

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Biologie

Option : Biotechnologie et valorisation des plantes

Thème :

Impact de la pollution sur les sols agricoles péri-urbains

Présenté par : HEMMAR Sarah

Devant le jury composé de :

Présidente : M^{me} Toumi. F - Professeur

UDL-Sidi Bel Abbès.

Encadreur : M^{me} CHIALI. K - Maître de conférences

UDL-Sidi Bel Abbès.

Examineur : Mr Djellouli. R - Maître-Assistant

UDL-Sidi Bel Abbès.

Résumé

L'objectif de ce travail, en premier lieu, est de se familiariser avec le concept de la pollution, d'identifier son origine (naturelle ou anthropique), de classer les types de pollutions et de polluants qui ocurrent dans la nature, et parler des diverses sources d'émission des substances potentiellement polluantes et leurs impacts sur les sols et spécifiquement les sols agricoles attenants aux zones urbaines. Il s'agit d'évaluer l'impact de la pollution sur les terres agricoles péri-urbaines et ses conséquences sur l'environnement et la santé humaine, en particulier la pollution qui résulte de la contamination des sols en métaux lourds. Afin de reconnaître les dangers que représente certaines substances sur les écosystèmes.

Une partie a été consacrée aux normes et réglementations adoptés dans quelque pays du monde en guise de prévention contre la contamination des sols en contrôlant les taux d'émissions de substances toxiques dans l'environnement. Mais aussi les politiques mises en place pour remédier au problème de la pollution des sols et leurs méthodes de gestion des sites pollués.

Mots clés : Pollution, Terres agricoles péri-urbaines, Santé humaine, Métaux lourds, Normes.

Abstract

The aim of this study, in the first place, is to familiarize with the concept of pollution, to identify its origin (natural or anthropogenic), to classify the types of pollution and pollutants that occur in nature, as well as the various sources of emissions of potentially polluting substances and their impacts on soils and specifically agricultural soils adjacent to urban areas. The goal is to assess the impact of pollution on peri-urban agricultural land and its consequences on the environment and human health, in particular pollution resulting from soil contamination of heavy metals. In order to recognize the dangers of certain substances to ecosystems.

A part is devoted to the standards and regulations adopted in some countries of the world to prevent soil contamination by controlling the rates of emissions of toxic substances into the environment. But also the policies put in place to address the problem of soil pollution and their methods of managing polluted sites.

Key words : Pollution, peri-urban agricultural land, Human health, Heavy metals, Standards.

المخلص

الهدف من هذا العمل، في المقام الأول، هو التعريف بمفهوم التلوث، وتحديد مصدره (طبيعي أو بشري المنشأ)، وتصنيف أنواع التلوث والملوثات التي تحدث في الطبيعة، وكذلك مختلف مصادر انبعاثات المواد التي يحتمل أن تكون ملوثة، وآثارها على التربة وعلى وجه التحديد التربة الزراعية المتاخمة للمناطق الحضرية. والهدف من ذلك هو تقييم أثر التلوث على الأراضي الزراعية في المناطق المحيطة بالحضر وما يترتب عليه من آثار على البيئة وصحة الإنسان، ولا سيما التلوث الناجم عن تلوث التربة بالمعادن الثقيلة. إدراك مخاطر بعض المواد على الأنظمة البيئية.

ويخصص جزء للمعايير والأنظمة المعتمدة في بعض بلدان العالم لمنع تلوث التربة عن طريق التحكم في معدلات انبعاثات المواد السامة في البيئة. ولكن أيضاً السياسات التي تم وضعها لمعالجة مشكلة تلوث التربة وأساليب إدارتها للمواقع الملوثة.

الكلمات المفتاحية : التلوث، التربة الزراعية المتاخمة للمناطق الحضرية، صحة الإنسان، المعادن الثقيلة، المعايير

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, ma mère **Nadia** et mon père **Youcef**, pour leurs soutien et encouragements tout au long de mon parcours scolaire, aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de leurs sacrifices.

A mes petites sœurs **Maella** et **Yness**, et à mon frère **Nadir**, qui m'ont toujours poussé à travailler dure et aller de l'avant.

A mes amies les plus proches, **Imène Bouteldja**, **Faiza El-Mestari**, **Sarah Meterfi**, et **Nana Lassakeur** pour leurs disponibilité, aide précieuse, et soutien morale.

A mes amies que je n'ai pas citées mais que je n'oublierai jamais. Trouvez dans ce travail, l'expression de ma profonde gratitude et reconnaissance.

A toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire. Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux et le fruit de votre soutien infallible.

Sarah HEMMAR

Remerciements

Je voudrais d'abord adresser toute ma gratitude et mes remerciements à **Madame CHIALI Khadidja**, je la remercie de m'avoir encadrée, orientée, conseillée et l'intérêt qu'elle a donné à ce travail et aussi pour sa disponibilité et ses avis éclairés tout au long de ce projet.

Ma profonde reconnaissance à **Madame TOUMI Fouzia**, responsable de filière de Biotechnologie, d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance.

Je suis très honorée de la présence de **Mr. Djellouli Riad**, maitre-assistant à l'UDL, et je le remercie chaleureusement d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie également les enseignants des départements de biologie et environnement pour tout le savoir qu'ils ont su nous transmettre durant ces années, sans oublier tout le corps professionnel de ces départements et de la faculté.

Enfin, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

Table des matières

Résumé

Dédicaces

Remerciements

Table des matières

Liste des tableaux et figures

Liste des abréviations

Introduction

Chapitre I : Généralités sur la pollution des sols

I.	La pollution.....	1
I.1.	Les formes de pollution.....	1
II.	Le sol	3
II.1.	Propriétés physiques du sol	4
II.1.1.	La texture	4
II.1.2.	La structure	5
II.1.3.	La porosité.....	5
II.2.	Contamination des sols.....	6
1.	Les pollutions diffuses	7
2.	Les pollutions ponctuelles	7
III.	Les principaux polluants des sols	8
III.1.	Les Polluants Organiques	9
III.1.1.	Les polluants organiques persistants (POP)	9
III.1.1.1.	Les Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).....	10
III.1.1.2.	Les polychlorobiphényles (PCB).....	11
III.1.1.3.	L'hexachlorobenzène (HCB).....	11
III.1.1.4.	Les Dioxines / Furanes (PCDD-F).....	12
III.1.2.	Les composés organiques volatiles (COV).....	12
III.1.3.	Sources d'émissions des polluants organiques	13
III.2.	Les polluants inorganiques (Métaux lourds)	14
III.2.1.	Cadmium (Cd).....	15
III.2.2.	Plomb (Pb).....	16
III.2.3.	Arsenic (As)	18
III.2.4.	Cuivre (Cu).....	19
III.2.5.	Mercure (Hg)	20
III.2.6.	Nickel (Ni)	22
III.2.7.	Zinc (Zn)	23
III.2.8.	Sources d'émissions des polluants inorganiques.....	23
III.2.8.1.	Les engrais.....	25

III.2.8.2. Les pesticides.....	25
III.2.8.3. Les bio solides et fumiers	26
III.2.8.4. Les eaux usées	27
III.2.8.5. Extraction de métaux, procédés de broyage et déchets industriels	27
III.2.8.6. Sources aéroportées	28
III.2.8.7. Les métaux lourds dans l'aérosol	29
Chapitre II : Pollution et agriculture péri-urbaine	
I. Définition et historique de l'agriculture péri-urbaine.....	30
II. Trafics routiers et pollution des sols agricoles	31
III. Absorption des métaux lourds par les plantes	32
IV. Les métaux lourds et l'environnement	33
V. Les métaux lourds et la santé humaine.....	34
Chapitre III : Normes de qualité du sol	
I. Quelques normes de qualité du sol	37
I.1. Teneurs maximales en Pb et Cd dans les fruits et légumes selon l'Union européenne.....	39
I.2. Norme internationale : ISO 11047 : 1998	41
I.3. Etats des lieux sur les normes de qualité des sols et plans de gestion dans quelque pays	42
I.3.1. Nigeria	42
I.3.2. Pologne	42
I.3.3. Etats unis.....	43
I.3.4. Algérie	44
I.4. Normes d'application de métaux lourds sur les sols agricoles à travers les boues d'épuration	45
Chapitre IV : Gestion et réhabilitation des sites pollués au niveau international	
I. Gestion et réhabilitation des sites pollués	46
I.1. France.....	46
I.2. Allemagne	48
I.3. Autriche.....	48
I.4. Belgique	49
I.5. Danemark.....	49
I.6. Grèce	51
Conclusion.....	52
Références bibliographiques.....	53

Liste des tableaux et figures

Tableau 1 : Différentes sources de métaux lourds qui contaminent les sols dans le monde chaque année	24
Tableau 2 : Utilisation actuelle courante des métaux dans l'industrie.....	27
Tableau 3 : Niveaux de métaux lourds dans l'air déclarés dans différents pays	29
Tableau 4 : Effets de certains métaux lourds sur la santé	35
Tableau 5 : Seuil de toxicité pour certains polluants minéraux rencontrés sur les sites pollués	37
Tableau 6 : Normes de qualité des sols pour les sols destinés aux résidences chez quelque pays	38
Tableau 7 : Normes de qualité des sols pour les sols destinés aux industries chez quelque pays	39
Tableau 8 : Teneurs maximales en plomb dans les légumes et fruits autorisés pour commercialisation dans l'union européenne	40
Tableau 9 : Teneurs maximales en cadmium dans les légumes et fruits autorisés pour commercialisation dans l'union européenne	40
Tableau 10 : Limites indicatives de la teneur du sol (mg/kg de matière sèche) en éléments extractibles par l'eau régale conformément à l'ISO 11466 ..	41
Tableau 11 : Valeurs cibles et valeurs d'intervention pour certains métaux dans un sol standard au Nigeria	42
Tableau 12 : Normes de qualité des sols sur des couches de surface des catégories de terres de groupes C et B en Pologne	43
Tableau 13 : Limites réglementaires applicables aux métaux lourds appliqués aux sols selon l'EPA.....	44
Tableau 14 : Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents liquides industriels en Algérie	44
Tableau 15 : Comparaison des lignes directrices pour l'application des métaux lourds sur les sols agricoles à travers les boues d'épuration (kg/ha) chez quelque pays.....	45

Figure 1 : Triangle des textures des sols	4
Figure 2 : Les principaux types de structure fragmentaire	5
Figure 3 : Catégorisation systématique des polluants des sols	8
Figure 4 : Principales sources de pollution routière	31

Liste des abréviations

% : Pourcentage

µg / kg : Microgramme par Kilogramme

ARR : Analyse de risques résiduels

As : Arsenic

BTX : Benzène, Toluène, Xylène

Cd : Cadmium

CE : Conformité européenne

CIRC : Centre international de recherche sur le cancer

COV : Composés organiques volatils

Cr : Chrome

Cu : Cuivre

DDT : Dichlorodiphényltrichloroéthane

EPA : Agence de protection de l'environnement

ETM : Eléments traces métallique

F : Fluorine

Fe : Fer

g/cm³ : Gramme par Centimètre cube

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

Hc : Hydrocarbure

HCB : Hexachlorobenzène

Hg : Mercure

ISO : International Organization for Standardization

Kg/An : Kilogramme par An

Kg/ha : Kilogramme par Hectare

Kg/ha/ An : Kilogramme par Hectare par An

Lb/A : Livre par Aire

Lb/A/ An : Livre (unité de mesure) par Aire par An

m : Mètre

Mg/Kg : Milligramme par Kilogramme
Mg/L : Milligramme par litre
MS : Matière sèche
Nacl : Chlorure de sodium
ng/m³ : Nanogramme par mètre cube
Ni : Nickel
NO : Oxyde d'azote
NO₂ : Dioxyde d'azote
NQS : Normes de qualité du sol
Pb : Plomb
PBB : Biphényles polybromés
PBDE : Ethers diphényliques polybromés
PCB : Polychlorobiphényles
PCDD : Dibenzo-p-dioxines polychlorées
PCDD-F : Dioxines/furanes
PCDF : Dibenzofuranes polychlorés
Pd : Palladium
POP : Polluants organiques persistants
Ppm : Partie par million
Pt : Platine
Rh : Rhodium
SAA : Spectrométrie d'absorption atomique
Se : Sélénium
SO₂ : Dioxyde de soufre
USA : Etats-Unis d'Amérique
Z : Numéro atomique
Zn : Zinc

Introduction

La pollution a des incidences importantes sur la santé humaine, l'environnement et même sur le fonctionnement de certains des systèmes terrestres, notamment le climat. La pollution touche toutes les parties de la planète. Elle affecte notre santé à travers la nourriture que nous mangeons, l'eau que nous buvons et l'air que nous respirons (Webmaster1)

La pollution des sols par rapport à l'érosion et à la salinité, représente une menace nouvelle apparue progressivement depuis l'essor de l'industrie chimique, on note une multiplication des sites contaminés par les dépôts de déchets toxiques ou d'anciens lieux de production, pollution qui auparavant n'était connue que dans les environs des sites miniers et métallurgiques (Koller,2009). Le sol étant un « puits universel » supporte le plus grand fardeau de la pollution environnementale (Ashraf et al, 2014).

Au fur et à mesure que notre population augmente et que l'industrialisation devient plus intense, le problème de la pollution s'aggrave (Mellanby, 1976). Avec l'évolution rapide de l'industrialisation et de l'urbanisation dans les pays en développement, un certain nombre de polluants produits par les activités anthropiques pénètrent dans les sols urbains agricoles en laissant un état de dégradation irréversible (Li, 2018).

Ce mémoire comporte quatre chapitres : Le premier chapitre est consacré à la pollution des sols et les différentes formes dont elle peut se manifester. Le deuxième chapitre est focalisé sur l'agriculture périurbaine et les conséquences de la pollution des sols agricoles attenants aux zones urbaines. Le troisième chapitre explore quelques normes de qualité de sols établis dans certains pays du monde. Le dernier chapitre est dédié aux politiques adoptés dans quelque pays concernant la pollution des sols.

*Chapitre I : Généralités sur la pollution
des sols*

I. La pollution

La pollution est une dégradation de l'environnement par l'introduction dans l'air, l'eau ou le sol de matières n'étant pas présentes naturellement dans le milieu (Webmaster2). C'est une introduction directe ou indirecte, par suite de l'activité humaine, de substances ou de chaleur dans l'air, l'eau ou le sol, susceptibles de porter atteinte à la santé humaine ou à la qualité des écosystèmes aquatiques ou des écosystèmes terrestres, qui entraînent des détériorations aux biens matériels, une détérioration ou une entrave à l'agrément de l'environnement ou à d'autres utilisations légitimes de ce dernier (Webmaster3).

Les polluants que l'on retrouve dans l'environnement peuvent être d'origine anthropique, c'est-à-dire produits par les activités humaines ou d'origine naturelle (émissions par la végétation, l'érosion du sol, les volcans, les océans, etc.). Tous les secteurs d'activité humaine sont susceptibles d'émettre des polluants : les activités industrielles, les transports (routiers et non routiers), les activités domestiques (chauffage en particulier), l'agriculture, la sylviculture... (Webmaster4)

I.1. Les formes de pollution

Les pollutions sont classées de différentes manières, cela peut être sur la base du type d'environnement pollué ou même la nature chimique du polluant. Parmi les principales formes de pollution de l'environnement on note la pollution de l'aire, l'eau, le sol, la pollution sonore et la pollution lumineuse.

a. La pollution de l'aire

La pollution atmosphérique concerne la dégradation de l'air que nous respirons à cause de substances polluantes qui se retrouvent dans l'atmosphère. Des pics de pollution atmosphérique ont souvent lieu en été. Les principaux polluants atmosphériques sont les particules fines, le dioxyde de soufre (SO₂),

l'ozone, les oxydes d'azote (NO et NO₂), les composés organiques volatils (COV), etc. (Webmaster5).

b. La pollution de l'eau

On appelle pollution de l'eau toute modification chimique, physique ou biologique de la qualité de l'eau qui a un effet nocif sur les êtres vivants (Webmaster6). La pollution de l'eau est mauvaise pour l'environnement car elle conduit à souiller les ressources d'eau douce, alors qu'il n'y a pas assez d'eau potable pour soutenir les écosystèmes. Une longue exposition à la pollution de l'eau conduit à un grave déclin de nombreuses espèces animales, la pollution excessive de l'eau peut même conduire à l'extinction d'espèces (Webmaster7).

c. La pollution du sol

La pollution du sol comprend la pollution des sols par des matériaux, principalement des produits chimiques, qui ne sont pas à leur place ou qui sont présents à des concentrations supérieures à la normale et qui peuvent avoir des effets nocifs sur les humains ou d'autres organismes. Il est difficile de définir exactement la pollution des sols car il existe des opinions divergentes sur la façon de caractériser un polluant ; tandis que certains considèrent l'utilisation de pesticides acceptable si leur effet ne dépasse pas le résultat prévu, d'autres considèrent que l'utilisation de pesticides ou même d'engrais chimiques n'est pas acceptable. Toutefois, la pollution des sols est également causée par d'autres moyens que l'ajout direct de substances chimiques xénobiotiques (d'origine humaine), comme les eaux de ruissellement agricoles, les déchets industriels, les précipités acides et les retombées radioactives (Stapleton, 2003).

d. La pollution sonore

La pollution sonore est souvent négligée, c'est la forme de pollution qui peut être aussi nuisible pour notre environnement. La pollution sonore en

provenance de voitures et de l'industrie peut avoir un impact négatif sur l'écosystème, elle est subie par des animaux, effrayés ils changent leurs habitats préférés. La pollution sonore n'est pas seulement sur terre, mais aussi dans nos océans, principalement en raison des forages en mer excessifs. Les espèces de la mer, tels que les dauphins et les baleines, sont parmi les espèces les plus touchées, car elles s'appuient largement sur leur sens, la pollution sonore peut donc modifier leurs activités quotidiennes telles que la chasse et la navigation, ce qui peut conduire à réduire les espèces (Webmaster7).

e. La pollution lumineuse

La pollution lumineuse excessive peut également avoir un impact négatif sur l'environnement. La pollution lumineuse peut affecter négativement les écosystèmes voisins et perturber le bon fonctionnement de la chaîne trophique. Elle est particulièrement nocive pour les animaux nocturnes, car elle peut perturber leur capacité de navigation (Webmaster7).

