

Chapitre 3 :

Pollution des sols

Plan du Chapitre

3. Sols et pollution des sols

3.1. Le Sol

3.1.1. Origine des sols

3.1.2. Composition et horizons des sols

3.1.3. Propriétés des sols

3.1.3.1. La couleur

3.1.3.2. La texture

3.1.3.3. La porosité

3.1.3.4. L'acidité

3.2. Dégradation des sols

3.2.1. Erosion des sols

3.2.2. Carences minérales

3.2.3. Salinisation des sols

3.2.4. Désertification

3.3. Pollution des sols

3.3.1. Pollution Par les engrais

3.3.2. Pollution par les pesticides

3.3.2.1. Devenir et comportement des pesticides dans le sol

3.3.2.2. Impacts éco-toxicologiques des pesticides

3.3.3. Pollution par les éléments traces métalliques

3.3.3.1. Origine des ETM dans le sol

3.3.3.2. Interaction des ETM avec les constituants des sols

3.4. Qualité des sols

3.5. Réhabilitation et traitement des sols pollués

3. Sols et pollution des sols

3.1. Le Sol

Le sol est l'épiderme vivant de notre planète. Il constitue la fine pellicule externe de la croûte terrestre. Situé à l'interface entre l'atmosphère, l'eau, les roches et le monde vivant, le sol participe aux grands cycles d'énergie, d'eau et d'éléments. Avec les milieux aquatiques, les sols constituent l'un des deux compartiments essentiels à la vie sur terre.

3.1.1. Origine des sols

Le sol se forme à partir de la désagrégation lente de la roche mère sous l'action conjuguée de processus d'altérations physiques, chimiques et biologiques. La fragmentation de la roche mère en des particules de plus en plus fines est un processus très lent qui peut prendre des milliers d'années (figure 3.1).

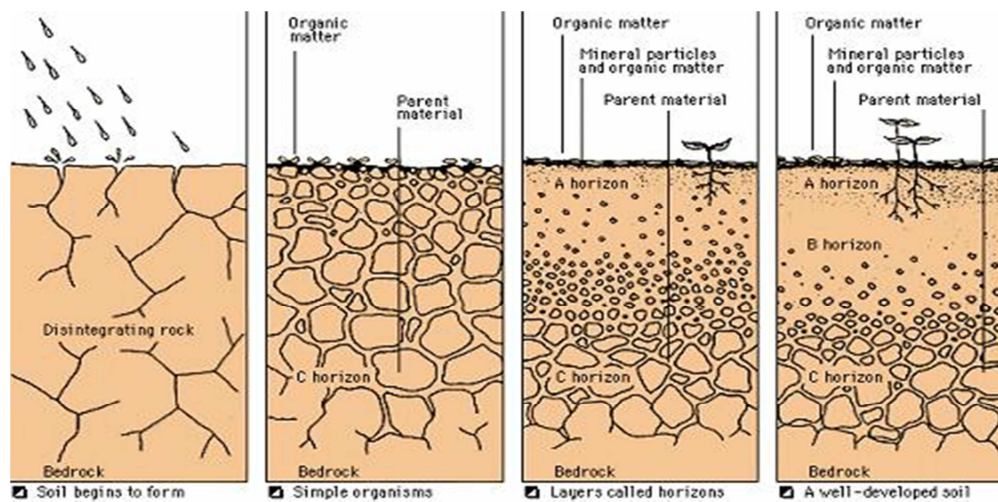


Figure 3.1 : Grandes étapes de la formation des sols

On estime qu'il faudrait entre 200 et 1000 ans pour former un horizon de surface de 2,5cm. Il faut ajouter à cela le temps relativement lent que met la matière organique pour se déposer et s'accumuler dans le sol. La pédogenèse (formation du sol) est un processus continu, impliquant des interactions permanentes entre les éléments de la croûte terrestre et la biosphère. L'épaisseur du sol varie entre une fine pellicule dans des sols jeunes comme c'est le cas dans les régions polaires ou sur les pentes de montagnes à plusieurs mètres dans les sols forestiers âgés.

Les facteurs topographiques comme la présence ou l'absence de vallées sont aussi impliquées dans la formation des sols. Sur les fortes pentes, les sols sont minces et superficiels, constamment entraînés vers le bas par gravité. Le ruissellement et l'érosion éolienne tendent à amplifier ce phénomène. Par contre en bas des pentes et dans les vallées, on observe la formation de sols plus épais appelés « **sols colluviaux** ».

3.1.2. Composition et horizons des sols

Le sol est composé de quatre éléments distincts. La fraction minérale qui représente environ 45% d'un sol, la matière organique (environ 5%) qui est composée d'humus (matière organique en décomposition), de racines et d'organismes divers (bactéries, champignons, vers ...etc), l'eau (environ 25%) et enfin l'air (25%) (figure 3.2). Les processus biologiques ont une grande influence sur la composition des sols (en participant au recyclage de la matière et des éléments) ainsi qu'à leur fertilité.

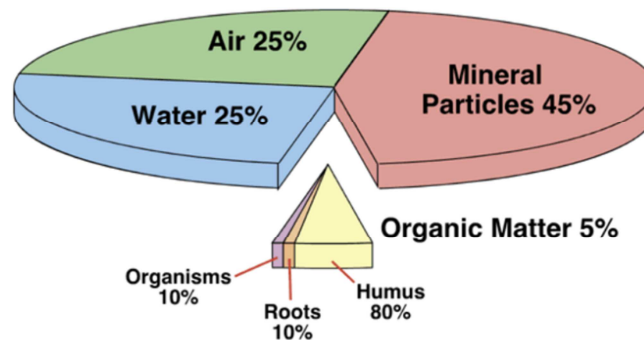


Figure 3.2 : Composition d'un sol

Une coupe verticale dans les sols révèle une organisation sous forme de couches qui s'empilent les unes sur les autres pour former des **horizons** qui ont une composition et des propriétés particulières (Figure 3.3).

