

## **Introduction générale**

Au cours de ces dernières décennies, les atteintes à l'environnement se font de plus en plus fréquentes, il s'agit de la destruction massive d'écosystèmes fragiles (zones humides, récifs coralliens, ainsi de la perte de la biodiversité animale et végétale), de l'augmentation de la production de déchets, des pollutions diverses, de la croissance et la mauvaise urbanisation, de la surexploitation des terres cultivables, tout ceci est dû essentiellement à l'accroissement de la population **(Thomaz & Luiz, 2012 ; Bai *et al.*, 2013)**.

En effet, la quantité de déchets ménagers a connu ainsi un accroissement rapide, il a été estimé que 0,5-4,5 kg par personne et par jour de déchets solides sont produits dans différentes régions du monde **(Bakare *et al.*, 2005 ; Swati *et al.*, 2014)**, l'une de ses conséquences les plus inquiétantes, réside dans les problèmes de gestion de déchets solides, ce phénomène est plus critique dans les pays en développement qui n'ont pas toujours les moyens nécessaires pour les gérer convenablement **(Thonart *et al.*, 2005)**.

La gestion des déchets solides ménagers (DSM) se caractérise par l'existence de plusieurs maillons dont la mise en décharge est l'un des plus importants **(El-Fadel *et al.*, 1997 ; Swati *et al.*, 2014)**. Il s'agit d'une technique qui concerne de très importants tonnages et qui donne prise à une élimination efficace et peu coûteuse. Nous pouvons distinguer deux grands types de décharge : décharges contrôlées et décharges non contrôlées.

La première est censée être la méthode d'élimination sûre des DSM, mais ceci n'est seulement pour les sites d'enfouissement bien conçus (centre d'enfouissement technique) qui permet l'élimination totale des déchets solides de manière sécurisée en minimisant les impacts sur l'environnement qui se trouvent souvent bordées de couches de matériaux absorbants et des feuilles imperméables pour empêcher les polluants de s'infiltrer dans le sol et l'eau **(Swati *et al.*, 2014)**. En parallèle on trouve les décharges non contrôlées, qui sont les plus répandues dans les pays du tiers monde, les rejets s'effectuent généralement par les particuliers, sans aucune autorisation de la part des autorités locales (APC) et sans aucune étude du site de dépôt, ils sont ainsi à l'origine de plusieurs nuisances pour l'environnement et surtout pour la santé des populations avoisinantes de ces dépotoirs. Les décharges non contrôlées sont souvent très riches en matières dangereuses tels que les dioxines, les métaux lourds, présentant des risques potentiels d'où la nécessité d'analyses approfondies des sols et des eaux souterraines qui peuvent être contaminés avec des produits chimiques lessivés des décharges **(Nevenka *et al.*, 1998 ; Swati *et al.*, 2014)**.

En Algérie la mise en décharge est la filière traditionnelle d'élimination des déchets solides, la méthode la plus largement pratiquée du fait de son faible coût. L'Algérie compte plus de 3200 décharges non contrôlées, occupant une superficie de plus de 150 000 hectares et situées le plus souvent sur des terres agricoles ou le long des oueds (MATE, 2004).

La région d'El-Tarf, abrite plusieurs sites humides classés par la convention de Ramsar 1971 (marais de la M'kharda, lac des Oiseaux, lac Noir, Aulnais de Aïn Khïar, lac Oubeïra et lac Tonga) et forment ce qu'on appelle le complexe humide d'El-Kala, caractérisé par une grande diversité écosystémique dotée d'une richesse biologique inestimable, malgré ces avantages, de nombreuses zones humides sont le réceptacle à ciel ouvert de dépôts non contrôlés de déchets, chaque site humide abrite une décharge non contrôlée (Zaafour, 2012).

La décharge non contrôlée du Kef Oum Teboul est l'une de ces décharges, qui reçoit toujours des déchets solides jusqu'à nos jours et qui sont déversés directement sur le sol. Cette décharge est située à l'extrême Nord-est de l'Algérie à environ 3 km des frontières Algéro-Tunisienne, et à environ 80 km à l'est de la ville de Annaba. Elle est implantée dans un environnement très vulnérable puisqu'elle se trouve à proximité du lac Tonga, (zone humide d'importance internationale «site Ramsar»), située dans le Parc National d'El-Kala (PNEK).