II. Le sol

D'une manière très générale, on peut définir le sol comme la couche de quelques centimètres à plusieurs mètres de matière organique et inorganique, accumulée au-dessus de la roche, capable de porter une végétation. Le sol est la plus importante des quatre ressources naturelles renouvelables sur lesquelles se fonde l'activité humaine de production. Sa naissance et son entretien sont, d'ailleurs, étroitement liés aux trois autres ressources renouvelables : eau, flore, faune (Koller, 2009). Le sol, comparativement à l'air et à l'eau, est le milieu qui reçoit les plus grandes quantités d'éléments en traces produites par les activités industrielles et constitue un lieu réceptacle des métaux lourds (Ghali, 2008). Il est vital pour l'homme de ne jamais oublier que la surface du sol n'est pas extensible et surtout que le sol, mal traité, se dégrade et peut, à l'extrême, mourir (Koller, 2009).

II.1. Propriétés physiques du sol

Parmi les principales propriétés physiques des sols on compte la texture, la structure, et la porosité.

II.1.1. La texture

Toutes les propriétés des sols et, en particulier leurs propriétés physiques, mécaniques et hydriques, dépendent de leur composition granulométrique d'une manière ou d'une autre. A des compositions granulométriques différentes correspondent des propriétés différentes qu'elles soient appréhendées par des mesures ou simplement par des appréciations tactiles et visuelles. Cette observation est à la base du concept de texture qui est une qualification globale des propriétés des matériaux terreux et par conséquent des sols ou des horizons de sol d'où ils sont issus. Elle est désignée par une appellation texturale établie à partir d'un diagramme basé sur les teneurs en argiles granulométriques, en limons granulométriques et en sables granulométriques (Fig.1) (Calvet, 2003).

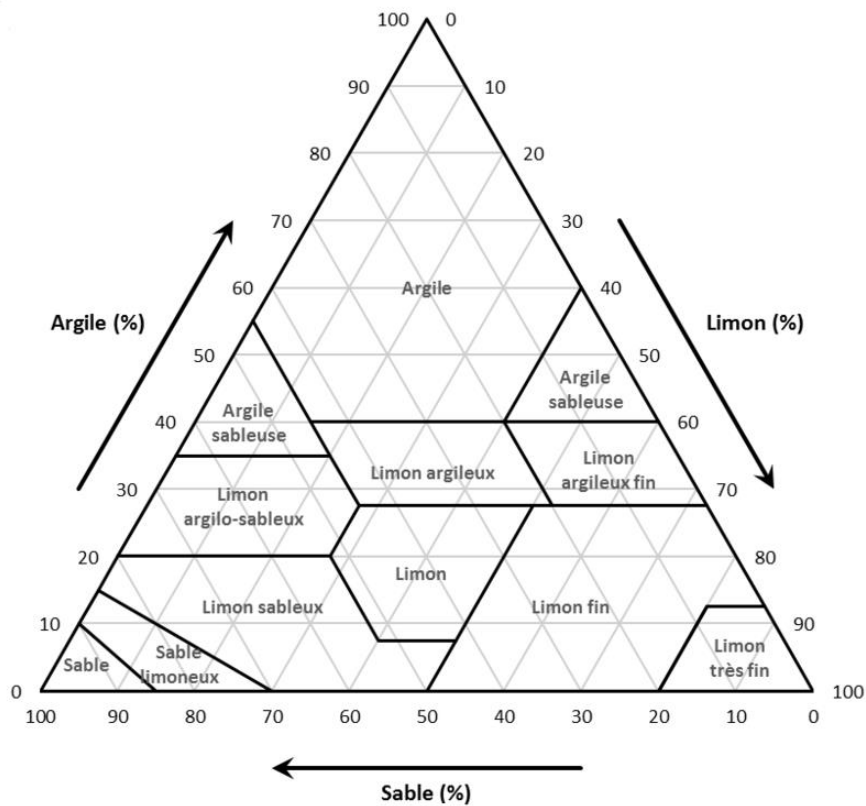


Figure 1. Triangle des textures des sols (Webmaster8)

II.1.2. La structure

La structure du sol est l'agencement dans l'espace de ses constituants. Elle est déterminée par la forme des agrégats. La structuration naturelle des sols est liée à leur texture. Un sol argileux aura notamment une structure angulaire, avec formation de lamelles. Par contre, une structure grumeleuse (fréquente sous prairie) est plutôt liée à l'activité biologique (Fig.2) (Webmaster9).

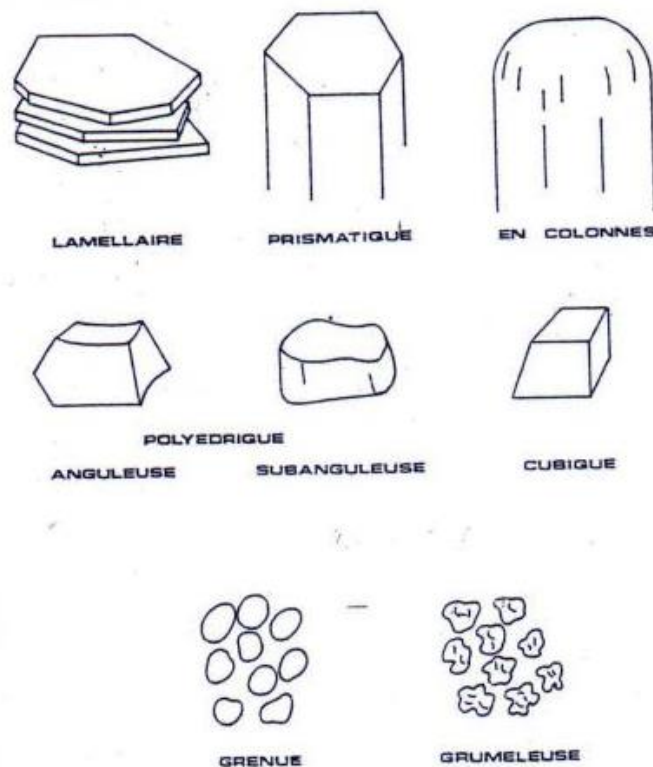


Figure 2. Les principaux types de structure fragmentaire (Delecourt, 1978)

II.1.3. La porosité

La porosité est le volume des "vides" du sol, les pores. C'est par les pores que circulent l'eau et les gaz dans le sol. Ils sont donc importants par leur quantité, mais également par la qualité de leur organisation. Dans l'idéal, il y a autant de "macropores" (dans lesquels circule l'air) que de "micropores" (dans lesquels circule l'eau), l'essentiel étant que toute la porosité forme un réseau continu sans rupture (Webmaster9). Cette porosité est essentielle, car c'est elle

qui permet l'aération du sol et la perméabilité. Elle est d'autant plus élevée que la structure est meilleure. On admet que, pour un bon sol, elle est de l'ordre de 50 % à 70 %. Dès qu'elle tombe à 40 %, on peut estimer qu'on a affaire à un sol tassé (Bonneau, 1963).

Les métaux et certaines substances organiques peuvent faire l'objet de transferts et d'accumulations à des degrés variables dans les sols, les végétaux (racines, tiges, feuilles, fruits) et dans la faune du sol (par exemple vers de terre, escargots, petits mammifères). Lorsqu'ils sont sous forme liquide ou soluble, les polluants peuvent également migrer en profondeur et contaminer les eaux souterraines. Ces processus vont dépendre des propriétés des substances, et des caractéristiques du sol tels la texture, la structure et la porosité (Damas et al, 2018).

II.2. Contamination des sols

Une contamination est la présence de substances potentiellement dangereuses à des concentrations significativement supérieures à celles habituellement mesurées dans un milieu donné (sol, air, eau), du fait des activités humaines. Une contamination est qualifiée de pollution lorsque l'enrichissement en une ou plusieurs de ces substances génère une nuisance ou un risque pour l'homme et/ou les écosystèmes (Damas et al, 2018).

Les composés présents dans la nature sont, en règle générale, complètement dégradables dans des conditions environnementales appropriées. Cependant, ils doivent être considérés comme polluants s'ils existent en concentrations élevées ou si les conditions du sol existantes (par exemple, manque d'oxygène) empêche leur décomposition (Hillel, 2008).

Les premiers exemples de sites contaminés résultaient principalement de la délocalisation de contaminants, c'est-à-dire les métaux dans les minerais métalliques et le pétrole brut des couches de sol plus profondes à la couche supérieure du sol. Au 20ème siècle, cependant, une énorme variété de bio composés, ainsi que des complexes organiques métalliques, ont été produits à partir de composés déjà existant et moins nocifs (Swartjes, 2010). Les

composés artificiels (appelés xénobiotiques, signifiant « étrangers à la vie ») peuvent ne pas être dégradables dans des conditions naturelles. Certains de ces composés sont largement inertes, tout comme de nombreux plastiques ; tandis que d'autres sont toxiques. Ces derniers composés peuvent avoir tendance à se concentrer progressivement au long des chaînes alimentaires, entraînant éventuellement de graves dommages physiologiques, même si sa concentration dans le sol même est basse (Hillel, 2008).

La nature des sites pollués est très hétérogène. Certains sites ne concernent que quelque mètre carré pollués par un épandage accidentel, alors que d'autres sites couvrent une superficie de plusieurs dizaines d'hectares. La nature des principaux polluants rencontrés sur ces sites est très diversifiée (Bliefert, Perraud, 2008). On distingue deux types de pollution du sol :

1. **Les pollutions diffuses** : principalement liées aux activités agricoles, notamment en raison des épandages de produits de toutes sortes qui génèrent une contamination de très larges surfaces de sol (Dor, 2006). La pollution diffuse résulte de l'émission continue et à long terme de contaminants à partir de sources dispersées, et est caractérisé par un modèle relativement homogène, couvrant de grandes surfaces (Swartjes, 2011). La dispersion puis l'accumulation de substances dangereuses sur ces sols donne ainsi des « sites uniformément contaminés » (NF ISO 11074-1,1997).
2. **Les pollutions ponctuelles** : à 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). Soit des situations de pollution accidentelle avec une évolution temporelle plus ou moins rapide en fonction de l'ampleur de l'accident et de la nature des produits impliqués (elles représentaient, à la fin des années 90, moins de 6 % des cas), soit des pollutions chroniques conséquences d'activités industrielles, principalement les industries

chimiques et de métaux non ferreux et l'enfouissement des déchets (Dor, 2006).

III. Les principaux polluants des sols

Les substances sont qualifiées de polluants lorsqu'elles exercent une influence négative sur la fertilité du sol (Koller, 2009). Les hydrocarbures, notamment les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les produits chlorés et les métaux lourds sont les principaux polluants trouvés dans les sols contaminés (Sahnoune, 2014). Allant des simples ions inorganiques à des molécules organiques complexes, deux grands groupes de polluants peuvent être définis : inorganique et organique (Cachada et al, 2018) (Fig.3).

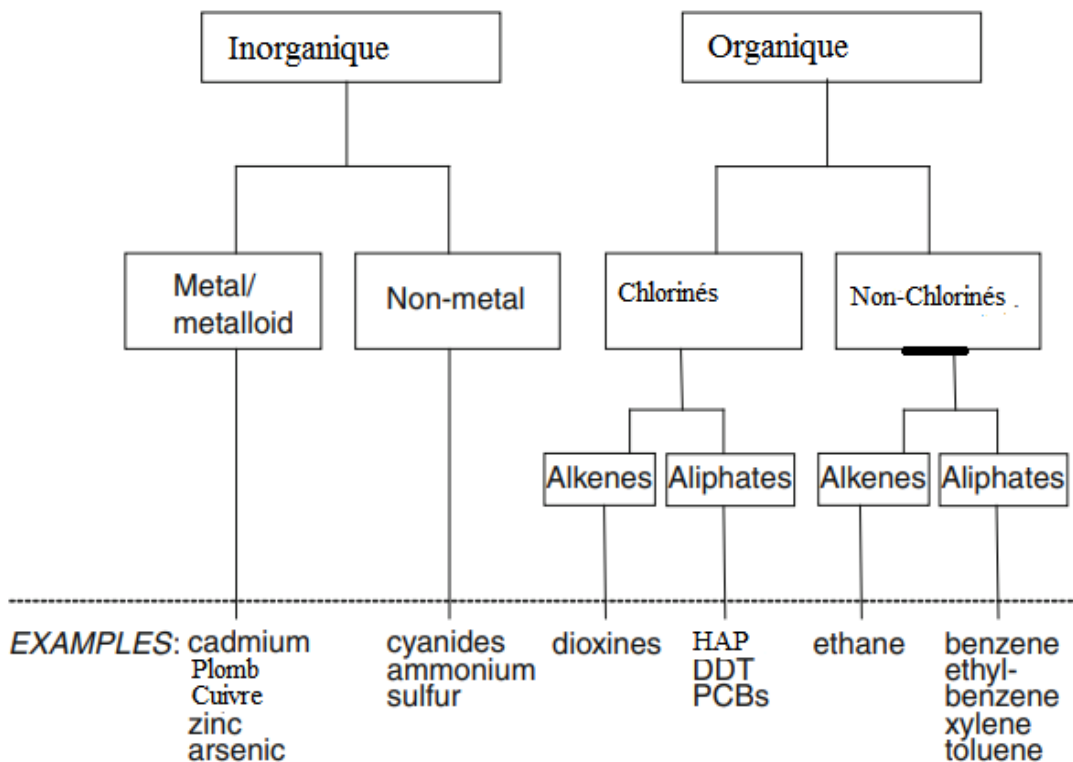


Figure 3. Catégorisation systématique des polluants des sols (Swartjes, 2010)

Les substances organiques peuvent être soit chlorinés tels les dioxines, HAP, DDT, PCB, soit non-chlorinés comme l'éthane, le benzène, l'éthylbenzène, le xylène et le toluène. Parmi les substances non organiques on compte les métaux/metalloïdes, et les non métaux tels les cyanides, ammonium et sulfure.

III.1. Les Polluants Organiques

Le terme polluant organique fait référence aux composés qui contiennent du carbone dans leur structure (avec ou sans groupes fonctionnels) et comprennent plusieurs groupes tels que : Les pesticides, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les polychlorobiphényles (PCB), dibenzo-p-dioxines polychlorées (PCDD), dibenzofuranes polychlorés (PCDF), biphényles polybromés (PBB), éthers diphényliques polybromés (PBDE), tensioactifs ou produits pharmaceutiques. Par conséquent, il comprend des milliers de composés puisque chacun de ces groupes peut contenir des dizaines ou des centaines de composés différents. Ces composés ont une large gamme de valeurs pour leurs propriétés (polarité, solubilité, volatilité), même au sein d'un même groupe, entraînant des comportements différents dans l'environnement et une toxicité pour les organismes. De nombreux produits chimiques organiques sont facilement biotransformés ou dégradés, mais d'autres sont très résistants aux produits chimiques et aux transformations biochimiques et ont de longues demi-vies (Walker et al, 2001). Un éventail ahurissant de composés organiques sont synthétisés par l'industrie chimique pour divers usages, y compris le contrôle des parasites, les détergents, les solvants, et émulsifiants. Beaucoup de ces composés, lorsqu'ils sont introduits dans l'environnement, s'avèrent assez persistants, et certains peuvent être nocifs pour une variété d'organismes (Hillel, 2008).

III.1.1. Les polluants organiques persistants (POP)

Les polluants organiques persistants (POP) sont probablement le groupe le plus important de contaminants organiques, car ils sont considérés comme un problème environnemental mondial à cause de : leur persistance, le potentiel de bioaccumulation, la toxicité, le potentiel cancérigène et / ou mutagène, leur

utilisation massive ou émission continue, leur persistance et mobilité dans tout l'environnement (WHO, 2003). Cela signifie qu'ils génèrent des impacts significatifs sur la santé humaine et l'environnement, même à des concentrations extrêmement faibles (Katsoyiannis, Samara, 2004).

Les polluants persistants, souvent appelés non biodégradables, posent un problème très différent. Présents dans notre environnement à une concentration faible, ils peuvent être concentrés par des organismes vivants jusqu'à des taux dangereux (Mellanby, 1976). Ces polluants ont un impact à l'échelle planétaire et sont visés par deux textes internationaux, qui établissent des listes nominatives de POP : le protocole d'Aarhus, signé en juin 1998 et amendé en 2009, puis la convention de Stockholm, signée en mai 2001 (ADEME, 2020). Selon la Convention de Stockholm, les POP peuvent entraîner de graves effets sur la santé, dont certains cancers, malformations congénitales, troubles immunitaires et systèmes reproductifs, une plus grande sensibilité aux maladies et une intelligence réduite (Swartjes, 2010).

Les quatre principaux polluants organiques persistants émis non intentionnellement par l'industrie sont les (PCB), l'hexachlorobenzène (HCB), les (HAP) et les dioxines/furanes (PCDD-F) (ADEME, 2020).

III.1.1.1. Les Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les HAP forment un groupe extrêmement important en ce qui concerne la contamination des sols, car ils sont parmi les contaminants les plus répandus dans les sols, et dans le monde. Ils se caractérisent par une fusion d'anneaux aromatiques et ne contiennent pas beaucoup d'hétéroatomes (atomes autres que le carbone ou l'hydrogène). Les HAP sont principalement formés par une combustion incomplète de carburants contenant du carbone comme le bois, le charbon, le diesel, les matières grasses, le tabac ou l'encens (Fetzer, 2000) et sont concentrés dans le pétrole, le goudron et le charbon (Swartjes, 2010).

III.1.1.2. Les polychlorobiphényles (PCB)

Fabriqués depuis les années 1920, les polychlorobiphényles (PCB) sont une famille de molécules chimiques de synthèse massivement utilisées entre 1930 et 1970 comme lubrifiants (turbines, pompes...) et dans la fabrication de transformateurs électriques et de condensateurs. On les a également utilisés dans certains adhésifs, peintures, huiles, etc... Ils sont aussi connus en France sous le nom de pyralène, nom commercial d'un produit à base de PCB très utilisé autrefois dans les transformateurs électriques (Webmaster10). Les PCB contaminent l'ensemble de la chaîne alimentaire jusqu'à l'homme. L'alimentation constitue la principale source d'exposition humaine à ces substances chimiques, soit plus de 90 % de l'exposition totale.

Les aliments dans lesquels ils sont le plus présents sont d'origine animale. Il s'agit notamment des poissons, du lait et produits laitiers, des œufs et de la viande. Les poissons (d'eau douce et de mer) et les fruits de mer constituent une part importante de l'exposition alimentaire des adultes aux PCBs. Les viandes et le lait peuvent également contenir des traces de PCBs. Les nourrissons peuvent aussi être exposés aux PCB contenus dans le lait maternel (Webmaster10).