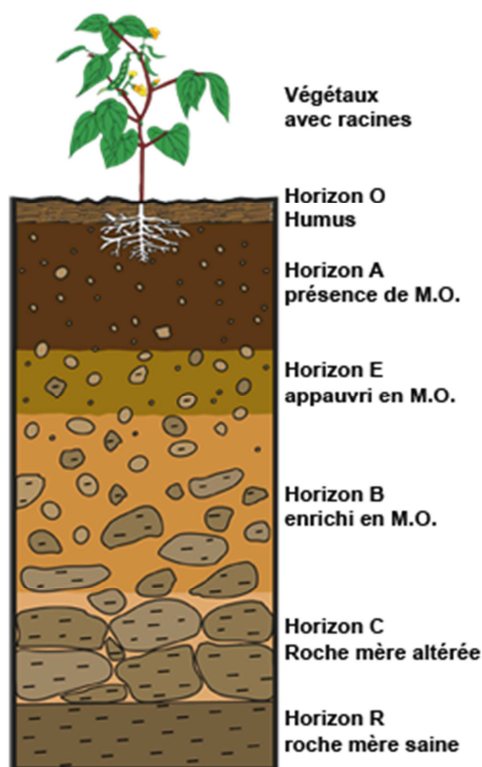


Figure 3.3 : Profil de sol

L'**horizon O**, horizon de surface qui est riche en matière organique. C'est la couche dans laquelle s'accumule la litière végétale et se décompose progressivement. Cet horizon est caractéristique des sols organiques riches et fertiles. Il peut être complètement absent dans les sols pauvres tels que les sols désertiques. Sous l'horizon O, on trouve l'**horizon A**, riche en matière organique et en humus mais pauvre en éléments minéraux nutritifs qui sont lessivés vers les horizons plus profonds. Dans certains sols, un horizon fortement lessivé (**Horizon E**) se développe entre les horizons A et B. L'**horizon B** est une zone d'accumulation des éléments nutritifs qui ont été lessivés dans les horizons supérieurs. Il est riche en argile, en fer et en aluminium. En dessous se trouve l'**horizon C** qui est formé par des

fragments de la roche mer.

3.1.3. Propriétés des sols

3.1.3.1. La couleur

La couleur est l'un des critères de classification les plus évidents dans un profil de sol. Une couleur rouge est généralement indicative d'un sol riche en oxydes ferriques (Fe_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$), alors qu'un sol à la teinte grise peut quant à lui résulter d'un enrichissement en oxydes d'aluminium ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ou encore en silicates (sels découlant de la silice (SiO_2)). La couleur noire est indicative d'un sol riche en matières organiques.

3.1.3.2. La texture

La texture d'un sol se réfère à la taille et aux proportions relatives des particules minérales qui le composent. Les particules de taille supérieure à 2 mm sont appelées graviers ou cailloux. Celles ayant un diamètre compris entre 0,05 à 2 mm représentent les **sables**. Les particules de tailles moyennes (0,002 à 0,05 mm) sont appelées **limons** et enfin les particules dont la taille est inférieure à 0,002 mm sont appelées **argiles**.

Selon le pourcentage de chaque fraction minérale, il est possible de classer les sols en quatre principaux groupes : sols sableux, sols limoneux, sols argileux et sols équilibrés ou loameux. Chacun de ces groupes possède des caractéristiques qui lui sont propres (figure 3.4).

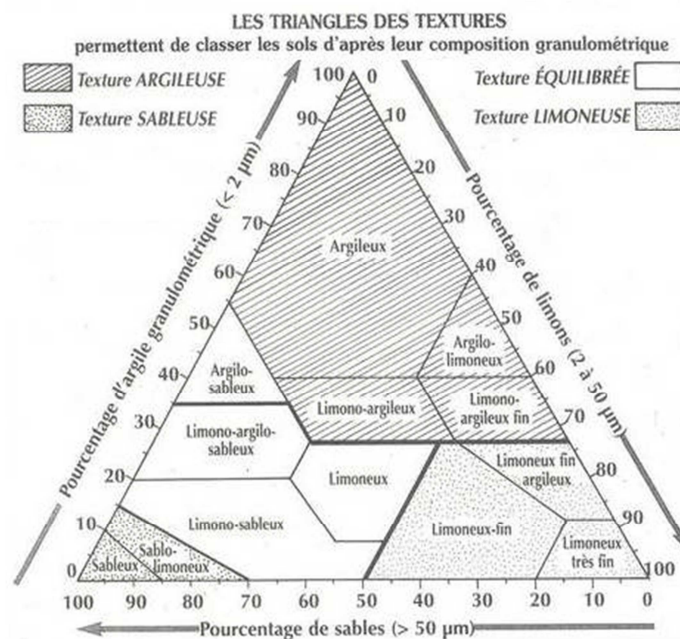


Figure 3.4 : Triangle de classification des sols selon la texture

La texture d'un sol affecte ses propriétés et par voie de conséquence la croissance des végétaux. Un terrain agricole idéal par exemple présenterait des proportions de 40% de sables, de 40% de limons et de 20% d'argile.

3.1.3.3. La porosité

La porosité représente le volume de l'ensemble des pores du sol occupés par l'eau ou l'air. La mesure de la porosité permet de donner certaines indications sur les capacités de drainage ou de rétention de l'eau ainsi que l'aération dans le sol. Elle peut fournir une idée assez juste de la structure du sol.

3.1.3.4. L'acidité

L'acidité d'un sol est mesurée par son pH. La plupart des sols présentent des valeurs de pH comprises entre 4 et 8 bien que certains sols peuvent présenter des pH très bas (acides).

Le pH d'un sol a une influence considérable sur les écosystèmes végétaux car la disponibilité de certains éléments minéraux dépend du pH. A des pH bas (acides), certains minéraux comme l'aluminium deviennent solubles et absorbés par les plantes à des doses parfois toxiques. Certains éléments minéraux indispensables à la croissance des plantes tels que le Calcium, le manganèse ou le phosphore sont facilement lessivés dans des sols acides, réduisant ainsi leur disponibilité pour les plantes. Un pH optimum pour un sol en ce qui concerne la croissance végétale est compris entre 6 et 7.

