

Chapitre 1. Les métaux lourds

1. Définition

Le protocole relatif aux métaux lourds de la Convention de Genève (Convention sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance, 1979) désigne par le terme « Métaux Lourds », les métaux ou, dans certains cas les métalloïdes, et leurs composés qui sont stables et ont une masse volumique supérieure à 4.5 g.cm^{-3} . Quarante et un métaux correspondent à cette définition générale auxquels il faut ajouter cinq métalloïdes (Figure 01). Cependant, l'appellation « métaux lourds » est une appellation courante qui n'a ni fondement scientifique ni application juridique. Aussi, ce terme est le plus souvent utilisé dans le langage courant pour caractériser les éléments ayant une toxicité avérée pour l'Homme. Certains de ces métaux lourds sont des oligo-éléments qui, à faibles doses sont bénéfiques mais qui ont des caractères toxiques à doses trop élevées ; c'est le cas du cuivre (Cu), du zinc (Zn), du manganèse et du sélénium (Se), etc. En revanche, le cadmium (Cd), le plomb (Pb), le mercure (Hg), l'arsenic (As), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le titane (Ti) et l'étain (Sn) sont toxiques au-delà d'une certaine dose dans l'organisme et n'ont pas de caractère indispensable pour le bon fonctionnement de l'organisme.

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	Uun	Uun	Uub						

Lanthanides	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Actinides	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Figure 01. Table périodique des éléments. Le fond grisé correspond aux 41 métaux de masse volumique supérieure à 5 g.cm^{-3} et les éléments en gras indiquent les éléments cités comme toxiques pour l'homme et l'environnement dans divers documents.

2. Sources d'éléments traces métalliques dans l'environnement

Le problème principal avec les ETM comme le plomb, le cadmium, le cuivre et le mercure est qu'ils ne peuvent pas être biodégradés, et donc persistent pendant de longues périodes dans des sols. Leur présence dans les sols peut être naturelle ou anthropogénique (fig. 02).

2.1. Origine naturelle

Les ETM sont naturellement présents dans les sols en faibles quantités. Ils sont en partie libérés lors de l'altération de la roche mère et constituent le pool endogène appelé fond pédogéochimique : concentration naturelle d'une substance dans un horizon de sol, résultant de l'évolution géologique et pédologique, à l'exclusion de tout apport d'origine anthropique.

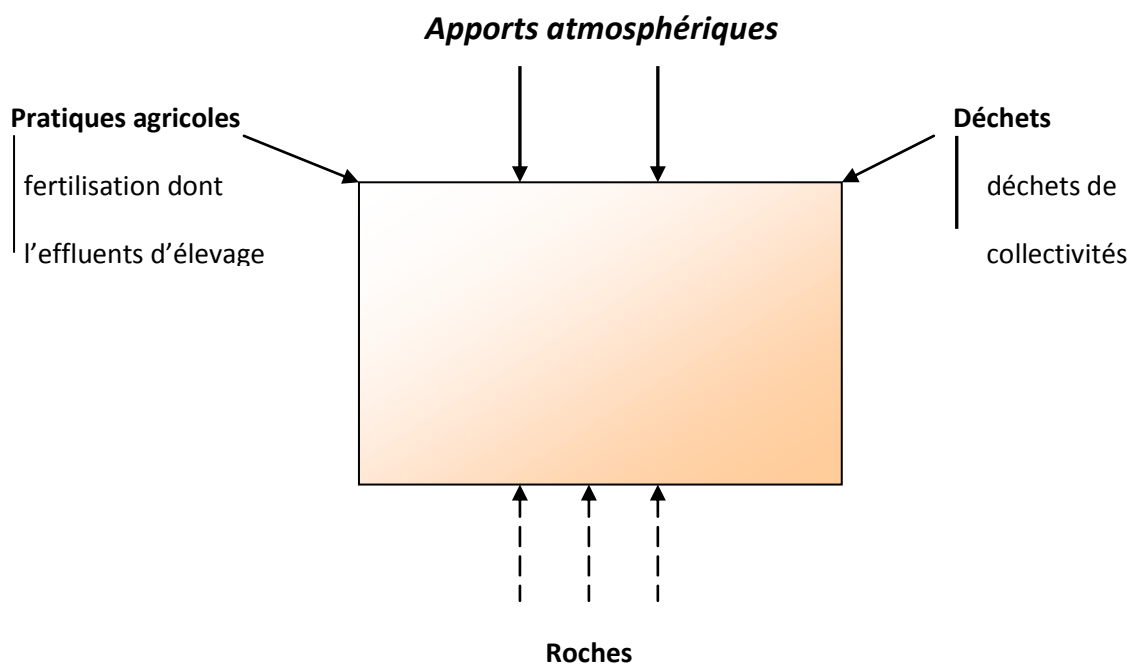


Figure 02. Origine des ETM dans le sol [D'après Robert et Juste, 1999].

Toutefois, des sols situés dans des zones rurales, éloignées de toutes activités industrielles ou anthropiques, actuelles ou passées, peuvent présenter des teneurs en métaux largement supérieures à celles communément rencontrées en absence de contamination. Ces « contaminations naturelles » se rencontrent au niveau d'accidents géologiques ayant entraîné l'affleurement de couches riches en minerais : les processus pédogénétiques ont alors enrichis naturellement les horizons de surface.

Ainsi, les sols formés sur des sables quartzeux renferment des quantités extrêmement faibles d'éléments traces métalliques (moins de 0.05 mg/kg de matière sèche de Cd, moins de 5 mg/kg de matière sèche de Cu), alors que ceux qui se sont formés sur des sédiments calcaires ou marneux, ou des schistes sont plus riches (0.5 à 1 mg/kg de matière sèche de Cd et de 25 à 50 mg/kg de matière sèche de Cu).

2.2. Origine anthropique

Les concentrations mesurées dans les sols sont liées, pour l'essentiel, à des émissions d'origine anthropiques :

♦ **les sources agricoles** correspondent aux impuretés présentes dans les produits phytosanitaires (comme le cuivre dans la bouillie bordelaise ou le plomb dans les pesticides), les lisiers (Cu, Zn, Cd) ou les engrais (Mn dans les scories potassiques, Cd dans les engrais phosphatés). La contamination provient d'apports directs gérés au niveau de la parcelle ou de son environnement proche par les eaux de ruissellement.

♦ **les sources urbaines** regroupent l'épandage des boues de station d'épuration ou des boues de curage (apport de Cr, Cu et Pb), l'incinération de déchets domestiques (Cd) ou le trafic routier (apport de Zn, de Cd lors de la combustion des carburants ou de Pb utilisé comme antidétonant).

♦ **les sources industrielles** émettent dans l'environnement tous les éléments métalliques par les activités métallurgiques telles que le traitement des minerais, l'exploitation minière, le raffinage, l'élaboration d'alliages ou d'acier mais aussi lors de processus industriels plus élaborés comme le recyclage du plomb des batteries ou l'élaboration de peintures. L'essentiel des émissions retombe sous forme de poussières dans un rayon proche du site industriel émetteur (3 à 5 km).

D'une manière plus globale, les sources urbaines et industrielles entraînent une contamination en éléments traces à la fois diffuse, avec des retombées atmosphériques lointaines, et locale par les retombées atmosphériques proches. Ainsi, 95 % du plomb susceptible de contaminer l'environnement provient du trafic routier par l'utilisation de composés organométalliques comme antidétonants dans les moteurs à explosion : cette contamination peut être visible jusqu'à 320m de part et d'autre d'une autoroute, avec un maximum observé sur entre 5 et 20 m.

3. Distribution et impact des ETM sur l'environnement

3.1. Contamination des sols

Les métaux peuvent être soit fixés dans les roches et les sédiments, soit mobiles. Dans le premier cas, les quantités disponibles sont infimes et ils n'ont aucune signification sur l'environnement. Mais lorsque les conditions changent de telle manière que les métaux redeviennent solubles, l'augmentation de la concentration devient alors une menace directe pour l'environnement du fait de l'augmentation de leur disponibilité pour les plantes. En outre, depuis quelques années, les pluies acides augmentent la mobilité des métaux dans le sol et causent donc une augmentation de leur concentration dans les produits agricoles.

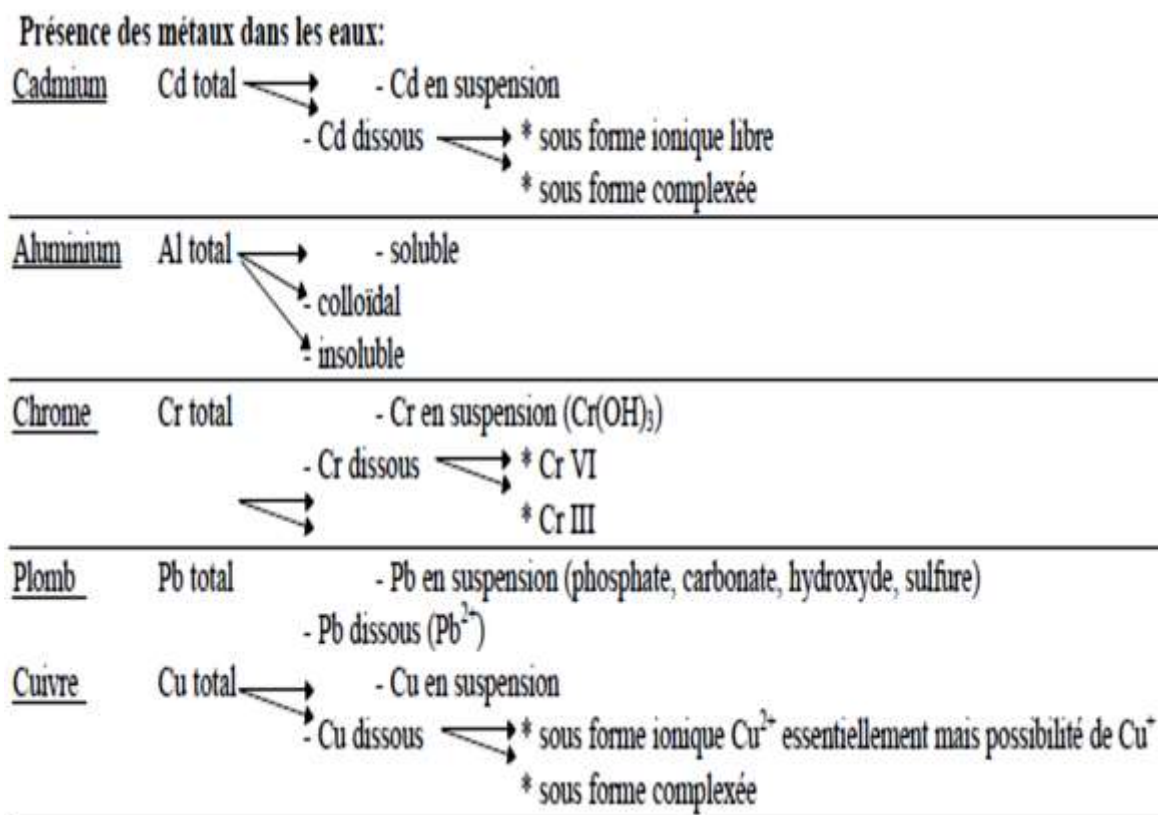
3.2. Eau

Il est assez difficile de prévoir l'évolution des métaux dans l'environnement, car ils peuvent subir un grand nombre de transformations (oxydation, réduction, complexation, etc.), et car cette évolution dépend fortement du milieu. En effet, la migration des métaux lourds vers la nappe phréatique est fonction de nombreux paramètres:

- ✓ la forme chimique initiale du métal,
- ✓ la perméabilité du sol et du sous-sol,
- ✓ la porosité du sol,
- ✓ le pH: dans un milieu acide, les métaux risquent de se solubiliser, alors que dans un milieu alcalin, ils peuvent former des hydroxydes métalliques,
- ✓ l'activité biologique: certains micro-organismes ont la capacité d'ingérer des métaux, alors que d'autres les solubilisent par acidogénèse,
- ✓ le potentiel redox du sol,
- ✓ la composition minéralogique du sol: il peut y avoir formation de composés,
- ✓ la teneur en matières organiques du sol:(complexation des métaux par les substances humiques).

Les principales sources de contamination de l'eau sont les suivantes: les eaux usées domestiques et industrielles, la production agricole, les polluants atmosphériques, les anciennes décharges, l'utilisation de substances dangereuses pour l'eau, la navigation, etc.

Le tableau (01) qui suit indique des différentes formes sous lesquelles on retrouve les métaux dans les eaux.



3.3. Contamination de l'air

Les principales sources de métaux dans l'air sont des sources fixes. De nombreux éléments se trouvent à l'état de traces dans des particules atmosphériques provenant de combustions à haute température, de fusions métallurgiques, des incinérateurs municipaux, des véhicules, etc. Les effets biologiques, physiques et chimiques de ces particules sont fonction de la taille des particules, de leur concentration et de leur composition, le paramètre le plus effectif sur l'environnement étant la taille de ces particules. Dans l'air ambiant, on trouve de nombreux éléments, comme le plomb, le cadmium, le zinc, le cuivre, etc., dont la concentration est d'autant plus élevée que les particules sont fines.

4. Mécanismes de toxicité des ETM

L'exposition à une pollution par les ETM est connue pour provoquer des effets dommageables, à court ou long terme, aux systèmes vivants (écosystèmes terrestres et aquatiques). Cependant, ces effets sont difficilement quantifiables car ils affectent des

systèmes présentant des seuils de vulnérabilité variables. La toxicité des ETM affecte plusieurs niveaux d'organisation, s'étendant de la molécule à l'écosystème.

Chaque niveau organisationnel est influencé par les perturbations se déroulant au niveau inférieur. L'étude des effets d'un polluant est de plus en plus difficile lorsque l'on se rapproche des niveaux organisationnels supérieurs (Figure 3).