III.1.1.3. L'hexachlorobenzène (HCB)

L'hexachlorobenzène était utilisé jusqu'aux années 1980, surtout en tant que fongicide pour l'enrobage des semences et le traitement des sols. Il intervenait dans plusieurs procédés industriels : comme agent fondant dans la fusion de l'aluminium, comme régulateur de porosité dans la fabrication d'électrodes en graphite, comme agent peptisant du caoutchouc. Il servait à la fabrication de produits militaires pyrotechniques et entrainé dans la composition de produits de préservation du bois. Il était un intermédiaire de synthèse dans la production de certains caoutchoucs et de composés aromatiques chlorés (INERIS, 2005).

L'hexachlorobenzène peut se retrouver comme impureté dans les solvants chlorés. Les teneurs résiduelles de HCB sont néanmoins très faibles. À cause

de son point d'ébullition élevé et de sa faible volatilité, les possibilités d'émission d'hexachlorobenzène à partir de ces solvants sont en outre minimales (INERIS, 2005).

III.1.1.4. Les Dioxines / Furanes (PCDD-F)

Les dioxines sont des polluants de l'environnement. Elles ont la caractéristique douteuse d'appartenir au groupe appelé « dirty dozen », une douzaine de produits chimiques dangereux qui sont des polluants organiques persistants. Elles posent problème à cause de leur toxicité potentielle élevée (WHO, 2016).

Les dioxines sont avant tout des sous-produits des processus industriels, mais elles peuvent aussi apparaître lors de phénomènes naturels, comme les éruptions volcaniques ou les feux de forêts. Ce sont des sous-produits indésirables dans un grand nombre de procédés de fabrication, comme la fusion, le blanchiment au chlore des pâtes à papier ou la production de certains herbicides et pesticides. En termes d'émissions de dioxines dans l'environnement, les pires fauteurs de pollution sont les incinérateurs non contrôlés de déchets (déchets solides et déchets des hôpitaux), en raison des combustions incomplètes. (WHO, 2016).

III.1.2. Les composés organiques volatiles (COV)

Les composés organiques volatils (COV) sont de petites molécules organiques qui participent à des réactions photochimiques dans l'atmosphère, entraînant le smog. Ils ont des points d'ébullition bas et se vaporisent facilement (Stapleton, 2003). Ils comprennent 19 solvants chlorés (nombreux usages, notamment dans le traitement des meubles) et les 9 composés organiques comprenant notamment le benzène, le toluène et le xylène, regroupés sous l'acronyme BTX, souvent associés aux fuites de pétrole ou de fuel dans les stations-services ou à proximité de réservoirs de carburants ainsi que les cyanures et pesticides (Chapelle, 2013).

Les sources infâmes de COV sont les installations de nettoyage à sec, la peinture, les assouplissants pour tissus, les carburants pétroliers (par exemple,

l'essence) et le pétrole brut. De plus, plusieurs sources intérieures sont reconnues, par exemple, photocopieuses, les dos de tapis et meubles. Les COV répandus dans les sols comprennent le trichloroéthylène, le tétrachloroéthylène, le 1,1,1-trichloroéthane, le chlorure de vinyle et, dans une moindre mesure, les éthers de glycol, l'hexane, le formaldéhyde, le bromure de méthyle, le méthyle chlorure et méthyléthylcétone (Swartjes, 2010).

III.1.3. Sources d'émissions des polluants organiques

Une pollution importante pour les sols est celle qui est associée aux polluants provenant des déchets. De même, des substances organiques provenant de l'agriculture telles que les engrais ou le purin, et de l'exploitation forestière comme les feuillages et les écorces, eux-mêmes pollués ou introduits en excès, peuvent polluer le sol (Bliefert, Perraud, 2008).

Les procédés industriels comprenant une étape de combustion (incinération de déchets, métallurgie, production de chaleur...) constituent des émetteurs potentiels de polluants organiques persistants non intentionnels, qui proviennent généralement de combustions incomplètes (ADEME, 2020)

Les HAP sont généralement présents sous forme de mélanges complexes dont la composition varie selon l'origine (Law, Biscayat, 1994). Les raffineries de pétrole constituent une importante cause d'émission d'HAP dans l'environnement, laquelle s'est aussi accrue au cours des toutes dernières décennies avec l'augmentation de l'activité industrielle, ainsi qu'avec la « diésélisation » du parc automobile et l'accroissement considérable du transport routier du fret lequel a quadruplé depuis le choc pétrolier de 1973 (Ramade, 1997). Plusieurs des composés organiques appliqués à l'environnement finissent dans le sol, où ils sont adsorbés par les minéraux argileux ou absorbés par la matière organique (Hillel, 2008).

III.2. Les polluants inorganiques (Métaux lourds)

On appelle en général métaux lourds les éléments métalliques naturels, de densité supérieure à 5 g/cm^3 et tout métal ayant un numéro atomique élevé, en général supérieur à celui du sodium ($Z=11$) (Mir, 2016).

Depuis le début de l'ère industrielle, on observe une augmentation significative de la concentration en métaux dans les sols (Semlali, 2000). Même à faibles concentrations, ils peuvent constituer un sérieux problème de santé publique du fait de leur toxicité et de leur caractère bio-accumulatif (Sterckeman et al, 2008).

Parmi la variété de polluants du sol, les métaux lourds posent un problème particulier dans la mesure où ils sont non biodégradables : ils s'accumulent donc dans le sol tant que perdure la source de contamination ; cette période peut durer plusieurs dizaines d'années. (Sahnoune, 2014) Les métaux lourds et leurs composés ont déjà été identifiés comme certaines des substances toxiques les plus dangereuses. Plus de 20 millions d'hectares de sols sont pollués par différents métaux lourds dans le monde (He et al, 2015). Ils deviennent essentiellement des contaminants dans les environnements du sol car :

- 1- Leurs taux de génération via des cycles artificiels sont plus rapides par rapport aux cycles naturels,
- 2- Ils sont transférés des mines à des emplacements environnementaux aléatoires où des potentiels d'exposition directe plus élevés se produisent,
- 3- Les concentrations des métaux dans les produits mis au rebut sont relativement élevés par rapport à ceux de l'environnement
- 4- La forme chimique (espèce) dans laquelle se trouve un métal dans le système environnemental récepteur peut le rendre plus biodisponible (Abdullahi, 2015).

La pollution par les métaux et métalloïdes est sans doute la plus étudiée, sinon la mieux connue, compte tenu des méthodes d'analyse performantes actuellement disponibles pour l'étude de ces contaminants à un coût raisonnable

(Ig-Chun Eom, 2006). Les métaux les plus représentés dans des cas avérés de pollution du sol sont l'arsenic, le cadmium, le cuivre, le mercure, le nickel, le plomb et le zinc (Lucisine, 2015).

III.2.1. Cadmium (Cd)

Le cadmium est un métal blanc bleuâtre doux et malléable que l'on trouve dans les minerais de zinc et, dans une bien moindre mesure, dans la greenockite minérale de cadmium (Webmaster18). Présent en faible quantité dans la biosphère (0.1-0.2 ppm). Ses minerais sont liés à ceux du plomb et du zinc et ses sels sont très toxiques. (Bovard et al, 1978). Les sources d'émissions naturelles comprennent les activités volcaniques, incendies de nature, tempête de poussière et aérosols de sel de mer (van Straalen, Denneman, 1989).

Les émissions de cadmium d'origine humaine proviennent soit de la fabrication, de l'utilisation et de l'élimination de produits utilisant intentionnellement du cadmium, soit de la présence de cadmium en tant qu'impureté naturelle mais non fonctionnelle dans les produits ne contenant pas de cadmium (Webmaster11). Il existe trois principales sources anthropiques de cadmium terrestre : les dépôts atmosphériques, l'application agricole d'engrais phosphatés et l'utilisation de boues d'épuration municipales comme engrais sur les sols agricoles. Il a été signalé que 90% du cadmium dans le sol s'accumule sur une couche de 15cm au-dessus de la surface (ATSDR, 1999).

L'accumulation de cadmium dans le sol dépend des propriétés du sol, avec des sols argileux en général retenant plus de cadmium que les sols sableux (WHO, 2007). Absorbé par les racines, il se fixe dans les parties aériennes, dont les feuilles. Outre les rejets industriels, l'épandage d'engrais phosphorés enrichit durablement les sols en Cd. Sous forme ionique, il se lie fermement à certaines protéines dans les cellules végétales et animales, d'où sa grande rémanence biologique (Boisset, 2017). Le Cd est plus mobile dans le sol que le Cuivre et le Plomb, donc plus disponible pour les plantes (Bourrelier, Berthelin, 2008).

Très toxique sous toutes ses formes (métal, vapeur, sels, composés organiques), le cadmium est l'un des rares éléments n'ayant aucune fonction connue dans le

corps humain ou chez l'animal (Ghali, 2008). Il est caractérisé par une longue demi-vie biologique (approximativement 20-30 ans), un faible taux d'excrétion par l'organisme, et un stockage prédominant dans les tissus mous (surtout le foie et les reins). Le Cd a un large éventail d'effets de toxicité : la néphrotoxicité, le risque cancérogène, la tératogénicité, la toxicité endocrinienne et la toxicité de l'appareil reproductif (Lazou et al ,2002). Il peut également infecter le système immunitaire. Les effets de ce métal sont corrélés à une anomalie des réponses humorales ou cellulaires, bien que les données disponibles soient rares et dans une certaine mesure controversée (Koller ,1998)

La marge de sécurité entre l'apport quotidien actuel de cadmium dans l'alimentation et l'apport qui peut entraîner des effets est très étroite et, inexistant pour les populations surexposées. Les groupes de population à risque comprennent les personnes âgées, les personnes atteintes de diabète et les fumeurs. Les femmes peuvent être exposées à un risque accru car elles ont des réserves de fer plus faibles que les hommes et, par conséquent, absorbent plus de cadmium au même niveau d'exposition (WHO, 2007).

III.2.2. Plomb (Pb)

Le plomb est, sans nul doute, l'un des métaux qui a été le plus anciennement et le plus largement utilisé par l'homme : c'est l'un des éléments des pigments retrouvés dans les tombes néandertaliennes moustériennes (40 000 ans avant Jésus-Christ) ; il est présent dans des objets décoratifs provenant de sites néolithiques anatoliens, 6 200 ans avant Jésus-Christ ; il était utilisé par les Égyptiens et les Hébreux, 4 000 ans avant Jésus-Christ et les Phéniciens ont commencé à l'extraire en Espagne environ 2 000 ans avant notre ère. Les Grecs et les Romains l'ont employé pour produire des céramiques. C'était le métal utilisé dans toutes les cités romaines pour l'adduction d'eau ; les Romains se servaient aussi de l'acétate de plomb comme édulcorant et conservateur du vin. Au cours des deux derniers millénaires les usages du plomb et de ses dérivés n'ont cessé de se multiplier et de se diversifier (Garnier, 2005).

Le plomb est assez abondant dans la croûte terrestre où sa concentration moyenne est comprise entre 10 et 20 mg/kg. Les principaux minerais sont la galène (sulfure), la cérusite (carbonate) et l'anglésite (sulfate). Dans le minerai, le plomb est souvent associé à l'argent et au zinc. L'antimoine, l'arsenic, le bismuth et le cuivre sont d'autres éléments fréquemment présents dans les minerais de plomb (WHO, 1995). Il est relâché dans l'environnement suivant divers processus naturels, mais depuis le développement d'industries telles que la métallurgie, la combustion des charbons, l'emploi des peintures et surtout l'utilisation de composés à base de plomb dans les carburants, les quantités de plomb émises dans le milieu naturel sont considérables (A.F.E.E, 1979).

La principale application industrielle du plomb est la fabrication de batteries d'accumulateurs. Elle a consommé plus de 70 % de la production mondiale du métal, en 1997 (Goyer, 2001). À cause de ses propriétés mécaniques, le plomb a été ou est actuellement utilisé pour la fabrication de tuyaux d'évacuation (et autrefois, d'adduction) d'eau, celle d'éléments de couverture de toits, de terrasses, de balcons, pour l'isolation contre le bruit et les vibrations, la protection de câbles, de fils d'acier ou de lignes téléphoniques. En alliage avec d'autres métaux, il permet de produire des fils et des bâtons de soudure, des caractères d'imprimerie, des bronzes à ciseler, des projectiles de munitions (Garnier, 2005).

Il en existe quatre isotopes naturels ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb et ^{208}Pb . Leur abondance relative dans la nature est respectivement de 1,48 %, 23,6 %, 22,6 % et 53,6 %, mais leurs proportions dans les matériaux varient, en fonction de la source, ce qui peut être utilisé pour identifier l'origine d'une contamination par le plomb (Garnier, 2005).

La poussière est une importante source d'exposition au plomb de la population générale. Sa teneur en plomb dépend de l'activité industrielle actuelle ou passée du voisinage (INSERM, 1999) Elle est modérément influencée par la circulation automobile de proximité (elle décroît rapidement à distance des routes) (Garnier, 2005). L'ingestion de terre contaminée, de poussières et de

vieilles peintures à base de plomb en raison des contacts main-bouche peuvent également être importante en ce qui concerne la consommation de plomb chez les jeunes enfants. Lorsque les systèmes d'eau de robinet avec des tuyaux en plomb sont utilisés, la prise de plomb via l'eau potable peut être une source importante, en particulier chez les enfants (WHO, 2007).

Le plomb est très toxique pour l'homme. Ses effets concernent le système cardio-vasculaire, le système nerveux central et périphérique et le rein, voire le système auditif et visuel. Le fœtus et le jeune enfant sont particulièrement sensibles à l'effet toxique neurocomportemental du Pb, caractérisé par une baisse peu ou pas réversible des facultés cognitives. Les ruminants sont généralement très sensibles aux intoxications par le Pb (Tremel-Schaub, Feix, 2005). Il induit une néphropathie chronique conduisant à l'insuffisance rénale, et augmente la pression artérielle systolique, chez l'adulte. Lors de la gestation, une partie du Pb mobilisé du squelette maternel et de celui ingéré avec les aliments franchit la barrière placentaire et s'accumule dans le cerveau fœtal. De multiples études ont montré une diminution des capacités cognitives de l'enfant quand la concentration de Pb dans le sang (plombémie) augmente chez la mère (Boisset, 2017).

III.2.3. Arsenic (As)

L'arsenic est un métalloïde naturellement présent dans les sols et les organismes biologiques, sous forme de dérivés inorganiques et organiques (Boisset, 2017). Il est assez répandu dans la biosphère (1-100 ppm) et sa présence a été décelée dans les pyrites (Noppe, 1996). Il est présent sur de nombreux sites industriels pollués. On le retrouve aussi dans certains sols agricoles suite à des traitements antifongiques, notamment en viticulture et arboriculture (Tremel-Schaub, Feix, 2005).

Les émissions de ce polluant dans l'atmosphère proviennent, d'une part, de la présence de traces de ce métal dans les combustibles minéraux solides ainsi que dans le fioul lourd et, d'autre part, de la présence de ce composé dans certaines matières premières comme par exemple dans certaines installations

de production de verre, de métaux ferreux ou non ferreux (SOGREAH, 2007). Il peut aussi provenir de l'utilisation de produits phytosanitaires et de la dispersion d'effluents métallurgiques (Boisset, 2017).

Facilement absorbé par la voie digestive l'As a une toxicité potentielle élevée pour l'homme. L'exposition chronique à l'As entraîne des troubles cutanés à type d'hyperkératose palmaire et plantaire et de pigmentation noirâtre des plantes de pieds (« maladie des pieds noirs »). L'As est aussi classifié comme une substance « cancérigène pour l'homme » (Tremel-Schaub, Feix, 2005).

Le Centre international de Recherche sur le Cancer (CIRC) a classé l'arsenic et ses composés dans les produits cancérogènes pour l'homme et il a également déclaré que l'arsenic dans l'eau de boisson est cancérogène pour l'homme. Les autres effets indésirables pour la santé qu'on peut associer à une ingestion prolongée d'arsenic inorganique sont les suivants : effets sur le développement, neurotoxicité, diabète, atteintes pulmonaires et atteintes cardiovasculaires. En particulier, l'infarctus du myocarde induit par l'arsenic peut être une cause importante de surmortalité (WHO, 2018).

III.2.4. Cuivre (Cu)

Métal largement répandu dans le globe (0.01% de la croûte terrestre), sous la forme de cuprite, de chyrocolle, ou de malachite. En raison de ses propriétés physiques particulières (conductivité électrique, thermique et résistance à la corrosion), le cuivre a un large éventail d'utilisations industrielles. Les sels de cuivre sont utilisés dans de nombreux domaines (agriculture, industrie textile, fabrication de pigments, industrie photographique) (A.F.E.E, 1979). De plus, il est reconnu comme élément essentiel de l'alimentation des oiseaux, des plantes et des mammifères, et participe au métabolisme de la purine et au développement du système nerveux (Bennouna, 1990).

Les deux secteurs qui prédominent dans les émissions de cuivre sont le transport routier (usure des plaquettes de frein) représentant 51% des

émissions, et les autres transports (usure des caténaires dans le transport ferroviaire) représentant 32% des émissions (SOGREAH, 2007).

Le cuivre peut interrompre l'activité du sol, car il influence de façon négative l'activité des micro-organismes et des vers de terre. La décomposition de la matière organique est sérieusement ralentie de ce fait. Quand le sol des terres agricoles est pollué par du cuivre, les animaux absorbent des concentrations importantes leur causant des problèmes de santé. Les moutons, surtout, souffrent beaucoup de l'empoisonnement au cuivre car les effets du cuivre chez les moutons se manifestent même à de très faibles concentrations (Webmaster19).

III.2.5. Mercure (Hg)

Elément non essentiel et hautement toxique pour la vie des organismes, rare dans la croûte terrestre. C'est le seul métal liquide à température ordinaire et le seul à être volatil (Ramade, 1993). La teneur moyenne en mercure des sols de surface d'un certain nombre de pays variait de 20 µg / kg à 625 µg / kg. Les concentrations les plus élevées ont été trouvées dans les sols emplacements urbains. La teneur en mercure de la plupart des sols varie avec la profondeur (WHO, 2007).

Les origines naturelles du mercure sont les éruptions volcaniques et l'érosion hydrique qui, par lessivage, entraîne dans les cours d'eau puis dans les océans une fraction du mercure contenu dans les roches superficielles (Ramade, 1978). Le dégazage de l'écorce terrestre et le volcanisme provoquent la dissémination atmosphérique et la contamination des eaux océaniques. La combustion des énergies fossiles et l'incinération des déchets contribuent aussi aux rejets, même si les composés d'Hg sont bannis de nombreux produits industriels (Boisset, 2017). Les deux secteurs qui contribuent majoritairement sont la transformation d'énergie (58% des émissions) et l'industrie manufacturière (38% des émissions), en particulier l'incinération des déchets et le secteur de la chimie (SOGREAH, 2007).