3.2. Dégradation des sols

Les activités humaines ont une grande influence sur les sols, en perturbant les équilibres naturels et en exacerbant les problèmes telles que l'érosion, la perte de la fertilité, la salinisation et désertification.

3.2.1. Erosion des sols

L'érosion des sols fait référence à l'amincissement de la couche arable sous l'effet de forces érosives naturelles tels que le vent, l'eau et la glace ou à cause des activités agricoles. L'eau et le vent sont particulièrement efficaces pour la désagrégation des sols et le transport des particules ainsi produites sur de longues distances.

Les mauvaises pratiques agricoles accélèrent aussi l'érosion. Cependant, elles ne sont pas les seules responsables. La destruction des couverts végétaux lors de l'ouverture des routes, la construction de bâtiments et l'exploitation forestière ont aussi pour effet d'aggraver les phénomènes d'érosion.

3.2.2. Carences minérales

Dans les écosystèmes naturels, les végétaux absorbent les éléments minéraux indispensables à leur croissance grâce à leur système racinaire. Après leur mort, les végétaux sont dégradés et décomposés par les micro-organismes, ce qui restitue les éléments minéraux aux sols. Dans les agrosystèmes, ce cycle naturel est rompu car les plantes cultivées sont récoltées et les éléments qu'elles contiennent ne retournent pas dans le sol. Sur le long terme, un sol cultivé perdra inévitablement sa fertilité.

3.2.3. Salinisation des sols

Les sols des régions arides et semi-arides contiennent d'importantes quantités de sels. Dans ces zones, les précipitations faibles favorisent l'accumulation des sels en surface, alors

que dans les régions à fortes pluviométrie, les sels sont lessivés et entraînés vers les nappes et les cours d'eau.

Le phénomène de salinisation des sols agricoles résulte de l'accumulation des sels due à l'irrigation. L'eau d'irrigation contient de petites quantités de sels qui s'accumulent progressivement au fil des années après l'évaporation de l'eau.

3.2.4. Désertification

Le phénomène de désertification survient après la dégradation des sols agricoles ou forestiers après l'érosion, le surpâturage, la surexploitation agricole et la déforestation. C'est en Asie et en Afrique que ce phénomène est le plus prononcé.

3.3. Pollution des sols

Contrairement à la pollution atmosphérique qui sévit dans les zones urbaines et industrielles, la pollution des sols affecte, elle, les zones rurales. Cette pollution résulte de plusieurs causes, notamment les dépôts de polluants atmosphériques qu'on a vus dans le chapitre précédent. Cependant, la cause majeure de contamination des sols reste l'utilisation abusive d'engrais et de pesticides par le secteur agricole. L'agriculture moderne constitue donc la principale cause de la pollution des sols compte tenu des surfaces affectées mais aussi de l'intensité du traitement des surfaces cultivées par les différents types substances agrochimiques.

3.3.1. Pollution Par les engrais

Les fertilisants minéraux ou organiques (fumiers, lisiers, boues des stations d'épuration) sont dispersés sur les sols afin d'augmenter les rendements des plantes et des végétaux cultivés (figure 3.5). En effet, l'usage des engrais vient de la nécessité de restituer aux sols les éléments minéraux (Azote, phosphore et potassium), parfois aussi le soufre et le magnésium et autres oligo-éléments) qui sont contenus dans le végétaux et emportés par la récolte.

Les engrais chimiques les plus utilisés se répartissent en trois grandes familles :

- Les engrais azotés sont utilisés pour apporter aux sols l'azote essentiel à la croissance des végétaux. Ils sont essentiellement sous forme de nitrate de calcium ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), le nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) et le sulfate d'ammonium ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$).
- Les engrais phosphatés, sous forme de (P_2O_5) apportent à la terre le phosphore
- Les engrais potassiques qui sont constitués de potasse (K_2O) ou de sulfates de potassium (K_2SO_4).

Depuis les années 50, d'énormes quantités d'engrais sont utilisées chaque année en agriculture. La consommation mondiale a atteint une valeur record de 180 millions de tonnes en 2013 (figure 3.5).

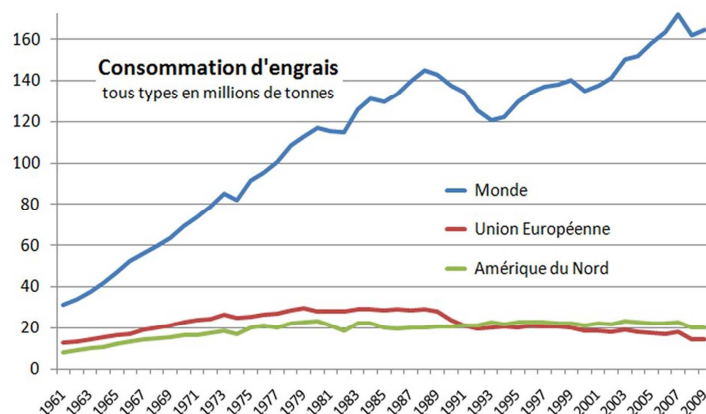


Figure 3.5 : Utilisation d’engrais dans le monde entre 1961 et 2009 (International Fertilizer Industry Association, IFIA, 2015).

Les engrais chimiques augmentent certes les rendements agricoles mais leur utilisation massive et répétée est responsable des phénomènes de pollution massive des sols. En effet, les phosphates et les nitrates sont la cause majeure de la pollution des nappes phréatiques par infiltration depuis les horizons supérieurs. Ce type de pollution est très difficile à traiter et constitue une sérieuse menace pour la santé humaine. En outre, les phosphates et les nitrates sont responsable des phénomènes d’eutrophisation des eaux côtières, un phénomène sur lequel on va revenir dans le chapitre suivant sur la pollution des milieux aquatiques et marins. Enfin, pour des raisons de cout de fabrication des engrais, ces substances ne sont pas bien purifiées, contribuant ainsi à ramener dans les sols les impuretés et les résidus de nombreux métaux toxiques qu’elles renferment (tableau 3.1).

