

Pollution des sols

1. Les sols pollués

1-1- Notion de pollution

La notion de pollution du sol désigne toutes les formes de pollution touchant n'importe quel type de sol (agricole, forestier, urbain...). Un sol pollué devient à son tour une source possible de diffusion directe ou indirecte de polluants dans l'environnement, *via* l'eau, les envois de poussières, émanations gazeuses ou *via* une reconcentration et transfert de polluants par des organismes vivants (bactéries, champignons, plantes à leur tour mangés par des animaux).

Un sol est dit pollué quand il contient un ou plusieurs polluant(s) ou contaminant(s) susceptibles de causer des altérations biologiques, physiques et chimiques.

Le polluant se définit comme un altéragène biologique, physique ou chimique, qui au-delà d'un certain seuil, et parfois dans certaines conditions développe des impacts négatifs sur tout ou partie d'un écosystème ou de l'environnement en général.

Autrement dit, la **pollution du sol** est comprise comme altération du biotope constitué par l'humus (ou tous autres types de sols) par l'introduction de substances toxiques, éventuellement radioactives ou d'organismes pathogènes entraînant une perturbation plus ou moins importante de l'écosystème. Selon le polluant et le contexte, ses impacts seront :

- directs ou indirects
- Immédiats ou différés

Le sol est une ressource très faiblement renouvelable au sens où sa dégradation peut être rapide (quelques années ou décennies) alors qu'il lui faut plusieurs milliers d'années pour se former et se régénérer.

1.2. Degrés de gravité de la pollution

Le degré de gravité de la pollution d'un sol dépend de plusieurs facteurs qui sont :

- la nature du polluant ou perturbateur pour une ou plusieurs espèces, mutagène, cancérigène, plus ou moins dégradable ou non-dégradable) ;
- sa capacité éventuelle à changer ou perturber le fonctionnement d'un écosystème ou de la biosphère ;
- la nature du sol (par exemple un sol faillé, fracturé, drainant ou acide accélèrera la diffusion de métaux, alors qu'un sol homogène, argileux ou basique la freinera) et à sa position biogéographique et à son usage (cultivé, brouté, jardiné...), ainsi qu'à la surface et profondeur touchées ;

- à des problèmes émergents posés avec l'introduction de plus en plus fréquente de propagules d'espèces invasives ou de pathogènes lors de transports de sols.

A l'opposé de la pollution atmosphérique, qui, sévit dans les zones urbaines et industrielles, la pollution des sols affecte de façon plus particulière les zones rurales. Elle résulte de nombreuses causes, en particulier des retombées de polluants atmosphériques, provenant d'industries chimiques et métallurgiques, de l'usage de combustibles fossiles, d'incinérateurs de déchets urbains et surtout de l'usage des produits chimiques en agriculture.

En conclusion, un sol est pollué quand il présente **un risque pérenne, réel** et potentiel pour **la santé humaine et/ou l'environnement**, du fait d'une pollution des milieux résultant d'une activité actuelle ou ancienne.

1.3 Les formes de pollution des sols

En fonction du mode d'arrivée des polluants au sol et de l'étendue des pollutions, on distingue deux grandes formes de pollution :

1.3.1. Pollutions diffuses

Elles impliquent des polluants à faibles concentrations sur de grandes surfaces. Elles proviennent généralement : d'épandages de produits solides ou liquides (emploi d'engrais ou de pesticides en agriculture) ou de retombées atmosphériques d'origine urbaine, industrielle ou routière. Les pollutions diffuses par les pesticides sont les plus étudiées. La dispersion puis l'accumulation de substances dangereuses sur ces sols donne ainsi des « sites uniformément contaminés » (NF ISO 11074-1,1997).

1.3.2. Pollutions ponctuelles ou accidentelles

Elles sont caractérisées par la présence ponctuelle dans les sols et sous-sols de substances dangereuses qui proviennent généralement de déversements, de fuites ou de dépôt de déchets très localisés dans l'espace et dans le temps. Elles sont caractérisées par de fortes concentrations sur une petite surface et donnent naissance à des « sites localement contaminés » (NF ISO 11074 - 1, 1997).

2. Origines des différents types de polluants

2.1 Les polluants d'origine agrochimique

L'agriculture est la première utilisatrice des sols. Aujourd'hui, 12 % des terres émergées dans le monde sont cultivées. Pendant longtemps, les hommes se sont adaptés au sol et aux climats pour cultiver ce dont ils avaient besoin. Les cycles naturels des végétaux étaient respectés, ainsi que la qualité des sols.

Le développement d'une **agriculture plus intensive**, même si elle a permis d'accroître les productions vivrières, **a contribué à la pollution des sols** notamment suite à l'usage intensif

d'engrais de synthèse et de produits phytosanitaires pour lutter contre les mauvaises herbes et les parasites. Des fertilisants minéraux ou organiques (lisiers, boues de station d'épuration) sont alors dispersés à la surface des sols afin d'accroître les rendements des végétaux cultivés. Ces produits contiennent des éléments qui ne sont pas tous dégradables. Ils peuvent donc rester dans le sol ou être entraînés par la pluie vers les nappes phréatiques ou les rivières ou être transférés vers les plantes, les animaux et l'homme.

Les énormes excédents de déchets solides d'origine agricole, produits par les exploitations ou la consommation urbaine des productions végétales et animales ne sont plus recyclés selon les pratiques traditionnelles mais entassés dans des décharges où la fermentation anaérobie produit des composés ammoniacaux ou sulfurés très toxiques entraînant une contamination accrue des sols et des eaux souterraines.

L'utilisation croissante d'engrais et de pesticides, l'épandage de lisier, de boues de station d'épuration et d'autres résidus d'origine urbaine introduit sur les terres agricoles une quantité croissante de polluants organiques et de métaux toxiques qui s'accumulent dans ces dernières et conduisent à une pollution irréversible des sols cultivés qui compromet, à long terme leur fertilité.

Remarque : Seule la transformation en compost de déchets solides riches en matières organiques, associée d'une interdiction de l'usage agricole de substances toxiques non biodégradables peut maintenir la qualité des sols cultivés.

La pollution par les engrais chimiques s'effectue par amendement dans le sol des substances suivantes :

- **Le nitrate** de calcium, le nitrate d'ammonium, le sulfate d'ammonium et l'urée qui sont transformés en nitrates par les bactéries nitrifiantes présentes dans le sol.
- Le chlorure de **potassium**, le nitrate de potassium et la sylvinite constituent les formes usuelles d'apport du potassium
- Les **superphosphates** (les ortho phosphates solubles) sont la principale source d'apport du phosphore
- **Les amendements calciques** (chaux ou calcaires broyés, gypse) dont l'utilisation s'avère nécessaire sur certains sols acides.

Pour des raisons de coût, ces substances ne sont pas purifiées et amènent dans le sol des résidus de nombreux métalloïdes et métaux toxiques et peu mobiles. C'est particulièrement le cas des superphosphates dont le prix de revient de la purification nécessaire pour éliminer ces éléments traces qui les contaminent serait prohibitif.

Tableau des principaux métaux ou métalloïdes constituant les impuretés présentes dans les superphosphates. (D'après Barrow, op.cit.)