Les émissions de mercure dans l'atmosphère à la fois de sources anthropiques et naturelles sont sous formes inorganiques qui peuvent être converties biologiquement en méthyl mercure dans le sol et de l'eau. Le méthyl mercure se bioaccumule et pénètre facilement dans le corps humain via la voie alimentaire. Le méthyl mercure est un puissant produit chimique neurotoxique. Les Fœtus constituent le groupe de population le plus sensible, l'exposition étant principalement due au poisson dans le régime alimentaire de la mère. Il est également excrété dans le lait maternel. À l'échelle mondiale, l'estimation des émissions naturelles de mercure représentent environ un tiers du total, et les émissions anthropiques représentent environ les deux tiers (Lamborg et al., 2002).

Tous les humains sont exposés à un certain niveau de mercure. La plupart des gens sont exposés à de faibles niveaux de mercure, souvent par une exposition chronique (contact à long terme continu ou intermittent). Cependant, certaines personnes sont exposées à des niveaux élevés, y compris une exposition aiguë (exposition se produisant sur une courte période de temps, souvent moins d'une journée). Un exemple d'exposition aiguë serait l'exposition au mercure due à un accident industriel (Webmaster12).

La toxicité humaine varie avec la forme de mercure, la dose et le taux d'exposition. L'organe cible des vapeurs de mercure inhalées est principalement le cerveau. Les sels mercureux et mercuriques endommagent principalement la muqueuse intestinale et les reins, tandis que le méthyl mercure est largement distribué dans tout le corps. La toxicité varie en fonction de la posologie : de grandes expositions aiguës à la vapeur de mercure élémentaire provoquent une pneumonie sévère qui, dans des cas extrêmes, peut être fatale (Berlin, Zalups, Fowler, 2007). Une exposition chronique de faible intensité au mercure élémentaire ou à d'autres formes de mercure induit des symptômes et des signes cliniques plus subtils (Bernhoft, 2011).

III.2.6. Nickel (Ni)

Le nickel est un métal blanc argenté, dur, malléable et ductile. Il appartient au groupe du fer et prend un poli élevé. C'est un assez bon conducteur de chaleur et d'électricité. Dans ses composés familiers, le nickel est bivalent, bien qu'il assume d'autres valences. Il forme également un certain nombre de composés complexes. La plupart des composés du nickel sont bleus ou verts. Le nickel se dissout lentement dans les acides dilués mais, comme le fer, il devient passif lorsqu'il est traité avec de l'acide nitrique. Le nickel finement divisé adsorbe l'hydrogène (Webmaster13).

La principale source de rejet de nickel dans les eaux résiduaires industrielles est représentée par l'industrie métallurgique, notamment les opérations de revêtement (A.F.E.E, 1979). Deux secteurs prédominent dans les émissions de nickel : la transformation d'énergie (en particulier le raffinage de pétrole et la production d'électricité) et l'industrie manufacturière qui représentent respectivement 56% et 38% des émissions totales de cet élément (SOGREAH, 2007).

Les humains peuvent être exposés au nickel en respirant de l'air, en buvant de l'eau, en mangeant des aliments ou en fumant des cigarettes. Le contact cutané avec du sol ou de l'eau contaminés au nickel peut également entraîner une exposition au nickel. Le nickel est essentiel, mais lorsque l'absorption est trop élevée, il peut constituer un danger pour la santé humaine. L'absorption de trop grandes quantités de nickel a les conséquences suivantes :

- Plus grand risque de développer un cancer du poumon, un cancer du nez, un cancer du larynx et un cancer de la prostate
- Maladies et étourdissements après exposition au nickel gazeux
- Embolie pulmonaire
- Insuffisance respiratoire
- Malformations congénitales
- Asthme et bronchite chronique

- Réactions allergiques telles que les éruptions cutanées, provenant principalement de bijoux
- Troubles cardiaques (Webmaster14)

III.2.7. Zinc (Zn)

Le zinc est un métal de transition habituellement présent dans la nature dans son état divalent. Il est considéré comme un minéral essentiel car il est nécessaire à la production de centaines d'enzymes dans tout le corps. L'apport quotidien recommandé de zinc varie en fonction de la population de patients, et la concentration normale de zinc dans le sérum est de 109 à 130 microgrammes / décilitre (Agnew, Slesinger, 2020).

Les émissions proviennent de trois secteurs principalement : l'industrie manufacturière (45% en 2004), la transformation d'énergie (37% des émissions) et le résidentiel/tertiaire (18%) (CITEPA, 2006).

La présentation clinique de la toxicité du zinc par ingestion aiguë comprend des vomissements, une hématurie, des nausées, des crampes musculaires, une diarrhée aqueuse et des douleurs abdominales diffuses, qui ont un large différentiel avec de nombreuses causes possibles. Ainsi, un niveau de suspicion très élevé est nécessaire pour diagnostiquer une toxicose au zinc. Certaines populations de patients peuvent être plus à risque, comme les patients pédiatriques ou les patients souffrant de maladie psychiatrique qui peuvent ingérer des suppléments nutritionnels en grande quantité ou un corps étranger contenant du zinc (Agnew, Slesinger, 2020).

III.2.8. Sources d'émissions des polluants inorganiques

Les métaux sont toujours présents à un niveau de fond d'origine non anthropique, leur présence dans les sols est liée à l'altération des roches mères et à la pédogenèse. Habituellement, ils sont fortement liés à la matrice du sol si elles sont sous forme de cations ; cela signifie que, même à haute concentrations, ils peuvent être présents sous des formes inertes et non nocives. Cependant, ils peuvent devenir mobile en raison des conditions

environnementales changeantes (utilisation des terres, intrants agricoles, changement climatique) ou par saturation au-delà de la capacité tampon du sol (Huang, Jin, 2008).

En raison de la perturbation et de l'accélération du cycle géochimique (naturellement lent) des métaux par l'homme, la plupart des sols des zones rurales et urbaines peuvent accumuler un ou plusieurs des métaux lourds précédemment nommés à des valeurs de fond suffisamment élevées pour entraîner des risques pour la santé humaine, les plantes, les animaux, les écosystèmes ou d'autres milieux (Raymond, Okieimen, 2011).

Tableau 1. Différentes sources de métaux lourds qui contaminent les sols dans le monde chaque année (Nriagu, Pacyna, 1988)

Sources (10⁶ kg/An)	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Déchets agricoles et alimentaires	0-0.6	0-0.3	4.4-90	3-38	0-1.5	6-45	1.5-27	12-150
Fumier bétail	1.26-4.4	0.2-1.2	10-60	14-80	0-0.2	3-36	3.2-20	150-320
Déchets industriels des exploitation forestière et bois	0-3.3	0-2.2	2.2-18	3.3-52	0-2.2	2.2-23	6.6-8.2	13-65
Déchets municipaux	0.09-0.7	0.88-7.5	6.6-33	13-40	0-0.26	2.2-10	18-62	22-97
Boues municipales	0.01-0.24	0.02-0.34	1.4-11	4.9-21	0.01-0.8	5.0-22	2.8-9.7	18-57
Déchets organiques	0-0.25	0-0.01	0.1-0.48	0.04-0.61	-	0.17-3.2	0.02-1.6	0.13-2.1
Déchets solides des Traitement des métaux	0.01-0.21	0-0.08	0.65-2.4	0.95-7.6	0-0.08	0.84-2.5	4.1-11	2.7-19
Cendres de charbon	6.7-37	1.5-13	149-446	93-335	0.37-4.8	56-279	45-242	112-484
Engrais	0-0.02	0.03-0.25	0.03-0.38	0.05-0.58	-	0.20-3.5	0.42-2.3	0.25-1.1

Marne (Roche)	0.04-0.5	0-0.11	0.04-0.19	0.15-2.0	0-0.02	0.22-3.5	0.45-2.6	0.15-3.5
Impuretés des matières premières	36-41	0.78-1.6	305-610	395-790	0.55-0.82	6.5-32	195-390	310-620
Dépôts atmosphériques	8.4-18	2.2-8.4	5.1-38	14-36	0.63-4.3	11-37	202-263	49-135
Totale	52-112	5.6-38	484-1309	541-1367	1.6-15	106-544	479-1113	689-2054

III.2.8.1. Les engrais

De grandes quantités d'engrais sont régulièrement ajoutés aux sols dans les systèmes agricoles intensifs pour fournir suffisamment d'azote, phosphore et potassium pour la croissance des cultures. Les composés utilisés pour fournir ces éléments contiennent des traces de métaux lourds (par exemple Cd et Pb) sous forme d'impuretés qui, après une application continue d'engrais, peuvent augmenter considérablement leur teneur dans le sol (Raymond, Okieimen, 2011). L'application de certains engrais phosphatés ajoute par inadvertance le Cd et autres éléments potentiellement toxiques pour le sol, dont le F, le Hg et le Pb (Abdullahi, 2015).

III.2.8.2. Les pesticides

Les pesticides comprennent les produits chimiques utilisés comme insecticides, herbicides, fongicides, poisons rongeurs et autres types de poisons (Shayler et al, 2009). Plusieurs pesticides courants largement utilisés en agriculture et en horticulture dans le passé contenaient des concentrations importantes de métaux. Une telle contamination a le potentiel de causer des problèmes, en particulier si les sites sont réaménagés à d'autres fins agricoles ou non agricoles. Par rapport aux engrais, l'utilisation de ces matériaux a été plus localisée, étant limitée à des sites ou des cultures particuliers (McLaughlin et al, 2000).

Quelques pesticides sont des poisons violents mais instables ; ils causent de sérieux dommages dans une zone donnée, mais ils n'occasionnent pas de pollution à long terme. D'autres, moins violents, sont beaucoup plus persistants, et leurs effets écologiques sont de longue durée ; à la faveur d'un transport, ils peuvent exercer leurs méfaits loin de l'endroit où on les a utilisés : c'est ainsi qu'on voit réapparaître là où on les attend le moins. Il arrive qu'ils se trouvent dilués à un point tel qu'ils deviennent inoffensifs, mais il arrive aussi qu'ils soient reconcentrés par un système biologique et récupèrent leur nocivité (Mellanby, 1976).

III.2.8.3. Les bio solides et fumiers

Les biosolides sont issus de l'épuration des eaux usées, procédé qui consiste à extraire les solides (boues) de l'effluent liquide (Webmaster15). Dans les zones agricoles, des contaminants ont été introduits en utilisant des sols pour filtrer les eaux usées, en appliquant des boues sur le sol ou en appliquant des cendres provenant de déchets, utilisé pour le chaulage (e.g, Pasquini et Alexander (2004), qui a démontré une augmentation du plomb principalement par l'addition de cendres aux sols du plateau de Jos au Nigeria) (Swartjes, 2010).

L'application de nombreux bio solides (par exemple, fumier de bétail, composts et des boues d'épuration municipales) à atterrir par inadvertance conduit à l'accumulation de métaux lourds (Raymond, Okieimen, 2011). Certains déchets animaux tels que les fumiers de volaille, de bovins et de porcs produits dans l'agriculture sont couramment appliqués aux cultures et aux pâturages sous forme de solides ou de boues. Bien que la plupart des fumiers soient considérés comme des engrais précieux, dans l'industrie porcine et avicole, le Cu et le Zn ajoutés aux régimes alimentaires et l'As contenus dans les produits sanitaires des volailles peut aussi potentiellement causer des contaminations du sol en métaux lourds (Chaney, Oliver, 1996).

III.2.8.4. Les eaux usées

L'application des eaux usées municipales et industrielles et effluents associés aux terres agricoles date de 400 ans et est désormais une pratique courante dans de nombreux pays du monde. Bien que les concentrations de métaux dans les effluents d'eaux usées soient généralement relativement faibles, l'irrigation à long terme des terres avec de telles eaux peut éventuellement entraîner une accumulation de métaux lourds dans le sol (Abdullahi, 2015). De même les eaux qui s'écoulent à partir des décharges sauvages anciennes, des lixiviats, constituent un danger pour le sol et la nappe phréatique (Bliefert, Perraud, 2008).

III.2.8.5. Extraction de métaux, procédés de broyage et déchets industriels

L'extraction et le broyage de minerais métalliques couplés à des industries ont légué de nombreux pays l'héritage d'une large distribution de contaminants métalliques dans le sol (Abdullahi, 2015). Les activités minières et en particulier, l'extraction à ciel ouvert de minerais produit de grandes quantités de résidus appelés résidus miniers qui peuvent contenir des concentrations importantes de métaux (Artiola et al, 2019). La plupart des sources de métaux lourds dans les sols sont aussi liées à l'activité humaine : stockage de déchets industriels et urbains (mines et fonderies de métaux non ferreux, décharges publiques) ; pratiques agricoles (pratique de la fertilisation à l'aide de compost urbain, de déjections animales ou de boues de station d'épuration) ; pollutions dues à des retombées atmosphériques (utilisation de combustibles fossiles, essence au plomb, poussières des industries métallurgiques, incinération des ordures ménagères...) (Tableau.2) (Jeannot et al, 2020).

Tableau 2. Utilisation actuelle courante des métaux dans l'industrie (Sahnoune, 2014)

Métal	Utilisation
Cadmium	Piles 70%

	Pigments 13%
	Autres 17%
Cuivre	Construction électrique 55%
	Bâtiment 20%
	Équipement industriel 10%
	Transports 5%
	Autres 10%
Nickel	Acier inoxydable 65%
	Alliages de nickel 15%
	Aciers et font alliées 7.5%
	Revêtement de surface 7.5%
	Autres 25%
Mercure	Cellules d'électrolyse 50%
	Construction électrique 25%
	Autres 25%
Plomb	Batteries 70%
	Laminés et munitions 10%
	Chimie 10%
	Autres 10%
Zinc	Galvanisation 50%
	Pièces moulées 15%
	Laiton et autres métaux d'alliages 20%
	Demi-produits 5%
	Chimie et autres 10%

III.2.8.6. Sources aéroportées

Les activités humaines sont à l'origine d'émissions polluantes vers l'atmosphère engendrant des risques de dépôt sur l'ensemble de la surface terrestre. Ces dépôts affectent les zones de culture et de pâturages qu'elles soient situées à proximité ou à distance des zones émettrices (Rychen et al, 2005). Les sources de métaux en suspension dans l'air comprennent les émissions dans les cheminées ou les conduits d'air, de gaz ou de vapeur et les émissions fugitives telles que la poussière des zones de stockage ou les tas de déchets. Les métaux provenant de sources aéroportées sont généralement libérés sous forme de particules contenues dans le flux de gaz (Abdullahi, 2015). Une grande partie des composés, qui ont de l'influence sur les sols et

les organismes qu'ils contiennent, provient directement de l'air (par dépositions sèches) ou arrivent avec les précipitations (dépositions humides) (Bliefert, Perraud, 2008). Les industries et les transports rejettent des polluants qui, après avoir été transportés dans l'air, sont déposés sur le sol par les pluies. Les industries ont également été à l'origine de nombreuses pollutions directes et localisées des sols par des métaux lourds ou des hydrocarbures (ADEME, 2020).

III.2.8.7. Les métaux lourds dans l'aérosol

Dans les zones de forte pollution atmosphérique, comme d'une industrie de fabrication d'alliages de métaux ou à côté d'une autoroute, les retombées atmosphériques de métaux sur tout espace confondu est très importante (Prasad ,2004). Nous avons pu recueillir les chiffres suivants dans quelque pays (Tableau.3)

Tableau 3. Niveaux de métaux lourds dans l'air déclarés dans différents pays (Shahid et al, 2016)

Pays	Pologne	Pakistan	Espagne	Algérie	Iran	Inde	Nigeria
Métal	Concentration dans l'air (ng/m³)						
Pb	23.6	16.24	9.24	299	120.92	-	0.832
Cd	0.806	31.66	0.25	21.2	0.33	0.02	-
Zn	66.5	0.85	354	-	164.58	7.13	1.712
Ni	2.15	65.78	3.38	42.4	5.33	0.29	0.478
As	0.534	-	0.55	-	7.77	-	-

*Chapitre II : Pollution et agriculture
péri-urbaine*

I. Définition et historique de l'agriculture péri-urbaine

L'agriculture périurbaine, au strict sens étymologique, est celle qui se trouve à la périphérie de la ville, quelle que soit la nature de ses systèmes de production. Avec la ville, cette agriculture peut soit n'avoir que des rapports de mitoyenneté, soit entretenir des rapports fonctionnels réciproques. Dans ce dernier cas, elle devient urbaine et c'est ensemble qu'espaces cultivés et espaces bâtis participent au processus d'urbanisation et forment le territoire de la ville (Fleury, Donadieu, 1997).

L'agriculture urbaine est devenue à travers le monde entier, et spécifiquement dans les pays en développement, l'une des activités nécessaires pour assurer la sécurité alimentaire des citadins (Dougnon et al, 2013). Selon les estimations, dans le monde entier, quelque 800 millions de citadins sont impliqués dans l'agriculture périurbaine et urbaine, que ce soit pour se procurer des revenus et/ou pour produire de la nourriture. Une série de données émanant de recensements nationaux, d'enquêtes sur les ménages et de projets de recherche montre que jusqu'au deux tiers des ménages urbains et périurbains sont engagés dans des activités agricoles. Une grande partie de la nourriture produite par l'agriculture urbaine est destinée à la consommation du ménage et les excédents occasionnels sont vendus sur le marché local (Fao, 1999).

Le développement industriel, agricole et urbain s'est accompagné lors des dernières décennies de véritables problèmes sanitaires liés à la pollution de l'environnement (Chaouali et al, 2018). Par conséquent, l'agriculture périurbaine doit faire face à une double problématique :

1. Augmenter sa productivité pour répondre à une demande croissante de consommer des produits locaux alors que la pollution atmosphérique affecte les rendements
2. Assurer aux consommateurs une qualité sanitaire des productions alors que celles-ci sont exposées à de nombreuses sources de pollutions, notamment

aux métaux lourds, aux polluants organiques persistants et aux HAP (Stella et al, 2017).