### **Objectifs et démarche**

Dans le cadre de cette problématique environnementale, l'objectif de notre travail est de contribuer à une étude d'impact de la décharge non contrôlée de Kef Oum Teboul sur les propriétés physicochimiques des sols.

Nous souhaitons apporter un éclairage sur l'état actuel de la décharge et les déchets contenant. Nous essayons ainsi de déterminer par une analyse des images satellitaires l'évolution de la décharge dans l'espace et le temps et d'évaluer le degré de contamination des sols hébergeant la décharge par une caractérisation physicochimique.

### **Structure de la thèse**

Notre travail de recherche s'articule en cinq chapitres depuis les concepts bibliographique jusqu'à l'évaluation finale du degré de menace de la décharge

**Le premier chapitre**, est une synthèse bibliographique détaillée sur la pollution des sols, la gestion des déchets, la mise en décharge et ces différents impacts environnementaux et sanitaires.

**Le second chapitre**, permettra de présenter la région d'étude, nous chercherons dans ce chapitre à donner un aperçu sur les caractéristiques physiques de la zone d'étude ;

**Le troisième chapitre**, est centré sur l'évolution spatiotemporelle de la décharge, nous essayons d'estimer le taux de l'évolution des dépôts de déchets au cours des douze dernières années ainsi que leurs distribution spatiale ;

**Le quatrième chapitre**, s'intéresse à la réalisation d'un diagnostic et une évaluation quantitative et qualitative des déchets par une analyse prospective de la décharge et la réalisation des prélèvements et analyses de déchets et du sol.

**Le cinquième chapitre**, est consacré à la caractérisation physico-chimique et l'évaluation des éléments traces métalliques dans les sols de la décharge.

Nous concluons ce travail par un récapitulatif de l'ensemble des résultats obtenus plus des recommandations.

## **I-1. Généralités sur les sols**

Le sol est une ressource naturelle, peu ou lentement renouvelable, considéré comme la plus importante des quatre ressources naturelles renouvelables sur lesquelles se fonde l'activité humaine de production.

La surface du sol n'est pas extensible mais globalement en voie de dégradation (surtout dans les pays pauvres), jusqu'à son élimination ou sa stérilisation.

Comme support de la biosphère, le sol joue un rôle essentiel dans la circulation des composés vitaux et dans la biodisponibilité de ces composés pour les organismes vivants. Il assure ainsi le maintien de sa fertilité et, de ce fait, de nombreux cycles biogéochimiques, s'y déroulent : cycle de l'eau, de l'azote, du soufre, du phosphore, du fer. Un sol peut être déclaré fertile et sain si la quantité de polluants qu'il reçoit est égale ou inférieure à celle qu'il peut éliminer (**Baudelet, 2004**).

Le sol est lieu privilégié d'innombrables réactions biochimiques et géochimiques ; sa contamination empêche ceux-ci de jouer correctement leur rôle de filtre actif qui garantit la qualité des eaux, la santé des végétaux, mais qui est aussi

On note une multiplication des sites contaminés par les dépôts des déchets toxiques ou d'anciens lieux de production, le développement des produits de traitement agricole et des engrais de synthèse, également dû à la chimie, enfin, plus récemment sont apparus des dommages à vaste échelle dus aux retombées de la pollution de l'atmosphère, dues à des cheminées insuffisamment filtrées (**Zmirou et al., 2003**).

Un sol dégradé doit être restauré (réhabilité), afin qu'il puisse retrouver son potentiel nourricier initial, la réhabilitation consiste en une baisse considérable de la toxicité (ou du risque) des sites en utilisant soit des procédés naturels (bio-remédiation), soit des nouvelles technologies de protection de l'environnement (**Vandamme, 2011**).