Tableau 3.1 : Principaux métaux contenus dans les engrais phosphatés (Ramade, 2012)

Elément	Concentration (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

La fertilisation abusive des sols avec des engrais chimiques aboutit inexorablement à la perturbation du fonctionnement des systèmes pédologiques, en particulier les cycles de la matière. Sur le long terme, il a été constaté la dégradation des structures physiques des sols, notamment avec la régression du complexe argilo-humiques, la perte de la matière organique ainsi qu’une accumulation des métaux toxiques. A cela, on doit ajouter la perturbation des cycles biogéochimiques naturels de l’azote, du phosphore et du potassium.

3.3.2. Pollution par les pesticides

Le terme pesticide vient de l'anglais « pest » qui signifie ravageur, nuisible. Il désigne toutes les substances naturelles ou de synthèse qui présentent des activités particulières contre développement des organismes vivants considérés comme nuisibles pour l'agriculture, l'hygiène publique, la santé publique, la santé vétérinaire ou les surfaces non agricoles. Les pesticides, appelés également **produits phytosanitaires**, sont utilisés dans divers secteurs d'activités. À des fins agricoles, ils sont majoritairement employés pour la protection des cultures afin d'augmenter les rendements, et sont également présents dans l'élevage pour lutter contre les insectes et les bactéries. Dans le domaine de la santé publique, ils sont utilisés dans lutte contre certains insectes vecteurs de maladies afin d'éviter les épidémies.

Les pesticides sont classés selon leurs propriétés biologiques ou chimiques. La classification biologique regroupe les pesticides selon les organismes visés (tableau 3.2).

Tableau 3.2 : Classes biologiques des pesticides

Classe biologique	Cible
Insecticides	Insectes
Herbicides	Mauvaises herbes
Fongicides	Champignons
Nématocides	Nématodes
Bactéricides	Bactéries
Rodenticides	Rongeurs
Corvicides	Oiseaux ravageurs
Acaricides	Mites
Molluscicides	Limaces

Dans la classification chimique, les pesticides sont regroupés selon leur composition chimique. On distingue les pesticides inorganiques, les pesticides organométalliques et les pesticides organiques. Ces derniers sont de loin les plus utilisés dans le monde actuellement. Ils se répartissent en cinq grandes familles chimiques principales (figure 3.6)

- Les organochlorés (DDT, lindane, Dieldrine...etc)
- Les organophosphorés (Malathion entre autres)
- Les carbamates (Carbaryl)
- Les pyréthroides (deltaméthrine)
- Les néonicotinoïdes (imidaclopride)

Les pesticides occupent une place particulière parmi les causes de pollution de l'environnement en raison du caractère volontaire de leur dispersion dans les milieux naturels. Le développement de l'industrie des pesticides a connu un essor considérable depuis la deuxième guerre mondiale. On estime que plus de 3000 substances ont déjà font l'objet d'une utilisation agricole dans le monde.

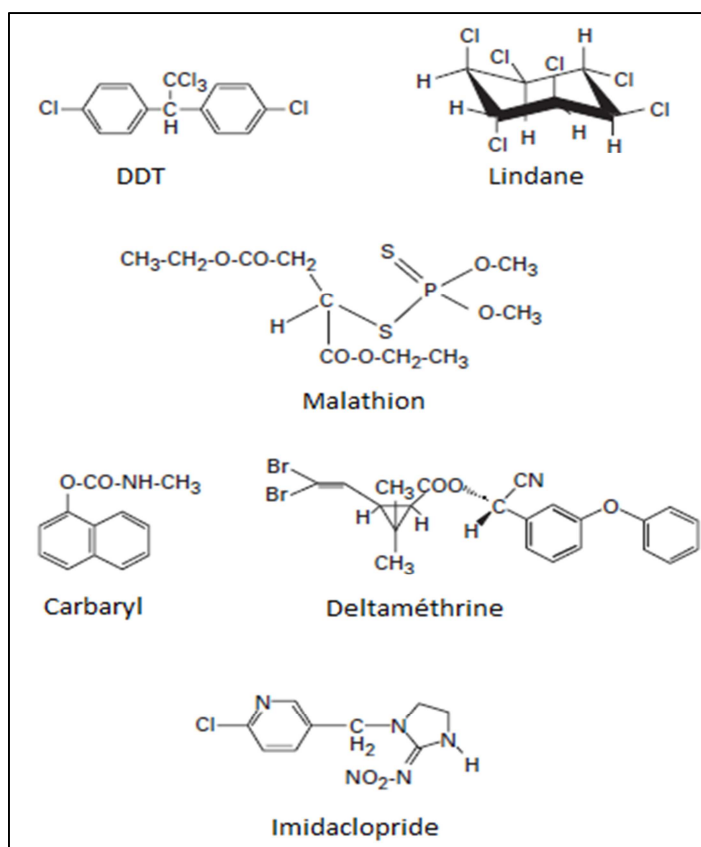


Figure 3.6 : Formules chimiques de quelques pesticides

La consommation mondiale en pesticides est d'environ **2 millions de tonnes par an**, dont 45% par l'Europe et 25% par les USA. Les substances les plus consommées sont les herbicides (47,5%), les insecticides (29,5%), les fongicides (17,5%) et les autres familles de pesticides (5,5%) (Figure 3.7).