Elément	Concentration en masse (en mg.Kg ¹)
Arsenic	2,2 à 12
Cadmium	50 à 170
Chrome	66 à 243
Cobalt	0 à 9
Cuivre	4 à 79
Plomb	7 à 92
Nickel	7 à 32
Sélénium	0 à 4,5
Vanadium	20 à 180
Zinc	50 à 1430

L'agriculture peut aussi aggraver le sol en provoquant son **tassement** par le **passage d'engins de plus en plus lourds**. Le sol compacté ne laisse passer ni l'eau, ni l'air et la faune des recycleurs du sol (par exemple, les vers de terre) diminue.

2.1.1. Les insecticides

Ce sont des pesticides qui tuent les insectes nuisibles aux cultures ou vecteurs d'affections parasitaires, microbiennes ou virales des animaux domestiques et de l'homme.

Les insecticides peuvent être des **minéraux** à base de sels de cuivre (sulfate de cuivre utilisé par exemple pour le traitement de la carie du blé en Suisse, Grande Bretagne et Pays Bas) ; **d'origine végétale** comme les aconites (espèces du genre *Aconitum*) utilisés contre les rongeurs au moyen âge ou les racines de tabac utilisées par les jardiniers en Inde. Ils peuvent être aussi des molécules de synthèse et appartiennent principalement à quatre groupes de composés organiques : Les composés organophosphorés, les organochlorés, les carbamates et les pyréthroides.

- **Les organophosphorés**

Présentent une certaine sélectivité dans leur toxicité pour les insectes à la différence des familles d'insecticides dont le spectre d'action est plus vaste. La plupart d'entre eux sont rapidement biodégradables aussi bien dans les sols que dans les eaux. Les composés organophosphorés les plus connus sont : le parathion, le malathion, le fenthion, le diazinon, la phosalone, etc. Le déméton, le phosdrin ou l'endothion sont doués de **propriétés systémiques**.

Le tetraethyl pyrophosphate (TEPP), le Sarin et la choline sont de puissants poisons neurologiques très toxiques pour les mammifères qui ont été développés en Allemagne et en Angleterre durant la seconde guerre mondiale. **Ils perturbent le système nerveux en inhibant l'enzyme cholinestérase responsable de la transmission de l'influx nerveux.**

- **Les organochlorés**

Produits également durant la deuxième guerre mondiale, se sont avérés très efficace pour contrôler les parasites responsables de la malaria (paludisme) et de la fièvre jaune. Ce sont des dérivés obtenus par chloration de divers hydrocarbures aromatiques ou hétérocycliques (terpènes par exemple). Ils appartiennent à 3 familles de composés chimiques : la famille du DDT (dichlorodiphényl trichloroethane), la famille du BHC (hexachlorure de benzène) dont le principal représentant est le Lindane et la famille des Cyclopentadiènes chlorés (Aldrine, dieldrine et heptachlorure). Ces substances sont très peu solubles, très stables et très faiblement biodégradables, ce qui leur permet de demeurer dans les sols qu'ils ont contaminés pendant des décennies pouvant donner des phénomènes de bioamplification tant dans les réseaux trophiques terrestres qu'aquatiques.

Du fait de leur persistance dans l'environnement et de l'élimination des insectes utiles en même temps que les nuisible, les organochlorés ont été interdits dans la plupart des pays développés. Leur dangerosité est également due au fait qu'ils s'accumulent dans les lipides des organismes animaux exposés. Ils sont aujourd'hui encore largement utilisés dans le tiers monde.

- **Les carbamates**

Sont des dérivés de l'acide N-méthyl carbamique dont 40 composés sont commercialisés et utilisés comme insecticides, molluscides ou nématocides. Ils ont une action toxique identique à celle des organophosphorés. Un empoisonnement léger par les carbamates peut affecter le comportement, réduire la concentration et la faculté d'apprentissage. La déficience en protéines peut accentuer ces symptômes. Les carbamates les plus utilisés sont le carbaryl (ou sevin) contre les insectes phylophages (chenilles et coléoptères défoliateurs) et l'aldicarbe (ou temik) qui est un puissant insecticide systémique utilisé contre les ravageurs suceurs de sève, en particulier les pucerons de la pomme de terre et la mouche de la betterave.

- **Les pyréthroides**

Ce sont des insecticides synthétiques chimiquement analogues aux pyréthrines naturelles dont ils dérivent. Ils renferment un noyau cyclopropane, stabilisé par l'addition de radicaux halogénés, chlorés, bromés (deltaméthrine) ou fluorés (cyperméthrine, cyfluthrine).

Les pyréthroides ont une stabilité moléculaire nettement plus grande que les pyréthrines naturelles qui sont facilement hydrolysables et photolabiles .Ils sont dénués de toxicité par contact ou ingestion chez les vertébrés à sang chaud dont ils ne traversent pas la barrière

intestinale, et présentent en conséquence un grand progrès par suite de la quasi-absence de toxicité pour les oiseaux et les mammifères.

Les pyréthroïdes possèdent néanmoins une très forte toxicité pour les poissons et autres vertébrés à sang froid.

Remarque : Les nicotiniques est une famille d'insecticides relativement récente qui est constituée d'homologues synthétiques de la nicotine, comme **l'imidaclopride** ayant des propriétés systémiques. Cette molécule est suspectée à l'origine de mortalités massives des ouvrières d'abeilles domestiques (perte du sens de l'orientation). Elle a été interdite d'usage en 2004 de même que **le fipronil** du groupe des phényl-pyrazolidines.

2.1.2. Les herbicides

Ils permettent d'éliminer les mauvaises herbes dénommées par les agronomes plantes adventices des cultures.

L'utilisation des herbicides est controversée par les environnementalistes du fait qu'ils ne soient pas toujours très sélectifs. Les principaux herbicides sont :

- **Les organochlorés**

Correspondent principalement **aux dérivés de l'acide phénoxyacétique** tels que le 2,4-D, le 2, 4,5-T et le MCPA et autres **auxinomimétiques**. Un mélange du 2,4-D et du 2, 4,5-T, connu sous le nom de « l'agent orange » a été utilisé comme défoliant dans la guerre des USA contre le Vietnam causant des dommages environnementaux persistants jusqu'à nos jours telle que la destruction de forêts tropicales, de mangroves et de cultures ainsi que leur impact sur les peuplements animaux et les populations humaines exposées (Orians et Pfeifer, 1970, Westing et al, 1984).

- **Les organophosphorés**

Connus sous les noms de **glyphosates**, ils agissent par contact foliaire sur les plantes et sont très largement utilisés en agriculture du fait de leur efficacité contre les parasites et qu'ils ne soient pas carcinogènes. Ils sont rapidement dégradables dans les sols : Ils ont une demi-vie de 60 jours dans les sols et sont excrétés inchangés par les mammifères (très faible toxicité). Ils sont utilisés comme substituts pour éliminer la végétation indésirables dans les milieux fragiles compte tenu de leur très faible potentiel de pollution.

- **Les dérivés de l'acide carbamique**

Dont plusieurs sont des dérivés de l'urée (urées substituées) tels que le monuron, le diuron, le fluometuron, le linuron et le chlorobromuron. Ils sont assez solubles dans l'eau et persistent dans les sols. Ils ont un puissant pouvoir herbicide sur les Phanérogames et une extraordinaire toxicité pour le phytoplancton à des concentrations aussi faible que 0,1ppb.