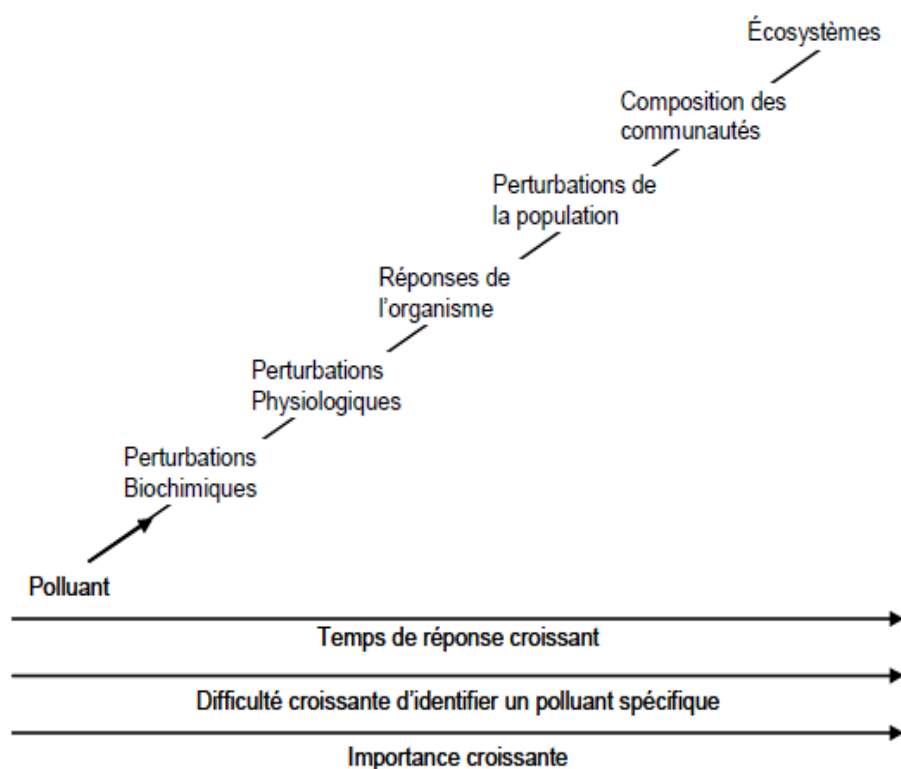


Figure 3. Représentation schématique des liaisons entre les réponses à différents niveaux organisationnels (d'après Walker *et al.*, 1996).

4.1. Impact à l'échelle de l'organisme

4.1.1. Pénétration des ETM dans les organismes

La pénétration des ETM dans les organismes composant la pédofaune peut être causée par l'eau et les surfaces solides avec lesquelles ils entrent en contact, mais elle se fait généralement de manière prépondérante par le biais de la nourriture et de l'eau ingérées. Les ETM présents dans les résidus végétaux ou animaux en décomposition, dans les champignons et les levures représentent la principale voie d'exposition des détritivores à ces polluants. Les organismes fongivores sont particulièrement exposés aux ETM car les champignons accumulent généralement ces éléments à des concentrations au moins 10 fois supérieures à celles du sol environnant.

Les prédateurs peuvent être mis en danger s'ils consomment des organismes ayant déjà accumulé des ETM, et s'ils ne sont pas capables de changer pour une source de nourriture moins contaminée. Quand les polluants ne sont pas dégradés ou rapidement excrétés, comme dans le cas des ETM, leur passage le long de la chaîne trophique peut conduire à de la biomagnification, à quelques ou plusieurs niveaux de la chaîne. Typiquement, les concentrations en ETM dans les organismes augmentent avec l'élévation du niveau trophique, les plus fortes teneurs étant rencontrées chez les prédateurs du haut de la pyramide alimentaire.

a- Effets Biochimiques

L'entrée des ETM dans les cellules des organismes exposés, peut entraîner des perturbations importantes dans leur fonctionnement biochimique. Des atteintes de plusieurs ordres peuvent être observées en fonction de la nature du contaminant :

✓ Effets moléculaires

Les métaux « étrangers » qui entrent dans la cellule peuvent déplacer des métaux essentiels depuis leur site fonctionnel, car leur liaison avec les molécules organiques sont des réactions de complexation et non des liaisons covalentes. Selon ce raisonnement, le mécanisme général de toxicité des ETM impliquera la liaison d'un métal inapproprié à des molécules physiologiquement importantes. La liaison du métal inapproprié pourrait induire des effets délétères de différentes manières :

- En bloquant des groupements fonctionnels essentiels de biomolécules ;
- En déplaçant des métaux essentiels de leurs sites chez les biomolécules ;
- En modifiant la conformation (et donc l'activité) de biomolécules.

✓ Effets génotoxiques

Plusieurs composés cancérigènes sont connus pour causer des dommages à l'ADN. Quand les cellules ayant un ADN endommagé se divisent, des cellules mutantes peuvent être produites, lesquelles suivront une évolution non coordonnée avec les autres cellules de l'organisme. De manière plus générale, les dommages causés sur l'ADN peuvent résulter en une altération ou en une perte d'information génétique, entraînant la production de protéines altérées, et incapables d'assurer leurs fonctions biochimiques.

b-Effets sur les organes

Les métaux qui entrent dans un organisme peuvent être stockés dans des organes particuliers (exemple : hépatopancréas). Ce processus engendre la bioaccumulation des ETM, qui peut facilement être estimée par le calcul d'un facteur de bioconcentration (BC) :

$$BC = \frac{[ETM]_{\text{organisme}}}{[ETM]_{\text{milieu}}}$$

4.2. Impact des ETM à l'échelle des populations

Les changements induits par une contamination aux ETM sur les populations vont principalement affecter le nombre d'individus vivant appartenant à une espèce. Deux types d'évolution peuvent être envisagés en fonction de la nature de la contamination :

a-Contamination aigue (intense, sur une durée limitée)

Une population exposée à une contamination aigue connaîtra le déclin de ses effectifs, parfois jusqu'à l'extinction totale de la population. Si la source de pollution disparaît, et que le milieu redevient viable après un temps variable, des processus de recolonisation peuvent se dérouler. La recolonisation peut également avoir lieu si une espèce plus résistante vient occuper la niche écologique laissée libre par la population disparue.

b-Contamination chronique (peu intense, longue durée)

C'est le cas le plus probablement rencontré en ce qui concerne les sols agricoles. Si l'intensité de la contamination engendre une diminution de l'effectif de la population touchée, mais sans engendrer sa disparition, une résistance peut se développer au sein de la population. La sélection génétique d'individus plus résistants peut conduire une population à s'adapter, et son effectif peut croître de nouveau, même si la source de pollution ne tarit pas. Les gènes sélectionnés sont ceux qui réduisent le taux de mortalité de leur porteur, augmentent sa capacité de reproduction, ou les rend capables de se reproduire plus tôt.

L'intégration de différentes populations dans un écosystème, et l'équilibre formé au sein de celui-ci peuvent également être affectés par la contamination du milieu.

4.3. Impact des ETM sur les communautés et les écosystèmes

Les communautés du sol sont des associations complexes entre une variété de micro et de macro organismes, de minéraux et de matière organique morte. Par exemple, les cycles des nutriments (C, N) au sein du sol sont assurés par l'action conjointe de plusieurs communautés.

Les fonctions du sol (en tant qu'écosystème) sont assurées par de nombreuses populations. Il est évident qu'il existe une certaine redondance dans les communautés du sol au regard des fonctions de celui-ci. L'importance de l'effet de changements dans la biodiversité du sol sur l'efficacité des processus, dépend de la nature des espèces supprimées de la communauté, et du degré avec lequel les espèces restantes peuvent compenser cette suppression. Il apparaît de plus, que les caractéristiques des espèces, les changements dans leur composition, et l'altération des interactions inter-espèces soient le principal facteur biotique de contrôle des fonctions de l'écosystème.

5. Impact sur l'homme

5.1. Exposition de l'homme aux ETMs

Les polluants peuvent atteindre l'homme par passage à travers la peau, ingestion (diffusion par gradient de concentration jusqu'à la circulation sanguine; le plomb et le cadmium peuvent prendre la place du calcium et de la vitamine D en cas de carence) ou par inhalation (les vapeurs peuvent se dissoudre dans les muqueuses du système respiratoire ou arriver dans la circulation sanguine par l'intermédiaire des alvéoles pulmonaires - le mercure et le plomb tétraéthyl peuvent être à l'état vapeur à température ambiante - ; quant aux particules, celles de diamètre supérieur à 20 µm sédimentent mais celle de diamètre compris entre 10 et 20 µm ont un impact sur le naso-pharynx, celle de diamètre compris entre 1 et 5 µm sédimentent dans la trachée, celles de diamètre inférieur à 1 µm atteignent les bronchioles et la circulation sanguine.

5.1.1. Absorption par voie respiratoire

Les métaux lourds dans l'air peuvent se trouver principalement sous deux formes : soit sous forme gazeuse pour certains composés métalliques volatiles ou dont la pression de vapeur saturante est élevée (c'est le cas du mercure même à température ambiante); soit sous forme de composés métalliques solides, déposés sur les très fines particules ou poussières formées lors des phénomènes de combustion (c'est le cas du

plomb sur les particules formées dans les moteurs à explosion et le cas de tous les métaux sur les particules formées dans les incinérateurs d'ordures ménagères). Pour des raisons de thermodynamique et de cinétique, les métaux lourds présents ont en effet tendance à s'accumuler sur les particules solides formées lors des réactions de combustion. Dans les deux cas (gaz ou fines particules), les métaux peuvent pénétrer dans les voies aériennes supérieures lors d'une inhalation normale et, si la taille des particules le permet, atteindre les alvéoles pulmonaires, véritables échangeurs air/sang d'où ils diffusent (gradient de concentration) dans le torrent circulatoire et sont solubilisés dans le sang de la personne exposée. Présents dans la circulation sanguine, les métaux peuvent alors atteindre tous les organes, ce qui fait de la voie respiratoire une voie de contamination très efficace.

5.1.2. Absorption par voie orale

5.1.2.1. La contamination de la chaîne alimentaire et la bioaccumulation

Les métaux lourds contenus dans notre environnement (eau, air, sols) peuvent, par des cycles parfois complexes, se retrouver dans une étape végétale de notre chaîne alimentaire et entraîner une contamination de l'homme par voie orale. Toutefois, un simple passage passif dans notre chaîne alimentaire aurait un impact limité, sans l'existence d'un phénomène très particulier pour les métaux lourds qui est la **bioaccumulation**. C'est donc ce phénomène de bioaccumulation que nous allons décrire brièvement.

La bioaccumulation est un phénomène, existant pour les métaux lourds mais également mis en évidence pour d'autres composés chimiques, qui a pour conséquence une concentration en polluant dans un organisme vivant supérieure à la concentration de ce polluant dans le biotope de l'organisme. Au-delà de cette définition, qui sert à comprendre l'utilité des bio-indicateurs (organismes vivants dont la contamination est révélatrice de la pollution du biotope), dans le cas des métaux lourds, c'est la bioaccumulation qui se transmet tout au long de la chaîne alimentaire qui explique que l'homme puisse être exposé à des quantités dangereuses de métaux lourds par son alimentation (Fig. 04).

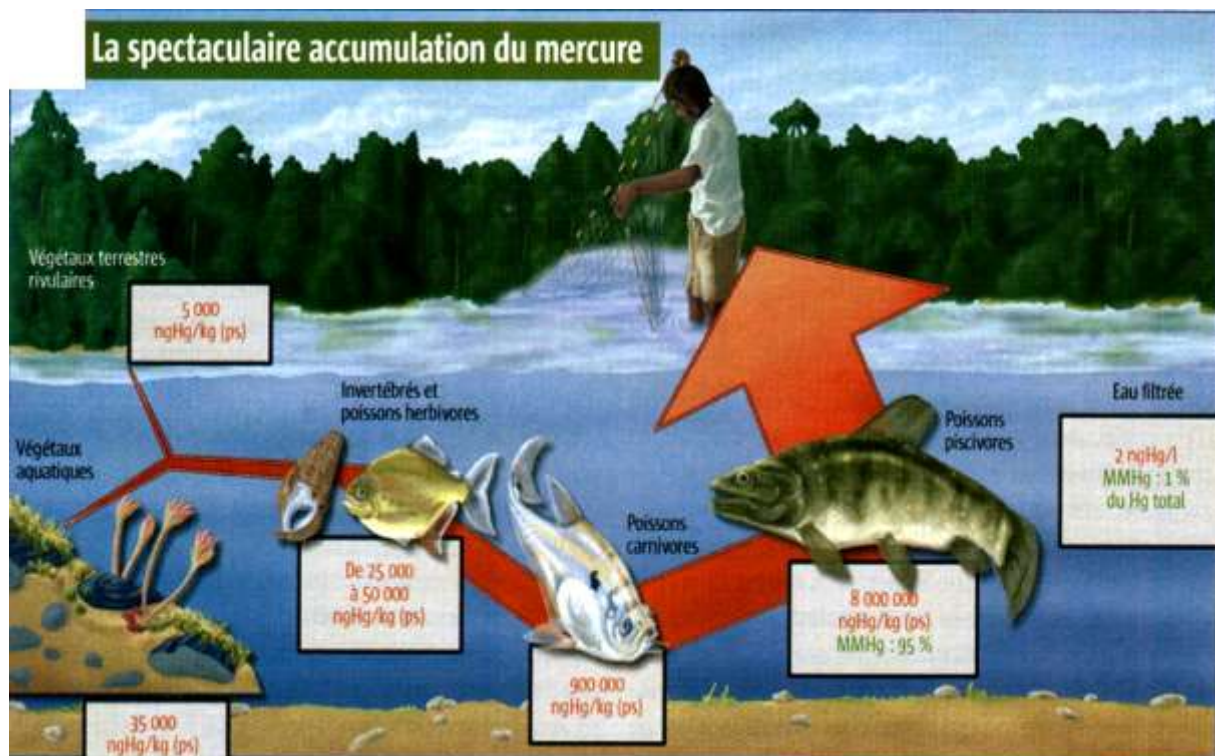


Figure 04. Accumulation du mercure (Hg) dans une chaîne alimentaire.

Cette bioaccumulation est le fait des êtres vivants qui peuvent être végétaux ou animaux. Pour tous les métaux lourds, il est possible de trouver une plante ou un animal appartenant à la chaîne alimentaire de l'homme qui sert d'accumulateur vivant de métaux lourds. A l'inverse, il existe très peu d'espèces capables de détoxifier ou d'éliminer efficacement ces métaux lourds de la chaîne alimentaire. Par conséquent, lorsqu'un bioaccumulateur de métaux lourds apparaît dans la chaîne alimentaire, ses effets sur la teneur finale des aliments se poursuivent jusqu'à l'homme (lorsqu'il n'y a pas intervention de plusieurs bioaccumulateurs, ce qui est souvent le cas). Si on ajoute à cela que l'homme lui-même ne possède pas de métabolisme efficace des métaux lourds susceptible de les éliminer, on comprend comment peut survenir la toxicité chez l'homme (qui devient lui-même un bioaccumulateur).