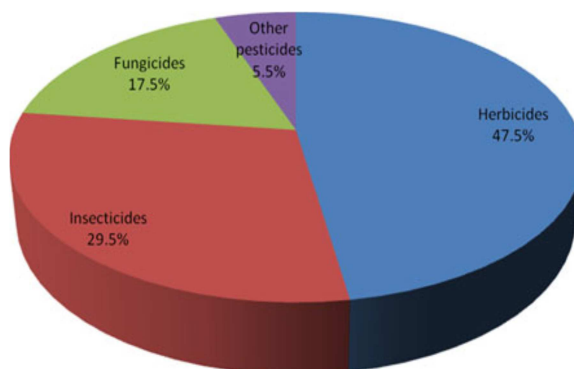


Figure 3.7 : Consommation mondiale de pesticides en fonction des principales familles (De et al., 2014)

3.3.2.1. Devenir et comportement des pesticides dans le sol

La **rétenion** par le sol et la **persistance** des pesticides sont les deux facteurs fondamentaux qui conditionnent leur caractère polluant. Dès leur arrivée dans le sol, la distribution des pesticides implique des phénomènes tels que le ruissellement, l'infiltration, mettant en jeu des processus complexes tels que l'adsorption/désorption, la

précipitation/dissolution, la bioaccumulation (accumulation dans les organismes biologiques) et la volatilisation (figure 3.8). Ces processus contrôlent le transport des pesticides du sol vers les autres compartiments environnementaux et leur devenir à long terme. L'importance relative de ces processus varie avec la nature chimique des molécules appliquées, les caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols et le climat.

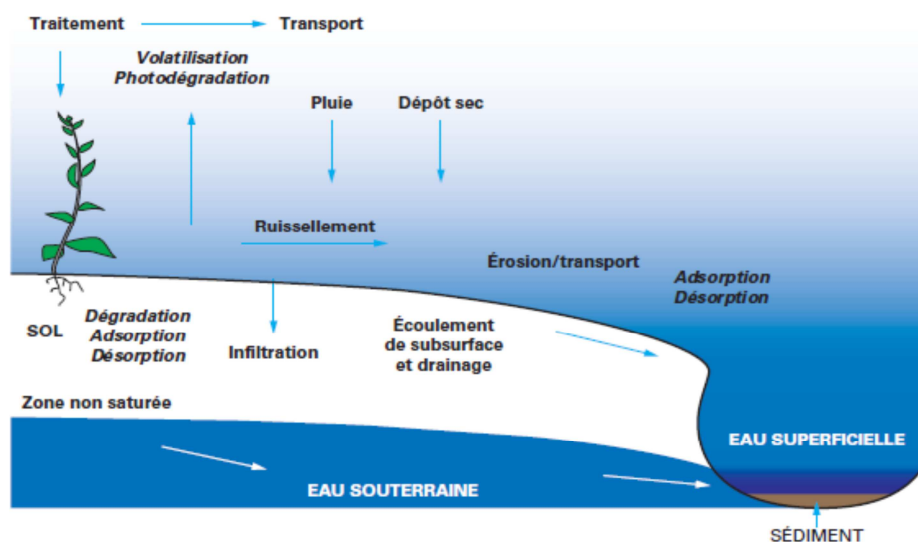


Figure 3.8 : Processus impliqués dans le devenir des pesticides dans le sol (<http://www.driaf.ile-de-france.agriculture.gouv.fr>).

La persistance d'un pesticide dans un sol est la résultante d'un certain nombre de processus physico-chimiques et biologiques qui font diminuer sa concentration dans ce même sol. La dégradation de ce pesticide conduit à des modifications de sa structure moléculaire et à l'apparition de composés intermédiaires (métabolites). Ces résidus ainsi produits, peuvent persister dans le sol des mois, des années voire des décennies (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 : Persistance de certains pesticides organochlorés dans le sol (Ramade, 2012).

Pesticide	% de persistance
	Après 14 ans
Aldrine	40
Chlordane	40
Endrine	41
Heptachlore	16
HCH	10
Toxaphène	45
	Après 15 ans
Aldrine	28
Dieldrine	31
	Après 17 ans
DDT	39
	Après 30 ans
Chlordécone	100

3.3.2.2. Impacts éco-toxicologiques des pesticides

Malgré les avantages immédiats inhérents à leur utilisation, les pesticides présentent un certain nombre d'inconvénients. Ces derniers découlent de leurs particularités toxicologiques qui finissent par affecter non seulement les espèces ciblées mais aussi la structure et le fonctionnement des écosystèmes.

Ces effets découlent de la toxicité aiguë des pesticides, dont les conséquences sont immédiates (mortalité immédiate de certaines espèces) et de la toxicité chronique (à long terme) due à l'exposition permanente à de faibles doses de pesticides.

Les effets éco-toxicologiques s'observent lorsque les pesticides subissent une bioamplification dans la chaîne alimentaire (incorporation des pesticides le long des maillons trophiques avec une augmentation de leur concentrations d'un maillon inférieur à un maillon supérieur) (figure 3.9). Cette amplification de la concentration des pesticides dans le réseau trophique continue jusqu'à atteindre un seuil critique pour les espèces se situant au sommet de la chaîne alimentaire qui peut se manifester par une mortalité directe ou des effets physiologiques insidieux comme la stérilité et la diminution du taux de reproduction qui aboutissent à la disparition progressive des peuplements.