- **Les dérivés de la triazine**

Qui sont des composés dans lesquels 3 atomes d'azote sont incorporés dans le noyau benzénique et qui comportent un atome de chlore. Les dérivés tels que l'atrazine et la simazine sont très utilisés contre les parasites et sont de « toxicité faible » pour les mammifères. Cependant leur solubilité dans l'eau est augmentée par l'action enzymatique des organismes du sol entraînant la substitution du chlore par les groupes hydroxyle, les rendant susceptibles d'être plus dangereux. Pour cette raison ils sont interdits en Angleterre et dans plusieurs pays d'Europe. Ce groupe d'herbicides agit par absorption racinaire. Ils inhibent la photosynthèse par blocage de la du cycle de Calvin de sorte que la plante est incapable de fixer le CO₂.

- **Les dérivés de la pyridine**

Dans lesquels un atome d'azote est incorporé dans le noyau benzénique. Exemple : le bipyridyl qui est connu sous le nom de *Diquat*.

- **Les composés aliphatiques**

Dont le plus connu est le *dalapon* qui est très efficace contre le chiendent. Il a l'avantage de ne pas être persistant dans le sol.

2.1.3. Les fongicides

Les fongicides sont des composés chimiques inorganiques et organiques de structures comparables aux pesticides précédents. Les principaux fongicides sont :

- **Les composés métalliques organiques et inorganiques**

Dont les principaux exemples sont la « mixture de Bordeaux (mélange de cuivre et de composés organiques) et les organotins qui sont des composés organométalliques.

- **Les dérivés de l'acide phtalique**

Dont l'exemple est le phtalimide qui est le produit de la réaction de l'acide phtalique avec l'ammoniaque. Il a plusieurs noms commerciaux dont *Captan* et *Captafol*.

- **Les benzimidazoles**

Sont des composés apparentés à l'histamine, connue pour sa faculté de réduction de la pression artérielle, qui sont utilisés comme fongicides systémiques.

2.2. Les polluants d'origine urbaine

2.2.1. Les émissions liées à la production d'énergie

Les émissions des usines productrices d'énergie à partir du charbon comportent des CO_x, NO_x, SO_x, UO_x et des hydrocarbures aromatiques polycycliques. Les usines productrices d'énergie nucléaire émettent de la radioactivité sous forme de radionucléides (surtout ¹³⁴Cs et ¹³⁷Cs). Ceux-ci peuvent être introduits dans le sol sous forme de dépôts secs par suite des retombées atmosphériques ou sous forme humide après leur dissolution dans les précipitations.

Les cendres émises par les usines de production d'énergie à partir du charbon, contiennent également des composés radioactifs et divers métaux lourds.

Un grand nombre de polluants organiques et inorganiques des sols, comprenant le goudron, du cyanure, du combustible, des oxydes de fer, du cadmium, du plomb, des sulfates et des sulfures sont retrouvés dans les stations-services abandonnées.

2.2.2. Les polluants du sol provenant des transports

Les émissions des véhicules et des avions (surtout les supersoniques) sont les principales responsables de la pollution des sols par les transports (particulièrement les véhicules utilisant le Diésel). Elles comportent des oxydes de carbone, d'azote et de soufre, quelques métaux lourds et des micropolluants organiques très cancérigènes tels que les PAHs (hydrocarbures aromatiques polycycliques), les PCDDs (polychlorodibenzo-*p*-dioxin, appelé « dioxine »), les substances chimiques les plus toxiques synthétisées par l'homme et les PCDFs (polychlorodibenzofuran), le plus mortel des produits chimiques produits par l'homme. Ces polluants peuvent être introduits dans le sol à la suite des dépositions des particules sur celui-ci ou lessivés à partir de l'atmosphère.

A la suite d'oxydations par des réactions photochimiques dans l'atmosphère, les oxydes de soufre et d'azote réagissent avec les gouttes d'eau de l'air pour donner des acides forts tels que le HNO_3 et H_2SO_4 . Ces acides produisent, par réaction avec des bases (existant dans l'atmosphère principalement sous forme de particules), un mélange de radicaux basiques et acides qui en se dissolvant dans les pluies forment ce que l'on appelle des « pluies acides » qui sont à l'origine de grandes dégradations des sols et des plantes.

2.2.4. Les polluants provenant des déchets et des boues d'épuration.

Les déchets et les boues d'épurations sont parmi les plus importants polluants des sols d'origine urbaine.

L'élimination des déchets par enfouissement ou par incinération peut entraîner la concentration des métaux lourds dans les sols, tels que le cadmium, le cuivre, le plomb, le tin et le zinc, et les micropolluants organiques. La contamination du sol se fait soit directement à partir des lessivages provenant des décharges, enfouies ou non, qui peuvent polluer le sol ou la nappe phréatique, soit à partir des retombées des cendres d'incinération.

Les boues d'épuration posent également un grand problème du fait de la difficulté de leur élimination. La plupart du temps, elles sont utilisées comme fertilisants des sols en raison de leur richesse en éléments minéraux majeurs et en matière organique. Cependant, elles contiennent souvent des concentrations élevées de métaux lourds (surtout cadmium) qui peuvent s'accumuler

dans le sol et être prélevés par les cultures. Elles sont également souvent très riches en micropolluants organiques.

2.3. Les polluants d'origine industrielle

Ils se présentent sous forme de déchets solides, liquides et gazeux. Ils englobent les rejets des différentes industries telles que : les métallurgies, les industries minières et chimiques, les hydrocarbures volatils ou peu volatils (kérosène, fioul, gasoil), les cyanures, les métaux lourds (arsenic, chrome, cuivre, cadmium, mercure, nickel, plomb, zinc...), les Polluants organiques comme les PolyChloroBiphényles (PCB) et les hydrocarbures Aromatiques Polycycliques et les produits phytosanitaires (pesticides, herbicides).

Les risques de pollution des sols peuvent être très divers et sont liés généralement à plusieurs facteurs tels que l'existence d'une source de pollution dangereuse, les possibilités de transfert dans l'air, l'eau des nappes phréatiques, dans les cultures... et qui sont liées à la mobilité des substances polluantes. Au contact des constituants du sol par exemple, des combinaisons chimiques plus ou moins dangereuses de polluants peuvent se former.

3. Les polluants organiques dans le sol

La pollution par les polluants organiques est principalement perçue au travers de leur présence dans les eaux et dans les denrées alimentaires. Ceci se traduit par l'établissement de normes concernant les teneurs maximales de résidus dans les aliments destinés à l'alimentation ou de normes de potabilité des eaux (CEE 1976 ; CEE 1980). Pour les sols, il existe uniquement des valeurs guides pour la gestion des sites contaminés (Gourdon et al., 1994). Cette contrainte de normes incite à prendre en compte le problème de la pollution dans l'intégralité du parcours du polluant incriminé, des sources aux cibles en passant par les voies de transfert.

La plupart des polluants arrivent au sol où leur comportement va définir leur dispersion vers d'autres compartiments de l'environnement. L'origine et la nature de la source de pollution conditionnent la nature et la concentration du polluant, et la quantité du polluant arrivant à une cible donnée dépendra des phénomènes de transport impliqués dans la dispersion de celui-ci.

Le sol occupe donc une position centrale dans la régulation des pollutions avec un double rôle d'épuration et de stockage des polluants. Il va pouvoir participer à leur élimination, ou diminuer ou retarder leurs impacts sur les différentes cibles. La contamination des sols par les polluants organiques est souvent raisonnée par rapport à une cible, mais il est important de ne pas oublier que les sols sont en soi une ressource difficilement renouvelable, et où la présence de polluants organiques peut affecter leur utilisation dans une perspective de développement durable.