5.2. La toxicité chez l'homme

Suivant la nature du métal, de la spéciation, de la dose et de la durée de l'exposition, les métaux peuvent avoir des effets toxiques. Pour un certain nombre d'ETM, il est possible de donner une valeur seuil fiable, sous laquelle aucun effet négatif n'est à prévoir. Pour les autres matières, un niveau acceptable d'effets nocifs est défini.

Dans cette partie du cours, seuls le plomb et ses effets toxiques sur la santé humaine seront abordés comme exemple.

5.2.1. Le plomb (Pb)

5.2.1.1. Histoire de l'utilisation du plomb

Le plomb est un métal connu depuis plus de 5000 ans. En effet, par exemple en Egypte des composés de plomb étaient déjà utilisés lors de l'émaillage du travail de poterie, autour de 3000 ans av. JC. La métallurgie du plomb a donc démarré à cette époque. Sous l'empire romain, le plomb était utilisé pour la fabrication de canalisations, la production de monnaie ou bien de la vaisselle, l'oxyde de plomb étant employé comme pigment.

Cependant, depuis les années 1970, le développement de nouvelles technologies ainsi que la prise en compte des problèmes environnementaux et de santé publique ont conduit à la diminution ou à l'arrêt de certaines utilisations du plomb (canalisations, soudure, peinture, pesticides, anti-détonnant dans l'essence...). Actuellement, la consommation de plomb continue de diminuer, sa principale utilisation étant dans les piles et batteries.

5.2.1.2. Voies d'exposition

Les différentes voies de pénétration du plomb sont résumées dans le Tableau 02. Chez l'adulte, la voie de pénétration majoritaire est l'inhalation de particules, alors que chez l'enfant, c'est plutôt l'ingestion par voie orale. La consommation d'eau passant par des canalisations en plomb peut également être responsable de l'ingestion de plomb. Plus rarement, le plomb peut pénétrer par voie cutanée, notamment par contact avec des crèmes contenant du plomb. Enfin, il ne faut pas négliger la consommation de gibiers tués par des balles en plomb, qui représente une source non négligeable de contamination au plomb.

5.2.1.3. Absorption

Les composés du plomb sont surtout absorbés dans les poumons (jusqu'à 70% sous forme d'aérosols) et dans le tube digestif (8%).

Tableau 02. Voie d'exposition au plomb chez l'homme (d'après BRGM, 2004)

Alimentation	Ingestion	Plantes contaminées par des retombées atmosphériques et/ou accumulation depuis le sol
		Gibier
Poussières	Inhalation	Stockage des aliments
		Poussières fines
		Fumées de cigarettes
Peintures	Ingestion Inhalation	Emissions automobiles
		Ecailles de peintures anciennes
		Poussières de peinture lors des travaux de rénovation
Activité professionnelle/ Loisirs	inhalation	Ingestion de sol par les jeunes enfants (pica)
		Métallurgie du plomb
		Fabrication d'accumulateurs et de batteries
		Récupération des métaux
		Soudure
		Décapage des vieilles peintures
		Manipulation de pigments
		Poussières
		Activité de poteries, imprimerie artisanale...

5.2.1.4. Distribution

A la suite de son absorption, le plomb se fixe essentiellement à l'hémoglobine et est ainsi rapidement distribué dans le corps. Chez les européens, les valeurs normales de la teneur en plomb sont en moyenne de : 0.3µg/ml dans le sang, 0.03µg/ml dans les urines, 0.1mg/kg dans le cerveau, 20mg/kg dans les os (Fig. 05 A). Dans les os et les dents, il se forme du phosphate du plomb, peu soluble, ce qui explique qu'il y soit stocké longtemps (dépôts de plomb, demi-vie allant jusqu'à 30 ans).

5.2.1.5. Elimination

Elle a lieu par voie rénale (75%) et par les selles (15%). 10% de la dose de plomb peuvent être éliminés par l'intermédiaire des cheveux, des ongles et de la sueur (Fig. 05 A).

5.2.1.6. Toxicité aiguë

Lors d'une intoxication au plomb, les premiers symptômes cliniques se manifestent à partir d'une plombémie de 1µg/ml et de 0.1µg/ml dans les urines. La toxicité due au Pb se caractérise par l'apparition de coliques saturniques importantes, des signes neurologiques, insomnies, apathie, stupeur, agressivité, atoxie, ralentissement de la conduction nerveuse, monoparésie et monoplégie brachiales, etc (Fig. 05 B).

5.2.1.7. Toxicité chronique

Elle se caractérise par l'apparition d'une anémie, d'un ictère, d'un liseré du au plomb au niveau des gencives (les bords des gencives se colorent en gris-noirâtre), d'une anorexie, de gastralgie, etc. sous l'effet d'une mobilisation spontanée du plomb stocké dans le squelette, des symptômes aigus peuvent également voir le jour (exp : encéphalopathie).

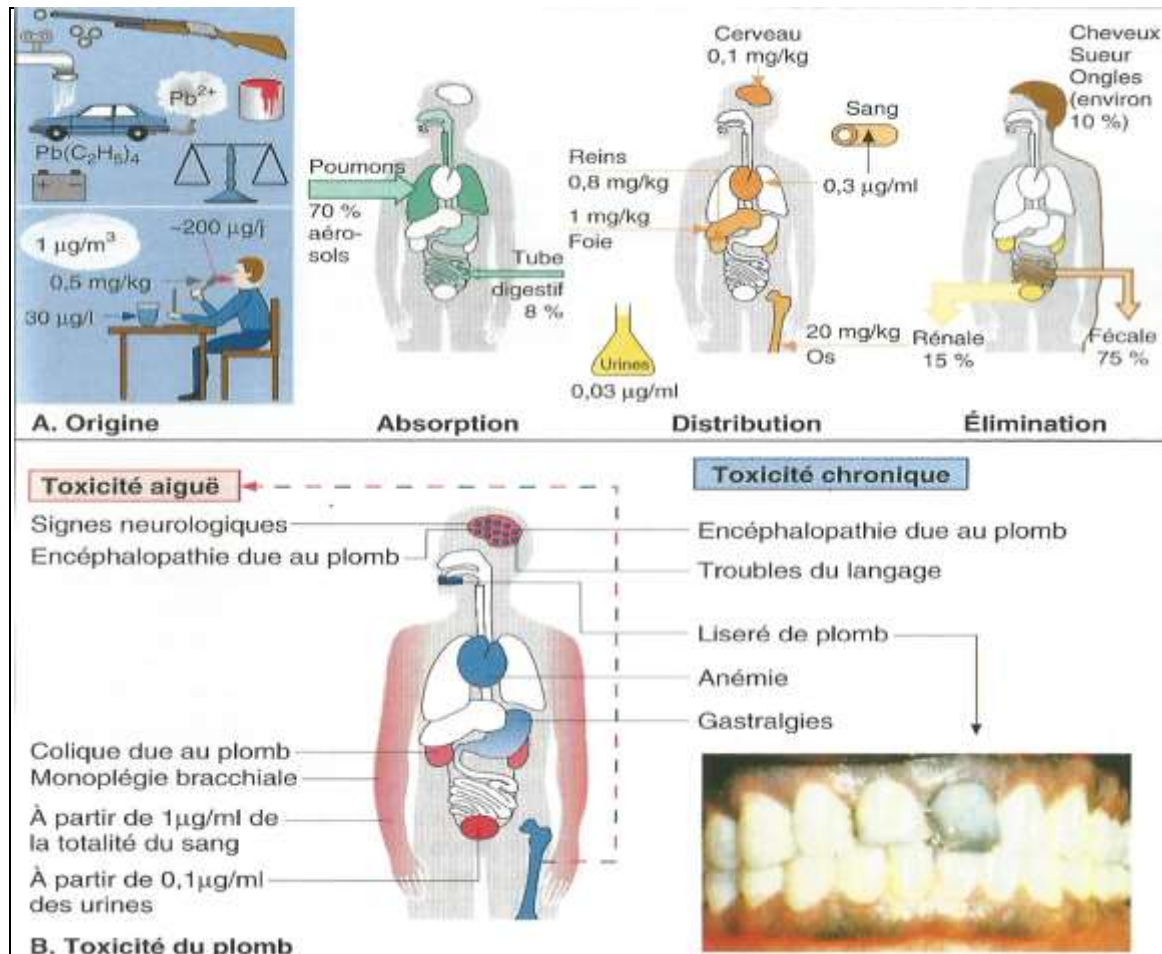


Figure 05. Toxicité du plomb.

Chapitre 2. Les pesticides

1. Qu'est-ce qu'un pesticide ?

Le terme *Pesticide* dérive du mot anglais « Pest » qui désigne tout animal ou plante (virus, bactérie, champignon, ver, mollusque, insecte, rongeur, oiseau et mammifère) susceptibles d'être nuisible à l'homme et à son environnement, et regroupe toute substance destinée pour protéger les cultures contre leurs ennemis ou bien utilisée pour l'assainissement des locaux, matériels et véhicules qui sert pour l'élevage des animaux domestiques ou encore dans la collecte, le transport, le stockage ou la transformation des produits d'origine animale ou végétale.

Les pesticides, appelés aussi produits phytosanitaires, produits agro- pharmaceutiques ou bien même produits antiparasitaires à usage agricole, sont très utilisés actuellement pour :

- Augmenter les rendements des cultures ;
- Limiter les irrégularités de production agricole ;
- Protéger les réserves alimentaires contre les parasites ;
- Lutter contre les vecteurs de maladies ;
- Protéger certaines espèces ; etc.

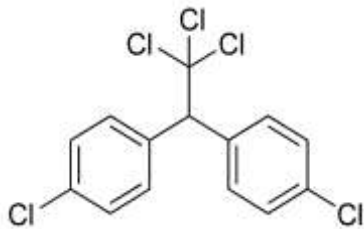
2. Composition des pesticides

Les pesticides se regroupent en trois grands types, qui sont les suivants :

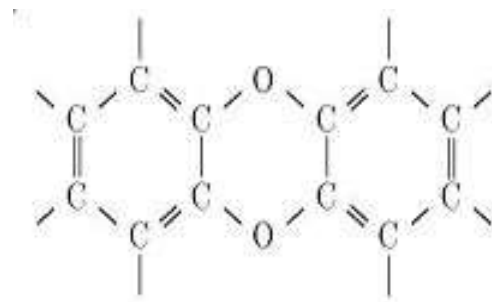
• **Les insecticides:** ce sont des substances actives permettant de tuer les insectes, les larves et leurs œufs, mais aussi les arthropodes (araignées, acariens et tiques). Ils se regroupent en plusieurs catégories comme ; les carbamates, les organophosphorés, les benzoyluorés, les organochlorés ou encore les pyréthrénoïdes de synthèse. Les insecticides ont pour mode d'action par exemple : de perturber les systèmes nerveux ou la respiration cellulaire.

En 1690 on utilisait contre les insectes le tabac. Puis durant la 2^e Guerre Mondiale, utilisé dans tout le Monde, pour lutter contre les insectes, apparaît le DDT

(dichlorodiphényltrichloroéthane) de la familles des organochlorés,issus de l'industrie de chlore d'ou ce nom. Ce sont des polluants organiques persistants. Or on va découvrir que celui ci est peu dégradable et qu'à force de consommer des produits traités avec, il avait un risque pour la santé. C'est pour cela que son utilisation est de nos jours interdit.

DDT :

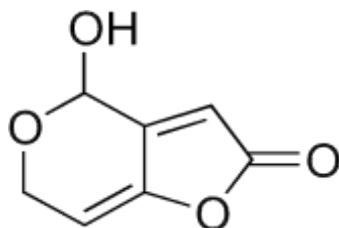
Les herbicides: ce sont des substances actives permettant de combattre les adventices, nom donné aux plantes qui ne sont pas désirées là où elles apparaissent. IL existe plusieurs familles d'herbicides, comme les herbicides minéraux qui peuvent contenir : du cyanure de calcium ($\text{Ca}(\text{CN})_2$), du sulfate de fer (FeSO_4), ou encore du chlorate de sodium (NaClO_3), des herbicides organiques qui sont les plus utilisés dans le marché actuel, des herbicides racinaires, et foliaires. L'un des herbicides le plus dangereux, et l'agent Orange, qui est utilisé lors de la guerre du Vietnam par les Américains, celui-ci contient de la dioxine. L'utilisation ou l'exposition trop courante avec ces produits peuvent avoir une répercussion importante sur la santé.

Dioxine :

Les fongicides: ce sont des substances propre à la destruction ou à limitation du développement des champignons microscopiques, appelés aussi produit phytosanitaire. Les champignons qui se développent sur la plante, peuvent entrainer des pertes au niveau de la culture. De plus, certains d'entre eux peuvent déposer une substance très

dangereuse sur le végétal, comme la patuline, qui est une substance cancérigène, que l'on peut trouver sur un fruit ayant été contaminé.

Patuline :



On distingue plusieurs sorte de fongicides ; ceux qui empêchent les champignons (spores) à la surface de la plante de se développer, aussi appelés produits préventifs. Et ceux qui stoppent leur développement quand ils sont déjà sur la plante, qui sont appelés produits curatifs. Ce n'est que depuis les années 60 que l'on trouve des fongicides étant à la fois curatif et préventif.

3. Problèmes de pollution diffuse et de contamination

L'utilisation des pesticides a permis d'augmenter considérablement les rendements agricoles en réduisant les pertes dues aux ravageurs des cultures, mais cela n'a pas été sans contrepartie. Dans les années 70, des premiers travaux ont montré que les produits pesticides peuvent aussi être transférés vers les eaux de surface et les eaux de profondeur. Ceci enclenche une prise de conscience des pouvoirs publics dans le monde. En 1972, les organochlorés sont interdits d'utilisation aux Etats-Unis et en Europe et une réglementation concernant spécifiquement les produits phytosanitaires est mise en place dans les années 80.

4. Devenir des pesticides dans l'environnement

Malgré un souci croissant de protection de l'environnement, lors de l'utilisation des pesticides, une certaine quantité de ces substances se retrouve dans l'environnement, principalement dans l'air par dérive sous forme de gouttelettes ou sur le sol. Ils peuvent alors être soumis à différents processus (Fig. 1) :

- ✓ la photo-dégradation;
- ✓ la dégradation par le phénomène d'hydrolyse aqueuse ou de biodégradation grâce aux micro-organismes présents dans le sol;

- ✓ la rétention dans le sol jusqu'à la formation de résidus liés (adsorption) (par exemple l'accumulation des fongicides à base de cuivre dans les sols);
- ✓ le transport vers d'autres compartiments environnementaux par des processus physicochimiques (volatilisation) ou via un vecteur, l'eau par lixiviation ou ruissellement ou les particules de sol (désorption).