II. Trafics routiers et pollution des sols agricoles

Bien qu'il n'existe pas d'inventaire sur la contribution spécifique des zones urbaines aux émissions globales de polluants, l'analyse sectorielle des émissions de polluants montre que le transport et les secteurs résidentiels/tertiaires, fortement concentrés en milieu urbain, sont responsables de l'émission de nombreux polluants. Par ailleurs, la composition chimique des particules émises par le transport révèle la présence de métaux lourds et d'Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), toxiques et persistants (Stella et al, 2017). La figure.4 indique les principales sources qui contribuent à la pollution d'origine routière.

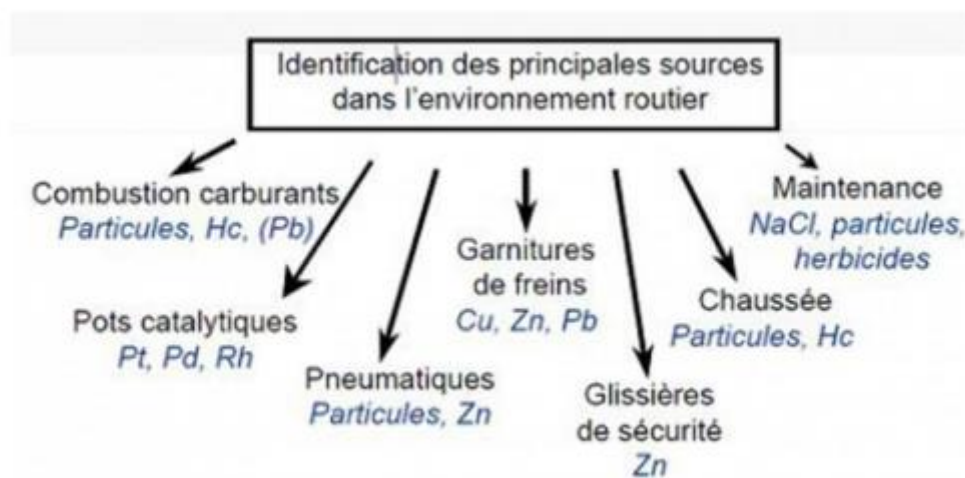


Figure 4. Principales sources de pollution routière (Legret et al, 1997)

Les parcelles d'exploitations agricoles sont fréquemment attenantes aux réseaux routiers, notamment en zones périurbaines, et les cultures par conséquent exposées directement aux émissions automobiles (Petit et al, 2012). Souvent abordés dans la littérature au regard des difficultés de circulation vécues par les agriculteurs, la question de l'impact des émissions du trafic routier sur les cultures en bord de route et des liens entre dépôt de polluant,

transfert vers les végétaux et risque pour la santé humaine reste encore peu renseignée. Plusieurs études montrent cependant que les substances toxiques émises par les réseaux routiers (métaux lourds, ETM, hydrocarbures aromatiques polycycliques, particules fines, etc.) se déposent à proximité des axes routiers et affectent ces écosystèmes (Feng et al, 2011).

De même, les conditions météorologiques influencent fortement les profils de concentrations, en particulier la vitesse et la direction du vent : des vitesses de vent élevées et perpendiculaires à la route provoquent une dispersion à plus grande distance (Venkatram et al, 2013). De plus, l'intensité du trafic et sa variabilité influencent fortement l'émission des polluants et donc leur concentration à proximité des axes routiers (Ducret-Sitch et al, 2013), ainsi que les aménagements de la route à proprement parler (surélevée ou en dépression) et des bordures (présence de barrière anti-bruit, de végétation) (Baldauf et al, 2016).

III. Absorption des métaux lourds par les plantes

Les plantes sont exposées de deux façons aux métaux lourds : par les parties aériennes et par les racines. Les métaux lourds peuvent être déposés à la surface des feuilles et des racines ou pénétrer dans la plante. Ils peuvent y pénétrer par les parties aériennes (feuilles, tiges et fruits), à partir de particules en suspension dans l'air, de composés gazeux ou de composés dissous dans l'eau de pluie ou d'irrigation. Ils peuvent pénétrer par les racines à partir du sol. Une fois absorbés par la plante, les métaux lourds peuvent être piégés et ne pas circuler dans la plante, ou alors transportés du lieu de l'absorption vers un autre organe végétal (Mir, 2016).

Le cuivre présente une rhizotoxicité chez les semis de blé (Fortunati et al, 2005). Le rendement du blé diminue lorsque le sol est contaminé par de l'oxyde de cadmium ou de zinc (Muramoto et al, 1990). Les sols pollués par les fonderies de cuivre et de nickel retardent la croissance de la biomasse des pins et réduisent les teneurs essentielles en calcium, en potassium et en magnésium

des jeunes plants (Nieminen, 2004). Le cadmium dans le sol réduit la croissance de l'ivraie avec des rendements des cultures inversement proportionnels à la teneur en cadmium (Moreno et al, 2006).

Les plantes qui poussent dans des sols contaminés peuvent absorber ces polluants. Une fois absorbés, ces produits chimiques toxiques sont absorbés par les animaux qui se nourrissent de plantes contaminées et passent, dans de nombreux cas, dans la chaîne alimentaire à l'homme (Zeliger, 2011). Le cadmium, le zinc et le plomb sont absorbés par les plants de blé et de riz (Muramoto et al, 1990). L'ivraie cultivée absorbe le cadmium des sols pollués (Moreno et al, 2006). L'ivraie est une culture nourrie au bétail, qui absorbe le cadmium et le transmet à l'homme dans la chaîne alimentaire (Zeliger, 2011).

IV. Les métaux lourds et l'environnement

La dégradation des sols peut avoir des impacts directs sur la qualité de l'eau et de l'air, la biodiversité et changement climatique (European Commission, 2006). Des niveaux élevés de contaminants dans le sol peuvent influencer négativement la vigueur des plantes, la santé animale, les processus microbiens, et santé globale du sol. Certains contaminants peuvent changer les processus métaboliques des plantes et réduire les rendements ou causer dommages visibles aux cultures. Même les concentrations relativement faibles de certains contaminants peuvent altérer la chimie du sol et impacter les organismes qui dépendent du sol ou des plantes pour la survie (Shayler et al, 2009).

Les métaux lourds se caractérisent par leur persistance, leur toxicité et leur pouvoir d'accumulation dans le milieu naturel, et par conséquent la présence de ces derniers dans l'environnement peut être nuisible à plusieurs variétés d'espèces vivantes (Ghali, 2008). Un sol pollué représente trois types de risques environnementaux :

1. Mise en contacte directe des polluants avec l'occupant du sol

2. Lessivage des polluants par les eaux d'infiltration et transfert des polluants vers les eaux souterraines et superficielles (pollution possible des ressources en eau)
3. Réintroduction des polluants dans la chaîne alimentaire par les végétaux et les organismes vivants du sol (Jeannot et al, 2020)

V. Les métaux lourds et la santé humaine

L'intérêt porté actuellement aux métaux lourds est lié aux risques d'effets sur la santé humaine qu'ils présentaient, ainsi qu'à la protection de l'environnement (Impens et al, 1991). Les contaminations par les métaux lourds sont un problème de santé très grave dans de nombreuses villes du monde, en particulier les zones industrielles fortement concentrées. (Ibiam, Ekpe, 2013). Si certains éléments métalliques, présents à l'état de traces, sont essentiels pour l'organisme, l'accroissement de leur concentration peut représenter un danger pour les êtres vivants. D'autres éléments ne sont pas nécessaires et ne peuvent produire que des effets toxiques. A cette dernière catégorie appartiennent différents éléments, dont la présence est fortement aggravée par les activités humaines dans l'environnement, tel le plomb, le mercure, le cadmium, le cuivre, le zinc (Koller, 2009).

Les humains peuvent être directement exposés aux contaminants des sols par ingestion, inhalation ou absorption cutanée de particules de sol (en particulier la poussière générée par le sol). Ceci est un problème particulièrement important dans les zones urbaines, notamment dans le contexte de l'étalement urbain actuel. De plus, les agriculteurs sont également un groupe qui peut être directement exposé à la contamination des sols (FAO, ITPS, 2015).

N'importe quel élément inutile, utile ou indispensable, peut occasionner des difficultés du métabolisme chez l'ensemble des organismes vivants lorsqu'il est absorbé en trop grande quantité par rapport à la normale. Les vivants n'ont besoin que d'une petite quantité de métaux lourds, Il est donc possible que leur

accroissement dans l'eau, l'air et le sol soit dangereuse et à haute dose aie des effets toxiques (Eshghi Malayeri, 1995).

Les métaux lourds les plus souvent impliqués dans l'empoisonnement de l'homme sont : le plomb, le mercure, l'arsenic et le cadmium. Certains métaux lourds, tels que le zinc, le cuivre, le chrome, le fer et le manganèse, sont requis par le corps en petites quantités, mais ces mêmes éléments peuvent être toxiques en grande quantité (Gaamoune, 2010). L'exposition aux métaux lourds est potentiellement dangereuse, en particulier les composés métalliques qui n'ont aucun rôle physiologique dans le métabolisme cellulaire. L'ingestion des métaux par l'eau ou des aliments peut modifier le métabolisme d'autres éléments essentiels tels que Zn, Cu, Fe et Se (Tableau.4) (Abdulla, Chmielnicka, 1990).

Tableau 4.Effets de certains métaux lourds sur la santé (Ghali, 2008)

Métaux	Effets sur la santé
Arsenic	<ul style="list-style-type: none"> • Cancérogène et atteinte de différent organes (Foie, système nerveux, peau...) • Pas d'organes cibles pour les expositions de longue durée
Cadmium	<ul style="list-style-type: none"> • Potentiel toxique élevé • Dommages rénaux pour des expositions chroniques à faible dose • Oxydes, chlorures, sulfates, et cadmium sont classés cancérogènes
Chrome	<ul style="list-style-type: none"> • Chromates endommagent le système respiratoire pour des expositions à long terme • Troubles dermatologiques, anémie • Composés avec du chrome VI responsables d'eczéma, chrome VI cancérogène pour l'homme
Cuivre	<ul style="list-style-type: none"> • Effet irritant par inhalation, allergie par contact

	<ul style="list-style-type: none"> • Lésion du foie par voie orale sur période longue
Mercure	<ul style="list-style-type: none"> • Tous les composés du mercure sont toxiques à de faibles doses • Cerveau et rein touchés • Intoxication chronique responsable de dommages irréversibles sur le système nerveux centrale et périphérique • Sous la forme organique peut perturber le développement du fœtus
Nickel	<ul style="list-style-type: none"> • Allergie par contact avec la peau et par présence dans la nourriture pour personnes sensibles • Composés du nickel sont cancérigènes pour le nez et les poumons
Plomb	<ul style="list-style-type: none"> • Entraîne une anémie a forte dose • Perturbe le système nerveux et les reins • Effet mutagène de l'acétate et du phosphate de plomb (expérience animale)
Zinc	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'effets cancérigènes du zinc par voie orale ou inhalation • Mais le chromate de zinc est cancérigène

Chapitre III : Normes de qualité du sol

I. Quelques normes de qualité du sol

La question des substances critiques entraîne automatiquement celle des quantités critiques : à partir de quand un sol est-il atteint, respectivement à partir de quand faut-il s'attendre à des dommages. Des normes sur les atteintes portées au sol fixent des valeurs indicatives à ne pas dépasser : les sols ou la concentration est inférieure à la valeur indicative sont considérés comme "sains" et ceux où la valeur indicative est dépassée comme "menacés". Mais souvent, la fixation des valeurs indicatives est quelque peu spéculative en raison de l'absence d'études scientifiques complètes. Le tableau.5 présente des valeurs indicatives permettant d'évaluer les atteintes portées au sol qui garantissent la protection à long terme de l'écosystème sol selon (Koller, 2009).

Tableau 5. Seuil de toxicité pour certains polluants minéraux rencontrés sur les sites pollués (Koller, 2009)

Elément	Valeur indicative (Mg/Kg de sol MS)
Plomb	50
Cuivre	40
Cadmium	0.8
Zinc	150
Nickel	50
Chrome	50
Cobalt	25
Mercure	0.5
Fluor	700

En plus de leurs divers rôles dans les cadres réglementaires nationaux, les valeurs de dépistage des sols ont été identifiées comme des valeurs de déclenchement, des valeurs de référence, des valeurs cibles, des valeurs d'intervention, des valeurs de nettoyage, des valeurs limites et de nombreuses autres dénominations. Leur rôle et leur force d'exécution dans les différents

cadres réglementaires nationaux sont également très variables (Rodriguez, Römken, 2018).

Dans le monde entier, les normes de qualité des sols utilisées diffèrent largement. C'est en partie en raison de différences dans l'objectif des normes de qualité des sols, mais les cadres techniques présentent également de nombreuses différences. Provoost et al. ont comparé les normes de qualité des sols pour huit métaux et métalloïdes, du Canada, Flandre (Belgique), France, Allemagne, Royaume-Uni, Pays-Bas, Norvège, Suède, Suisse et USA (Tableau.6 et Tableau.7). Pour la plupart des contaminants, ils ont trouvé des différences entre la valeur la plus élevée et la plus faible. Ils ont conclu que certaines de ces différences pourraient s'expliquer par des différences d'ordre politiques, techniques ou scientifiques entre les procédures utilisées dans les différents pays (Swartjes, 2010).

Le tableau.6 indique les normes de qualité des sols pour les sols destinés aux résidences dans la Belgique, le Pays bas, l'Allemagne, la France, la Suède, la Norvège, la Grande Bretagne, le Canada, la Suisse, les Etats unies.

Tableau 6. Normes de qualité des sols pour les sols destinés aux résidences chez quelque pays (Provoost et al, 2006)

Contaminants (Mg / Kg MS)	Belgique	Pays Bas	Allemagne	France	Suède	Norvège	Grande Bretagne ₁	Grande Bretagne ₂	Canada	Suisse	Etats Unies
Arsenic	110	55	50	37	15	2	20	20	12	N. A	22
Cadmium	6	12	20	20	0.4	3	8	30	10	20	37
Chrome III	300	380	400	130	120	25	130	200	64	N. A	100000
Cuivre	400	190	N. A	190	100	100	N. A	N. A	63	1000	3100
Mercure	15	10	20	7	1	1	8	8	6.6	N. A	23
Plomb	700	530	400	400	80	60	450	450	140	1000	400
Nickel	470	210	140	140	35	50	50	75	50	N. A	1600
Zinc	1000	720	N. A	9000	350	100	N. A	N. A	200	2000	2300

N. A : Non applicable

¹ : Zone résidentielle avec jardins et potagers

² : Zone résidentielle sans jardins ni potagers

Le tableau.7 indique les normes de qualité des sols pour les sols destinés aux industries dans la Belgique, l'Allemagne, la France, la Suède, la Grande Bretagne, le Canada, les Etats unies.

Tableau 7. Normes de qualité des sols pour les sols destinés aux industries chez quelque pays (Provoost et al, 2006)

Contaminants (Mg / Kg MS)	Belgique	Allemagne	France	Suède + ES ²	Suède - ES ³	Grande Bretagne	Canada	Etats Unis
Arsenic	300	140	120	15	40	500	12	260
Cadmium	30	60	60	1	12	1400	22	450
Chrome III	800	1000	7000 ¹	250	250	5000	87	100000
Cuivre	800	N. A	950	200	200	N. A	91	41000
Mercure	30	80	600	5	7	480	50	310
Plomb	2500	2000	2000	300	300	750	600	750
Nickel	700	900	900	150	200	5000	50	20000
Zinc	3000	140	120	700	700	500	360	100000

N. A : Non applicable

¹ : Chrome totale

+ES² : Décrit le type d'usage industriel du sol et l'usage des eaux souterraines

-ES³ : Décrit le type d'usage industriel du sol sans l'usage des eaux souterraines

I.1. Teneurs maximales en Pb et Cd dans les fruits et légumes selon l'Union européenne

Les végétaux cultivés sur un sol contaminé par les métaux lourds les absorbent et les concentrent par voie racinaire et par voie aérienne. Ensuite, la sève les distribue aux autres organes de la plante. Ainsi, les métaux lourds se retrouvent finalement dans les cultures et plus précisément dans les produits agricoles récoltés et consommés par l'Homme (Bliefert, Perraud, 2010). Selon le règlement (CE) n°1881/2006 de la commission du 19 Décembre 2006, les

teneurs maximales en Plomb et Cadmium dans les légumes et fruits autorisées pour leur commercialisation dans l'union européenne est indiqué dans le Tableau.8 et Tableau.9 (Chapelle, 2013).

Tableau 8. Teneurs maximales en plomb dans les légumes et fruits autorisés pour commercialisation dans l'union européenne (Chapelle, 2013)

Plomb	Mg/Kg
Légumes, à l'exclusion des brassicacées, des légumes-feuilles, des fines herbes et des champignons. Dans le cas des pommes de terre, la teneur maximale s'applique aux produits pelés	0,1
Brassicacées, légumes-feuilles et champignons cultivés	0,3
Fruits, à l'exclusion des baies et des petits fruits	0,1
Baies et petits fruits	0,2

Tableau 9. Teneurs maximales en cadmium dans les légumes et fruits autorisés pour commercialisation dans l'union européenne (Chapelle, 2013)

Cadmium	Mg/Kg
Légumes et fruits, à l'exclusion des légumes-feuilles, des fines herbes, des champignons, des légumes-tiges, des pignons de pin, des légumes-racines et des pommes de terre	0,05
Légumes-feuilles, fines herbes, champignons cultivés et céleri-rave	0,2
Légumes-tiges, légumes-racines et pommes de terre, à l'exclusion du céleri-rave. Dans le cas des pommes	0,1

de terre, la teneur maximale s'applique aux produits pelés.

Baies et petits fruits	0,2
------------------------	-----

I.2. Norme internationale : ISO 11047 : 1998

La présente Norme internationale prescrit deux méthodes de dosage, par spectrométrie d'absorption atomique, d'un ou plusieurs des éléments suivants : cadmium, chrome, cobalt, cuivre, plomb, manganèse, nickel et zinc, dans un extrait à l'eau régale obtenu conformément à l'ISO 11466. Le choix de la méthode pour chaque élément dépend de la quantité de cet élément que l'on s'attend à trouver dans l'échantillon, et les deux méthodes peuvent être nécessaires pour couvrir tous les éléments d'un échantillon. Les méthodes s'appliquent lorsque la teneur en élément est soit supérieure, soit inférieure à la quantité indiquée au tableau.10 (en milligrammes par kilogramme de matière sèche) (Tableau.10). Les deux méthodes sont traitées séparément.