3.1. Nature et origine des polluants organiques des sols:

Les polluants organiques des sols proviennent principalement de trois ensembles d'activités : industrielles (production d'énergie, métallurgie, industries chimiques,...), urbaines (transports, gestion et traitement des déchets), agricoles (utilisation de produits phytosanitaires). Mis à part les hydrocarbures aliphatiques et les pesticides, d'autres polluants organiques sont largement rencontrés dans les sols. Ils peuvent être regroupés dans les quatre familles suivantes :

- **Les polychlorobiphényles (PCB)**

Leur production industrielle débuta dans les années 50 pour leur utilisation dans les encres d'imprimerie et dans les peintures. Ils ont été très utilisés comme isolants dans les transformateurs électriques fluides en raison de leur stabilité thermique élevée. On les trouve dans la plupart des boues de stations d'épuration à des concentrations moyennes comprises entre 0,4 et 10 mg de PCB/Kg (Beck et al., 1995). En France, un décret de Février 1987 interdit le rejet de PCB dans les sols et les eaux. Cependant l'élimination des anciens résidus demeure un problème non entièrement résolu.

- **les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)**

Ils sont formés par la fusion de plusieurs noyaux benzéniques. Ces composés peuvent être d'origine naturelle et sont présents dans des combustibles fossiles à des concentrations importantes. Ils se forment à des températures entre 500 et 700 °C, par exemple, lors de la cokéfaction du charbon et la pyrolyse ou la mauvaise combustion des combustibles fossiles ou du bois. Les incendies de forêts constituent une source importante en milieu non urbain.

Les principales sources en milieu urbain sont l'émission lors de la combustion des carburants de véhicules ou du chauffage. Ils peuvent être trouvés dans des concentrations élevées dans des cendres d'incinérateurs et de certaines centrales thermiques. Les HAP constituent une pollution de fond de la plupart des boues de station d'épuration, dont la concentration moyenne se situe entre 15 et 50 mg HAP/Kg (Jauzein et al., 1995 ; Beck et al., 1995). Le Benzo [a] pyrène (BaP) est particulièrement toxique avec une action carcinogène à des doses très faibles.

- **Les polychlorodibenzo-dioxines (PCDD) et polychlorodibenzo-furanes (PCDF)**

Ils sont produits par des phénomènes thermiques principalement à partir de produits organiques chlorés, par exemple, lors d'incinération de déchets ou de résidus organiques et de la combustion d'essences plombées utilisant des dégrasants chlorés. Des PCDD et PCDF sont aussi formés au cours du blanchissement du papier par chloration ou de la synthèse de composés organiques avec des impuretés à base de chlorophénols. D'autres sources d'émissions sont les fonderies et les installations sidérurgiques.

- **Les composés organiques volatils (COV)**

Ce sont des composés contenant du carbone et présentent une pression de vapeur supérieure à 0,13 KPa. Ils sont présents dans des combustibles et des fumées, mais les principales sources de pollution sont liées à des activités industrielles (dégraissage de pièces métalliques dans la métallurgie, fabrication d'adhésifs, nettoyage de vêtements). Les hydrocarbures aliphatiques halogénés de faible poids moléculaire utilisés comme solvants en particulier, le 1,1,1-trichloroéthane, le tétrachloroéthylène et le trichloroéthylène sont des polluants particulièrement répandus. Les composés aromatiques volatils tels que le benzène, le toluène, les éthylbenzènes et les xylènes (BTEX), sont des composés caractéristiques des pollutions par des combustibles dérivés du pétrole.

3.2. Caractéristiques des polluants organiques

Les polluants organiques sont des molécules complexes qui, contrairement aux autres polluants ne sont pas définies en fonction de leur nature chimique mais à partir de quatre propriétés qui sont :

- ❖ **La toxicité** : elles ont un ou plusieurs impacts prouvés sur la santé humaine.
- ❖ **La persistance dans l'environnement** : Ces molécules sont résistantes aux dégradations biologiques naturelles.
- ❖ **Le transport longue distance.**
- ❖ **La bioaccumulation** dans les tissus vivants et une augmentation des concentrations le long de la chaîne alimentaire (bioamplification).

Le coefficient de partage octanol-water (**K_{ow} : C_{oct}/C_{eau}**) renseigne sur le degré d'hydrophobie (lipophilie), donc le caractère hydrophile ou lipophile d'une molécule. Il rend compte de la tendance d'une molécule à s'accumuler dans les membranes biologiques des organismes vivants. S'il est élevé le risque de bioaccumulation est important. Trois notions sont importantes à retenir :

- **Bioconcentration (BCF)**

Absorption d'un contaminant à partir du milieu ambiant et son accumulation à une concentration supérieure à celle de l'environnement (concentration directe par voie aqueuse, branchies et épiderme). Les contaminants relâchés dans l'environnement par les humains, comme des pesticides ou des métaux lourds, peuvent s'accumuler dans les écosystèmes et nuire à la santé des organismes vivants dans ce milieu. Ces substances potentiellement toxiques sont absorbées par les organismes et s'accumulent dans les tissus (surtout les graisses)._Exemple_: Les organismes aquatiques filtreurs, tels que les moules et les huîtres, filtrent l'eau pour se nourrir. Ainsi, ils absorbent une très grande quantité de contaminants qui s'accumulent dans leur corps.

Éventuellement, la concentration de contaminants dans leur système dépasse celle du milieu aquatique. Le « *facteur de bioconcentration* » (BCF) désigne le rapport entre concentration du composé chimique (métal lourd par exemple) dans l'organisme vivant et celle dans le milieu (eau/air/sol). Ce facteur permet d'établir la bioaccumulation.

- **Bioaccumulation (BAF)**

Absorption d'un contaminant et son accumulation dans les tissus de l'organisme vivant. Le contaminant peut être absorbé directement par le milieu (air, eau, sol) ou par la consommation de proies contaminées (concentration par voie aqueuse et par la nourriture).

- **Biomagnification (BMF)**

Le contaminant s'accumule dans l'organisme vivant à la suite de l'ingestion d'espèces du niveau trophique précédant (concentration dans la chaîne trophique).