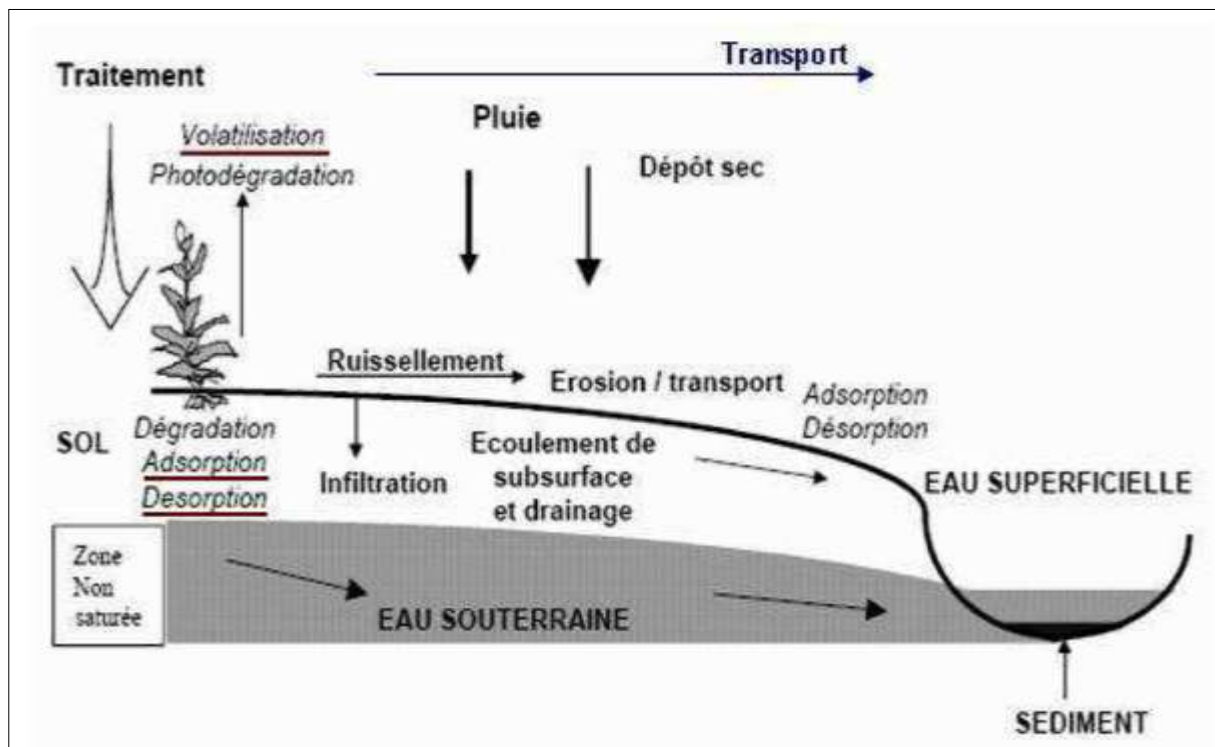


Figure 1. Mécanismes de transferts et de transformations des pesticides dans les milieux de l'environnement

4.1. Contamination des eaux

Une des conséquences environnementales majeures de l'agriculture intensive actuelle est la dégradation de la qualité des eaux. Cette dégradation se traduit, pour les eaux de surface comme pour les eaux souterraines, par une pollution liée à la dissémination des produits phytosanitaires, des engrais minéraux azotés et phosphatés ou encore des effluents d'élevage. Les pesticides peuvent facilement pénétrer dans le sol et les sources d'eau.

La contamination par les pesticides est le plus souvent un phénomène irrégulier. Il est à noter que des pics de concentration sont fréquemment observés dans les quelques heures qui suivent les épisodes pluvieux et que la contamination des eaux de surface est

d'autant plus élevée que la surface des bassins versants est faible. Par ailleurs, dans certaines régions, une part significative de la contamination des eaux peut parfois provenir du dépôt de substances transportées par voie aérienne ou beaucoup plus fréquemment découler d'usages autres qu'agricoles, qu'il s'agisse du désherbage des infrastructures de transport ou industrielles, des parcs et jardins ou bien d'utilisations domestiques.

4.2. Contamination de l'air

a)- Air extérieur

La présence de pesticides est observée dans toutes les phases atmosphériques en concentrations variables dans le temps (avec parfois un caractère saisonnier, en lien avec les périodes d'application) et dans l'espace (selon la proximité des sources). L'air et l'eau pouvaient être contaminés, de manière locale, mais aussi à distance des lieux de traitement. Cette contamination est chronique. Des composés peu volatils ou interdits ont parfois été observés. Dans le cas spécifique de traitements en serre, des concentrations élevées ont pu être observées juste après l'application et malgré une décroissance, ces concentrations peuvent rester à un niveau significatif pendant plusieurs jours après le traitement.

b)- Air intérieur

Les pesticides peuvent contaminer l'air intérieur non seulement suite à leur application ou leur stockage dans les logements mais également du fait du transport des produits utilisés à l'extérieur (agriculture, jardins, parcs) par l'intermédiaire des chaussures, des vêtements, des animaux domestiques ou par l'air. Il existe très peu de programmes de recherche dans le domaine de la qualité de l'air intérieur.

4.3. Contamination des sols

La contamination des sols par différentes substances, dont les pesticides, a été reconnue comme l'une des principales menaces qui pèsent sur les sols. Les pesticides dans les sols peuvent provenir des activités agricoles mais également des activités d'entretien des espaces verts et jardins ou de désherbage des réseaux routiers et ferrés. La vitesse d'infiltration des pesticides dans le sol dépend du sol (humidité, taux de matière organique, pH) et du pesticide. Par ailleurs, il n'existe pas de dispositif

équivalent à ceux relatifs à l'eau et à l'air pour la caractérisation de la contamination des sols par les pesticides.

Il est connu que les insecticides organochlorés sont assez persistants dans l'environnement et certains, bien qu'interdits d'usage peuvent rester présents dans le sol pendant plusieurs années (lindane, alpha-HCH). A l'heure actuelle les insecticides utilisés (organophosphorés, pyréthriinoïdes, carbamates et autres) se dégradent rapidement, par contre les herbicides sont assez persistants dans les sols et leurs produits de dégradation sont souvent stables. La pollution chronique par certaines substances minérales persistantes (cuivre dans les fongicides employés en viticulture) et l'existence éventuelle de "résidus liés" pose la question du risque environnemental à long terme, notamment dans le cas d'une réallocation des terres agricoles à d'autres usages. D'autres sources de contamination des sols proviennent des industries produisant et/ou procédant au stockage des substances phytosanitaires.

5. Les possibles modes d'expositions de l'homme aux pesticides

Les pesticides sont utilisés, non seulement dans l'agriculture, mais aussi par divers autres acteurs (industries, collectivités territoriales) ainsi qu'en usage domestique et vétérinaire. Des problèmes de résidus dans les légumes, les fruits, etc., sont aussi mis en évidence. L'exposition aux pesticides se caractérise donc par une multiplicité des voies d'exposition, ces substances pouvant pénétrer dans l'organisme par contact cutané, par ingestion et par inhalation. La grande variété de produits rend difficile l'évaluation des expositions des populations, qu'il s'agisse de la population exposée professionnellement (agriculteurs ou manipulateurs), ou de la population générale. La figure (2) résume les possibles modes d'exposition de l'environnement et de l'homme aux pesticides.

6. Les facteurs influençant la toxicité des pesticides

- ✓ La dose.
- ✓ Les modalités de l'exposition.
- ✓ Le temps pendant lequel la personne est exposée.
- ✓ Le degré d'absorption.
- ✓ La nature des effets de la matière active et de ses métabolites.
- ✓ L'accumulation et la persistance du produit dans l'organisme.
- ✓ La "sensibilité" personnelle (antécédents, patrimoine génétique, etc.)

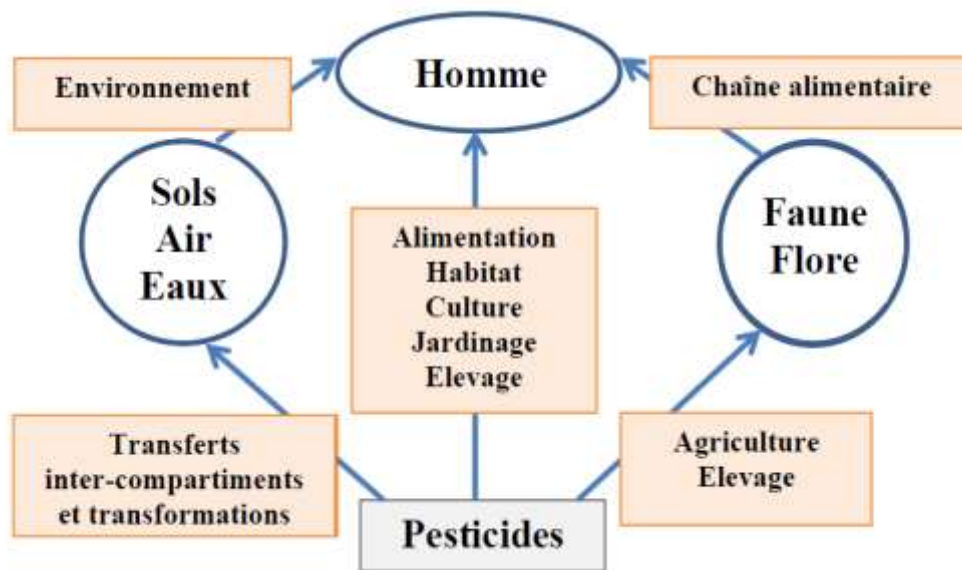


Figure 2. Modes d'exposition de l'homme et des milieux par les pesticides.

7. Toxicité des pesticides

La toxicité des pesticides dépend d'un certain nombre de facteurs parmi lesquels on cite la nature de la formulation (solide, liquide ou gaz), les moyens d'application et d'emploi (pulvérisation, dispersion, etc.) et les conditions d'utilisation. Mais le facteur principal qui conditionne la toxicité de ces produits concerne le mode de pénétration et le devenir du produit dans l'organisme. Le schéma ci-dessous (Figure 03) résume cet aspect toxico-cinétique

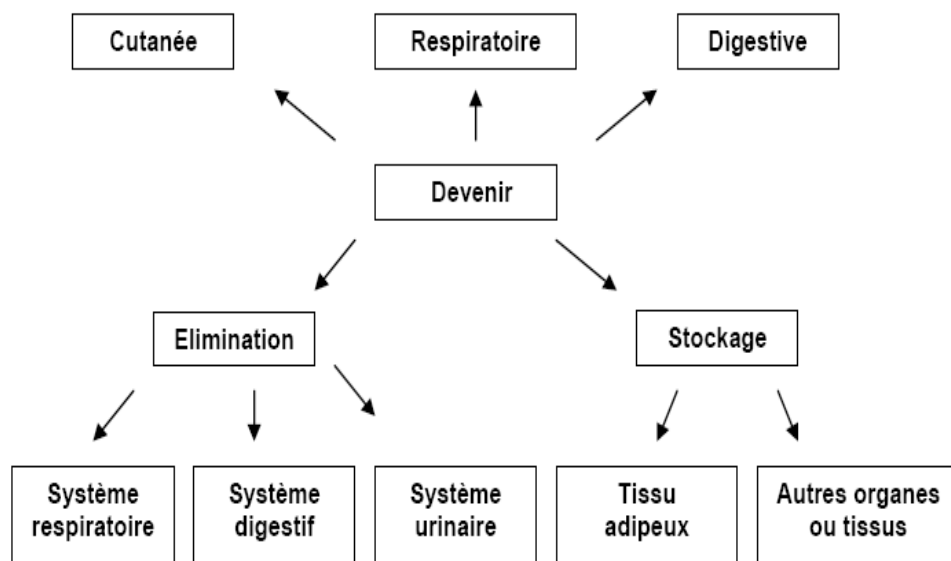


Figure 3. Toxicologie et devenir des pesticides.

- ✓ La pénétration par voie respiratoire est la plus redoutable car l'air pulmonaire et le sang circulant sont directement en contact.
- ✓ La pénétration par voie cutanée dépend de l'affinité du produit pour la barrière cutanée, de l'état de la peau et de la surface exposée.
- ✓ Le mode de pénétration digestive est rare pour des quantités importantes (suicide), mais il est d'une importance capitale pour les ingestions répétées de petites quantités de produits.

Il est classique de distinguer deux formes de toxicité, l'une est dite aiguë, et correspond à l'adsorption massive d'une seule dose de poison, l'autre est dite chronique et survient à la suite d'adsorption de faibles doses de substances nocives durant plusieurs jours, plusieurs mois ou même plusieurs années. Pour les organochlorés, les intoxications chroniques sont beaucoup plus fréquentes.

7.1. Toxicité aiguë

La principale conséquence d'une intoxication aiguë est la mort des organismes contaminés qui ne peut s'évaluer que par un taux ou un coefficient de mortalité. Ce dernier n'est pas un caractère individuel, mais au contraire relatif à l'ensemble de la population. Les symptômes qu'elle provoque sont observés chez l'animal au cours de l'expérimentation en laboratoire et chez l'homme lors d'accident.

Les pesticides induisant cet effet sont extrêmement dangereux. Leur DL50 par voie buccale varie entre 50 et 500 mg/kg de poids corporel et, par voie cutanée, entre 200 et 2000 mg/kg.

7.2. Toxicité chronique

Le phénomène de toxicité chronique résulte de deux causes ; la cumulation et la sommation des effets. Les substances toxiques ingérées ne sont pas éliminées, mais sont accumulés dans l'organisme jusqu'à une dose seuil à partir de laquelle vont apparaître les troubles.

Ce type d'intoxication est souvent lié à la présence de pesticides résiduels dans différents milieux et ne peut être mesuré scientifiquement que plusieurs années après l'homologation des produits. De nombreuses études scientifiques indiquent, malgré quelques réserves, que l'exposition chronique aux pesticides est

susceptible d'augmenter l'incidence de dérèglement des systèmes reproducteur, endocrinien, immunitaire et nerveux. Des souris recevant 0.1 mg/kg/jour d'endosulfan pendant 78 semaines ont été stérilisées par les atteintes des organes sexuels. Chez le rat, 10 mg/kg pendant 15 jours portent atteinte aux canaux séminifères. Certains pesticides peuvent également induire des effets tératogènes ou cancérogènes. Le tableau (01) montre les effets de quelques pesticides.