### **I-1.1. Définitions d'un sol**

Les sols constituent une interface issue des interactions entre les différents ensembles que sont la lithosphère, l'hydrosphère, l'atmosphère, la biosphère et enfin l'anthroposphère. Cette particularité des sols rend difficile le choix d'une définition unique, selon l'Association française pour l'étude du sol (**AFES**), une définition officielle des sols formulée en 2014, puis retenue en 2018, définissant le sol comme un volume qui s'étend depuis la surface de la Terre jusqu'à une profondeur marquée par l'apparition d'une roche dure ou meuble, peu altérée, ou peu marquée par la pédogenèse. L'épaisseur du sol peut varier de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres, ou plus. Il constitue, localement, une partie de la couverture

pédologique qui s'étend à l'ensemble de la surface de la Terre. Il comporte le plus souvent plusieurs horizons correspondant à une organisation des constituants organiques et/ou minéraux (la terre). Cette organisation est le résultat de la pédogenèse et de l'altération du matériau parental. Il est le lieu d'une intense activité biologique (racines, faune et micro-organismes). »

Le sol peut aussi être défini comme la couche supérieure de la croûte terrestre composée de particules minérales, de matière organique, d'eau, d'air et d'organismes, le sol est donc un système hétérogène et complexe. Il est composé d'une phase solide représentée par les particules du sol, une phase liquide représentée par l'eau du sol (qui peut être enrichie en de nombreux composés et particules) et une phase gazeuse constituée par l'air emprisonné dans le sol (**Demougeot, 2004**).

D'après **Cornu & Clozel (2000)**, le sol provient en général de l'altération de la roche mère sous-jacente, appelée sous-sol. La pédologie décrit les différents types de sols ainsi formés, en distinguant la couche arable et le sol sous-jacent. L'agriculture travaille la couche arable, plus riche en matières organiques. L'horizon sous-jacent, entre la couche arable et la roche mère, contribue aussi à la nutrition de la plante en éléments minéraux et en eau.

### I-1.2. La composition du sol

Le sol est un système complexe formé de très nombreux composants minéraux et organiques soumis à des phénomènes physiques, chimiques et biologiques en constante interaction. Les principaux constituants du sol sont de trois phases : une phase solide occupe 40 % (sol très fragmenté) à 70 % (sol très compacté) du volume du sol, constitué d'une fraction minérale (sable, argile...), et une fraction organiques (débris d'organismes végétaux), d'une phase liquide " solution du sol ", formée d'eau et d'ions et une enfin une phase gazeuse " atmosphère du sol ", formée des gaz qui circulent dans les interstices du sol (Figure 1). Les proportions des phases gazeuse et liquide dépendent de l'hydratation du sol (**Donadieu, 2016**). La fraction minérale solide représente 93 à 95 % du poids total du sol (**Calvet, 2003**)

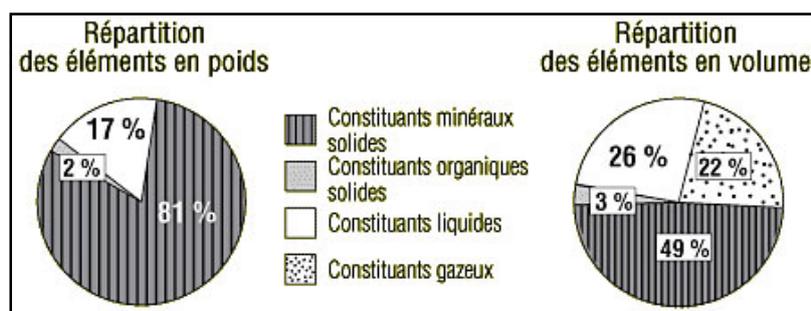


Figure 1. Répartition des éléments en poids et en volume dans le sol (**Christiane, 2009**).

### **I-1.3. L'évolution des sols**

Le sol se forme à partir d'un matériau parental, le plus souvent une roche, qui, sous l'effet de différents facteurs, s'altère, se désagrège et contribue à former la composante minérale du sol. Il peut également se développer à partir de matériaux apportés par le vent (cas des limons et sables éoliens) ou l'eau (marais, terrasses alluviales...). Les organismes vivants contribuent à former le stock de matière organique (**Girard *et al.*, 2011**).

