partie se transforme en oxydes gazeux dont certains sont des gaz à effet de serre. D'autre part, la forme nitrate est facilement lessivée et peut se retrouver dans les eaux de surface et souterraines.

Les nitrates sont régulièrement accusés de polluer les eaux destinées à la consommation d'une part, et les rivières et même la mer d'autre part. Il n'est donc pas étonnant de voir un service du Ministère de l'écologie produire un énième document sur la pollution par les engrais azotés. Mais cela relève d'un mouvement pavlovien, d'une certaine étroitesse d'esprit, et d'un souci de rester politiquement correct.

**5.3. Principales sources de pollutions des sols par l’industrie**

Les activités industrielles anciennes ayant contaminé les sols sont relativement nombreuses ; se sont notamment les usines à gaz, les pressings, les ateliers de mécanique, les ateliers de traitement de surface, les casses automobiles, les garages automobiles, les imprimeries, les sites ayant abrité des dépôts d’hydrocarbures ou des substances dangereuses, les stations-services, les sites chimiques et pharmaceutiques, mais aussi les anciennes décharges de déchets.

L’origine de la pollution des sols par l’industrie est due à d’anciennes pratiques sommaires d’élimination des déchets, mais aussi à des fuites ou à des épandages de produits chimiques, accidentels ou pas. Il existe aussi autour de certains sites des contaminations dues à des retombées atmosphériques accumulées au cours des années voir des décennies.

La pollution industrielle des sols se caractérise par sa concentration, à savoir des teneurs souvent élevées mais sur une surface réduite.

Les activités industrielles à l’origine de la contamination des sols sont l’industrie des métaux (19,5 %) ; l’industrie chimique et pharmaceutiques (16,9 %), le traitement d’élimination des déchets (15,6 %), l’industrie du pétrole et du gaz naturel (12,9 %) et de la cokéfaction et les usines à gaz (12,0 %).

Les sources de contamination par les métaux sont multiples : les activités minières, la sidérurgie, le transport. On les retrouve dans les piles, les batteries, comme adjuvants dans les peintures et colorants, ainsi que dans les engrais phosphorés (cadmium).

Les secteurs qui contribuent principalement aux pollutions des sols par les dioxines et les furannes (PCDD/F) en 2005 sont l’industrie manufacturière (45 %) et la transformation de l’énergie (43 %).

* **Perturbation des cycles biogéochimiques par l’emploi des fertilisants**

Deux cycles biogéochimiques sont principalement perturbés par l’emploi des fertilisants, il s’agit de l’azote et le phosphore.

La perturbation du cycle de l’azote est importante. Sur un total de 250 à 379.106 t.an-1 d’azote nitrique apporté à la biosphère, 53.106 t.an-1 le sont par les engrais nitrés c’est-à-dire environ une augmentation de 20% de l’azote circulant. Or cet excès de nitrates n’est pas entièrement dénitrifié et on estime qu’environ 40.106 t.an-1 de nitrates sont en surplus, provoquant des ruptures du cycle de l’azote. Les perturbations les plus manifestes se font sentir dans les milieux limniques.

La perturbation du cycle du phosphore est due au fait que sur les apports de phosphore par les roches extraites en vue d’en faire des engrais chimiques, environ 16.106 t.an-1, multiples par trois les apports naturels du phosphore amené chaque année des sols à l’océan pas les eaux continentales. Or l’excès du phosphore, non fixé dans les sols, provoque des phénomènes d’eutrophisation.