- Méthode A — Dosage du cadmium, chrome, cobalt, cuivre, plomb, manganèse, nickel et zinc par spectrométrie d'absorption atomique avec flamme.
- Méthode B — Dosage du cadmium, chrome, cobalt, cuivre, plomb, manganèse, nickel et zinc par spectrométrie d'absorption atomique avec atomisation électrothermique (Webmaster17).

Tableau 10. Limites indicatives de la teneur du sol (mg/kg de matière sèche) en éléments extractibles par l'eau régale conformément à l'ISO 11466 (Webmaster17)

Élément	Méthode A (SAA avec flamme)	Méthode B (SAA avec atomisation électrothermique)
Cadmium	> 2	< 2
Cuivre	> 5	< 5
Plomb	> 15	< 15
Nickel	> 12	< 12

Zinc	> 2	< 2
------	-----	-----

Eau régale : Solution capable de dissoudre les métaux nobles

I.3. Etats des lieux sur les normes de qualité des sols et plans de gestion dans quelque pays

I.3.1. Nigeria

Au Nigeria, en attendant que des paramètres appropriés sont en cours d'élaboration, le Ministère de ressources pétrolières a recommandé des lignes directrices pour l'assainissement des terres contaminées en fonction de deux paramètres, les valeurs d'intervention et les valeurs cibles (Tableau.11) (Abdullahi, 2015).

Tableau 11. Valeurs cibles et valeurs d'intervention pour certains métaux dans un sol standard au Nigeria (DPR-EGASPIN, 2002)

Métal	Valeur cible (Mg/Kg)	Valeur d'intervention (Mg/Kg)
Nickel	140.00	720.00
Cuivre	0.30	10.00
Zinc	-	-
Cadmium	100.00	380.00
Plomb	35.00	210
Arsenic	200	625
Chrome	20	240
Mercure	85	530

I.3.2. Pologne

En Pologne, la contamination des sols est évaluée sur la base des normes de qualité des sols (NQS), établi en vertu de l'ordonnance du ministère de l'environnement de 2002 (NQS 2002) (Tableau.12). Les NQS ont été établis pour trois catégories de terres :

- **Groupe A** - terres situées dans des zones protégées en vertu des lois de Protection de l'eau et de la nature. Le règlement prévoit qu'à moins que

la contamination constitue une menace pour la santé humaine ou l'environnement, aucune action spéciale est requise. Toutefois, ces terres relèveront également du groupe B ou C et sera soumis à ses dispositions

- **Groupe B** - terres agricoles à l'exception des terres immergées dans les étangs et les fossés, des terres forestières et terres à arbres ou arbustes, des friches et terrains urbanisés à l'exception des terrains industriels, des terrains miniers et des terrains utilisés pour le transport ;
- **Groupe C** - terrains industriels, miniers et de transport (Wcisło, 2012)

Tableau 12. Normes de qualité des sols sur des couches de surface des catégories de terres de groupes C et B en Pologne (Wcisło, 2012)

Contaminant	NQS (Mg/Kg)	
	Groupe C Terrain à usage industriel	Groupe B Terrain à usage résidentiel
	0 – 2 m couche de sol	0 – 0.3 m couche de sol
Arsenic	60	20
Cadmium	15	4
Chrome	500	150
Cuivre	600	150
Mercure	30	2
Nickel	300	100
Plomb	600	100
Zinc	1000	300

I.3.3. Etats unis

Aux états unis, la prévention de la pollution par les métaux lourds est essentielle car le nettoyage des sols contaminés est extrêmement coûteux et difficile. Les applicateurs de déchets industriels ou de boues doivent respecter les limites réglementaires établies par l'agence de protection de l'environnement des États-Unis (EPA) (Tableau.13) (Abdullahi, 2015) :

Tableau 13. Limites réglementaires applicables aux métaux lourds appliqués aux sols selon l'EPA (USEPA, 1993)

Métaux lourds	Concentration	Polluant annuel		Polluant cumulatif	
	maximale dans les boues	Taux de chargement	Taux de chargement	Taux de chargement	Taux de chargement
	(Mg/Kg)	(Kg/ha/ An)	(Lb/A/ An)	(Kg/ha)	(Lb/A)
Arsenic	75	21.9	1.8	41	36.6
Cadmium	85	1.9	1.7	39	34.8
Chrome	3000	150	134	3000	2679
Cuivre	4300	75	67	1500	1340
Plomb	420	21	14	420	375
Mercure	840	15	13.4	300	268
Nickel	75	0.90	0.80	18	16
Sélénium	100	5	4	100	89
Zinc	7500	140	125	2800	2500

I.3.4. Algérie

Le décret exécutif n° 06-141 du 20 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 avril 2006 définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels a instauré des normes relatives aux rejets de métaux lourds (Tableau.14).

Tableau 14. Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents liquides industriels en Algérie (Journal officiel, 2006)

Paramètres	Valeurs limites (Mg/l)
Cadmium	0.2
Cuivre	0.5
Mercure	0.01
Plomb	0.5
Zinc	3
Nickel	0.5

I.4. Normes d'application de métaux lourds sur les sols agricoles à travers les boues d'épuration

Il existe évidemment des divergences d'opinion majeures sur ce qui peut être considéré comme des niveaux d'application sûrs. Les variations non seulement reflètent les différences d'attitude d'un pays à l'autre, mais aussi les différences réelles entre les sols, les cultures et le climat qui peuvent affecter les résultats de la recherche. Une grande partie du travail effectué sur les éléments traces a testé l'ajout de sels métalliques directement ou ajoutés aux boues d'épuration, et en raison du nombre de traitements nécessaires, les cultures ont souvent été cultivées en pots (Webber, 1981). Le tableau.15 compare les lignes directrices élaborés chez quelque pays concernant les taux de métaux lourds appliqués au sols agricoles à travers les boues d'épuration :

Tableau 15. Comparaison des lignes directrices pour l'application des métaux lourds sur les sols agricoles à travers les boues d'épuration (kg/ha) chez quelque pays (Webber, 1981)

Métaux	G.Bretagne	Ontario	Etats unies	Suède	Hollande
Zinc	560	363	500	300	120
Cuivre	280	168	250	90	30
Nickel	70	36	100	15	3
Cadmium	5	1.6	10	0.75	0.6
Plomb	1000	94	1000	30	-
Mercure	2	0.9	-	0.75	0.6

*Chapitre IV : Gestion et réhabilitation
des sites pollués au niveau
international*

I. Gestion et réhabilitation des sites pollués

Une réhabilitation est l'ensemble d'opérations (réaménagement, traitement de dépollution, confinement (éviter la dispersion dans l'environnement de matériel biologique indésirable), résorption des déchets, contrôles institutionnels...) effectuées en vue de rendre un site apte à un usage donné. La réhabilitation des sites pollués - ou friches industrielles - est une nécessité pour l'environnement, la santé publique et la santé au travail, même si son coût financier reste élevé (Smiri, 2015). Afin d'éviter de faire recours à la réhabilitation des sites pollués et limiter les dommages causés par les activités humaines à l'environnement, les gouvernements imposent des réglementations strictes. Par réglementation sur les sols on entend, au sens large, l'ensemble des textes (lois, règlements, dispositions d'urbanisme) qui intègrent la notion de qualité des sols, qu'il s'agisse de préservation ou de gestion pour garantir une adéquation avec l'usage d'un site (Damas et al, 2018).

Certains sites évoquent un soupçon clair d'être contaminés, tandis que d'autres sites ont une apparence plutôt innocente en ce qui concerne la contamination des sols. Une visite sur place, comprenant une enquête dite organoleptique (« recherche et odeur »), est une activité essentielle à ce stade du projet. L'évaluation de l'histoire du site pourrait comprendre une visite des archives municipales et des sites enregistrements trouvés dans la bibliothèque. De plus, des entretiens avec d'anciens travailleurs ou habitants pourraient être utiles. Une carte du site pourrait également aider à l'interprétation, et des photos numériques soutiendront la mémoire de l'évaluateur des risques. Cette étude préliminaire devrait conduire à une hypothèse sur le type de contaminants et les endroits où ces contaminants peuvent être présents. De toute évidence, des échantillons doivent être prélevés et analysés afin de déterminer la concentration dans le sol (Swartjes, 2010).

I.1. France

La France ne possède pas de législation spécifique aux sites contaminés. Le principal document réglementaire est une circulaire ministérielle aux Préfets

de Département en date du 3 décembre 1993 et relative à la gestion et à la réhabilitation des sites pollués. Cette circulaire, prise au titre de la loi du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement, définit les principes d'une politique réaliste : inventorier, sélectionner, traiter. Ceci doit conduire à la réhabilitation des sites pollués reconnus comme présentant un risque significatif pour la santé humaine et / ou son environnement. La réglementation applicable aux sols pollués est en France séparée de celles de la gestion des déchets, contrairement à certains autres pays européens. Le principe du pollueur – payeur, est une caractéristique de l'approche française (Ferguson, Darmendrail, 2003).

La méthodologie en vigueur actuellement a été mise en place en 2007 et a fait l'objet d'une actualisation en avril 2017. Cette méthodologie s'appuie sur deux démarches que sont l'interprétation de l'état des milieux et le plan de gestion :

L'interprétation de l'état des milieux est prévue pour vérifier que l'état actuel du site est compatible avec son usage. Elle s'intéresse prioritairement aux aspects sanitaires, et aux aspects connexes (ressources en eau par exemple).

Il s'agit de distinguer :

- 1- Les milieux qui ne nécessitent aucune action particulière, c'est-à-dire ceux qui permettent une libre jouissance des usages constatés sans exposer les populations à des niveaux de risques excessifs
- 2- Les milieux qui peuvent faire l'objet d'actions simples de gestion pour rétablir la compatibilité entre l'état des milieux et leurs usages constatés (par exemple l'enlèvement des pollutions concentrées, le recouvrement de terre)
- 3- Les milieux qui nécessitent la mise en place d'un plan de gestion

Le plan de gestion vise à étudier différents scénarios de gestion d'une pollution (action sur une source, action sur une voie de transfert, action sur des expositions). Il s'agit alors :

- 1- De maîtriser les impacts des pollutions s'il n'est pas possible de supprimer les pollutions elles-mêmes

- 2- De déterminer les mesures de gestion à réaliser en prenant en compte le bilan « coûts-avantages »
- 3- D'engager les travaux de réhabilitation nécessaires
- 4- De réaliser une analyse des risques résiduels (ARR) lorsque des voies de transfert subsistent et ceci, pour savoir si les risques sont acceptables, sur le plan sanitaire, et en fonction des usages constatés ou futurs (Damas et al, 2018)

I.2. Allemagne

La loi fédérale relative à la conservation des sols a été ratifiée en février 1998 et est entrée en application en mars 1999. Du fait de la parution de cette nouvelle loi, les multiples réglementations et normes relatives à la réhabilitation des sols dans les différents Länder allemands sont remplacées par des critères nationaux uniformes pour l'évaluation des risques liés aux sites contaminés et leur traitement. Les points spéciaux de cette loi relative à la gestion des sols contaminés sont cohérents avec les réglementations actuelles des Länder. Elles peuvent être décrites ainsi :

- 1- Les autorités régionales compétentes sont responsables de l'enregistrement officiel, des investigations et de l'évaluation des risques sur tous les sites abandonnés suspectés de contamination. Les autorités peuvent recouvrir les coûts d'investigation auprès des personnes responsables.
- 2- En utilisant les valeurs de déclenchement d'actions, l'autorité peut décider des besoins en matière d'investigations plus détaillées ou d'actions de réhabilitation immédiates.
- 3- Les valeurs d'actions uniformes (qui ne sont pas des objectifs standards de réhabilitation) seront aussi prescrites lorsqu'une justification scientifique aura été élaborée. Ces valeurs d'action indiquent un niveau de danger tel qu'il convient d'intervenir sans avoir nécessairement besoin d'investigation plus détaillée (Ferguson, Darmendrail, 2003).

I.3. Autriche

La constitution fédérale Autrichienne comprend des dispositions pour la préservation de la qualité des sols, mais il n'existe pas de texte réglementaire

spécifique sur la conservation des sols. Ceci est de la responsabilité des autorités régionales. Elle porte exclusivement sur la réhabilitation et le maintien des surfaces agricoles. La loi relative à la réhabilitation des sites contaminés (Journal Officiel Fédéral n° 229/1989) a été initialement établie de manière à financer les mesures de nettoyage et demande au Ministère chargé de l'Environnement de coordonner les actions d'investigation, d'évaluation et de réhabilitation des sites contaminés à l'échelle nationale (Ferguson, Darmendrail, 2003).

I.4. Belgique

En Belgique, la réglementation environnementale est du ressort des trois régions : les Flandres, la Wallonie et la Région de Bruxelles – Capitale. Ceci s'applique aussi à la législation relative aux sols pollués. A l'heure actuelle, seule les Flandres ont adopté un texte législatif sur les sols contaminés, à savoir le décret sur la réhabilitation des sols, ratifié par le gouvernement flamand en février 1995. Le décret flamand comprend un certain nombre de principes permettant une nouvelle approche de la gestion de la contamination des sols, à savoir :

- 1- Un registre des sites pollués, avec l'opportunité de demander un certificat de sol comprenant un extrait de ce registre,
- 2- La prise en considération d'une distinction entre les pollutions historiques et nouvelles,
- 3- Une différenciation entre les notions d'obligation et de responsabilité pour la réhabilitation (Ferguson, Darmendrail, 2003)

I.5. Danemark

Au début des années 1970, les autorités danoises réalisèrent qu'il pourrait avoir des problèmes en relation avec certains sites contaminés, en particulier des décharges contenant des produits chimiques. La découverte de déchets enterrés sur des sites en cours de redéploiement économique conduisit à la loi sur les sites contaminés de 1983. Dans les années 1980, il est devenu clair que certaines décharges contenant des déchets ménagers et industriels pouvaient présenter un risque pour l'homme et son environnement. La loi de

1983 fut alors révisée pour prendre en considération tous les types de contaminants.

Une décision de la cour suprême datant de 1992 a établi que la date limite normale en matière de responsabilité dans le cas des sols contaminés est de 20 ans. Aussi, un pollueur ne peut être rendu responsable d'une pollution ayant eu lieu il y a plus de 20 ans indépendamment de la possibilité qu'il ait agi de mauvaise foi.

En complément de la réglementation sur les sols contaminés, un système spécial de traitement pour les propriétaires de maisons a été introduit en 1993 (loi relative à la perte de valeur). En payant une contribution mineure, le propriétaire peut initier un traitement financé par des fonds publics. Dans le cadre de cette dernière loi, aucune distinction entre les contaminations intervenues avant et après le milieu des années 1970 n'est faite. La protection du propriétaire innocent est considérée comme de la plus haute importance. Ceci suppose que, si le propriétaire est à l'origine de la pollution (en ayant une petite affaire par exemple), il ne pourra pas prétendre à l'assistance financière publique. Il en va de même lorsque le propriétaire connaissait la pollution au moment de l'acquisition et a obtenu ainsi une remise de prise sur la vente.

En 1994, le Ministère de l'Environnement et de l'Energie a mis en place un comité national sur les sites contaminés. En 1996, le comité a proposé une révision de la législation sur les sites contaminés. En janvier 1998, une proposition de modification a été soumise aux différents partenaires : industrie, groupes d'intérêt, autres ministères, etc. Présentée au parlement en février 1999, elle a été adoptée fin mai 1999. Les modifications majeures portent sur les points suivants :

- 1- Le texte couvre tous les sites contaminés, y compris la gestion des sols excavés et transportés,
- 2- Aucune distinction entre les pollutions intervenues avant ou après le milieu des années 1970 n'est introduite,

- 3- Le principe du pollueur – payeur sera appliqué et imposé, ce qui nécessitera de prouver qu’il agissait de mauvaise foi au moment de la pollution,
- 4- Toute contamination intervenant après la mise en application de la nouvelle réglementation sera soumise aux règles strictes de responsabilités (pollueur – payeur) (Ferguson, Darmendrail, 2003).

I.6. Grèce

En Grèce, la loi environnementale n°1650/86 couvre tous les aspects de la protection de l’environnement, et en particulier la protection des sols susceptibles d’être contaminés par les dépôts de déchets municipaux et industriels, ou par l’utilisation excessive de fertilisants et pesticides. Bien qu’aucune législation spécifique, aucune valeur guide ou norme en matière de qualité des sols, n’existe, certaines parties de la législation grecque se réfèrent directement ou indirectement au contrôle de la contamination des sols et des eaux souterraines (Ferguson, Darmendrail, 2003).

Conclusion

Cette étude a porté sur la réalisation d'une synthèse bibliographique sur la pollution des sols. Elle a permis d'aborder la problématique de la pollution des sols sous ses diverses formes et analyser les nombreux facteurs contribuant à la contamination des sites agricoles. Afin de saisir la relation entre les activités humaines considérées comme potentiellement nuisibles à l'environnement et leurs répercussions, à leurs tours, sur la santé humaine, directement ou à travers la chaîne alimentaire.

D'une manière générale, l'analyse des niveaux de métaux lourds dans des parcelles de terres doivent exprimer des résultats conformes aux réglementations établis dans le pays d'origine, ces réglementations se traduisent par des normes. Ce mémoire a exploré quelques-unes de ces normes et leurs différences selon le pays et les politiques de gestion et remédiation à la pollution des sols établis dans quelque pays.

Le présent travail ouvre des perspectives sur la nécessité de la prise en considération de l'état des sols agricoles vis-à-vis des taux de contaminants qu'ils peuvent accumuler vue le danger qu'ils représentent à la santé humaine.