Considéré comme un système dynamique, le sol évolue sans cesse sous l'effet de plusieurs facteurs en interaction. C'est ainsi que le climat, la végétation, le matériau parental, l'érosion (mécanique, chimique), l'hydrologie, le temps ou l'action de l'homme conditionnent le type de sol observé et sa durée de formation. Par exemple, un sol se développe d'autant plus rapidement qu'il se trouve sous un climat plus humide et plus chaud ou que la roche dont il provient est plus tendre et altérable.

La formation d'un sol ne se déroule pas à échelle humaine mais demande du temps. Le temps de formation des sols varie de quelques milliers d'années, comme pour les sols des bordures des cours d'eau, à plusieurs millions d'années (**Pillet & Longet, 1989**).

Quand on dit qu'un sol est «mature», cela ne veut pas dire que sa formation est terminée. Cela signifie que les changements dans le sol sont devenus pratiquement imperceptibles, car le sol entre en équilibre dynamique avec son environnement. Autrement dit, la vitesse à laquelle le sol se forme est approximativement égale à la vitesse à laquelle le sol se décompose ou est naturellement érodé (**SSSA, 2019**).

### **I-1.4. La dégradation des sols**

La dégradation des sols est la perte réelle ou potentielle de productivité ou d'utilité consécutive à des facteurs naturels ou anthropiques. Il s'agit essentiellement d'une diminution de la qualité des sols ou d'une réduction de leur productivité agricole, végétale et animale, et de sa capacité de régulation environnementale. La dégradation des sols résulte des activités humaines ou elle est un phénomène naturel aggravé par les activités humaines (**Lal, 1997 ; Brabant, 2008**).

La dégradation d'un sol correspond à sa transformation (physique, chimique et/ou biologique) qui implique la détérioration plus ou moins réversible d'une ou de plusieurs de ses fonctions. Il peut s'agir de modifications voulues, destinées à améliorer certaines de leurs caractéristiques (teneur en matière organique, pH, salinité) ou fonctions (drainage, etc.), mais, bien souvent, intervenir sur le sol provoque différentes formes de dégradation (figure 2).

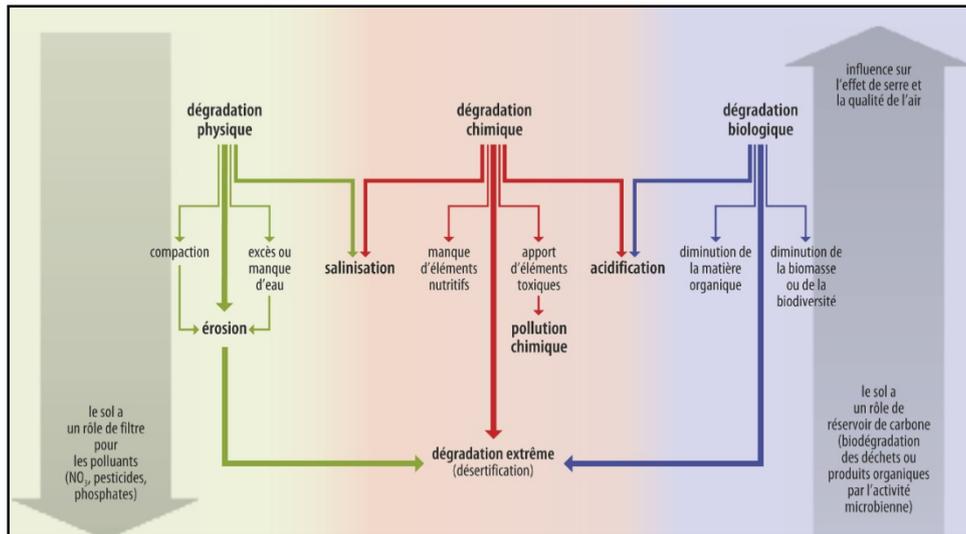


Figure 2. Différentes formes de dégradation du sol (Dozzo, 2019)

Qu'elle soit d'ordre physique, chimique et/ou biologique, la dégradation est un phénomène complexe, elle a non seulement des impacts néfastes sur les sols (modifications des propriétés et des fonctions du sol), mais également, du fait du rôle d'interface que jouent les sols, sur l'hydrosphère, l'atmosphère, la lithosphère et la biosphère.

