

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ibn Khaldoun –Tiaret-

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département de des Sciences de la Nature et de la Vie



Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master académique

Domaine : "Sciences de la Nature et de la Vie "

Filière : " Sciences biologique "

Spécialité : " Pathologie des écosystèmes "

Thème :

Dépollution des sols contaminés par les métaux lourds (Zinc et Cuivre)
à l'aide des invertébrés (vers de terres).

Présentés et soutenus publiquement par :

- ✓ JMAFOU Radhia
- ✓ SLIMANI Hakima

JURY :

***Président** : M^{me} CHAFAA .M

***Promotrice** : Dr ZERROUKI. D

***Examineur** : M^{me} OMAR. Y

Année universitaire : 2014 -2015

Remerciements



Nous remercions **ALLAH** tout puissant qui nous donne la force et le courage et la volonté afin d'atteindre notre but.

Au terme de ce travail, nous tiens à exprimer ici, toute ma gratitude et notre sympathie à notre promotrice **Mme. ZERROUKI dahbia**, pour les précieux conseils et pour nous avoir guidés tout au long de ce travail.

Nous adressons mes plus vifs remerciements et nos profondes gratitude à **Mr. BEN HMED Ahmed**, qui nous encourage et me guide.

Que **Mme. CHAFA Meriem**, soit vivement remercions pour avoir accepté de présider le jury de ce travail et d'apporter ses précieux conseils et ses remarques constructives.

Que **Mme .OMAR Yamina** , soit chaleureusement remercions d'avoir bien voulu examiner ce travail, trouver ici mes sincères et mes vifs remerciements.

Nous adressons mes hommages et mes remerciements les plus vifs à Monsieur **Mr DAHMANI Walid**, qui nous aide dans notre travail, et nous avons fait bénéficier de ses conseils permanents, pour cela, nous serons toujours redevable.

A **M^{elle} BOUKIRAT Dyhia** nous ne sais comment exprimer la grande chance d'avoir pu bénéficier de sa grande expérience sur terrain et sa responsabilité durant tous les travaux qu'on a faits.

Mes profonds respect et mes chaleureux remerciements sont dirigés vers les personnels du l'INSID de Ksar El Chelala.

Nous tiens à remercions les personnels de la bibliothèque, du laboratoire, et de l'administration, soit vivement remercié.



Dédicace

*A l'aide de Dieu tout puissant, qui m'a tracé le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce travail
que je dédie :*

*A la lumière de mes yeux, l'ombre de mes pas et le bonheur de ma vie ma mère qui ma
apporté son appui durant toutes mes années d'études, pour son sacrifice et soutien qui m'ont
donné confiance, courage et sécurité.*

*A mon cher père qui ma appris le sens de persévérance tout au long de mes études, pour son
sacrifice ses conseils et ses encouragements.*

A ma très chère sœur Lamia.

A mon frère : Djamel.

A toute la famille Slimani.

A mes amis : Noura, Hafsa, Amina, Nassima, Hassnia.

A tous ceux qui aiment les sciences.

Hakima

Dédicace

Je dédie ce travail à:

Mes très chers parents, sans votre

Affection, vos conseils, vos sacrifices, vos encouragements, vos prières et vos efforts que vous avez déployés durant toute ma vie, ce travail n'aurait jamais pu être réalisé. Je vous présente ma pleine gratitude et mon profond respect, j'espère que Allah vous donne la longue vie et la bonne santé, je vous aime énormément.

Ma chère sœur Zineb, et mon frère Hamid j'espère que Allah vous garde et vous montre le droit chemin.

Mes chères amies

Des personnes qui comptent dans ma vie, merci pour tous que vous m'avez offert.

Radhia

Table des matières

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction

PARTIE I: Synthèses bibliographique

Chapitre I : Sol et métaux lourds

I.1. Définition des métaux lourds	3
I.2. Principales propriétés physico-chimiques	4
I.2.1. Solubilité	4
I.2.2. Stabilité	4
I.2.3. Volatilité	4
I.3. Toxicité des éléments traces métalliques.....	4
I.4. Contamination des sols par les métaux lourds.....	5
I.4.1. Définition du sol.....	5
I.4.3. Origine des éléments trace métalliques dans le sol.....	5
I.4.4. Évolution des métaux lourds dans le sol.....	8
I.4.4.1. Équilibre entre la forme adsorbée et la solution du sol	9
I.4.4.2. Immobilisation et rétrogradation	9
I.4.4.3. Transport et la rétention des métaux lourds dans le sol.....	9
I.4.4.4. Transformation des métaux.....	10
I.4.4.5. Comportement des métaux lourds dans le sol.....	11
I.4.4.6. Interaction entre les métaux lourds.....	11

I.5. Cas des métaux étudiés : le zinc et le Cuivre	12
I.5.1. Zinc (Zn)	12
I.5.1.1. Généralité	12
I.5.1.2. Pollution des sols par le Zinc	12
I.5.1.3. Utilisations	12
I.5.1.4. Effets biologiques du zinc	13
I.5.2 Le Cuivre (Cu)	13
I.5.2.1 Généralité	13
I.5.2.2. Le domaine du cuivre	13

Chapitre II : Dépollution des sols par la bioremédiation

II.1. Introduction:	17
II.2. La bio remédiation : mise en œuvre	18
II.3. Principe de la bio remédiation :	19
II.3.1. La bio augmentation :	19
II.3.2. La bio filtration :	19
II.3.3. La bio stimulation :	20
II.3.4. Le compostage:	20
II.3.5. La biolixiviation :	20
II.4. Avantages et limitations:	21
II.4.1. Avantages de la bio remédiation:	21
II.4.2. Limites techniques	21