Références bibliographiques

- A.F.E.E : Association Française pour l'étude des eaux, (1979). *Le chrome, le cuivre, le nickel*, rapport N°6. 198. **In** : Noppe Karine, (1996). *Contamination métallique des sédiments des cours d'eau du bassin Artois-Picardie et son impact sur la contamination des chairs et des foies de poissons*. Mémoire de D.E.A Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistiques et Géochimie. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- Abdulla M. et Chmielnicka J. (1990). *New aspects on the distribution and metabolism of essential trace elements after dietary exposure to toxic metals*. Biol Trace Elem Res . 23 :25–53. **In** : Gaamoune Sofiane, (2010). *Le rôle des biofilms d'algues dans les traitements biologiques des eaux*. Mémoire de magister en biologie végétale. Université Farhat Abbas –Sétif (Algerie).
- Abdullahi, M. S. (2015). *Soil Contamination, Remediation and Plants*. *Soil Remediation and Plants*, 525–546. Doi :10.1016/b978-0-12-799937-1.00018-8
- ADEME : Agence de la transition écologique (France). *Les polluants organiques persistants (POP)*, (2017). *Les sols en danger* (2019). Consulté le : 01 Avril 2020. <https://www.ademe.fr/expertises/sols-pollues>
- Agnew M. Ulrika, Slesinger L. Todd, (2020). *Zinc Toxicity*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK554548/>
- Artiola, J. F., Walworth, J. L., Musil, S. A., & Crimmins, M. A. (2019). *Soil and Land Pollution*. *Environmental and Pollution Science*, 219–235. Doi : 10.1016/b978-0-12-814719-1.00014-8
- Ashraf, M., M. J. Maah and I. Yusoff, (2014). Chap 1 : Soil Contamination, Risk Assessment and Remediation.” <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:149453887>
- ATSDR : Agency of toxic substances and disease registry, (1999). **In** : WHO, (2007) : *Joint WHO/Convention Task Force on the Health Aspects of Air Pollution, Health risks of heavy metals from long-range transboundary air pollution*.
- Baldauf RW, Isakov V, Deshmukh P et al. (2016). *Influence of solid noise barriers on near-road and on-road air quality, Atmospheric Environment*. N° 129, p. 265-276. **In** : Stella, Patrick., BEDOS, Carole., GENERMONT, Sophie., Benjamin Loubet, Erwan Personne, Caroline Petit et Sébastien Saint-Jean, (2017). « *Les espaces périurbains : entre pollution des villes et pollution des champs aux échelles régionale et locale* ». *Pollution atmosphérique [En ligne]*, N°229 - 230, URL :

<http://lodel.irevues.inist.fr/pollution-atmospherique/index.php?id=5613>, <https://doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.5613>

- Bennouna. T, (1990). **In** : Noppe Karine, (1996). *Contamination métallique des sédiments des cours d'eau du bassin Artois-Picardie et son impact sur la contamination des chairs et des foies de poissons*. Mémoire de D.E.A Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistiques et Géochimie. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- Berlin M, Zalups RK, Fowler BA. *Mercury*. **In** : Nordberg GF, Fowler BA, Nordberg M, Friberg LT, (2007). editors. *Handbook on the Toxicology of Metals*. 3rd edition. chapter 33. New York, NY, USA: Elsevier. **In** : Bernhoft Robin A., (2011). *Mercury Toxicity and Treatment: A Review of the Literature*, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3253456/>
- Bernhoft Robin A., (2011). *Mercury Toxicity and Treatment : A Review of the Literature*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3253456/>
- Bliefert C, Perraud R. (2010). *Chimie de l'Environnement. Air, Eau, Sols, Déchets*. De Boeck Université ; 369-388. **In** : Adoté Agbéko ADUAYI-AKUE et Kissao GNANDI, (2014). *Evaluation de la pollution par les métaux lourds des sols et de la variété locale du maïs Zea mays dans la zone de traitement des phosphates de Kpémé (Sud du Togo)*, Int. J. Biol. Chem. Sci. 8(5) : 2347-2355. DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v8i5.37>
- Bliefert Claus, Perraud Robert, (2008). *Chimie de l'environnement*, de Boeck, collection : Chimie, 478Pages.
- Boisset, M. (2017). *Les « Métaux Lourds » dans l'alimentation : quels risques pour les consommateurs ?* Médecine Des Maladies Métaboliques, 11(4), 337–340. [https://doi.org/10.1016/S1957-2557\(17\)30077-9](https://doi.org/10.1016/S1957-2557(17)30077-9)
- Bourrelrier.P.H, BERTHELIN.J., (2008). *Contamination des sols par les éléments en traces : les risques et leur gestion*. Rapport n°42 à l'Académie des Sciences. Paris, France : Lavoisier Tec & Doc, p440.
- Bovard. P, L. Foulquier, M. Pally, (1978). *Transfert du cadmium dans les eaux douces*. B.I.S.T, 230. **In** : Noppe Karine, (1996). *Contamination métallique des sédiments des cours d'eau du bassin Artois-Picardie et son impact sur la contamination des chairs et des foies de poissons*. Mémoire de D.E.A Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistiques et Géochimie. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- C.H Walker, S.P Hoplin, S.P Sibley, D.B Peakall (2001). *Principles of ecotoxicology*, second ed, Taylor and Francis, London. **In** : Cachada, A., Rocha-Santos, T., & Duarte, A. C. (2018). *Soil and Pollution*, 1–28. Doi : 10.1016/b978-0-12-849873-6.00001-7

- Cachada, A., Rocha-Santos, T., & Duarte, A. C. (2018). *Soil and Pollution*, 1–28. Doi :10.1016/b978-0-12-849873-6.00001-7
- Calvet Raoul, (2003). *Le sol : propriétés et fonctions. Constitution, structure, phénomènes aux interfaces*. Vol 1. France Agricole Editions, 455 pages
- Caroline Petit, Benjamin Loubet, Elisabeth Rémy, Christine Aubry, Fabrice Duguay, Julie Missonnier, Pierre Cellier, Amir Ali Feiz, Cécile Blondeau, Cécile Mauclair et Brigitte Durand, (2012). « *Dépôt de polluants sur les espaces agricoles à proximité des voies de transport en Île-de-France* », Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne]. URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/12833> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.12833> Consulté : le 07 juillet 2020.
- Chaney, R.L., Oliver, D.P., (1996). *Sources, potential adverse effects and remediation of agricultural soil contaminants*. In: Naidu, R. (Ed.), *Contaminants and the Soil Environments in the AustraliaPacific Region*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 323–359. In : Abdullahi, M. S. (2015). *Soil Contamination, Remediation and Plants. Soil Remediation and Plants*, 525–546. Doi : 10.1016/b978-0-12-799937-1.00018-8
- Chaouali. N, Nouioui. A, Aouard. M, Smaoui. O, Amira. D, & Hedhili. A, (2018). *Mise au point et validation d'une méthode de dosage du plomb dans les matrices végétales par spectrométrie d'absorption atomique*. *Toxicologie Analytique et Clinique*, 30(1), 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.toxac.2017.12.002>
- Chapelle, Gauthier., (2013). *L'incidence des pollutions urbaines sur les productions alimentaires en ville*. Rapport final de la recherche réalisé pour le compte de l'Institut Bruxellois de Gestion de l'Environnement. https://document.leefmilieu.brussels/opac_css/electfile/etude_pollution-et-agricultureUrbaine_Greenloop_avril_2013.PDF?langtype=2067
- CITEPA, (2006). Ref n°72. In : SOGREAH, (2007). Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par SOGREAH. *Bilan des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles de France métropolitaine*. https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/57992_sogreah.pdf
Consulté le : 19 juillet 2020
- DAMAS O., BRANCHU P., DOUAY F., SCHWARTZ C., GRAND C., MAROT F., (2018). *Présomption de pollution d'un sol : des clés pour comprendre et agir*. Plante & Cité, Angers, 36 p.
- Delecourt F, 1978 – *Initiation à la pédologie*. Faculté des Sciences Agronomiques de l'Eat, Gembloux, Belgique, 69 p. In (Webaster9) :

[:https://www.supagro.fr/ress-pepites/sol/co/2_2_StructureSol.html](https://www.supagro.fr/ress-pepites/sol/co/2_2_StructureSol.html)

Consulté le : 26 Aout 2020

- Dor, F., (2006). *Pollution des sols et santé publique*. Institut de veille sanitaire. Département santé environnement. Arch Mal Prof Env ; 67 : 40-48. <https://www.em-consulte.com/article/73663/article/pollution-des-sols-et-sante-publique>.
- Dougnon, V., Edoth, P., Bankolé, H., Dougnon, J., Klotoé, J. R., Loko, F., ... Boko, M. (2013). *Présence du plomb dans les feuilles de Solanum macrocarpon Linn cultivé à Cotonou (Bénin) : rôle des fientes de poulets mal compostées*. Comptes Rendus Biologies, 336(5-6), 261–264. Doi : 10.1016/j.crvi.2013.04.006
- DPR-EGASPIN, (2002). *Environmental Guidelines and Standards for the Petroleum Industry in Nigeria (EGASPIN)*. Department of Petroleum Resources, Lagos, Nigeria. **In** : Abdullahi, M. S. (2015). Soil Contamination, Remediation and Plants. *Soil Remediation and Plants*, 525–546. Doi : 10.1016/b978-0-12-799937-1.00018-8
- Ducret-Sitch RE, Tsai MY, Ragetti M *et al.* (2013). *Role of highway traffic on spatial and temporal distributions of air pollutants in a Swiss Alpine valley*. *Science of the Total Environment*, n° 456-457, p. 50-60. **In** : Stella, Patrick., BEDOS, Carole., GENERMONT, Sophie., Benjamin Loubet, Erwan Personne, Caroline Petit et Sébastien Saint-Jean, (2017). « *Les espaces périurbains : entre pollution des villes et pollution des champs aux échelles régionale et locale* ». *Pollution atmosphérique [En ligne]*, N°229 - 230, URL : <http://odel.irevues.inist.fr/pollution-atmospherique/index.php?id=5613>, <https://doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.5613>
- Eshghi Malayeri Behrouz, (1995). *Décontamination des sols contenant des métaux lourds à l'aide de plantes et de microorganismes*. Thèse de doctorat en biologie des organismes, Université Henri Poincaré, Nancy 1(France).
- European Commission, (2006). PART I—*Evaluation of the Relevance of Organic Micro-pollutants in Sewage Sludge*. Directorate-General Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Background Values in European soils and Sewage Sludges., EUR 22265 EN, Ispra, Italy. **In** : Cachada, A., Rocha-Santos, T., & Duarte, A. C. (2018). *Soil and Pollution*, 1–28. Doi :10.1016/b978-0-12-849873-6.00001-7
- F. Swartjes, (2011). *Introduction*, **in** : F. Swartjes (Ed.), *Dealing with Contaminated Sites. From Theory Towards Practical Application*, Springer. **In** : Cachada, A., Rocha-Santos, T., & Duarte, A. C. (2018). *Soil and Pollution*, 1–28. Doi :10.1016/b978-0-12-849873-6.00001-7
- Fao, (1999). <http://www.fao.org/Ag/fr/magazine/9901sp2.htm>

- FAO, ITPS: Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR)*, Rome, Italy. **In** : Cachada, A., Rocha-Santos, T., & Duarte, A. C. (2018). *Soil and Pollution*, 1–28. Doi :10.1016/b978-0-12-849873-6.00001-7
- Feng J, Wang Y, Zhao J *et al.* (2011). *Source attributions of heavy metals in rice plant along highway in Eastern China. Journal of Environmental Sciences*, n° 23, p. 1158-1164. **In** : Stella, Patrick., BEDOS, Carole., GENERMONT, Sophie., Benjamin Loubet, Erwan Personne, Caroline Petit et Sébastien Saint-Jean, (2017). « *Les espaces périurbains : entre pollution des villes et pollution des champs aux échelles régionale et locale* ». *Pollution atmosphérique [En ligne]*, N°229 - 230, URL : <http://odel.irevues.inist.fr/pollution-atmospherique/index.php?id=5613>, <https://doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.5613>
- Ferguson, Colin C. et DARMENDRAIL, Dominique, (2003). *Evaluation des risques issus des sites pollués : Réglementation Et pratiques dans 16 Pays Européens*. Ministre de l'aménagement du territoire et de l'environnement, BRGM. https://www.researchgate.net/publication/331167487_Evaluation_des_risques_issus_des_sites_pollues_Reglementation_Et_pratiques_dans_16_Pays_Europeens
- Fetzer JC (2000) *Polycyclic aromatic hydrocarbons*. Chemistry and analysis. A series of monographs on analytical chemistry and its applications, vol 158. Wiley-Interscience, New York. **In** : Swartjes, F. A. (2010). *Introduction to Contaminated Site Management. Dealing with Contaminated Sites*. 3–89. Doi : 10.1007/978-90-481-9757-6_1
- Fleury A., Donadieu P., (1997). *De l'agriculture périurbaine à l'agriculture urbaine*. *Courrier de l'environnement de l'Inra*, 31 : 45-61. **In** : https://www.idrc.ca/sites/default/files/openebooks/134-5/index.html#page_25 Webmaster16 : Consulté le : 12 Aout 2020
- G. Rychen, C. Ducoulombier-Crépineau, N. Grova, S. Jurjanz, C. Feidt, (2005). *Modalités et risques de transfert des polluants organiques persistants vers le lait*. URAPA, INRA-INPL-UHP, BP 172, F-54505 Vandoeuvre-lès-Nancy.
- Gaamoune Sofiane, (2010). *Le rôle des biofilms d'algues dans les traitements biologiques des eaux*. Mémoire de magister en biologie végétale. Université Farhat Abbas –Sétif (Algerie).
- Garnier. R, (2005). *Toxicité du plomb et de ses dérivés*. *EMC - Toxicologie-Pathologie*, 2(2), 67–88, <https://doi.org/10.1016/j.emctp>

- Ghali Souad, (2008). *Etude de la carbonisation d'un précurseur végétal : les noyaux d'olives : utilisation dans le traitement des eaux*. Mémoire de Magister en pollution chimique et environnement. Université du 20 août 1955 – Skikda (Algérie).
- Goyer R. Lead. In : Bingham E, Cohrssen B, Powell C, (2001). editors. *Patty's toxicology*. New-York: John Wiley and Sons. p. 611–75. In : Garnier. R, (2005). *Toxicité du plomb et de ses dérivés*. EMC - Toxicologie-Pathologie, 2(2), 67–88. <https://doi.org/10.1016/j.emctp>
- Hannah Shayler, Murray McBride, Ellen Harrison, (2009). *Sources and Impacts of Contaminants in Soils*. Cornell Waste Management Institute. Department of Crop & Soil Sciences. <http://cwmi.css.cornell.edu/sourcesandimpacts.pdf>
- He, Z., Shentu, J., Yang, X., Baligar, V.C., Zhang, T., Stoffella, P.J., (2015). *Heavy metal contamination of soils : sources, indicators and assessment*. J. Environ. Indicators 9, 17–18. In : Mitkovska, V. I., Dimitrov, H. A., & Chassovnikarova, T. G. (2020). *Chronic exposure to lead and cadmium pollution results in genomic instability in a model biomonitor species (Apodemus flavicollis Melchior, 1834)*. Ecotoxicology and Environmental Safety, 194, 110413. doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110413
- Hillel, D. (2008). *Soil pollution and remediation*. Soil in the Environment. 211–222. Doi :10.1016/b978-0-12-348536-6.50020-4
- Huang, S.W., Jin, J.Y., (2008). *Status of heavy metals in agricultural soils as affected by different patterns of land use*. Environmental Monitoring and Assessment, 139, 317-327. In : Velasquez, Horatio R., (2011). *Pollution control : management, technology and regulations*. Nova Science Publishers, Inc. New York.
- Ibiam, J.A., Ekpe, I.I., (2013). *Remediation, danger and health implications of hazardous heavy metals*. Proc. 36th Annu. Int. Conf. Chem. Soc. Nigeria, Minna, Niger State 1, 346–352. Held between 16th – 20th September, 2013. In : Abdullahi, M. S. (2015). *Soil Contamination, Remediation and Plants*. *Soil Remediation and Plants*, 525–546. Doi : 10.1016/b978-0-12-799937-1.00018-8
- Ig-Chum Eom, (2006). *Ecotoxicité d'un sol de cokerie contaminé par des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)*. Sciences agricoles. Université Paul Verlaine - Metz. Français. ffNNT : 2006METZ008Sff.
- Impens, R., Fagot, J., Avril, C., (1991). *Gestion des sols contaminés par les métaux lourds (Synthèse bibliographique)*. Annales de Gembloux. U.E.R de biologie végétale. Faculté des sciences agronomiques. Gembloux (Belgique). 97 : 235-276.
- INERIS, (2005). *Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : Hexachlorobenzène*. Version N°1-mai 05. www.pollutions.eaufrance.fr/pcb/doc/hexachlorobenzene.pdf

- INSERM : Institut nationale de la santé et de la recherche médicale (France), (1999). *Plomb dans l'environnement. Quels risques pour la santé ?* Paris : éditions INSERM ; 461p. **In** : Garnier, R., (2005). *Toxicité du plomb et de ses dérivés*. EMC - Toxicologie-Pathologie, 2(2), 67–88, <https://doi.org/10.1016/j.emctp>
- J. Webber, (1981). *Trace metals in agriculture, effect of heavy metal pollution on plants*. Vol.2, Metals in the environment, applied science publishers ltd,.
- J.L. Moreno, A. Sanchez-Marin, T. Hernandez, C. (2006). *Effect of cadmium on microbial activity and a ryegrass crop in two semiarid soils*. Environ. Manage. 37 (5) 626–633. **In** : Zeliger, H. I. (2011). *Soil Pollution. Human Toxicology of Chemical Mixtures*, 97–103. Doi : 10.1016/b978-1-4377-3463-8.00009-6
- Journal officiel de la république algérienne n° 26, Décret exécutif n° 06-141 du 20 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 avril 2006 définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels. <http://www.sante.dz/jms2010/oms/dec06-141.pdf>
- Katsoyiannis, A., Samara, C. (2004). *Persistent organic pollutants (POPs) in the sewage treatment plant of Thessaloniki, northern Greece : occurrence and removal*. Water Research, 38(11), 2685–2698. doi:10.1016/j.watres.2004.03.027
- Koller Emilian, (2009). *Traitement des pollutions industrielles : eau, air, déchets, sols, boues*. 2eme édition. collection : Technique et ingénierie : environnement et sécurité, Edition : Dunod L'Usine Nouvelle, Librairie Eyrolles - Paris 5^e.
- Koller, (1998). **In** : Mir Soumia, (2016). *Etude de contamination du Plomb et du Zinc dans les céréales cultivées (blé dur) dans la région de Sebdou (Tlemcen)*. Mémoire de Master en Pathologie des écosystème. Université de Tlemcen (Algérie).
- Lamborg CH et al. (2002). *A non-steady-state compartmental model of global-scale mercury biogeochemistry with interhemispheric atmospheric gradients*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 66:1105–1118. **In** : WHO, (2007) : *Joint WHO/Convention Task Force on the Health Aspects of Air Pollution, Health risks of heavy metals from long-range transboundary air pollution*.
- Law, R., Biscayat, J.L., (1994). — *Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) - Problems and progress in sampling, analysing and interpretation*. Mar. Poll. Bull., 29 : 235-241. **In** : Rochez Hélène, Buet Astrid, Tidou Abiba, Ramade François, (2003). *Contamination du peuplement de poissons d'un étang de la réserve naturelle nationale de Camargue, le Vaccarès, par des polluants organiques persistants*. Société nationale de protection de la nature et d'acclimatation de France,