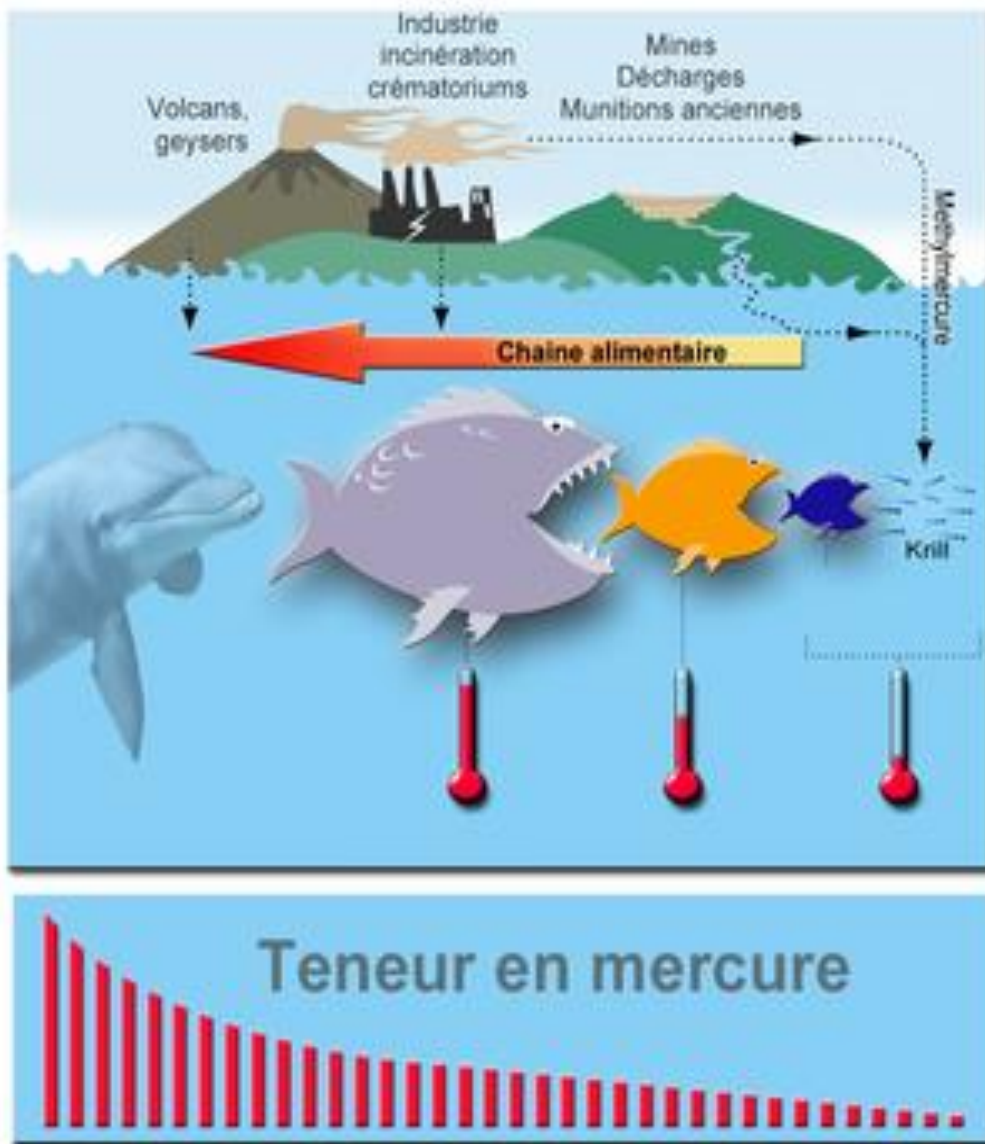


Schéma simplifié de la « cinétique environnementale du mercure » et de sa biomagnification dans le réseau trophique.

Le mercure naturel, et celui émis par les centrales électriques, l'industrie, les mines, etc. aboutit en mer et dans les sédiments marins où il se transforme en partie en **méthylmercure** (plus écotoxique et toxique pour l'homme, et entrant facilement dans la chaîne alimentaire où il se concentre à chaque étape de cette chaîne). Les grands prédateurs comme les cachalots, orques, requins, espadons, thons ... contiennent ainsi les taux de mercure les plus élevés. Le mercure nuit gravement au développement ; des limites et recommandations, ici symbolisées par les thermomètres visent donc à protéger les femmes en âge d'enfanter et les enfants de 12 ans ou moins.

4. Pollution des sols par les métaux lourds

4.1. Définition

Les éléments traces (ET) sont les 80 éléments chimiques, constituants de la croûte terrestre, dont la concentration est pour chacun d'entre eux inférieure à 0,1 %. Ils ne représentent à eux tous que 0,6 % du total, alors que les 12 éléments majeurs (Si ; Al ; Fe ; Ca ; Na ; K ; Mg ; Ti ; H ; P ; Mn) représentent 99,4 %.

Certains éléments traces sont des métaux et sont donc appelés éléments traces métalliques (ETM) tels que: Cd, Cr, Zn, Pb, Cu alors que d'autres sont des non-métaux tels que : As, Se, B. Les éléments traces qui sont indispensables aux processus biologiques donc à la production agricole végétale et animale sont appelés oligoéléments tels que Zn, Cu, Cr, Mo, et B. Le Cd, Pb, Hg, et Sn ne jouent aucun rôle utile.

Les éléments traces métalliques sont tous potentiellement toxiques. Cela dépendra de leur concentration dans le milieu considéré (ex. sols) mais surtout de leur forme chimique (spéciation). Ils sont présents dans les sols, les eaux, les plantes, les animaux,...

Les métaux lourds arrivent au sol suite au stockage de déchets industriels et urbains, aux pratiques agricoles, aux retombées atmosphériques et aux décharges. Les métaux lourds sont caractérisés par des propriétés physicochimiques particulières, ils sont Indéfiniment stables, solubles dans l'eau ce qui leur permet de rejoindre les nappes souterraines et peuvent être prélevés par les plantes.

La toxicité des métaux lourds est due à leur non dégradabilité, leur toxicité à faible concentration, leur tendance à s'accumuler dans les organismes vivants et à se concentrer le long des chaînes trophiques.

Tableau périodique des éléments

I

1 H <small>Hydrogène</small>	
3 Li <small>Lithium</small>	4 Be <small>Béryllium</small>
11 Na <small>Sodium</small>	12 Mg <small>Magnésium</small>

II

Légende

	= métaux
	= non-métaux
	= métalloïdes

VIII

2 He <small>Hélium</small>				
10 Ne <small>Neon</small>	18 Ar <small>Argon</small>	36 Kr <small>Krypton</small>	54 Xe <small>Xénon</small>	86 Rn <small>Radon</small>

19 K <small>Potassium</small>	20 Ca <small>Calcium</small>	21 Sc <small>Scandium</small>	22 Ti <small>Titane</small>	23 V <small>Vanadium</small>	24 Cr <small>Chrome</small>	25 Mn <small>Manganèse</small>	26 Fe <small>Fer</small>	27 Co <small>Cobalt</small>	28 Ni <small>Nickel</small>	29 Cu <small>Cuivre</small>	30 Zn <small>Zinc</small>	31 Ga <small>Gallium</small>	32 Ge <small>Germanium</small>	33 As <small>Arsenic</small>	34 Se <small>Sélénium</small>	35 Br <small>Brome</small>	36 Kr <small>Krypton</small>
37 Rb <small>Rubidium</small>	38 Sr <small>Strontium</small>	39 Y <small>Yttrium</small>	40 Zr <small>Zirconium</small>	41 Nb <small>Niobium</small>	42 Mo <small>Molybdène</small>	43 Tc <small>Technétium</small>	44 Ru <small>Ruthénium</small>	45 Rh <small>Rhodium</small>	46 Pd <small>Palladium</small>	47 Ag <small>Argent</small>	48 Cd <small>Cadmium</small>	49 In <small>Indium</small>	50 Sn <small>Étain</small>	51 Sb <small>Antimoine</small>	52 Te <small>Tellure</small>	53 I <small>Iode</small>	54 Xe <small>Xénon</small>
55 Cs <small>Césium</small>	56 Ba <small>Baryum</small>	57-71 La-Lu <small>Lanthanides</small>	72 Hf <small>Hafnium</small>	73 Ta <small>Tantale</small>	74 W <small>Tungstène</small>	75 Re <small>Réhenium</small>	76 Os <small>Osmium</small>	77 Ir <small>Iridium</small>	78 Pt <small>Platine</small>	79 Au <small>Or</small>	80 Hg <small>Mercure</small>	81 Tl <small>Thallium</small>	82 Pb <small>Plomb</small>	83 Bi <small>Bismuth</small>	84 Po <small>Polonium</small>	85 At <small>Astato</small>	86 Rn <small>Radon</small>
87 Fr <small>Francium</small>	88 Ra <small>Radium</small>	89-103 Ac-Lr <small>Actinides</small>	104 Rf <small>Rutherfordium</small>	105 Db <small>Dubnium</small>	106 Sg <small>Seaborgium</small>	107 Bh <small>Berkelium</small>	108 Hs <small>Hassium</small>	109 Mt <small>Mtlerium</small>	110 Uun <small>Ununilium</small>	111 Uuu <small>Ununilium</small>	112 Uub <small>Ununilium</small>						