#### a- La dégradation physique

La dégradation physique des sols correspond principalement à une désorganisation de leur structure. Cette dernière, définie par l'organisation spatiale des agrégats du sol (assemblages de constituants minéraux et organiques), délimite les volumes des vides ou porosité du sol.

La dégradation physique contribue à l'affaiblissement de la structure du sol induisant l'encroûtement, la compaction, et l'érosion (Gueye, 2013) ;

#### b- La dégradation chimique

La dégradation chimique, comprenant la perte de nutriments (déplétion lors de la culture de sols pauvres sans fertilisation suffisante), la salinisation (insuffisance de drainage des zones irriguées, intrusion d'eau salée), la pollution et l'acidification ;

#### c- La dégradation biologique

Dans le sol, l'activité biologique contrôle les processus importants qui déterminent sa fertilité: taux ou vitesse de décomposition, de minéralisation, de dénitrification ou de lixiviation. En fait, il y a une très étroite relation entre l'activité microbienne et la teneur en eau du sol.

Ainsi, il existe un seuil critique de la teneur en eau en dessous duquel les processus biologiques tels que les taux de diffusion de l'oxygène et des éléments nutritifs sont inhibés (Scholes *et al.*, 1994 in Woomer & Swift, 1994).

#### **I-1.4.1. La pollution des sols**

Selon le 1<sup>er</sup> rapport du Conseil sur la qualité de l'Environnement de la Maison Blanche (1965), la pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît comme le sous-produit d'une action humaine, au travers les effets directs et indirects de ses activités. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou à travers de ressources en produits agricoles, en eau, et autres produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter indirectement en altérant les objets physiques qu'il détient, les possibilités récréatives du milieu ou encore en enlaidissant la nature.

Dans une approche « milieu », le sol est interfacé avec l'eau et l'air ; la notion de pollution du sol appelle donc généralement aussi celle de contamination d'un ou plusieurs composants des écosystèmes (air, eau) ou potentiellement des organismes vivant en contact direct ou indirect avec le sol (invertébrés du sol, champignons en particulier) avec une incidence sur l'écosystème, au-delà des seuils variant selon la nature du polluant et du sol.

La pollution du sol peut être due à l'accumulation sur le sol des substances non biodégradables, ou à l'accumulation des substances biodégradables mais dont la vitesse de biodégradabilité excède le taux d'accumulation. Alors ces substances peuvent être stockées sur le sol ou être lessivées par les eaux de ruissellement vers les cours d'eau voisins ou vers la nappe phréatique ; ou encore s'évaporer vers l'atmosphère. **(ALPE-TOGO)**.

Certains sols sont souvent utilisés comme décharge pour les déchets ménagers et industriels. Dans beaucoup de régions cultivées, le lessivage des engrais et des effluents d'élevage épandus en excès provoque une augmentation importante de teneur en nitrate et autres éléments minéraux dans les nappes phréatiques.

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

Pour le polluant, il peut être défini comme un élément dangereux susceptible de présenter un risque pour les milieux et les organismes vivants **(Ramade, 1993)**.

#### **I-1.4.2. Les sources de pollution**

Les sources de la pollution des sols (facteurs perturbateurs de l'écosystème) peuvent être d'origine naturelle dans le cas de la sécheresse, des incendies, les volcanismes, l'altération de la roche mère... etc. Notons que, d'une manière générale les sources naturelles sont moins fréquentes avec des conséquences plus ou moins négligeables. Il existe cependant des sols qui sont naturellement pollués (sol riche en métaux lourds ou en hydrocarbure).