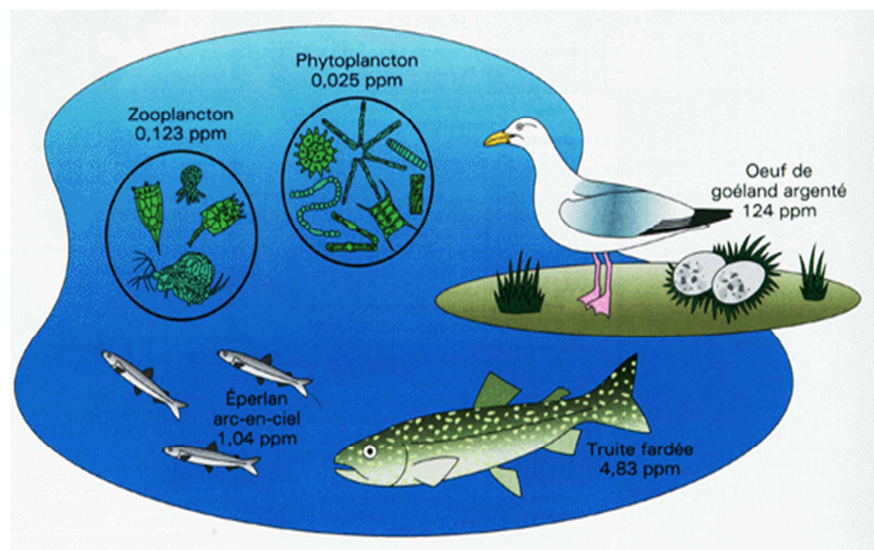


Figure 3.9 : Bioamplification des pesticides dans une chaîne alimentaire marine

3.3.3. Pollution par les éléments traces métalliques

Les éléments traces métalliques (ETM) sont les éléments chimiques, constituants de la croûte terrestre, dont les teneurs sont inférieures à 1000 mg. Kg^{-1} (0,1 %). Ils ne représentent que 0,6 % du total, alors que les 12 éléments majeurs (O ; Si ; Al ; Fe ; Ca ; Na ; K ; Mg ; Ti ; H ; P ; Mn) représentent 99,4 %.

Dans les sols, les ETM sont soit des métaux (par exemple Cd, Cu, Cr, Ni, Pb) ou métalloïdes (B, Se, As). Certains d'entre eux sont qualifiés de lourds en raison de leur densité supérieure à 6g.cm^{-3} (Pb, Cd, Hg, As...etc).

3.3.3.1. Origine des ETM dans le sol

Les ETM présents dans les sols sont issus de la désagrégation de la roche mère (fond pédogéochimique naturel) d'une part, et des apports anthropiques d'autre part (apports anthropiques directs : fertilisants, pesticides, industries diverses ou indirects via les retombées atmosphériques) (figure 3.10).

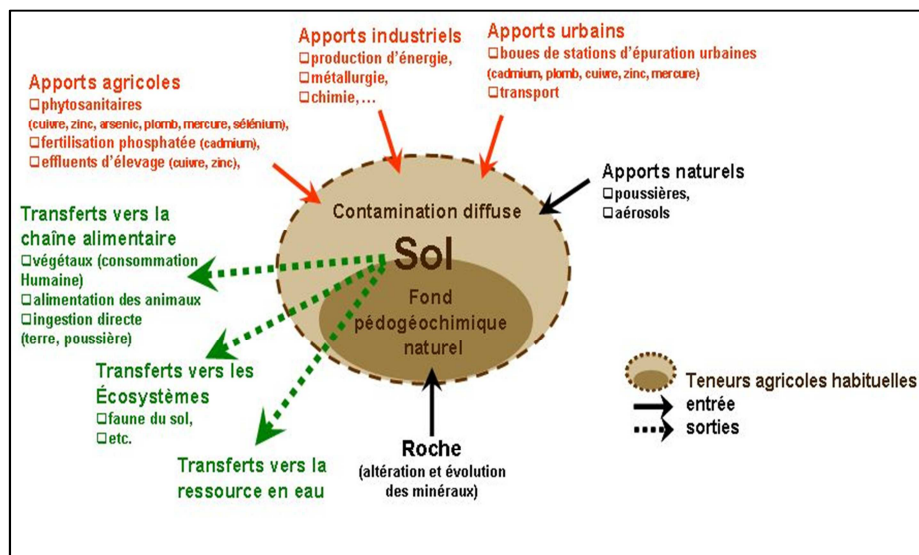


Figure 3.10 : Sources des ETM dans les sols et leur transfert vers les autres compartiments de l'environnement.

- **Le fond pédogéochimique naturel**

Il correspond à la concentration d'un élément dans un sol, résultant des évolutions naturelles géologiques et pédologiques en dehors de toute intervention anthropique. Ce fond résulte d'un héritage direct du matériau parental (figure 3.11). Les teneurs en ETM vont ainsi être différentes en fonction des types de sols et des régions géographiques.

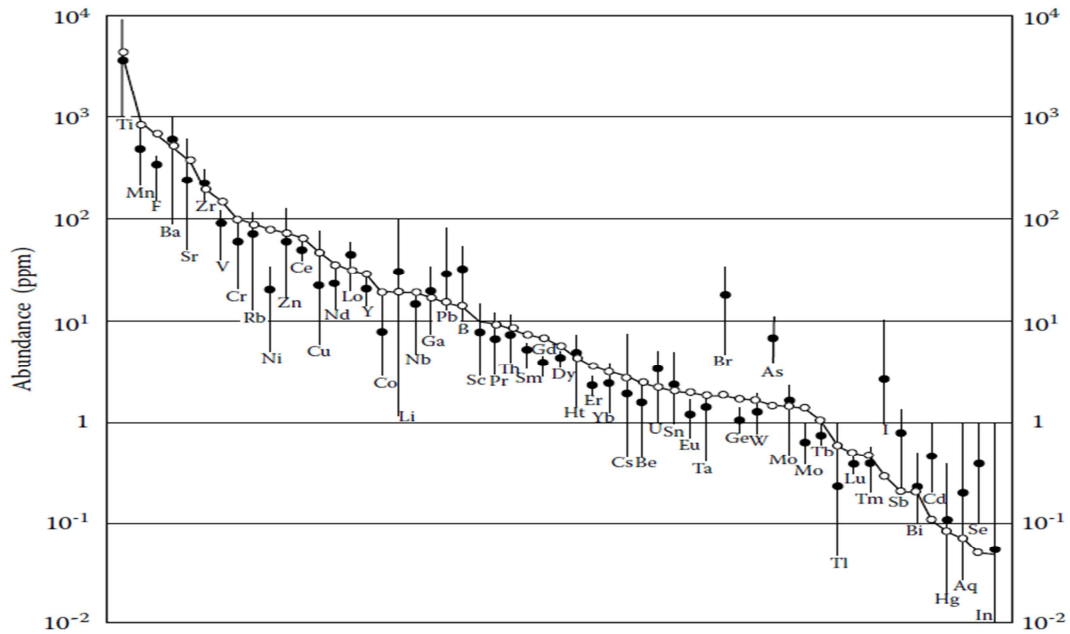


Figure 3.11 : Concentrations en ETM dans les sols comparée à leur abondance dans la lithosphère. Les cercles noirs indiquent leurs concentrations dans les sols et les cercles ouverts, leurs concentrations dans la lithosphère (Kabata-Pendias, 2011).