Tableau 01. Pesticides et Cancer chez l'adulte.

<i>Type d'affection</i>	<i>Nature de l'affection</i>
Leucémie (Cancer du sang)	D'après le registre des cancers de Californie centrale il existe une corrélation entre l'utilisation des herbicides 2,4-D et atrazine et la leucémie chez les hommes d'origine hispanique
Cancers gastro-intestinaux	L'exposition aux pesticides organochlorés est liée à une variété de cancers gastro-intestinaux. Les professionnels exposés au DDT ont jusqu'à 7 fois plus de risque de développer un cancer du pancréas
Cancer de la prostate	De nombreuses études montrent la corrélation entre l'exposition aux pesticides et le cancer de la prostate
Cancer de la thyroïde	Une région du Minnesota où sont largement utilisés les fongicides du type : Maneb, Mancozèbe ... a un taux de cancers de la thyroïde trois fois supérieur à la « normale »

Chapitre 3. Les Hydrocarbures

1. Généralités

Les hydrocarbures sont des substances constituées exclusivement de carbone et d'hydrogène. On inclura toutefois dans ce groupe, des substances dérivées dont la structure chimique, la nomenclature et le comportement, peuvent être assimilés à ceux d'un hydrocarbure. La composition de ces produits pétroliers dépendra à la fois, de leur origine et du type de traitement qu'ils auront subi. Les hydrocarbures présentent une grande importance commerciale : nous les utilisons comme carburants, comme combustibles, comme huiles lubrifiantes, et comme produits de base en synthèse pétrochimique.

2. Classification des hydrocarbures

Compte tenu de la tétravalence de l'atome de carbone et de la monovalence de l'atome d'hydrogène, les hydrocarbures se divisent en trois familles :

- ✓ les hydrocarbures aliphatiques,
- ✓ les hydrocarbures naphténiques,
- ✓ les hydrocarbures aromatiques.

2.1. Les hydrocarbures aliphatiques

Ils sont à chaîne ouverte ou acycliques. Suivant la nature des liaisons entre les atomes de carbone, cette série se divise en deux classes :

2.1.1. Les hydrocarbures aliphatiques saturés

Appelés aussi *n*-alcane ou hydrocarbures paraffiniques, à formule générale C_nH_{2n+2} et dont la longueur de la chaîne varie de 5 à 60 atomes de carbone suivant l'origine du pétrole. Les hydrocarbures aliphatiques saturés, constitue une des classes les plus abondantes (10 à 40 % des hydrocarbures totaux d'un brut pétrolier).

2.1.2. Les hydrocarbures aliphatiques non saturés

Ce sont des alcanes qui ont au minimum un double (C_nH_{2n}) ou une triple liaison (C_nH_{2n-2}). Ils servent à la synthèse des polymères et sont utilisés comme matériel de base dans de nombreuses synthèses chimiques.

2.2. Les hydrocarbures naphténiques

Ils peuvent représenter entre 30 et 50 % des hydrocarbures totaux d'un pétrole brut. Ce sont des composés à chaîne fermée, formant la série cyclique. Grâce à leur grande résistance aux différents phénomènes de dégradation dans le milieu, ils servent également pour le suivi d'une pollution pétrolière.

2.3. Les hydrocarbures aromatiques

En général, les hydrocarbures aromatiques sont moins abondants que les alcanes, et ne représentent que 10 à 30 % des hydrocarbures totaux d'un brut pétrolier. De formule générale C_nH_{2n-6} , ils sont caractérisés par la présence d'au moins un cycle à six atomes de carbone, présentant un système particulier de liaison, qui confère à la molécule une grande stabilité, ainsi que certaines propriétés chimiques spécifiques très recherchées, dans les industries des parfums, des colorants et pharmaceutiques.

3. Etude de cas : les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

3.1. Structures et propriétés chimiques

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont une famille de molécules constituées uniquement de carbone et d'hydrogène dont la structure comprend au moins 2 cycles aromatiques fusionnés, chacun compose de 5 ou 6 atomes de carbone, et pouvant être substitués (Fig. 01)

3. Source d'exposition des populations aux HAP

3.1. Exposition environnementale

3.1.1. L'alimentation

La principale source d'exposition aux HAP dans la population générale est l'alimentation en particulier la consommation de viandes et poissons fumés ou grillés sur le feu, de graisses et huiles végétales ainsi que l'ingestion de produits contaminés par dépôt atmosphérique (végétaux) ou par bioaccumulation (mollusques). En ce qui concerne les céréales, leur teneur en HAP est modérée mais elles sont consommées en grande quantité. L'ingestion quotidienne moyenne de Benzo[a]Pyrène a été estimée entre 50 à 290 ng/adulte d'après des études menées dans 6 pays européens.

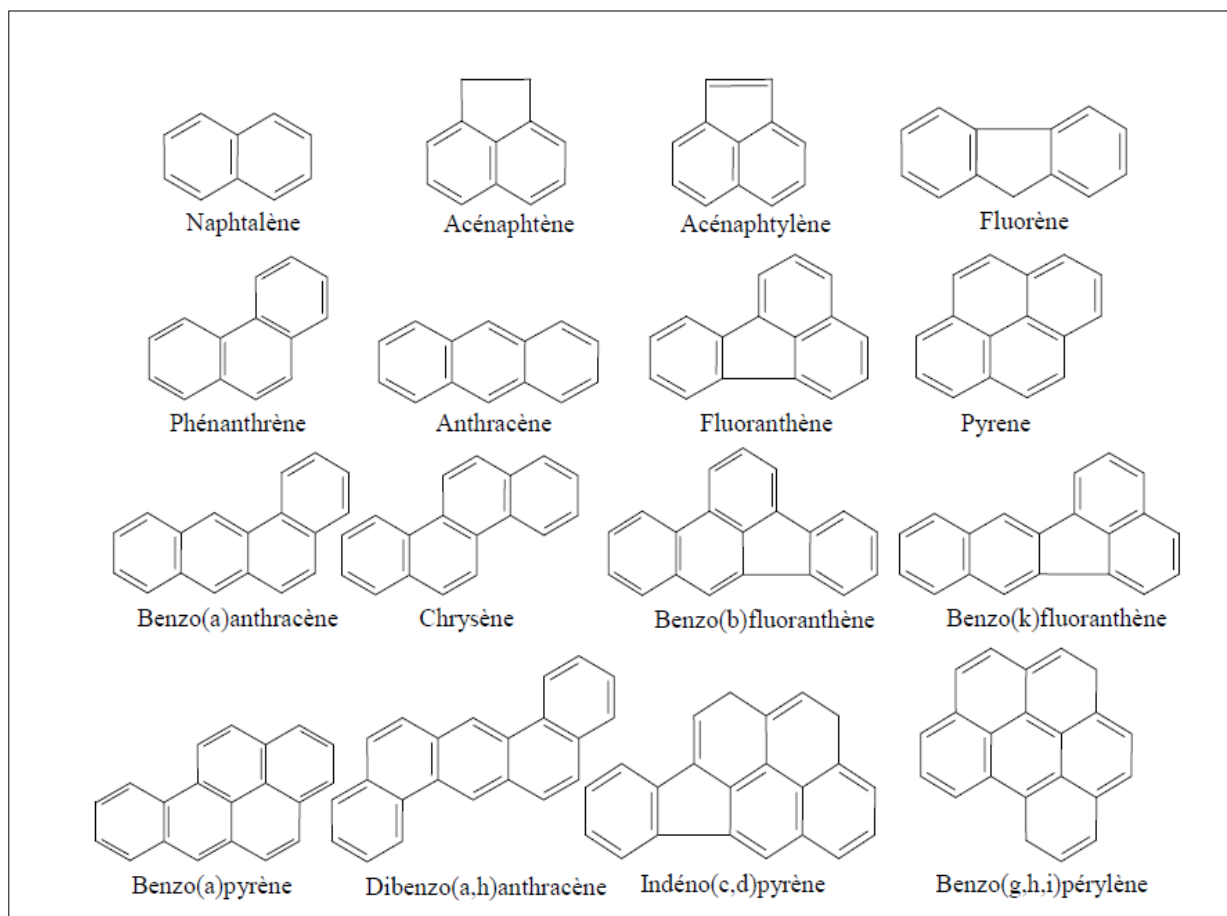


Figure 1. Présentation des 16 HAP classés prioritaires par l'EPA

Chez les sujets non-fumeurs, l'alimentation représente ainsi environ 96 % des expositions totales en HAP.

3.1.2. Tabagisme

La fumée de tabac est une source importante d'HAP dans l'air. On estime qu'une personne fumant 20 cigarettes par jour absorbe en moyenne 105 ng/jour de BaP et un fumeur passif 40 ng/jour.

3.1.3. L'atmosphère

Il existe deux types de sources d'émission des HAP dans l'atmosphère : les sources naturelles (feu de forêt, volcans...) et les sources anthropiques comprenant les émissions industrielles et domestiques rassemblées sous le terme de sources stationnaires ainsi que les émissions liées aux modes de transport qualifiées de sources mobiles.

Au niveau domestique, les HAP sont émis dans les fumées lors de la cuisson par grillade des aliments mais ils sont surtout issus du mode de chauffage et en particulier du chauffage au bois, au fuel ou au charbon des habitations. Contrairement aux sources industrielles celles-ci ne sont pas bien répertoriées et quantifiées.

Les véhicules automobiles sont les sources mobiles les plus importantes d'HAP en milieu urbain. Les gaz d'échappement sont dilués et refroidis dans l'atmosphère; ce qui provoque la condensation d'une partie des hydrocarbures présents. Cette condensation se fait préférentiellement sur les « germes » disponibles : suies et résidus de combustion des minéraux présents dans l'huile et le gazole. La plupart des particules émises ont une taille inférieure à 2.5 μm .

3.1.4. Emission industrielle

Les émissions industrielles comprennent l'ensemble des activités industrielles et les activités d'incinération de déchets.

4. Voie d'absorption et d'élimination des HAP

4.1. Voies d'exposition

Pour la population générale, les voies d'exposition aux HAP sont digestives par l'ingestion d'aliments contaminés et pulmonaire liée au tabagisme et à la pollution atmosphérique, notamment en zone urbaine et péri-industrielle.

En milieu professionnel, la voie d'exposition est essentiellement pulmonaire par l'inhalation d'air contenant de très fortes concentrations en HAP pouvant atteindre le mg/m^3 et des concentrations en Benzo-Pyrène pouvant être parfois 5000 fois plus élevées que dans l'environnement.

Il existe également une absorption cutanée des HAP lors du contact direct avec des produits ou indirects avec des éléments souillés et aussi par retombées atmosphériques de poussières en suspension.

L'exposition est caractérisée par plusieurs paramètres, à savoir: les concentrations atmosphériques des différents HAP, ainsi que la taille des particules. Seules les particules de diamètre inférieur à 10 μm (PM10) peuvent atteindre l'appareil pulmonaire et sont dites particules inhalables.

4.2. Voies d'absorption, distribution et élimination des HAP

Les HAP, très liposolubles, sont absorbés par le poumon, l'intestin et la peau.

-Absorption respiratoire : en fonction de la granulométrie et la composition des particules, il existe une clairance muco-ciliaire qui fait remonter les particules dans l'arbre respiratoire.

Elles sont alors avalées et entrent dans l'organisme par voie digestive. Les particules les plus petites se déposent directement dans le parenchyme pulmonaire profond où une métabolisation a lieu.

-Absorption digestive : rapide, facilité par les aliments riches en graisse.

-Absorption cutanée : chez l'homme, *in vitro*, la dose absorbée est de 1 à 3 % de la dose appliquée. Elle constitue une voie d'entrée importante pour les HAP dans le cas d'expositions professionnelles. Il a été estimé chez des salariés des fours à coke que l'absorption du pyrène par la peau contribuait pour 50 % à la dose interne voire même 90 % chez les salariés utilisant de la créosote pour l'imprégnation du bois.

Les études chez l'animal montrent que les HAP sont rapidement transportés de la voie d'entrée vers d'autres organes via le sang et les vaisseaux lymphatiques. La distribution est rapide, quelle que soit la voie d'entrée et les HAP sont détectés dans pratiquement tous les organes. Un stockage se fait dans le foie, les reins et le tissu adipeux.

Les HAP, très lipophiles peuvent entrer dans les cellules en franchissant la membrane plasmique. Une fois dans la cellule, ils s'associent généralement avec des molécules hydrophobes qui participent à sa distribution à travers les compartiments intracellulaires. La plupart des HAP s'accumule préférentiellement dans la mitochondrie et le noyau.

L'élimination des métabolites des HAP se fait majoritairement par les fèces et les urines.

En ce qui concerne le Benzo-Pyrène et ses métabolites, l'élimination se fait majoritairement par le biais du système hépato-biliaire et par le tractus intestinal. L'excrétion urinaire est une voie mineure.

5. Toxicité des HAP

Les HAP peuvent être à l'origine d'une toxicité aiguë et surtout d'une toxicité chronique.

5.1. Toxicité aiguë

Les HAP contribuent fortement à la réduction du développement de tous les organes et de plus à une pigmentation locale de la peau. L'exposition simultanée aux HAP et aux UV peut provoquer une dermite phototoxique accompagnée de conjonctivite. Cette toxicité est très modérée et aucun cas de décès n'a été rapporté.

Les HAP peuvent être à l'origine d'irritations pulmonaires et d'eczéma et de troubles de l'immunité avec en particulier une diminution des immunoglobulines G et A sériques qui a été rapportée chez des salariés travaillant dans une fonderie.

5.2. Toxicité chronique

Des études épidémiologiques ont montré une association entre des niveaux d'expositions professionnelles élevés aux HAP chez les salariés de certains secteurs industriels (cokerie, fonderie, utilisation de dérivés de houille...) et une augmentation des risques de cancer du poumon, de la vessie et de la peau. Ces cancers figurent dans le tableau des cancers reconnus comme maladies professionnelles en France.

Des effets tératogènes et toxiques pour le fœtus ont été mis en évidence chez l'animal. Chez l'homme, des études sont actuellement en cours.

Chapitre 4. Les produits radioactifs

1. Généralités

Parmi les différents types de pollution du milieu, la pollution radioactive est incontestablement celle qui est la plus mal connue, et cependant c'est aussi celle qui a suscité les mesures de protection à la fois les plus sévères et les plus scientifiquement établies.