Les sources de la pollution de sols peuvent également être d'origine anthropique soit directe, dues aux rejets directs ou accidentels sur le sol, des polluants divers qui peuvent être issus de l'agriculture, de l'industrie, des déchets ménagers, soit indirectes, dues aux conséquences de la pollution atmosphérique et/ou de la pollution des eaux. Les causes anthropiques sont donc les plus graves car l'homme introduit dans le sol d'énormes quantités de produits naturels biodégradables dépassant la capacité d'autoépuration des sols ou des produits synthétisés à demi-vie élevé ou encore des produits non biodégradables. (ADEME, 2012). Les sources de la pollution des sols sont :

- Décharge de déchets industriels ;
- Percolation de l'eau contaminée ;
- Rupture de réservoirs de stockage souterrains ;
- Une application excessive de pesticides, d'herbicides ou d'engrais ;
- Infiltration des déchets solides.

#### **I-1.4.3. Les formes de la pollution**

Il existe deux formes de pollution du sol, la pollution dite diffuse (indirecte) et la pollution dite ponctuelle (directe). (Piedrafita & María, 2007)

##### **I-1.4.3.1. La pollution diffuse**

Elles se développent sur de grandes surfaces de sols, elles proviennent généralement d'épandages de produits solides ou liquides (emploi d'engrais ou de pesticides en agriculture) ou de retombées atmosphériques. La dispersion puis l'accumulation de substances dangereuses sur ces sols donne ainsi des « sites uniformément contaminés » (NF ISO 11074-1, 1997).

##### **I-1.4.3.2. La pollution ponctuelle**

A l'inverse des pollutions diffuses, elles se distinguent par la présence ponctuelle dans les sols et sous-sols de substances dangereuses provenant généralement de déversements, de fuites ou

de dépôt de déchets. Non confinées et en fortes concentrations, ces substances donnent naissance à des « sites localement contaminés » (NF ISO 11074 -1, 1997).

Le milieu urbain est en effet à l'origine de plusieurs sources de pollution des sols (Tableau 1)

Tableau 1 : Sources urbaines de pollution ponctuelle de sols (Piedrafita & María, 2007)

<b>SOURCES URBAINES DE POLLUTION PONCTUELLE DE SOLS</b>
Stations-service
Maisons familiales
Anciennes décharges
Dépôts clandestins
Stations d'épuration

#### **I-1.4.4. Les principaux types de polluants**

##### **I-1.4.4.1. Les polluants organiques**

Ils proviennent principalement de trois ensembles d'activités : industrielles (production d'énergie, métallurgie, industries chimique,...), urbaines (transport, gestion et traitement des déchets), et 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 4 familles suivantes :

**a- Les Polychlorobiphényles (PCB)**, on les trouve dans la plupart des boues de station d'épuration à des concentrations moyennes comprises entre 0,4 et 10 mg. PCB kg<sup>-1</sup> (Alcock & Jones, 1993 ; Beck *et al.*, 1995 ; Jauzein *et al.*, 1995)

**b- Les Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)** sont formés par la fusion de plusieurs noyaux benzéniques. Ces composés peuvent être d'origine naturelle et sont présent dans des combustibles fossiles à des concentrations importantes. 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 .PCB kg<sup>-1</sup> (Beck *et al.*, 1995).

**c- Les Polychlorodibenzo-dioxines (PCDD) et Polychlorodibenzo-furanes (PCDF)** produit par des phénomènes thermiques principalement à partir des produits organiques chlorés, par exemple, lors de l'incinération des déchets ou de résidus organiques et de la combustion d'essences plombées utilisant des déccrassant chlorés. Des PCDD et PCDF sont aussi formés au cours du blanchissement de papier par chloration, d'autres sources d'émission sont les fonderies et les installations sidérurgiques. (Barriuso *et al.*, 1996).

**d- Les composés organiques volatils (COV) qui sont des composés** contenant du carbone et présentant une pression de vapeur supérieur à 0,13 k Pa (**Directive 1999/13/CE**). Ils sont présents dans des combustibles et dans des fumées, mais les principales sources de pollution sont liées à des activités industrielles (dégraissage de pièces métallique dans la métallurgie, fabrication d'adhésifs, nettoyage de vêtements).