- **Apports directs ou indirects d'origine anthropique**

- Apports agricoles (fertilisants, fumiers, déjections animales, boues d'épuration, composts, pesticides...etc).
- Apports atmosphériques d'origine lointaine (poussières et aérosols provenant des activités industrielles, trafic automobile, incinérateurs...etc.)
- Des pollutions localisées massives (souvent à proximité d'une source industrielle, mines, usines métallurgiques ...etc).

Dans les études environnementales portant sur l'étude de la contamination des sols par les éléments trace métalliques, il conviendrait d'abord de déterminer les fonds pédogéochimiques locaux pour pouvoir évaluer la contamination d'un sol par des apports exogènes. Ce fond servira de référence à partir de laquelle seront calculés les facteurs d'enrichissement d'un élément donné. Le niveau de composition de référence communément utilisé est la teneur de cet élément dans la croûte terrestre. Le facteur d'enrichissement sera ainsi calculé comme suit :

$$FE = X_{\text{sol}} / X_{\text{croûte terrestre}}$$

Où X_{sol} est la teneur de l'élément X dans le sol et $X_{\text{croûte terrestre}}$ celle du même élément dans la croûte.

3.3.3.2. Interaction des ETM avec les constituants des sols

Les teneurs totales en ETM dans les sols n'est pas une indication suffisante pour évaluer les risques de mobilité, de biodisponibilité et d'impact sur le fonctionnement de écosystèmes. Dans le sol, les ETM se répartissent dans les différentes fractions qui composent ces sols (Figure 3.12). Généralement, la quantité existant dans la solution du sol ne représente qu'un

infime pourcentage de la totalité du polluant. Les métaux se concentrent donc dans la fraction solide du sol, à savoir les fractions organiques (Acides organiques, complexes organiques, phénols...) et minérales (Argiles, carbonates, sels minéraux, oxydes métalliques...).

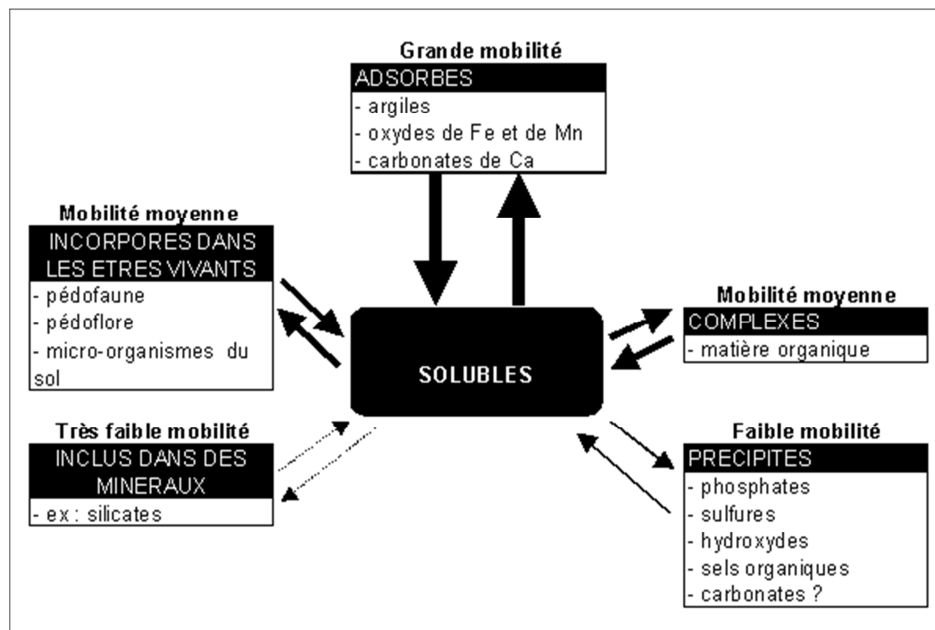


Figure 3.12 : Répartition des ETM dans les différentes composantes du sol (Juste, 1995)

- **Mobilité et spéciation des ETM dans les sols**

Les variations des conditions du milieu modifient la distribution des ETM entre les composantes du sol. La mobilité des ETM est définie comme leur capacité à être transféré vers des phases où ils sont de moins en moins énergiquement retenus, le compartiment ultime étant représenté par la solution du sol. La mobilité des ETM dépendent des paramètres physico-chimiques et biologiques du sol.

- **Effet du pH**

La variation de pH (naturelle ou anthropique) semble être le facteur déterminant dans la mobilité des ETM dans le sol, notamment dans leur mise en solution. Une baisse du pH favorise la mobilité des métaux. Inversement, l'augmentation du pH provoque l'immobilisation par formation de composés insolubles. Il faut cependant noter que certains ETM comme le bore obéissent moins strictement à ce type de comportement ou, au contraire, comme le molybdène, l'arsenic, le sélénium présentent un comportement opposé : leur mobilité augmente avec l'élévation du pH (Tableau 3.4).