57 La <small>Lanthane</small>	58 Ce <small>Cérium</small>	59 Pr <small>Praseodyme</small>	60 Nd <small>Neodyme</small>	61 Pm <small>Prométhium</small>	62 Sm <small>Samarium</small>	63 Eu <small>Europium</small>	64 Gd <small>Gadolinium</small>	65 Tb <small>Terbium</small>	66 Dy <small>Dyprosium</small>	67 Ho <small>Holmium</small>	68 Er <small>Erbium</small>	69 Tm <small>Thulium</small>	70 Yb <small>Ytterbium</small>	71 Lu <small>Lutécium</small>
89 Ac <small>Actinium</small>	90 Th <small>Thorium</small>	91 Pa <small>Protactinium</small>	92 U <small>Uranium</small>	93 Np <small>Neptunium</small>	94 Pu <small>Plutonium</small>	95 Am <small>Americium</small>	96 Cm <small>Curium</small>	97 Bk <small>Berkelium</small>	98 Cf <small>Californium</small>	99 Es <small>Einsteinium</small>	100 Fm <small>Fermium</small>	101 Md <small>Mendelevium</small>	102 No <small>Nobelium</small>	103 Lr <small>Lavrentzium</small>

4.2. Origine des métaux lourds dans les sols :

Les teneurs en métaux lourds mesurées aujourd'hui dans les sols résultent de processus naturels :

- **Le fond géochimique**

C'est la composition chimique d'un sol et des roches du sous-sol dont il est la décomposition. Il détermine en partie la qualité du sol, de l'eau et la vie de la flore et de la faune. Il est plus ou moins modifié par l'évolution pédogénétique (différenciation d'horizons). La notion de « *fond géochimique* » est utilisée dans le domaine de l'évaluation environnementale, de l'étude de la pollution des sols et de la gestion des sites et sols pollués.

- **D'apports directs ou indirects liés aux activités humaines**

Qui regroupent les diverses contaminations tels que les constituants involontaires d'apports gérés à l'échelle de la parcelle agricole (fertilisants, fumiers, déjections animales, boues d'épuration, etc.), Les apports atmosphériques d'origine lointaine (poussières et aérosols, activités industrielles, trafic automobile, incinérateurs, etc.) et les pollutions localisées massives (souvent à proximité d'une source industrielle).

L'analyse des éléments traces d'un sol apporte aussi des informations sur son **histoire environnementale** et **paléo-environnementale**, et permet d'évaluer et/ou expliquer certains risques sanitaires. Au **Bangladesh**, un sous-sol riche en une forme mobile et bio disponible de **l'arsenic** contamine les puits qui fournissent l'eau potable ou d'irrigation, en causant selon l'OMS un grave problème de santé publique, à large échelle.

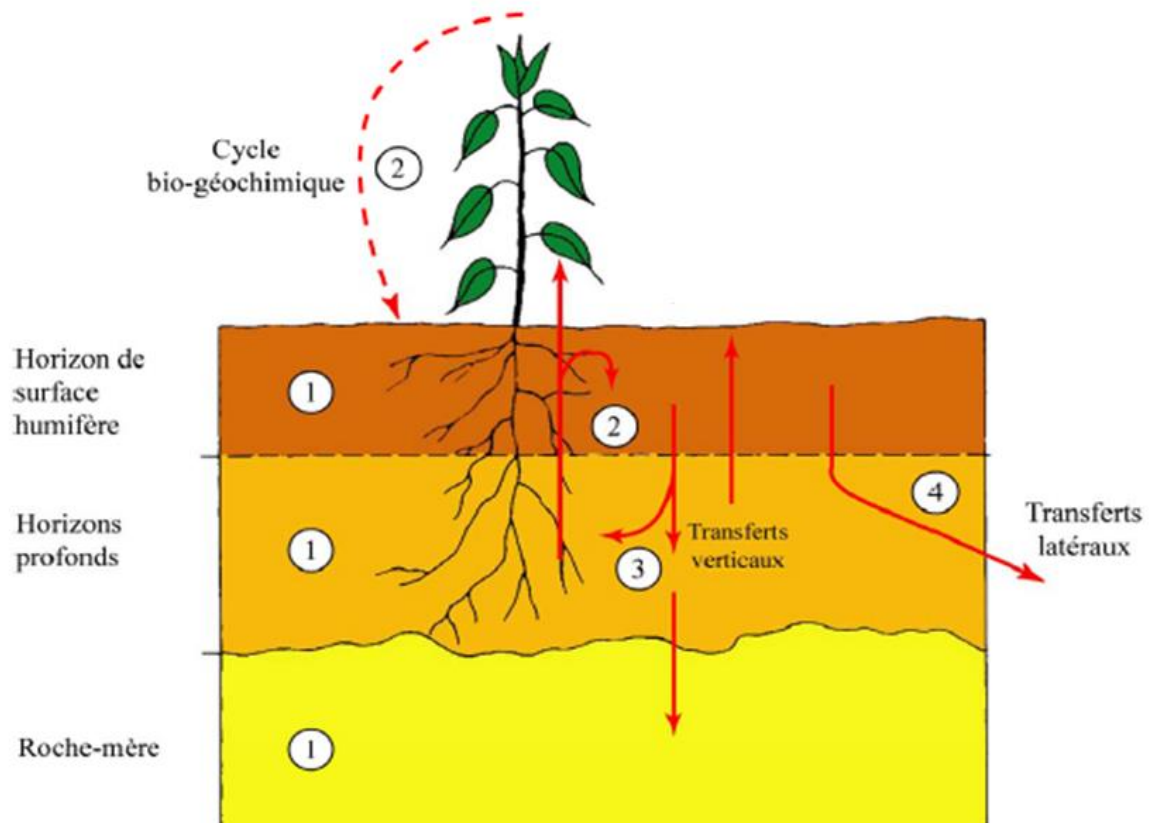


Schéma de l'acquisition des teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols. Milieux naturels.

Les teneurs naturelles mesurées aujourd'hui sont le résultat d'un équilibre acquis sur de très longues durées 10.000, 100.000 à un million d'années.

En écosystème naturel, pour les ETM comme pour les éléments majeurs, on se trouve en "régime stationnaire". L'altération des minéraux primaires, la lixiviation verticale vers les nappes phréatiques et les apports atmosphériques naturels d'origine lointaine sont des processus impliquant des flux infimes.

Tout ce qui était mobile est parti depuis longtemps ce qui reste est associé fortement à des phases stables, ou est pris dans le cycle biogéochimique.