En fonction du mode d'arrivée des polluants au sol et de l'étendue des pollutions, ces produits organiques peuvent être impliqués dans deux types de pollution : des pollutions ponctuelles ou accidentelles, se caractérisant par des déversements très localisés, dans l'espace et dans le temps, et des pollutions diffuses, impliquant des polluants à faibles concentrations sur des grandes surfaces. La pollution des sols par des PCB et des HAP par dépôts atmosphériques en est un exemple, de même que les pollutions dues aux pesticides lors de leur usage agricole. (**Barriuso et al., 1996**).

#### **I-1.4.4.2. Les polluants inorganiques**

Cette famille est principalement composée par les métaux lourds, également appelés «Éléments traces». Tous ces composés se retrouvent à l'état naturel dans l'environnement. Leur dangerosité s'exprime dans une inhalation ou ingestion directe des poussières. (**Mérian, 1991**).

##### ***Origines et impacts des métaux lourds***

Dans la croûte terrestre, douze éléments dont l'oxygène (O), le silicium (Si), l'aluminium (Al), le fer (Fe), le calcium (Ca), le sodium (Na), le potassium (K), le magnésium (Mg), le titane (Ti), l'hydrogène (H), le phosphore (P), le manganèse (Mn), constituent plus de 99% en poids du total de l'ensemble des éléments et sont présents à des teneurs moyennes supérieures ou égales à 1ppm (1g/kg) (**Pearson, 1963**). Les autres éléments (68 éléments minéraux), dont les teneurs sont inférieures à 1ppm (1g/kg), sont désignés sous le terme d'éléments traces métalliques (ETM) (**Pearson, 1963**), leur abondance totale dans la croûte terrestre, est de 0,6 % (**Baize, 1997**).

Un métal lourd se caractérise par une densité supérieure à 5 g/cm<sup>3</sup>. Les métaux lourds que l'on retrouve le plus souvent dans le sol sont : le cadmium, le manganèse, le cobalt, le chrome, le cuivre, le plomb, le mercure, le nickel et le zinc. L'arsenic est métalloïde lourd, peut également être associé à cette catégorie (**McLean & Bledsoe, 1992**).

La présence de métaux lourds à des fortes concentrations entraîne la contamination des sols, posant ainsi un sérieux problème pour l'environnement et la santé humaine, du fait qu'ils sont persistants et non dégradables. L'USEPA a mis en place une liste des polluants les plus

dangereux et les plus présents dans les sols (représentant un niveau toxicologique élevé) parmi lesquels nous retrouvons le Cd, Cr, Cu, Pb et Zn (**Han *et al.*, 2002**).

Les métaux lourds se libèrent dans le milieu depuis leurs sources qui peuvent être d'origine naturelle ou d'origine anthropique. En effet, ils sont des constituants naturels dans les roches et dans les gisements minéraux dont l'activité humaine a renforcé leur présence dans l'environnement en modifiant leurs répartitions, leurs formes chimiques et leurs concentrations. Parmi les sources naturelles, nous pouvons citer l'exploitation des mines, l'érosion des gisements naturels et les prélèvements d'eau ainsi que les éruptions volcaniques (**Miquel, 2001**). Parmi les sources anthropiques, nous pouvons citer les activités minières, l'industrie métallurgique et sidérurgique associée, les engrais et les pesticides appliqués dans les activités agricoles (fumiers, amendements, fertilisants), les incinérateurs et les cendres d'incinération des déchets (ordures ménagères), les déchets médicaux, les rejets toxiques des batteries, les émissions des usines et moteur à explosion, les émissions lors de la combustion du charbon et du pétrole. De plus, le ruissellement de surfaces contaminées, les effluents des égouts et des boues des stations d'épuration et les activités militaires peuvent être à l'origine de la contamination des sols (**Mercier, 2000 ; Callender, 2003 ; Johnson *et al.*, 2005 ; Levasseur *et al.*, 2006 ; Mercier *et al.*, 2007 ; Perron & Hébert, 2007 ; Bliefert & Perraud, 2009 ; Dermont *et al.*, 2010 ; Laporte-Saumure *et al.*, 2010 ; Guemiza, 2013**). Donc, ce sont les activités industrielles qui constituent la principale source de contamination des sols par les métaux (**USEPA, 2007**).