Certes, la pollution radioactive a ses propres caractéristiques, mais du point de vue de l'homme et de l'écologie, c'est une pollution parmi les autres et les risques qui en résultent devraient être évalués sur les mêmes bases.

2. Une grande variété de polluants radioactifs émis

Une explosion nucléaire est due à la fission (cassure) d'atomes lourds comme l'uranium 235 (^{235}U) ou le plutonium 239 (^{239}Pu). Elle entraîne un dégagement d'énergie considérable et l'émission de produits de fission et d'activation (Fig. 01).

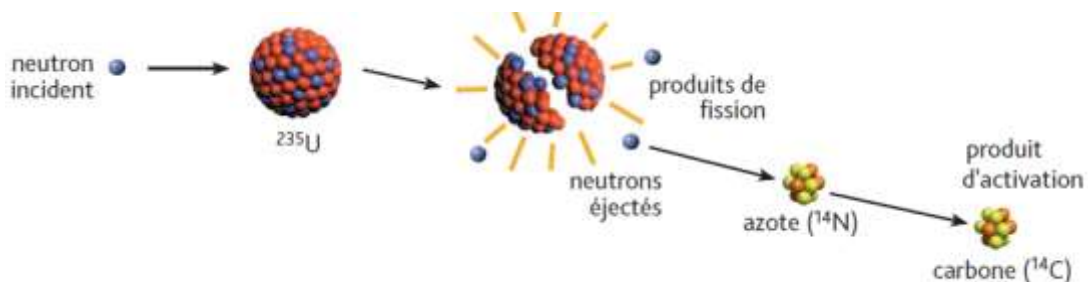


Figure 01. Produits de l'explosion nucléaire.

3. Les sources de pollution radioactive

3.1. Les sources naturelles d'irradiation

De tous temps, les populations humaines ont été soumises à des rayonnements d'origine très variée.

Indépendamment de l'irradiation directe due aux rayons cosmiques et aux rayonnements de matières radioactives contenues dans les roches, l'homme est soumis à une certaine irradiation interne due aux radioéléments d'origine naturelle contenus dans l'air, l'eau de boisson et les aliments, et qui peuvent se déposer dans l'organisme après ingestion ou inhalation.

La plus grande partie de la radioactivité naturelle de l'organisme est due à des éléments des séries de l'uranium et du thorium, au potassium 40 et au carbone 14.

Les débits de dose provenant des rayonnements d'origine naturelle varient d'une région à l'autre dans d'assez larges limites. En moyenne, la dose annuelle est de l'ordre de 100 millirems par an. Elle peut atteindre 200 millirems dans les régions granitiques françaises. Aux Indes et au Brésil, on a observé dans des régions limitées des doses annuelles dépassant 1 .000 millirems, dues à la présence du thorium.

De nombreux facteurs affectent la dose d'irradiation absorbée par l'homme à partir de la radioactivité naturelle. Parmi ces facteurs, citons l'âge, le sexe, les habitudes alimentaires, le site de la résidence, le type d'habitation, le système de chauffage.

La dose d'irradiation externe provenant des rayons cosmiques varie avec l'altitude et la latitude. A La Paz (Bolivie), la dose d'irradiation externe due aux rayons cosmiques atteint quatre fois la valeur moyenne relevée au niveau de la mer. Au cours d'un voyage aérien à 12 .000-13 .000 mètres d'altitude, la dose externe peut atteindre 0,12 millirems par heure, soit 12 fois la dose reçue au niveau de la mer. L'irradiation naturelle est importante à considérer car elle sert de référence pour comparer les doses de rayonnement d'origine artificielle.

3.2. Les sources artificielles de contamination radioactive

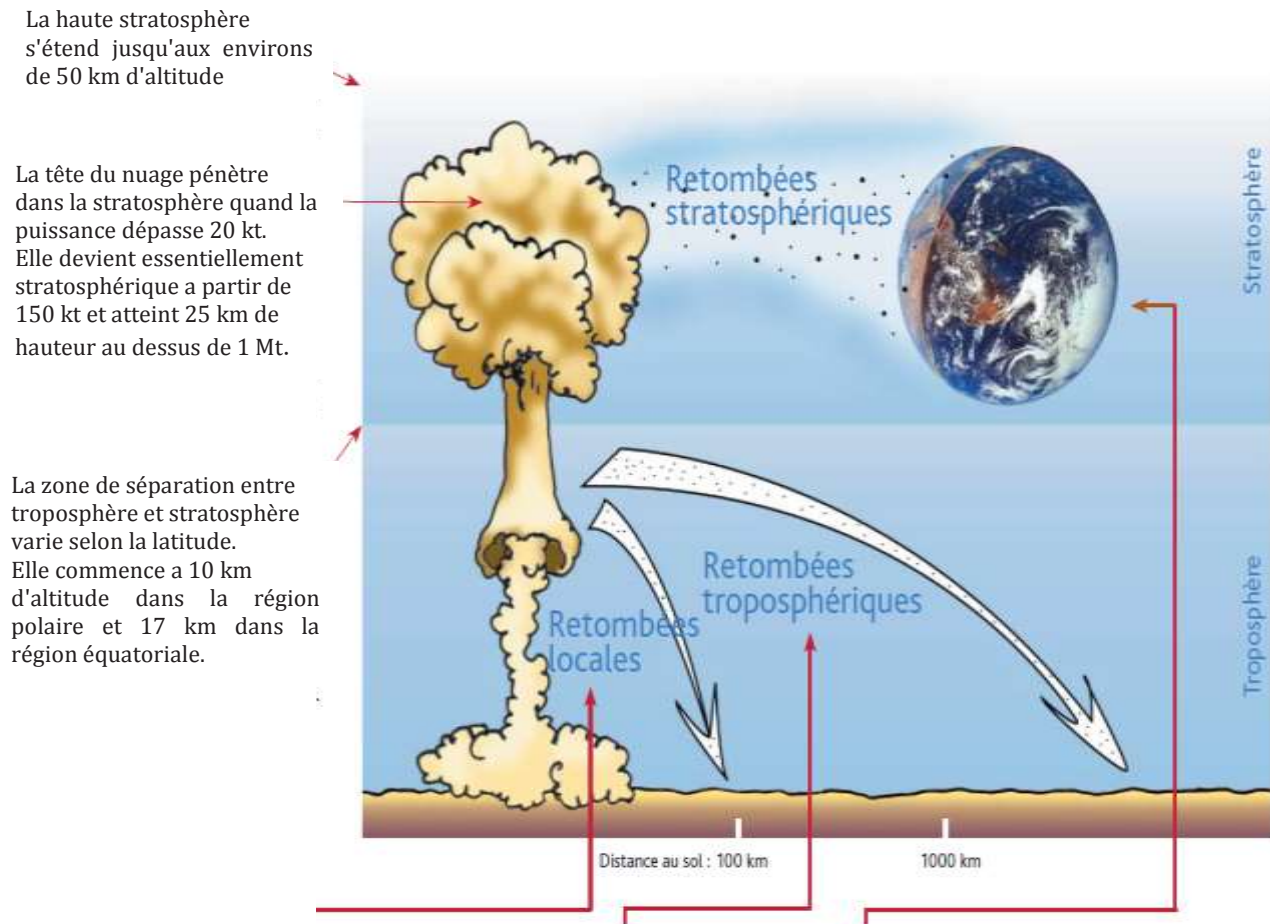
Dans les conditions actuelles, la pollution radioactive du milieu a deux origines principales qui sont les explosions d'armes nucléaires et les déchets radioactifs.

3.2.1. Explosions d'armes nucléaires

Les produits de l'explosion se déposent à la surface de la terre sous forme de retombées, pendant une période qui varie de quelques minutes pour les retombées locales, quelques mois pour les retombées de la troposphère, et plusieurs années pour les matières ayant atteint la stratosphère (Fig. 02).

Les explosions nucléaires qui ont eu lieu au cours des dix dernières années ont imposé des mesures de surveillance très étroites, non seulement au voisinage des explosions, mais sur tous les continents, afin de contrôler le niveau de la radioactivité du dépôt et des différents produits alimentaires.

Les doses d'irradiation dues aux retombées dépendent de la nature et de la quantité des radioéléments qui se trouvent dans le milieu ambiant. Elles dépendent également de facteurs géographiques et humains, tels que le régime alimentaire des populations. C'est en Alaska (Amérique du nord) où se situent les groupes de population les plus contaminés à la suite des explosions nucléaires. L'irradiation est due principalement au césium-137.



Les débris les plus lourds se déposent par gravité dans un rayon de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres autour du site de tir.

Les produits de fission et d'activation libérés dans la troposphère y séjournent jusqu'à 30 jours avant de se déposer sur le sol. Pendant cette période, ils sont transportés sur des milliers de kilomètres par les vents dominants qui les dispersent autour de la latitude d'injection. Compte tenu des délais de transport relativement courts, les retombées dites "troposphériques" contiennent la majeure partie des radionucléides, y compris ceux de période courte (^{131}I , ^{140}Ba , ^{103}Ru , etc.).

Les particules libérées dans la stratosphère redescendent par gravité dans la troposphère pendant une période de 2 à 12 mois dans les régions polaires et de 8 à 24 mois dans les régions équatoriales. Ce délai conduit à une bonne homogénéisation des radionucléides et à la disparition de ceux de période courte. Les retombées dites "stratosphériques" ne concernent donc que les radionucléides de période longue (^{137}Cs , ^{90}Sr , etc.).

Figure 02. Séjour, dispersion et retombées des particules radioactives.

Déposé sur la Toundra, le Cs-137 passe dans les lichens consommés par les rennes qui le fixent dans leurs muscles. Les esquimaux, grands consommateurs de viande de renne, constituent de ce fait le groupe de population critique. On considère que pendant toute la période des tests nucléaires, les doses d'irradiation reçues par ces esquimaux n'ont pas dépassé deux à trois fois la dose due à la radioactivité naturelle.

3.2.2. Les déchets radioactifs

Le fonctionnement des usines atomiques pour la production d'énergie et de radioéléments, aussi bien que l'utilisation de ceux-ci à des fins médicales ou de recherche scientifique aboutissent inévitablement à la production de déchets radioactifs.

Ces déchets apparaissent à tous les stades de production :

- ✓ extraction et traitement des minerais ;
- ✓ préparation des éléments combustibles ;
- ✓ fonctionnement des réacteurs ;
- ✓ traitement des combustibles irradiés.

Les déchets produits dans les deux premiers stades ne comprennent que des radioéléments naturels et leur activité spécifique est habituellement faible.

Les quantités les plus importantes de déchets proviennent du traitement des combustibles irradiés et comprennent presque uniquement des produits de fission.

Les déchets résultant des applications médicales, industrielles et scientifiques des radioéléments contiennent moins de radioactivité, mais la dispersion des établissements pose un problème d'évacuation non négligeable.

Enfin, des accidents peuvent se produire dans les installations provoquant une libération non contrôlée de substances radioactives dans le milieu ambiant.

3.2.3. Accidents nucléaires

Un accident survenant dans une installation nucléaire peut avoir pour conséquence la libération de substances radioactives dans le milieu environnant et, par conséquent, doit être considéré comme une source possible de pollution.

Parmi les accidents ayant entraînés l'exposition du public est celui de Windscale (Grande-Bretagne), survenu en 1957 sur un réacteur de production militaire d'un type

périmé . On a estimé que la dose maximale reçue par inhalation de l'iode-131 par les enfants au voisinage du réacteur a été de 16 rads, ce qui est relativement faible et considéré comme une dose négligeable, lorsqu'il s'agit d'une dose unique. On a cependant surveillé la consommation du lait et des légumes pendant six semaines sur une surface de 500 km².

5. Voies et modalités d'atteinte de l'homme

Les substances radioactives rejetées dans les différents milieux peuvent atteindre l'homme par des voies et selon des modes différents suivant le type de rejets effectués et la nature des radioéléments rejetés (Fig. 3). Suivant le mode d'évacuation des rejets, on distingue :

- ✓ l'évacuation dans l'air
- ✓ l'évacuation dans les cours d'eau et les lacs
- ✓ l'évacuation dans les mers et les océans
- ✓ l'évacuation à la surface du sol.

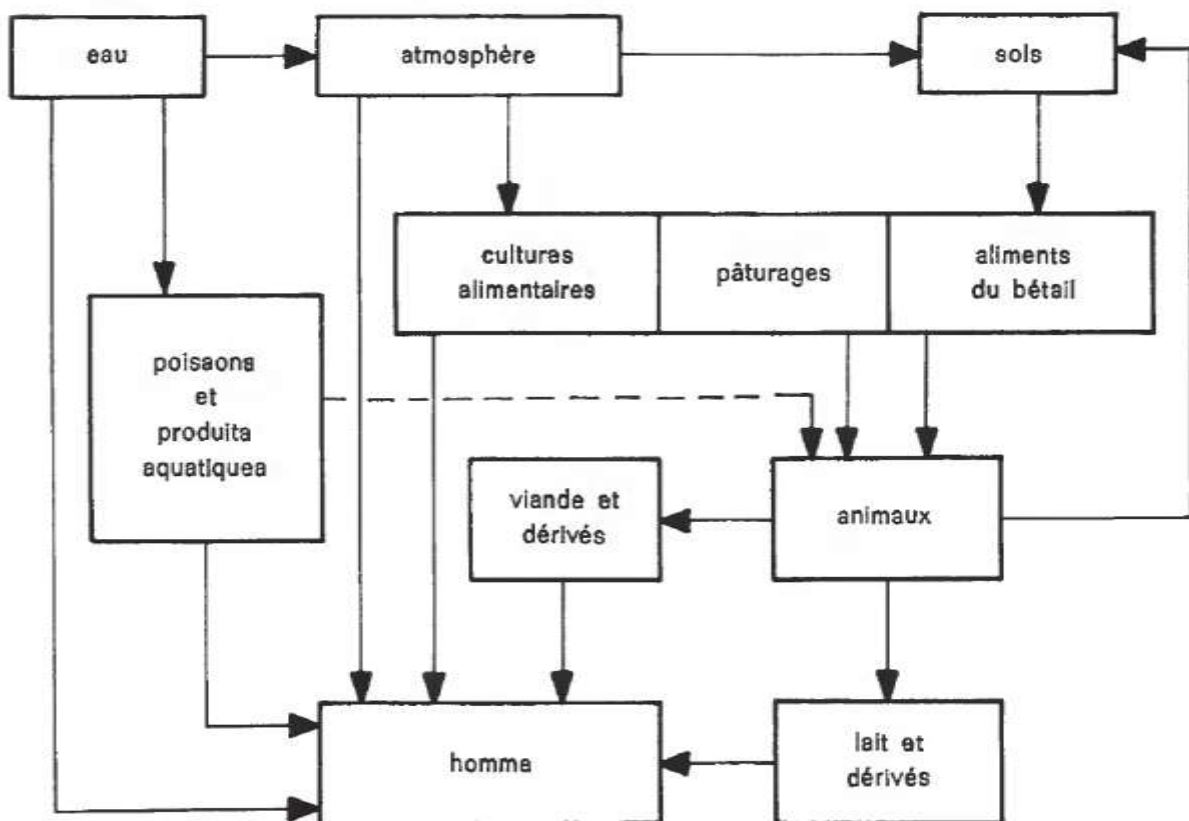


Figure 03. Schéma général des transferts de la contamination radioactive du milieu à l'homme

5.1. Evacuation dans l'air

Les gaz entraînent principalement une irradiation externe de l'organisme. Les aérosols insolubles contaminent l'appareil respiratoire après inhalation. Les aérosols solubles pénètrent dans l'organisme par ingestion alimentaire.