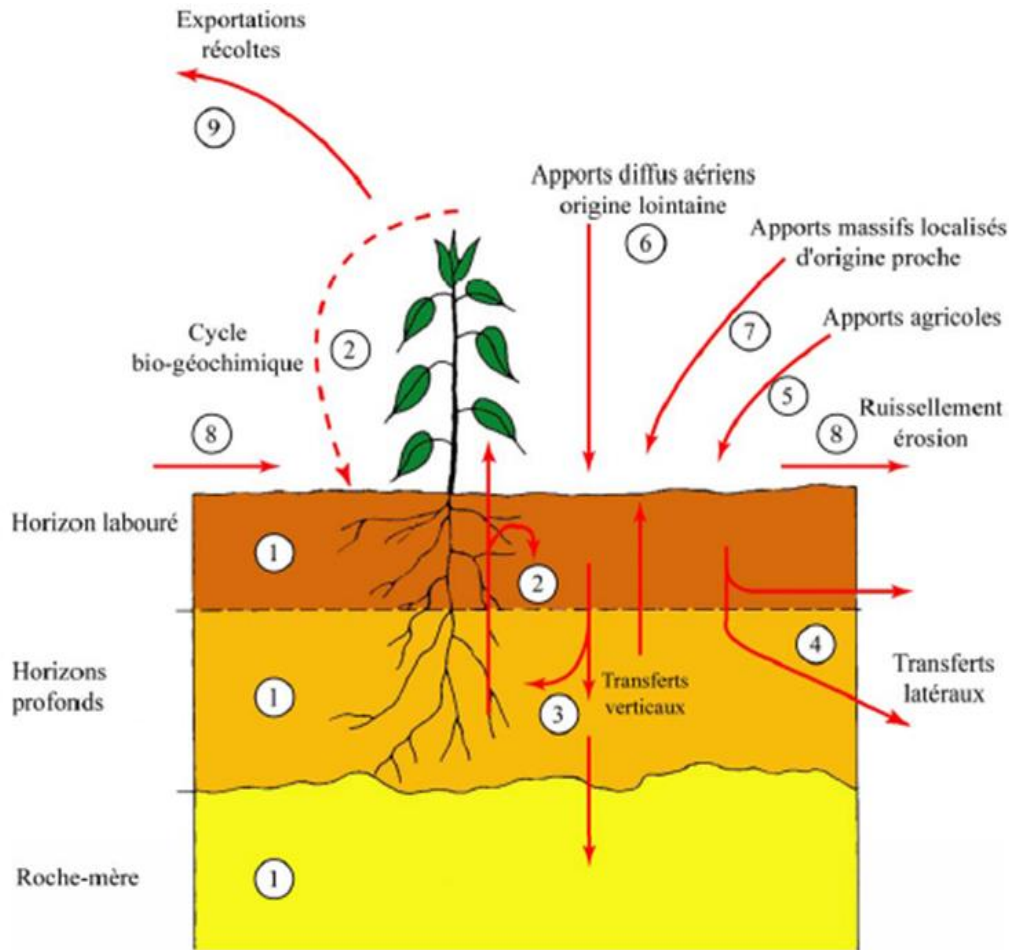


Schéma de l'acquisition des teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols. Milieux anthropisés.

Le « fond d'origine anthropique » exprime la part des éléments exclusivement introduits dans le milieu par les activités humaines ou suite à ces activités. Les apports anthropogènes sont arrivés très récemment (le plus souvent 10 à 150 ans maximum) et d'une manière brusque aboutissant à un régime perturbé. Ces apports sont entrés par la surface du sol (épandages, voie atmosphérique) ou sous des formes assez mobiles et/ou bio-disponibles (par ex. associés à des matières organiques, rapidement minéralisées)... d'où des redistributions et/ou des modifications des formes chimiques à court terme...

- **Le fond pédo-géochimique naturel (FPGN)**

Le fond pédo-géochimique naturel correspond à la concentration d'une substance dans un horizon de sol, il résulte des évolutions naturelles, géologiques et pédologiques, en dehors de tout apport d'origine humaine.

D'un endroit à un autre, cette concentration peut être très variable, en fonction de la composition du matériau parental. Le FPGN est défini par pays, région, bassin versant, parcelle agricole, par horizon, ...

4.3. Contamination vs Pollution des sols par les métaux lourds:

Les polluants du sol se comportent de 2 manières:

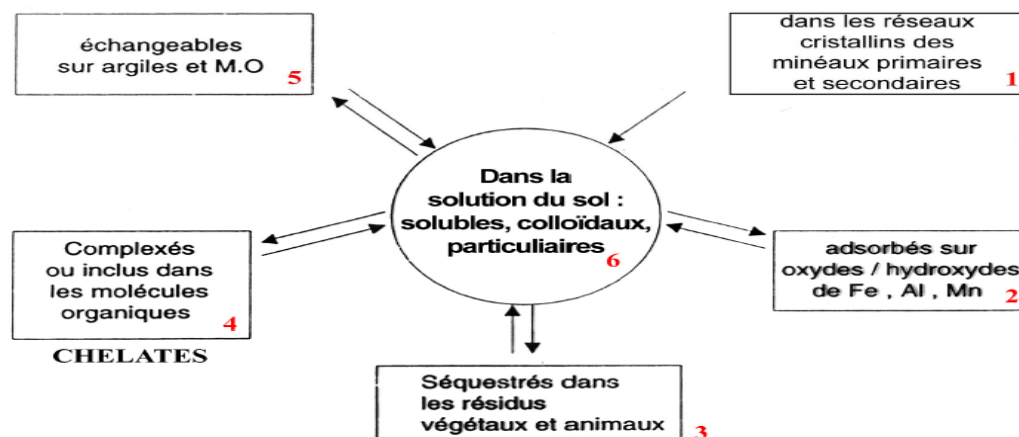
- Soit la charge critique est dépassée et le sol ne joue plus son rôle tampon, de sorte que les polluants pénètrent jusqu'à la nappe phréatique et les fleuves.
- Soit les polluants s'accumulent dans le sol jusqu'au point où un changement dans les conditions physiques et/ou chimiques, et/ou biologiques, entraînera un transfert des polluants.

Ces deux possibilités nous amènent au **dilemme entre contamination de court terme et de long terme**. Donc le choix entre une contamination de la population ou bien une contamination durable, voire irréversible des sols. Dans les deux cas, on constate, dans le sol, une augmentation nette de la teneur en une substance potentiellement dangereuse, par rapport au fond pédo-géochimique naturel local suite à une ou plusieurs activité(s) humaine(s).

On utilise le mot **contamination** lorsqu'aucun effet négatif n'est observé sur un quelconque compartiment de l'écosystème ou de l'agro-système étudié et on utilise le mot **pollution** lorsqu'un ou plusieurs effets négatifs sont observés sur un ou plusieurs compartiment(s) de l'écosystème ou de l'agro-système étudié.

4.4. La répartition d'un ETM dans les compartiments du sol

Elle ne demeure pas figée au cours du temps. En permanence les éléments passent d'une forme à une autre sous l'influence de modifications externes naturelles ou anthropiques (changements de caractéristiques physico-chimiques du milieu).



Différentes formes et localisations des éléments traces dans les sols.

4.5. La mobilité:

C'est l'aptitude d'un élément à passer d'un compartiment où il est retenu avec une certaine énergie dans un autre, où il est retenu avec une moindre énergie. C'est donc un potentiel de transfert.

Un élément peut ainsi passer successivement dans des compartiments d'énergie de rétention décroissante pour aboutir dans la solution du sol, voire dans son atmosphère (cas du Hg).