Une fois libérés, les métaux lourds sont transportés par voie éolienne et/ou par voie aqueuse. La mobilité et le comportement des métaux dans l'environnement dépend de plusieurs paramètres tels que : le climat, le pH et le potentiel redox du milieu, la composition du sol (teneurs en argile, limon et sable, teneurs en carbonates, en oxydes et en hydroxydes de fer, d'aluminium et de manganèse), la capacité d'échange cationique (CEC), le type, la distribution et la vitesse de décomposition de la matière organique, le type de végétation présente (**Adriano, 2001 ; Darling & Thomas, 2003**). Généralement, l'adsorption des ions métalliques dans les sols est importante en raison de la présence des argiles et de la matière organique (MO) qui sont des composés ayant de grandes surfaces spécifiques (allant jusqu'à 800 m<sup>2</sup>/g pour les argiles). Ainsi, une forte CEC et la présence de ligands organiques (carboxylique et phénolique) et des hydroxydes limitent la disponibilité des métaux. Cependant, une baisse du pH augmente la solubilité des métaux et entraîne leur lixiviation dans les eaux souterraines et les eaux de surface (**Iskandar, 2001**). Les formes chimiques sous lesquelles les métaux sont présents influencent aussi leur comportement dans les sols. Il existe

des formes libres (élémentaire, particulaire et ionique) et des formes liées (adsorbées, complexés aux composés organiques insolubles, précipités sous forme de sels ou des minéraux solides ou présents dans la structure cristalline des minéraux) (McLean & Bledsoe, 1992). Les ETM représentent une grande diversité de pollution, dépendant principalement de la source de leurs émissions (Tableau 2).

Tableau 2 : Principales sources anthropiques d'ETM. (D'après O'Connell *et al.*, 2008)

Sources anthropiques en ETM		
Source	ETM	Caractéristique de la pollution
Mines de métaux	Cd, Cu, Ni, Cr, Co, Z	Reliquat d'acide de drainage, résidus de métaux, terrils
Intrants agricoles	Cr, Mo, Pb, U, V, Zn	Ruissellement, pollution des eaux superficielles et souterraines, bioaccumulation dans les plantes
Boue d'épuration	Zn, Cu, Ni, Pb, Cd, Cr, As, Hg	transfert dans les eaux de surface et souterraines
Industries métallurgiques	Pb, Mo, Ni, Cu, Cd, As, Te, U, Zn	résidus de métaux et terrils
Élimination des déchets	Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Hg	lessivage des zones de décharge, transfert dans les eaux de surface et souterraines
Électronique	Pb, Cd, Hg, Pt, Au, Cr, As, Ni, Mn	déchets solides et liquides provenant des procédés de fabrication et de recyclage
Industries de finition des métaux	Cr, Ni, Zn, Cu	Effluent liquide produit par les procédés de galvanisation et plaquage
Batteries	Pb, Sb, Zn, Cd, Ni, Hg	Écoulement du liquide des batteries contaminant le sol et les eaux souterraines
Peintures et pigments	Pb, Cr, As, Ti, Ba, Zn	Déchets liquides lors de la production et détérioration des peintures, pollution du sol

Tout élément est toxique quand il est absorbé en excès par rapport à la capacité d'assimilation de l'organisme. La toxicité des métaux pour les micro-organismes du sol est principalement due à leur capacité à établir des complexes stables avec les protéines ce qui peut altérer les sites actifs ou déplacer des cofacteurs métalliques essentiels (Baath, 1992).

La toxicité des métaux lourds pour un même organisme dépend du type de sol, de la disponibilité de chaque minéral dans ce sol, de l'état physiologique du micro-organisme (Baath, 1992). Les éléments les plus souvent rencontrés comme phyto-toxiques sont le cuivre, le manganèse, le nickel et le zinc (Logan & Traina, 1993). Les plus toxiques pour l'homme sont notamment, le cadmium, le mercure, le chrome et le plomb. Il est ainsi distingué une toxicité aiguë (absorption en forte dose sur un court laps de temps) et une toxicité chronique (absorption à faible dose sur temps plus long).