Un exemple classique du transfert de la contamination atmosphérique à l'homme est celui de l'iode-131. Déposé sur l'herbe des pâturages, l'iode-131 est ingéré par les vaches, puis sécrété dans le lait. Le lait est ensuite consommé par les populations, notamment les enfants.

D'une façon générale, c'est le risque alimentaire qui est le plus important à considérer pour une installation en fonctionnement normal. Par contre, dans le cas d'un accident, tous les risques conservent toute leur importance.

5.2. Evacuation dans les cours d'eau et les lacs

Les risques d'irradiation externe que peuvent entraîner les rejets dans les cours d'eau et les lacs sont limités à des circonstances telles que les bains et sports nautiques, qui entraînent un contact plus ou moins prolongé avec les eaux contaminées et les sédiments.

Les risques de contamination interne sont généralement plus importants . Ils sont liés à l'utilisation de l'eau à des fins alimentaires ou agricoles.

En premier lieu, l'eau contaminée peut être ingérée par l'homme sous forme d'eau de boisson, ou d'eau incorporée aux aliments. Mais les transferts de la contamination à l'homme se font également par l'intermédiaire de la chaîne alimentaire, suivant des mécanismes très complexes qui font l'objet de nombreuses études.

L'eau polluée peut en effet contaminer les végétaux et les animaux directement ou indirectement par l'intermédiaire des sédiments et des chaînes alimentaires aquatiques.

Elle peut également être utilisée pour l'irrigation. Il peut y avoir alors fixation immédiate par les végétaux ou contamination indirecte par l'intermédiaire du sol. Les végétaux irrigués peuvent être utilisés à leur tour comme fourrages pour les animaux et il peut en résulter une certaine contamination du lait, de la viande, des œufs.

En ce qui concerne les rejets dans les eaux douces, on peut dire que l'eau de boisson, les cultures vivrières arrosées avec une eau polluée et les poissons, constituent les principaux modes d'exposition du public.

5.3. Evacuation dans le sol

L'évacuation de déchets radioactifs dans le sol est possible, à condition de pouvoir garantir leur isolement. Un certain nombre de possibilités existent, donnant cette garantie. C'est le cas en particulier de l'utilisation de mines de sel abandonnées, ou de certaines formations géologiques imperméables.

On peut également imaginer de construire spécialement des sites artificiels, en béton par exemple. Mais de telles solutions sont toujours très coûteuses.

Dans tous les cas, un certain contrôle des eaux du voisinage est toujours indispensable, pour déceler le moindre indice de pollution.

Chapitre 5. La pollution atmosphérique

1. Généralités

De tous les milieux avec lesquels l'homme est en contact, l'atmosphère est le seul auquel il ne peut se soustraire. C'est aussi le milieu avec lequel il a les échanges les plus importants : chaque individu respire environ 15000 l d'air par jour. L'air est indispensable à la vie, mais il peut aussi avoir des effets nocifs si sa qualité est mauvaise.

L'air est un mélange inodore et incolore de plusieurs gaz de composition constante à l'état pur :

- 78% de di-azote (N_2)
- 21% de di-oxygène (O_2)
- 1% d'argon (Ar)
- 0,04% de CO_2 , ainsi que de gaz rares

L'air contient également des polluants, d'origine naturelle ou anthropique, qui peuvent présenter des risques à plus ou moins longue échéance pour la santé humaine.

Parmi les gaz que contient l'air, c'est l'**oxygène** qui assure le fonctionnement de notre corps. C'est au niveau des alvéoles pulmonaires qu'il gagne le sang. Il est ensuite transporté par les globules rouges vers les différents tissus. Le CO_2 est rejeté vers l'extérieur par la même voie de transport.

2. La pollution atmosphérique

2.1. Définition

Constitue une **pollution atmosphérique**, l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives excessives.

2.2. Sources de pollution

On peut mettre en évidence trois principales sources de pollution **anthropiques** :

- ✓ la circulation automobile,
- ✓ les installations industrielles (activités métallurgiques, pétrochimie, chimie, usine d'incinération...),
- ✓ les installations de combustion (chauffage, production d'énergie...).

Il ne faut cependant pas oublier les sources domestiques et agricoles qui participent elles aussi à la pollution atmosphérique.

La pollution atmosphérique peut avoir une **origine naturelle** : éruption volcanique, incendies spontanés, zones de marais...

2.3. Différents types de polluants

Les polluants primaires qui sont directement émis par les sources et les polluants secondaires (ozone) qui sont issus des réactions chimiques de certains polluants primaires entre eux.

Les principaux polluants primaires émis sont :

- NO _x (NO + NO ₂)	oxydes d'azote
- CO	monoxyde de carbone
- CO ₂	dioxyde de carbone
- PS	Particules en suspension et sédimentables
- COV	composés organiques volatils
- SO ₂	dioxyde de soufre

2.4. Les retombées atmosphériques (Fig.01)

Les polluants se déposent sous la forme :

- de **dépôt sec** : retombées d'aérosols ou de gaz à la surface du sol et du couvert végétal.
- de **dépôt humide** : précipitation de gaz et d'aérosols par les pluies, le brouillard ou la rosée. La pluie entraîne sur son passage des substances solubles ou insolubles en suspension dans l'atmosphère.

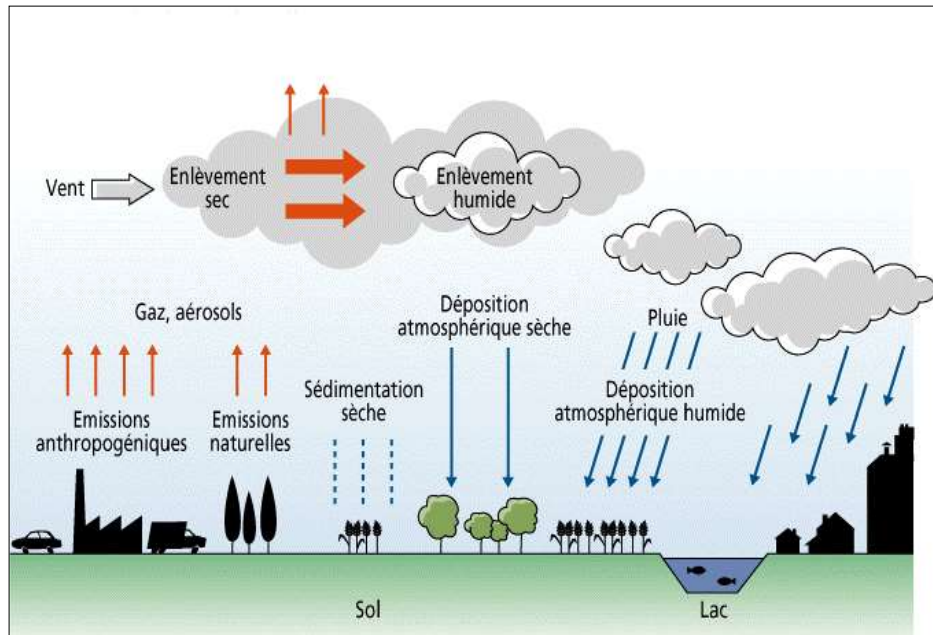


Figure 01. Processus de transfert des polluants atmosphériques

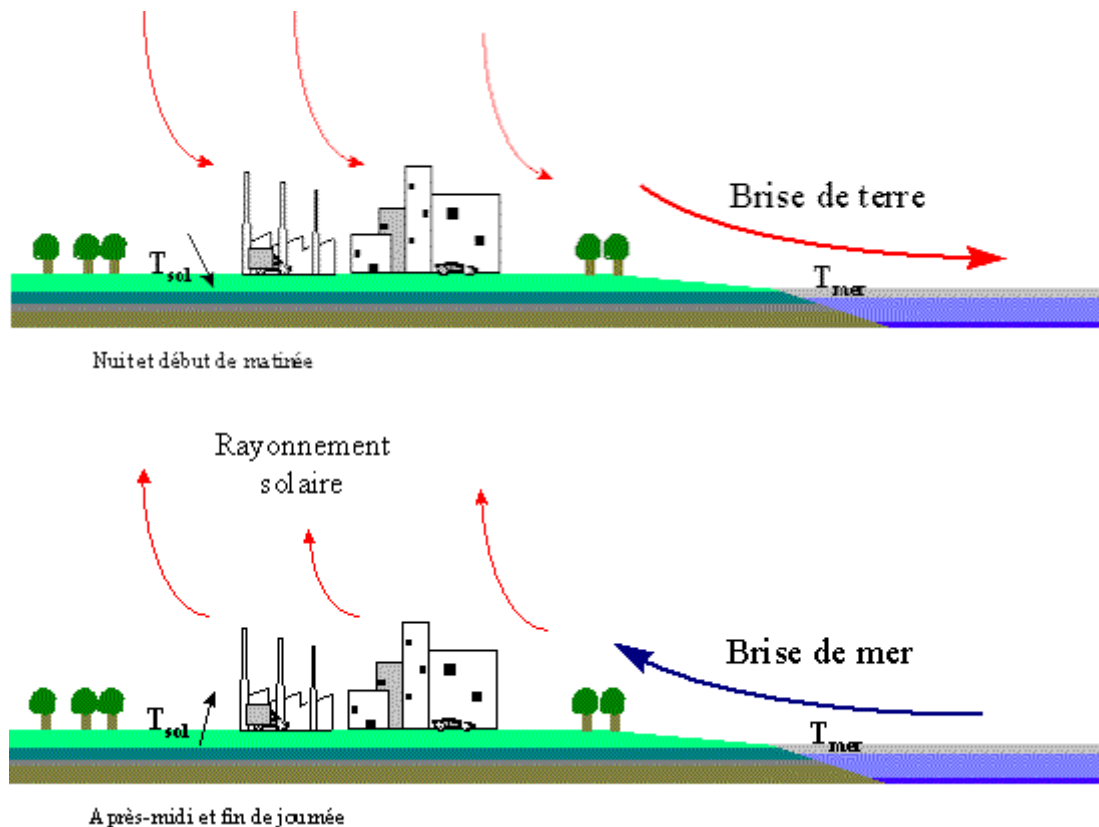
Les particules lourdes ($>10\mu\text{m}$) se déposent en fonction de leur gravité à proximité plus ou moins immédiate de leur émission. Les particules fines restent en suspension dans l'atmosphère et peuvent pénétrer dans l'appareil respiratoire. Elles participent à la formation d'aérosols dans l'air.

2.5. La dispersion des polluants atmosphériques

Les masses d'air sont les principaux vecteurs de circulation des polluants. Leur circulation est sous l'influence :

- *de la topographie* : le **relief** naturel mais aussi celui de l'urbanisation.
- *de la situation géographique* : sous l'effet du rayonnement solaire, la terre se réchauffe plus vite que la mer dans l'après-midi et en fin de journée. Le phénomène de **brise de mer** (ascension de l'air chaud au-dessus des terres, création de zone de convergence au-dessus de la côte) est ainsi créé.

De même, une **brise de terre** est engendrée la nuit et tôt le matin, quand la terre se refroidit plus vite que la mer.



- des conditions météorologiques :

L'ensoleillement : la température agit sur la chimie des éléments. L'action des rayons ultra-violet favorise la pollution d'origine photochimique tandis que le froid diminue la volatilité de certains gaz.

L'humidité : favorise certaines réactions chimiques telles que la formation d'acides comme (HNO_3 - H_2SO_4).

Inversion thermique : En situation normale, la température décroît avec l'altitude et l'air chaud contenant les polluants au niveau du sol, se déplace verticalement. Or, ici le sol est refroidi de façon importante pendant la nuit et la température dans l'atmosphère est supérieure à celle du sol. Ce niveau d'inversion représente une discontinuité thermique qui bloque toute possibilité d'échange vertical. Les polluants se trouvent alors bloqués dans les basses couches de l'atmosphère sous une « couche d'inversion » qui joue le rôle de couvercle thermique (Fig.02).

On parle de **pollution estivale** lorsqu'il y a pollution photochimique, liée à la production d'ozone, et de polluants associés (acide nitreux HNO_2 , PAN (Peroxy Acétyl Nitrate)...). Elle se manifeste souvent lors de périodes anticycloniques où le rayonnement intense du soleil a pour effet d'augmenter le taux de pollution et de conduire à des pics.

La **pollution hivernale** est essentiellement liée à la présence de NO_x , SO_2 et de poussières. Les conditions propices de son apparition sont l'inversion de température ou l'atteinte du point de saturation de certains polluants. Le tout provoquant une condensation en micro-gouttelettes, formant le smog.