Paris (FRA), Rev. Écol. (Terre Vie), vol. 58.
<http://hdl.handle.net/2042/55538>

- Lazou et al, (2002). **In** : Mir Soumia, (2016). *Etude de contamination du Plomb et du Zinc dans les céréales cultivées (blé dur) dans la région de Sebdou (Tlemcen)*. Mémoire de Master en Pathologie des écosystème. Université de Tlemcen (Algérie).
- Legret, M., C. le Marc et D. Demare, (1997). *Pollution des eaux de ruissellement de chaussées autoroutières – L’autoroute A 11 près de Nantes*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et chaussées, 1997, N°211, pp. 101-115. **In** : BARRY Ibrahima, Mamoudou KONATE Ténéman, (2017/2018), *Détermination du niveau de la pollution de l’air par le plomb d’origine routière dans la ville de Khemis Miliana*, Mémoire de fin d’étude, université Djilali Bounaâma de Khemis Miliana, Algérie.
- Li, Fei, (2018). *Heavy Metal in Urban Soil : Health Risk Assessment and Management*. Chap : 19. Doi : 10.5772/intechopen.73256
- Lucisine Pierre, (2015). *Fonctionnement des sols contaminés*. Thèse de doctorat en Ecotoxicité. Biodiversité. Ecosystèmes. Université de Lorraine (France).
- M.Bonneau, (1963). *L’importance des propriétés physiques du sol dans la production forestière*. Revue forestière française. http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/24490/RFF_196_3_1_19.pdf
- McLaughlin, M.J., Hamon, R.E., McLaren, R.G., Speir, T.W., Rogers, S.L., (2000). *Review : A bioavailability-based rationale for controlling metal and metalloid contamination of agricultural land in Australia and New Zealand*. Aust. J. Soil Res. vol. 38 (6), 1037–1086. **In** : Abdullahi, M. S. (2015). *Soil Contamination, Remediation and Plants*. *Soil Remediation and Plants*, 525–546. Doi : 10.1016/b978-0-12-799937-1.00018-8
- Mellanby Kenneth, (1976). *Biologie de la pollution*. Edition Vuibert, Paris, Collection : Thèmes Vuibert université biologie.
- Mir Soumia, (2016). *Etude de contamination du Plomb et du Zinc dans les céréales cultivées (blé dur) dans la région de Sebdou (Tlemcen)*. Mémoire de Master en Pathologie des écosystèmes. Université de Tlemcen (Algérie).
- NF ISO 11074-1, 1997 **In** : Carnicer Piedrafita, María-Victoria, Décembre (2006). *La pollution ponctuelle des sols : Le cas des stations-service dans la Région de Bruxelles-Capitale*. Mémoire de fin d’étude en gestion de l’environnement, Université Libre de Bruxelles.
- Nriagu, J. O., & Pacyna, J. M. (1988). *Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals*. Nature, 333(6169), 134–139. doi:10.1038/333134a0 **In** : Chao Su1, LiQin Jiang1, WenJun Zhang, Juin (2014). *A review on heavy metal*

contamination in the soil worldwide : Situation, impact and remediation techniques. Publisher : International Academy of Ecology and Environmental Sciences, Environmental Skeptics and Critics, , 3(2) : 24-38.

- Noppe Karine, (1996). *Contamination métallique des sédiments des cours d'eau du bassin Artois-Picardie et son impact sur la contamination des chairs et des foies de poissons*. Mémoire de D.E.A Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistiques et Géochimie. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- P. Fortunati, E. Lombi, R.E. Harmon, et al. (2005). *Effect of toxic cations on copper rhizotoxicity in wheat seedlings*. Environ. Toxicol. Chem. 24 (2) 372–378. **In** : Zeliger, H. I. (2011). *Soil Pollution. Human Toxicology of Chemical Mixtures*, 97–103. Doi : 10.1016/b978-1-4377-3463-8.00009-6
- Prasad. M. N. V. (2004). *Heavy metal stress in plants from biomolecules to ecosystems* (2ème édition) Springer. **In** : Mir Soumia, (2016). *Etude de contamination du Plomb et du Zinc dans les céréales cultivées (blé dur) dans la région de Sebdou (Tlemcen)*. Mémoire de Master en Pathologie des écosystème. Université de Tlemcen (Algérie).
- Provoost, J., Cornelis, C., & Swartjes, F. (2006). *Comparison of Soil Clean-up Standards for Trace Elements Between Countries: Why do they differ?* (9 pages). Journal of Soils and Sediments, 6(3), 173–181. doi:10.1065/jss2006.07.169
- R. Jeannot, B. Lemièrre, S. Chiron, F. Augustin, D. Darmendrail, Fevrier (2020). *Guide méthodologique pour les sols pollués*. Etude réalisé dans le cadre des actions de service publique du BRGM 98-F-108 et de la convention MATE 23/98 : étude N°4, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, France.
- RAMADE, F. (1997). — *Écotoxicologie*. Masson, Paris, p. 77 et suiv **In** : Rochez Hélène, Buet Astrid, Tidou Abiba, Ramade François, (2003). *Contamination du peuplement de poissons d'un étang de la réserve naturelle nationale de Camargue, le Vaccarès, par des polluants organiques persistants*. Société nationale de protection de la nature et d'acclimatation de France, Paris (FRA), Rev. Écol. (Terre Vie), vol. 58. <http://hdl.handle.net/2042/55538>
- Ramade. F, (1978). *Eléments d'écologie appliqués*, 2eme Edition, McGraw hill. Paris. 451. **In** : Noppe Karine, (1996). *Contamination métallique des sédiments des cours d'eau du bassin Artois-Picardie et son impact sur la contamination des chairs et des foies de poissons*. Mémoire de D.E.A Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistiques et Géochimie. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- Ramade. F, (1993). *Dictionnaire encyclopedique des elements de l'ecologie des sciences de l'environnement*. Ed. Sciences internationales.

822. **In** : Noppe Karine, (1996). *Contamination métallique des sédiments des cours d'eau du bassin Artois-Picardie et son impact sur la contamination des chairs et des foies de poissons*. Mémoire de D.E.A Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistiques et Géochimie. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.

- Raymond, A.W. and Okieimen, F.E. (2011). *Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation International Scholarly Research Network Ecology, Tolerance in Plants*. Biochimie, 88, 1707-1719.
- Rodrigues, S. M., & Römken, P. F. A. M. (2018). *Human health risks and soil pollution*. In : A. C. Duarte, A. Cachada, & T. Rocha-Santos (Eds.), *Soil Pollution: From Monitoring to Remediation* (pp. 217-250). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849873-6.00009-1>
- S. Muramoto, H. Nishizaki, I. Aoyama, (1990). *The critical levels and the maximum metal uptake for wheat and rice plants when applying metal oxides to soil*, J. Environ. Sci. Health B 25 (2) 273–280. **In** : Zeliger, H. I. (2011). *Soil Pollution. Human Toxicology of Chemical Mixtures*, 97–103. Doi : 10.1016/b978-1-4377-3463-8.00009-6
- Sahnoune Rachid, (2014). *Analyse et Caractérisation physico-chimique des Sols d'Entreposage de la station de Pétrole (Bejaia)*. Mémoire de Master en Mines et géologie. Université Abderrahmane Mira – Bejaia (Algérie).
- Semlali, R. M., van Oort, F., Loubet, M., & Denaix, L. (2000). *La composition isotopique du plomb : un outil privilégié pour l'estimation de la distribution du plomb anthropique et naturel dans les sols*. Comptes Rendus de l'Académie Des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science, 331(9), 595–600. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(00\)01460-9](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(00)01460-9).
- Shahid, Muhammad., Dumat, Camille., Khalid, Sana., Schreck, Eva., Tiantian Xiong, et al., (2016). *Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants : A comparison of foliar and root metal uptake*. Journal of Hazardous Materials, Elsevier, 325, pp.36-58. [ff10.1016/j.jhazmat.2016.11.063](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.063)ff. [ffhal01436218](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.063)
- Smiri, Moez., (2015). *Dépollution et réhabilitation des sites pollués*. 68p. <https://www.bookelis.com/sciences-de-la-vie/12581-Depollution-et-Rehabilitation-des-Sites-Pollues.html>
- SOGREAH, (2007). Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par SOGREAH. *Bilan des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles de France métropolitaine*. https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/57992_sogreah.pdf
- Stapleton Richard M., (2003). *Pollution from A to Z (L-Z) Vol.2*, Macmillan Reference USA

- Stella, Patrick., BEDOS, Carole., GENERMONT, Sophie., Benjamin Loubet, Erwan Personne, Caroline Petit et Sébastien Saint-Jean, (2017). « *Les espaces périurbains : entre pollution des villes et pollution des champs aux échelles régionale et locale* ». Pollution atmosphérique [En ligne], N°229 - 230, URL : <http://lodel.irevues.inist.fr/pollution-atmospherique/index.php?id=5613>, <https://doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.5613>
- Sterckeman.T., Douay.F., Proix.N & Fourrier.H., (2008). *Contamination des sols vers la profondeur à Noyelles-Godault et Aubry*. In : *Un point sur...les éléments traces métalliques dans les sols approches fonctionnelles et spatiales*. INRA. Editions. Paris. 565. In : Mir Soumia, (2016). *Etude de contamination du Plomb et du Zinc dans les céréales cultivées (blé dur) dans la région de Sebdo (Tlemcen)*. Mémoire de Master en Pathologie des écosystèmes. Université de Tlemcen (Algérie).
- Swartjes, F. A. (2010). *Introduction to Contaminated Site Management. Dealing with Contaminated Sites*. 3–89. Doi : 10.1007/978-90-481-9757-6_1
- T.M. Nieminen, (2004). *Effects of soil copper and nickel on survival and growth of Scots pine*, J. Environ. Monit. 6 (11) 888–896. In : Zeliger, H. I. (2011). *Soil Pollution. Human Toxicology of Chemical Mixtures*, 97–103. Doi : 10.1016/b978-1-4377-3463-8.00009-6
- Tremel-Schaub Anne et Feix Isabelle, (2005). *Contamination des sols Transferts des sols vers les plantes*, ADEME Ed 2, EDP Sciences, France.
- USEPA, (1993). Clean Water Act, sec. 503. vol. 58, no. 32. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. In : Abdullahi, M. S. (2015). *Soil Contamination, Remediation and Plants. Soil Remediation and Plants*, 525–546. Doi : 10.1016/b978-0-12-799937-1.00018-8
- Van straalen, N. M, Denneman, C. A, In (1989). *Ecotoxicological evaluation of soil quality criteria*. Ecotoxicol.viron. saf. 18, 241-251. In : Wang, X., Luo, J., Lin, C.-J., Wang, D., & Yuan, W. (2020). *Elevated cadmium pollution since 1890s recorded by forest chronosequence in deglaciated region of Gongga, China*. Environmental Pollution, 260, 114082. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114082>.
- Venkatram A, Snyder M, Isakov V *et al.* (2013). *Impact of wind direction on near-road pollutant concentrations*. Atmospheric Environment, n° 80, p. 248-258. In : Stella, Patrick., BEDOS, Carole., GENERMONT, Sophie., Benjamin Loubet, Erwan Personne, Caroline Petit et Sébastien Saint-Jean, (2017). « *Les espaces périurbains : entre pollution des villes et pollution des champs aux échelles régionale et locale* ». Pollution atmosphérique [En ligne], N°229 - 230, URL :

atmospherique/index.php?id=5613, <https://doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.5613>

- Wcisło, E. (2012). *Polish Soil Quality Standards Versus Risk-Based Soil Screening Levels for Metals and Arsenic*. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 18(3), 569–587. doi:10.1080/10807039.2012.672888
- WHO, (1995). IPCS. *Environmental health criteria* 165. Inorganic lead. Geneva : 300p In : Garnier. R, (2005). *Toxicité du plomb et de ses dérivés*. EMC - Toxicologie-Pathologie, 2(2), 67–88. <https://doi.org/10.1016/j.emctp>
- WHO, (2003). World Health Organization. Regional Office for Europe. *Health risks of persistent organic pollutants from long-range transboundary air pollution*. Copenhagen : WHO Regional Office for Europe. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107471>
- WHO, (2007) : *Joint WHO/Convention Task Force on the Health Aspects of Air Pollution, Health risks of heavy metals from long-range transboundary air pollution*.
- WHO, (2016), *Les dioxines et leurs effets sur la santé* <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/dioxins-and-their-effects-on-human-health>
- WHO, (2018) : World Health Organisation <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- Zeligler, H. I. (2011). *Soil Pollution. Human Toxicology of Chemical Mixtures*, 97–103. Doi : 10.1016/b978-1-4377-3463-8.00009-6

Sites web

- **Webmaster1** : <https://www.greenfacts.org/en/pollution-free-planet/1-2/index.htm> consulté le : 8 Aout 2020.
- **Webmaster2** : khalil Bouchibti, *La pollution* (site web), Consulté le : 16 Mars 2020. <http://www.pollution.com.sitew.com>
- **Webmaster3** : Pierre Tourev, *La toupie* (site web), Consulté le : 7 Janvier 2020. <http://www.toupie.org/Dictionnaire/Pollution.htm>
- **Webmaster4** : <http://www2.prevoir.org/content/origine-et-sources-de-pollution> consulté le : 16 Aout 2020

- **Webmaster5 :**
<https://sites.google.com/site/pollusiondelenvironnement/les-types-de-pollution>
 Consulté le 18 Juillet 2020
- **Webmaster6 :** <https://www.lenntech.fr/faq-pollution-eau.htm#ixzz6Uvpqq6br> Consulté le : 12 Aout 2020
- **Webmaster7 :** <https://www.alcor-contrôles.fr/les-differentes-formes-de-pollutions-nuisibles-pour-lenvironnement/>
 Consulté le 18 Juillet 2020
- **Webmaster8 :**
https://fr.wikipedia.org/wiki/Texture_du_sol#/media/Fichier:Triangle-texture-sols.png
 Consulté le : 13 Juillet 2020
- **Webmaster9 :** https://www.supagro.fr/ress-pepites/sol/co/2_2_StructureSol.html#
- **Webmaster10 :** <https://www.cancer-environnement.fr/90-Polychlorobiphenyles-PCB.ce.aspx> . Consulté le : 12 Aout 2020
- **Webmaster11 :** <https://www.cadmium.org/environment/cadmium-emissions>
 Consulté le : 21 Mai 2020.
- **Webmaster12 :** WHO : <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health> , version du 31 Mars 2017. Consulté le : 17 Juin 2020
- **Webmaster13 :** <https://blog.globalhealing.com/natural-health/metal-toxicity-health-dangers-nickel/#references>
 Consulté le : 16 Juin 2020
- **Webmaster14 :** <https://www.lenntech.com/periodic/elements/ni.htm>
 Consulté le : 21 Mai 2020
- **Webmaster15 :** <https://www.ccme.ca/fr/resources/waste/biosolids.html>
 Consulté le : 19 Juillet 2020
- **Webmaster17 :** <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:11047:ed-1:v1:fr>
 Consulté le : 12 Juillet 2020

- **Webmaster18** : <https://www.osha.gov/SLTC/cadmium/> Consulté le : 21 Mai 2020.
- **Webmaster19** : <https://www.lenntech.fr/data-perio/cu.htm> Consulté le : 02 Septembre 2020

Résumé

L'objectif de ce travail, en premier lieu, est de se familiariser avec le concept de la pollution, d'identifier son origine (naturelle ou anthropique), de classer les types de pollutions et de polluants qui ocurrent dans la nature, et parler des diverses sources d'émission des substances potentiellement polluantes et leurs impacts sur les sols et spécifiquement les sols agricoles attenants aux zones urbaines. Il s'agit d'évaluer l'impact de la pollution sur les terres agricoles péri-urbaines et ses conséquences sur l'environnement et la santé humaine, en particulier la pollution qui résulte de la contamination des sols en métaux lourds. Afin de reconnaître les dangers que représente certaines substances sur les écosystèmes.

Une partie a été consacrée aux normes et réglementations adoptés dans quelque pays du monde en guise de prévention contre la contamination des sols en contrôlant les taux d'émissions de substances toxiques dans l'environnement. Mais aussi les politiques mises en place pour remédier au problème de la pollution des sols et leurs méthodes de gestion des sites pollués.

Mots clés : Pollution, Terres agricoles péri-urbaines, Santé humaine, Métaux lourds, Normes.

Abstract

The aim of this study, in the first place, is to familiarize with the concept of pollution, to identify its origin (natural or anthropogenic), to classify the types of pollution and pollutants that occur in nature, as well as the various sources of emissions of potentially polluting substances and their impacts on soils and specifically agricultural soils adjacent to urban areas. The goal is to assess the impact of pollution on peri-urban agricultural land and its consequences on the environment and human health, in particular pollution resulting from soil contamination of heavy metals. In order to recognize the dangers of certain substances to ecosystems.

A part is devoted to the standards and regulations adopted in some countries of the world to prevent soil contamination by controlling the rates of emissions of toxic substances into the environment. But also the policies put in place to address the problem of soil pollution and their methods of managing polluted sites.

Key words : Pollution, peri-urban agricultural land, Human health, Heavy metals, Standards.

الملخص

الهدف من هذا العمل، في المقام الأول، هو التعريف بمفهوم التلوث، وتحديد مصدره (طبيعي أو بشري المنشأ)، وتصنيف أنواع التلوث والملوثات التي تحدث في الطبيعة، وكذلك مختلف مصادر انبعاثات المواد التي يحتمل أن تكون ملوثة، وآثارها على التربة وعلى وجه التحديد التربة الزراعية المتاخمة للمناطق الحضرية. والهدف من ذلك هو تقييم أثر التلوث على الأراضي الزراعية في المناطق المحيطة بالحضر وما يترتب عليه من آثار على البيئة وصحة الإنسان، ولا سيما التلوث الناجم عن تلوث التربة بالمعادن الثقيلة. إدراك مخاطر بعض المواد على الأنظمة البيئية.

ويخصص جزء للمعايير والأنظمة المعتمدة في بعض بلدان العالم لمنع تلوث التربة عن طريق التحكم في معدلات انبعاثات المواد السامة في البيئة. ولكن أيضاً السياسات التي تم وضعها لمعالجة مشكلة تلوث التربة وأساليب إدارتها للمواقع الملوثة.

الكلمات المفتاحية: المعايير, المعادن الثقيلة, صحة الإنسان, التربة الزراعية المتاخمة للمناطق الحضرية, التلوث