- **Le potentiel Redox**

Les conditions d'oxydo-réduction (Eh) ont une influence sur le comportement des éléments chimiques. Elles mesurent la capacité d'un milieu à céder des électrons à un agent oxydant ou à accepter des électrons venant d'un agent réducteur. A titre d'exemple, le manganèse et le fer sont plus mobiles dans le sol sous leurs formes réduites que sous leurs formes oxydées. Les effets du pH et du potentiel Redox sur la mobilité des ETM dans le sol sont résumés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Effets du pH et du potentiel redox sur la mobilité des ETM dans le sol (Forstner, 1985)

Mobilité relative	pH		Potentiel redox	
	<i>Neutre-alcalin</i>	<i>Acide</i>	<i>Oxydant</i>	<i>Réducteur</i>
Très haute	Se,Mo	B.	B.	-
haute	As.	Zn, Cd, Hg, Co, Ni, Mn	Mo,So	-
Moyenne	Mn.	Cu, Al, Pb, Cr.	Cu,Co,Hg, Ni,Zn,Cd.	Mn.
Basse	Pn, Fe, Zn,Cd,Tl	Fe(III), Tl.	Pb, Tl.	Fe, Zn, Co , Ni, Tl
Très basse	Al, Cr, Hg, Cu, Ni, Co.	Mo, Se, As.	Al, Cr, Fe, Mn.	Al, Cr, Hg, Cu, Se, B, Mo, Cd, Pb.

➤ **Température et humidité du sol**

Ces deux paramètres influent indirectement via l'activité biologique du sol. En effet, l'activité biologique induit une production de substances acides ou complexantes issues de la biodégradation de matières organiques, alors que l'élévation de la température agit directement sur la dissolution de composés fixant les ETM, facilitant ainsi leur absorption par la flore.

➤ **Facteurs microbiologiques**

Les micro-organismes agissent sur la mobilité des éléments traces minéraux dans le sol par le biais de leur métabolisme qui agit sur leur spéciation et aboutit, soit à leur mise en solution dans la phase liquide, soit à leur précipitation.

• **Biodisponibilité et toxicité des métaux**

La biodisponibilité peut se définir comme la capacité d'un élément trace à passer dans un compartiment du sol dans lequel il sera directement assimilable par les êtres vivants. La biodisponibilité d'un élément trace est intimement liée à la phase liquide du sol, car c'est à partir de là que les ETM sont transférés vers les organismes.

La biodisponibilité comprend :

- La disponibilité environnementale : elle correspond à l'offre du sol
- La biodisponibilité environnementale qui correspond à l'absorption d'un ETM par un organisme
- La biodisponibilité toxicologique qui reflète l'accumulation et/ou l'effet de l'ETM dans l'organisme.

L'accumulation des métaux dans les sols a pour conséquence des effets néfastes sur l'équilibre et le fonctionnement des écosystèmes et sur leurs populations. La toxicité des métaux pour les micro-organismes des sols réside dans leur capacité à établir des complexes stables avec les protéines à activité enzymatique, ce qui peut aboutir à leur inactivation. En

outre, certains métaux qualifiés de xénobiotiques (aucune fonction physiologique connue) peuvent perturber les fonctions cellulaires en entrant en compétition avec les nutriments essentiels sur les sites disponibles de la membrane cellulaire.

- **Le transfert des ETM vers les horizons profonds et les bassins versant**

Les ETM peuvent être transférés vers le réseau hydrographique (fleuves, rivières, lacs et nappes phréatiques) sous forme particulaire, colloïdale ou dissoute. La proportion de chacune de ces formes varie selon les processus de transfert et selon les sources de pollution. Les formes dissoutes se retrouvent dans les eaux de drainage et les écoulements de subsurface, alors que les écoulements de surface transportent plutôt des ETM dans la phase particulaire.

3.4. Qualité des sols

La qualité des sols est un facteur essentiel pour la santé des écosystèmes terrestres et pour la rentabilité des sols agricoles. Cette qualité s'apprécie en fonction notamment de sa texture, de sa structure et de sa composition. Toutefois, la qualité d'un sol ne peut être évaluée à partir de critères purement physico-chimiques et biologiques absolus mais en fonction de ses aptitudes à remplir ses fonctions écologiques, économiques, de production ou de support.

Afin de préserver la qualité des sols, des mesures sont prises à travers le monde pour limiter et atténuer les effets néfastes des différents types de pollution qui menacent les sols. Ces mesures se traduisent par la mise en place de normes de qualité. A titre d'exemple, le problème de la pollution des sols par les métaux toxiques (mercure, plomb, cadmium, arsenic ...etc) a conduit les pays développés à adopter des normes relatives à la teneur maximale des sols en ces éléments (tableau 3.5).

Tableau 3.5 : Normes relatives aux teneurs maximales dans les sols des principaux métaux toxiques (mg/kg de sol en poids sec) (Ramade, 2012).

Pays	Cd	Cr	Co	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
Union européenne	3	200	nd	140	1,5	75	300	nd	300
Canada	3	750	40	150	0,8	150	375	2	600
France	2	150	nd	100	1	50	100	10	300
Grande Bretagne	3	400	nd	135	1	75	300	3	300
Hollande	0,8	100	20	36	0,3	30	40	nd	140
Suède	0,4	30	nd	40	0,3	30	40	nd	75
Suisse	0,8	75	25	50	0,8	50	50	nd	200

3.5. Réhabilitation et traitement des sols pollués

La réhabilitation (remédiation) des sols pollués s'impose lorsqu'une pollution affecte un sol de manière à altérer l'équilibre des écosystèmes ou présenter un danger pour la santé humaine. L'objectif de cette démarche est d'intervenir afin de ramener un sol à des conditions environnementales durables, dans lesquelles les risques liés aux agents polluants sont réduits au minimum. La réhabilitation des sols pollués peut s'effectuer par le biais de procédés physico-chimiques (Désorption thermique, électrocinétique...etc) ou biologiques

(Phytorémediation, Bioventing, Biosparging...) développés en détails dans l'article synthétique de Roudier (2004).

Conseils de lecture pour ce chapitre

- François Ramade, 2012. Eléments d'écologie appliquée.
- Michel-Claude Girard *et al.*, 2011. Sols et environnement.
- Philippe Duchaufour, 2004. Introduction à la science du sol.
- Ibrahim, A Mirsal, 2008. Soil pollution : Origin, monitoring, remediation.
- Alina Kabata-Pendias, 2011. Trace elements in soils and plants
- Roudier, P, 2004. Techniques de réhabilitation des sites et sols pollués. Techniques de l'ingénieur.