La mobilité dépend de plusieurs facteurs :

- Le degré de solubilité de l'ETM: soluble, il passe dans la nappe phréatique et/ou la plante. Peu soluble, il reste dans le sol.
- Le PH: un sol acide facilite la mobilisation de l'ETM. Un sol calcaire contribue à l'immobilisation (sauf arsenic)
- L'apport de matières fertilisantes notamment les boues: les boues chaulées réduisent la mobilité.
- l'origine de l'apport: les ETM se diffusent plus ou moins selon que le rejet est isolé ou provient de boues. Les métaux lourds des boues restent dans celles-ci au moins pendant un certain délai.
- L'aération du sol: un tassement de sol favorise la mobilité. Un sol aéré permet d'activer les composés de Fe et de Mn du sol qui sont peu solubles et donc immobilisent les métaux.

4.6. La biodisponibilité:

C'est la propriété d'un élément présent dans le sol d'être absorbé par les organismes vivants via la solution du sol (plantes = phytodisponibilité).

Cette propriété s'applique aussi bien aux éléments nutritifs (P, K) qu'aux oligo-éléments ou autres métaux potentiellement toxiques. La biodisponibilité implique le franchissement d'une barrière biologique à savoir les parois cellulaires (des racines ou stomates chez les végétaux supérieurs). Elle résulte de l'interaction des éléments présents dans la solution du sol (nature et concentration), de l'espèce et de la variété de l'organisme vivant considéré (plus précisément de son génome) et enfin des propriétés physico-chimiques et microbiologiques du sol.

4.7. Les teneurs "totales" en éléments traces

La teneur totale est une mesure d'un stock à un moment donné. La répétition dans le temps de ces mesures en un même lieu permet un suivi des teneurs (monitoring). Les teneurs totales sont faciles à interpréter, quel que soit le contexte pédologique de l'échantillon (pH, granulométrie, présence de calcaire, d'oxydes de fer, etc.). La plupart des valeurs seuils sont actuellement exprimées sous la forme de teneurs totales. Elles permettent l'estimation du degré de contamination par les activités humaines, à condition d'évaluer le fond pédo-géochimique

naturel. Le seul inconvénient de cette mesure est qu'elle ne permet pas de distinguer les formes chimiques présentes et ne donnent donc aucune information sur la mobilité de l'élément, ni sur sa disponibilité ou sa toxicité vis-à-vis des organismes vivants.

Pour atteindre une teneur totale il faut employer un processus analytique capable d'extraire toutes les formes de l'élément que l'on veut doser, y compris celles intégrées dans les réseaux cristallins des minéraux silicatés ; d'où l'emploi par certains laboratoires de l'association d'acides forts $\text{HF} + \text{HClO}_4$ pour dissoudre la totalité de la phase minérale. Beaucoup de laboratoires préfèrent utiliser la mise en solution par l'eau régale (*aqua regia* = $\text{HCl} + \text{HNO}_3$). Cette méthode de "digestion" par l'eau régale est dite "pseudo-totale".

4.8. Importance des formes chimiques:

Il est essentiel de bien distinguer les ETM naturels (fond pédo-géochimique local) de ceux résultent d'apports ou de contamination d'origine humaine.

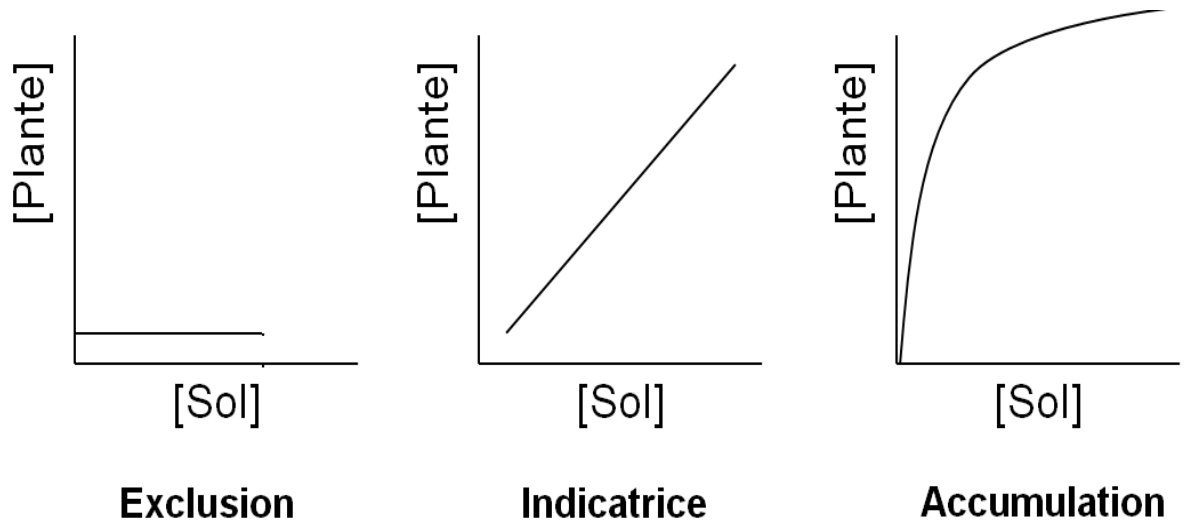
Parce que les métaux des apports anthropiques sont sous des formes assez réactives et entraînent éventuellement des dangers alors que les métaux naturels sont le plus souvent immobilisés sous des formes chimiques relativement inertes. La part des apports anthropiques et leur effet sur le fond géochimique sont d'une importance très variable. Dans certaines circonstances, le fond géochimique originel est si bouleversé, que le fond modifié relègue le fond originel au second plan tant dans les faits que dans leur étude.

Quelques exemples de sources anthropiques et de circonstances d'apport

- le plomb issu de l'essence plombée (près des routes et autoroutes), notamment en contexte humide et acide (l'acidité rend le plomb et de nombreux métaux plus mobiles) ;
- des retombées de grenaille de plomb sur une zone de ball-trap ou de chasse ou de chasse régulière (notamment en contexte humide et acide, par exemple devant les huttes de chasse ou d'autres postes de tirs fixes). La grenaille est alors une source majeure et chronique de saturnisme aviaire, susceptible de contaminer la chaîne alimentaire humaine et le réseau trophique dans les milieux naturels ;
- du cadmium apporté par les engrais phosphatés, qui sera mélangé au sol superficiel par le labour ;
- du mercure apporté par les épandages d'effluents ou de boues d'épuration ou issu de retombées atmosphérique (Baize et al., 2001 ; Baize et al., 2006) ;
- du cuivre issu du sulfate de cuivre utilisé massivement par les vignerons, agriculteurs et jardiniers contre l'oïdium, particulièrement en zones de vignobles et moindrement dans certains champs et jardins) ;

- d'arséniate de plomb, hautement toxique et à ce titre massivement utilisé comme insecticide du sol dans les golfs américains, et autrefois dans l'agriculture ou les jardins ;
- l'apport en divers polluants et contaminants de l'air par les fumées d'incinérateurs (notamment durant le XX^e siècle en raison d'une mauvaise performance des systèmes de filtration alors utilisés) ;
- les apports de polluants liés aux lessivages des décharges ou sols pollués (y compris par des fumiers ou lisiers).

5.9. Comportement des plantes des sols pollués par les métaux lourds



- Le prélèvement des métaux est faible: La plante contrôle leur non-absorption au niveau de la racine. Il existe une valeur maximale de tolérance au-delà de laquelle le végétal meurt. Il y a **exclusion** de la plante.

- Le prélèvement des métaux est proportionnel à la quantité de ceux présents dans le sol. La plante est alors qualifiée **indicatrice** puisqu'elle reflète les quantités présentes dans celui-ci.

- Une hyper-accumulation des métaux dans les parties aériennes de la plante. Les mécanismes d'absorption sont actifs. La plante est dite **accumulatrice**