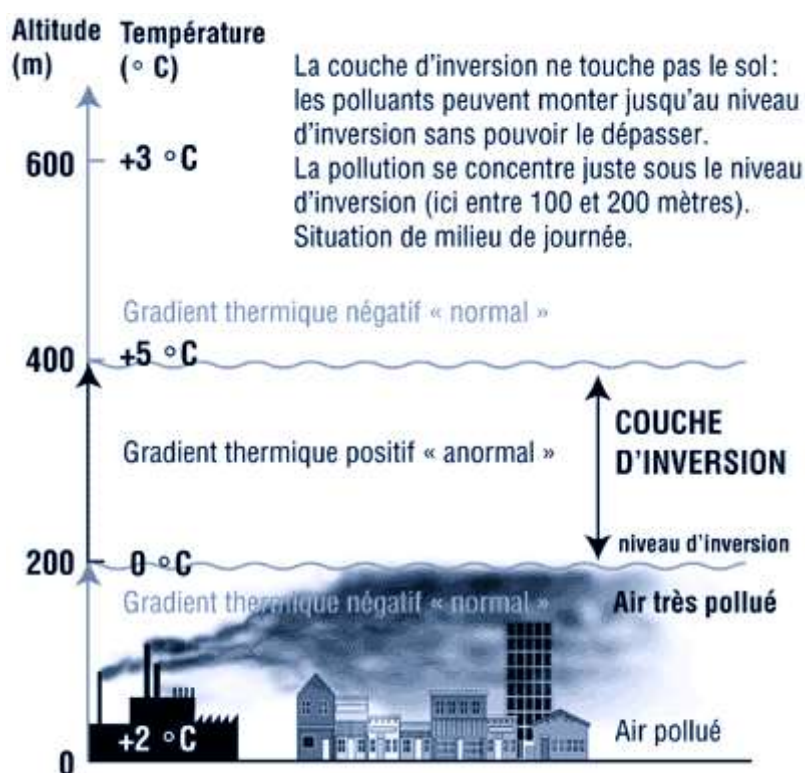


Figure 02. Inversion thermique

3. Les impacts de la pollution atmosphérique

Bien que la concentration des polluants soit très faible dans l'atmosphère, ces substances ont des conséquences préjudiciables sur la santé humaine, l'environnement, les biens matériels.

3.1. Impact sur l'environnement

Les végétaux subissent les agressions de la pollution atmosphérique de manière continue. Les atteintes peuvent être perceptibles et se traduire par des nécroses sur les feuilles, des chloroses (dégradation de la chlorophylle provoquant un jaunissement des feuilles ou des aiguilles qui se détachent par la suite), une réduction du nombre de fleurs ou même par un décollement de l'épiderme foliaire.

Elles peuvent aussi se manifester de façon plus diffuse en exerçant sur la végétation un ralentissement de la photosynthèse et de la croissance, entraînant au niveau des cultures une perte de rendement.

Les végétaux sont aussi attaqués par les dépôts acides au sol qui fragilisent les racines. L'acidification des sols facilite le lessivage d'éléments minéraux qui ne sont plus disponibles par la plante. Elle modifie le recyclage de la matière organique en perturbant les microorganismes du sol. Ces microorganismes participant à la formation d'humus sont détruits et la litière non dégradée s'accumule, diminuant ainsi la vitesse de recyclage des éléments nutritifs minéraux. La végétation s'en retrouve affaiblie et se développe mal.

Les végétaux étant les maillons importants des écosystèmes en tant que producteurs de matière organique, une atteinte de la végétation a des conséquences sur l'ensemble du fonctionnement de l'écosystème, y compris sur les communautés animales.

3.2. Impact sur la santé

Les polluants atmosphériques pénètrent dans l'organisme par 3 voies possibles :

- **les voies respiratoires** : par inhalation (voie principale).

De nombreuses enquêtes épidémiologiques et tests toxicologiques montrent que les atteintes respiratoires (irritation des muqueuses des voies aériennes et augmentation de certaines pathologies comme l'asthme, bronchiolites, allergies...) sont plus fréquentes dans les zones de forte pollution atmosphérique.

La majorité des gaz atteint les alvéoles pulmonaires. Les particules, quant à elles, y pénètrent plus ou moins selon leur taille.

- **la voie digestive** : par ingestion d'aliments contaminés par retombées des polluants

sur le sol et dans l'eau. (dioxines issues de certains processus de combustion que l'on retrouve dans le lait de vaches, pesticides, métaux lourds).

- **les voies cutanées (mode marginal de pénétration)** : concerne quelques toxiques (ex : insecticides) pouvant traverser la peau pour pénétrer dans l'organisme et provoquer des pathologies.

Le tableau (01) et la figure (03) ci-dessous récapitulent les différents types de polluants atmosphériques, leur origine et leurs effets sur la santé.

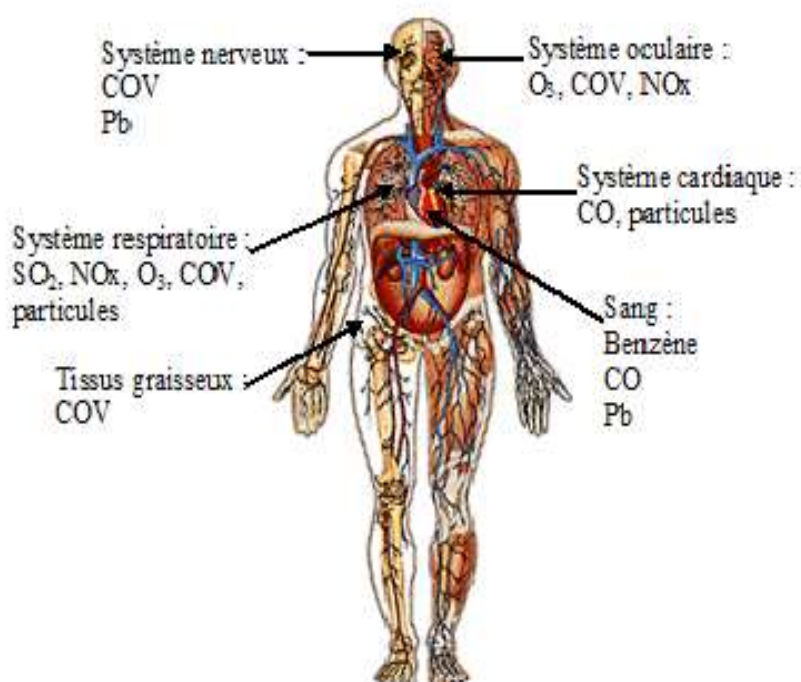


Tableau 01. Les polluants atmosphériques : origine et effets sur la santé

Polluants	Sources principales	Effets sur la santé
CO	Véhicules, installations de combustion, chauffage	Fixation du CO sur l'hémoglobine du sang : Anoxie, céphalées, troubles cardiovasculaires, vertiges mortel à fortes doses) Surtout à l'intérieur des locaux
CO ₂	Véhicules, chauffage, combustions diverses	Troubles pulmonaires
NO _x (NO+NO ₂)	Véhicules, industries	Céphalées, altération des fonctions pulmonaires, inflammation des bronches, irritation oculaire
SO ₂	Chauffage, industries, diverses combustions, diesels	Gaz irritant, inflammation

		pulmonaire
O₃	Polluant secondaire issu de réactions chimiques et photochimiques entre les NOx et les hydrocarbures	Céphalées, toux, irritations oculaires, altération de fonctions pulmonaires
Pb	Véhicules	Troubles sanguins et de la croissance et troubles neurologiques (saturnisme)

Chapitre 6. Les déchets ménagers

1. Qu'est ce qu'un déchet ?

Les déchets peuvent être abordés de manière différente en fonction de leurs propriétés. Leur classification peut notamment se faire en fonction de leur état physique (solide, liquide, gazeux), de leur provenance (déchets ménagers, déchets industriels, déchets agricoles), de leur traitement (primaires, secondaires, ultimes) ou encore de leur dangerosité (déchets inertes, déchets banals, déchets spéciaux). La variété de ces propriétés et des points de vue que l'on peut adopter lorsque l'on s'intéresse aux déchets amène la plupart des auteurs à dire qu'il n'existe pas de définition satisfaisante du déchet. Cette définition est différente en fonction du point de vue réglementaire, environnemental, économique ou encore fonctionnel.

Le mot déchet vient du mot déchoir, du latin « cadere » qui signifie tomber. Au sens de la loi, est considéré comme un déchet « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement, tout bien abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon. »

2. Les grandes catégories des déchets

2.1. Les déchets ménagers

Ce terme regroupe l'ensemble des déchets que nous produisons dans le cadre de notre vie quotidienne et familiale : emballages plastiques, restes de repas, boîtes de conserve, vieux vêtements, etc.

2.2. Les déchets inertes

Comme leur nom l'indique, ces déchets ne bougent pas. Ils ne se décomposent pas et ne se dégradent pas. Ils sont constitués par les gravats de démolition (briques, blocs de béton, terre, panneaux de vitres...).

Ils ne sont pas dangereux, mais compte tenu de leurs volumes et de leurs quantités, représentent des risques de dégradation des paysages.

2.3. Les déchets industriels banals

Il s'agit de déchets d'entreprises qui s'apparentent, par leur nature et leur composition, aux déchets ménagers. La loi considère d'ailleurs qu'ils sont « assimilables

aux déchets ménagers ». Ils peuvent ainsi être collectés et éliminés comme des déchets ménagers. Sont considérés comme des DIB les vieux papiers, les cartons ou les emballages, les plastiques qui sont rejetés en quantités très importantes par les entreprises. Les chutes de bois non traité, les pièces mécaniques d'un moteur, les anciennes moquettes d'un appartement rénové, les invendus d'un marché à plein vent appartiennent aussi à cette catégorie des DIB. Ces déchets ne sont pas dangereux en tant que tels, mais peuvent provoquer des nuisances quand ils sont abandonnés sans précaution particulière et n'importe où.

2.4. Les déchets industriels spéciaux

Ils contiennent des éléments toxiques et représentent un réel danger pour la santé et pour l'environnement. Ce sont par exemple les solvants, les vernis, les colles, les goudrons, les bains d'électrolyses.

Ces déchets font l'objet d'une réglementation particulière et doivent suivre des filières de collecte et de traitement spécifiques.

2.5. Les autres catégories de déchets

Il existe aussi des déchets d'activités agricoles qui proviennent des élevages ou des cultures, des déchets d'activités de soins, dont certains sont considérés comme à risques, ou encore les déchets nucléaires.

3. Etude de cas : les déchets ménagers

Les déchets ménagers sont constitués par les déchets des ménages et autres déchets assimilés, qui peuvent être, eu égard à leurs caractéristiques, collectés et traités par les collectivités locales.

Ils sont divisés en cinq catégories : ordures ménagères, encombrants, déblais et gravats, déchets ménagers spéciaux, autres déchets municipaux (déchets assimilés et déchets produits par les services publics : déchets de voirie et de marché, boues de station d'épuration, déchets verts des espaces publics...).

Ils se décomposent comme suit :

- Déchets putrescibles : 29 %,
- Papiers/cartons : 25 %,

- Verre : 13 %,
- Plastiques : 11 %,
- Métaux : 4 %,
- Autres : 18 %.

3.1. Impact des déchets ménagers sur la santé

Les substances comprises dans les déchets ménagers et susceptibles d'engendrer des nuisances ou des atteintes à la santé sont diverses :

- ✓ Matières organiques végétales et animales servant de support aux organismes qui contribuent à leur dégradation et qui sont susceptibles d'être pathogènes par eux mêmes ou en tant que vecteurs,
- ✓ Les déchets solides peuvent provoquer des blessures et faciliter ainsi la propagation de maladies telles que le tétanos, certaines infections,...,
- ✓ Matières combustibles susceptibles de dégager des substances corrosives ou toxiques dans l'atmosphère ;
- ✓ La faune et la flore peuvent devenir des vecteurs de maladies en cas de mauvaise élimination des déchets dans la nature. Il faut également tenir compte des recycleurs informels présents sur les sites d'élimination de déchets. Ce sont notamment les gens qui fouillent des déchets à la recherche des bouteilles, des boîtes ou du papier qu'ils vont revendre dans les quartiers. Les enfants cherchent toutes sortes de flacons, de seringues, d'aiguilles,...

3.2. Impacts sur l'environnement

3.2.1. Impacts sur l'organisation du paysage et de l'espace

Les déchets en général occupent un espace important qui s'accroît avec le temps et en fonction de la dynamique des populations. Ils ont également un impact sur la qualité visuel du paysage. Ainsi, on remarque que la zone réservée aux déchets n'est plus utilisable par la population et les animaux domestiques. L'affectation d'un terrain au stockage et à l'élimination des déchets exige une gestion particulière de l'espace entre autre la protection du site, l'organisation des voies d'accès, l'aménagement des infrastructures d'élimination, ...

3.2.2. Impacts sur la flore et la faune

Au niveau de la flore : les dépôts des déchets peuvent entraîner la destruction des éléments de la flore qui sont utiles pour la population humaine et les animaux (plantes médicinales, plantes servant comme pâturage, les arbres servant de nichoir des oiseaux, ...) ; certaines plantes peuvent assimiler des substances issues de ces déchets et les transmettre aux animaux qui sont consommés par les humains ; les milieux de dépôt des déchets peuvent devenir des cadres favorables de la prolifération de la flore cryptogamique (champignons) et la population qui viendrait s'en approvisionner peut être infectée par les déchets.

Au niveau de la faune : les déchets peuvent contaminer les animaux qui les fouillent à la recherche de la nourriture, les animaux peuvent se blesser lors du piétinement des éléments tranchants ou pointus dans les lieux de stockage des déchets. Ceci peut être à l'origine des infections pouvant entraîner la mort de certains animaux ; certains déchets peuvent servir de nourriture à certains animaux.

3.2.3. Impacts sur l'air

Les déchets exercent des impacts au niveau de l'air de plusieurs manières : les fumées lors de l'opération de brûler les déchets souvent humides contiennent du monoxyde de carbone, de dioxyde de carbone, dioxines, chlorofluorocarbones (CFC), dont certains d'entre eux sont susceptibles d'affecter la couche d'ozone ou contribuer à l'effet de serre.

Le stockage de déchets entraîne souvent le dégagement d'odeurs désagréables et inconfortables aux populations environnantes. Pour cela, il est important de bien choisir le lieu de stockage et de destruction pour éviter d'affecter l'air dans les zones peuplées.

3.2.4. Impacts sur l'eau

Les conséquences de ce phénomène sont multiples, on peut citer :

- ✓ La turbidité : les eaux chargées en matières en suspension sont très troubles et présentent une turbidité. De ce fait, la lumière est quelque peu bloquée vers la profondeur avec comme conséquence, la diminution de la production primaire,
- ✓ L'eutrophisation : les éléments azote et phosphore contenus dans les déchets ménagers contribuent à l'enrichissement du milieu aquatique en éléments minéraux

et il peut y avoir une efflorescence algale qui conduit à l'eutrophisation du milieu aquatique,

- ✓ La désoxygénation : la présence d'une quantité importante de matière organique dans les eaux d'un cours d'eau va entraîner l'activité bactérienne qui va de plus en plus consommer de l'oxygène. Cette diminution de l'oxygène peut aller au delà des limites et on aura le phénomène de désoxygénation. Ce dernier aura comme conséquence directe une diminution de l'activité photosynthétique, c'est à dire la production primaire.