Chapitre III : Généralité sur les Vers de terre

III.1. Généralité sur le Ver de terre	22
III.3. Morphologie des vers des terres	22
III.3.1. La forme	22

III.3.2. La taille :	23
III.4. Taxonomie et catégories écologiques	23
III.5. Ver de terre et métaux lourds	25

PARTIE II: Etude Expérimentale

Chapitre I :Localisation de la zone d'étude

I. Localisation de la zone d'étude.....	26
I.1. Situation géographique	26
I.2. Caractéristiques climatologiques	26
I.3. Le réseau routier.....	27
I.3.1. Le réseau routier externe.....	27
I.3.2. Les routes nationales	27
I.3.3. Les chemins de la wilaya :	27
I.3.4. Le parc automobile de la commune de Tiaret	28

Chapitre II : Origine du matériel expérimental

II. Origine du matériel expérimenté	29
II.1. Choix du site	29
II.2. Choix des métaux : le Zinc et le Cuivre	29
II.3. Choix de ver de terre	29
II.4. Protocole expérimental.....	31
II.1. Prélèvement des échantillons.....	32
II.2. Traitement des échantillons du sol.....	32
II.2.1. L'analyse physicochimique des échantillons de sol	33
II.2.2. Préparation des solutions et extraction des éléments métalliques	33

Chapitre III: Résultats& discussions

III.1. Etude de la variabilité des concentrations en métaux lourds dans le sol	35
III.2. Teneurs des métaux lourds dans les vers de terres (Zn et Cu)	36

III.3. Effet des facteurs physico-chimiques du sol sur l'accumulation des ETM par les vers de terres	37
III.3.1. Effet du pH du sol.....	37
III.3.2. Effet de la CEC du sol.....	40
III.3.3. Effet de l'Humidité du sol.....	42
III.3.4. Effet de la matière organique du sol	43
III.4.Corrélation:ETM vere de terre–ETM sol.....	46

Conclusion générale

Références bibliographiques

Annexe

Résumé

Liste d'Abbreviations

Notions et Abbreviations :

CEC :Capacité d'échange cationique

Cu : Cuivre

CW : chemins de la wilaya

EMT : Eléments traces métalliques

H%:L'Humidité

mg Cu kg⁻¹: milligramme de cuivre par Kilo gramme

MES : matières en suspension

ppm : Partie par million

RN : Route nationale

Zn : Zinc

Liste des figures

Liste des figures:

Figure N° 01 : Origine des métaux lourds dans le sol	06
Figure N° 02 : Principales voies de dispersion des polluants émis en milieu routier.....	07
Figure N°03 : Morphologie des vers des terres.....	23
Figure N° 4 : Carte des réseaux routiers de la zone d'étude.....	27
Figure N° 05 : Répartition du parc automobile de la commune de Tiaret selon le type de carburant.-(Service Carte Grise, Wilaya de Tiaret, Communication personnelle, 2012).....	28
Figure N° 06 : Représentation du processus d'analyse des ETM sur les sols et vers de terre.....	31
Figure N° 07 : Localisation des points de prélèvement dans la zone d'étude.....	32
Figure N°08 : Corrélation entre le pH de la rhizosphère et l'accumulation du Zinc par les vers de terres.....	38
Figure N° 09 : Corrélation entre le pH de la rhizosphère et l'accumulation du Cuivre par les vers de terres.....	39
Figure N° 10 Corrélation entre la CEC et l'accumulation du Zinc par les vers de terres.....	40
Figure N° 11 Corrélation entre la CEC et l'accumulation du Cuivre par les vers de terres.....	41
Figure N° 12 Corrélation entre l'Humidité et l'accumulation du zinc par les vers de terres.....	42
Figure N° 13 Corrélation entre l'Humidité et l'accumulation du Cuivre par les vers de terres.....	43
Figure N°14 : Corrélation entre la matière organique et l'accumulation du Zinc par les vers de terre.....	44
Figure N°15 : Corrélation entre la matière organique et l'accumulation du Zinc par les vers de terre.....	45
Figure N°16 : Corrélation entre le Zinc du sol et le Zinc des vers de terre.....	46
Figure N°17 : Corrélation entre le Zinc du sol et le Zinc des vers de terre.....	47

Liste des tableaux

Liste des tableaux :

Tableau N° 01: Sources naturelles et anthropiques de quelques métaux lourds (*1000t/an).....	05
Tableau.N° 02: Un gramme de tissu humide contient de Cu en gamma (un millionième de gramme).....	16
Tableau N° 03: Principales caractéristiques des trois catégories écologiques de vers de terre.....	24
Tableau N° 04 : Données climatiques relatives à la région de Tiaret (Source : Station météorologique d'AIN BOUCHEKIF, Wilaya de Tiaret, 2009)	26
Tableau N°05 : Statistiques descriptives sur les concentrations des ETM (en ppm) dans le sol.....	35
Tableau N°06 : Normes internationales pour la contamination des sols en éléments traces métalliques.....	36
Tableau N° 07 : Statistiques descriptives sur les concentrations du Zinc (en ppm) dans les vers de terres.....	36
Tableau.N°08: Analyse de la variance à un seul facteur: cas de potentiel hydrique.....	37
Tableau.N° 09: Analyse de la variance à un seul facteur: cas de potentiel hydrique.....	38
Tableau N°10 : Analyse de la variance à un seul facteur : cas de la capacité d'échange cationique.....	40
Tableau N°11 : Analyse de la variance à un seul facteur : cas de la capacité d'échange cationique.....	41
Tableau.N° 12 : Analyse de la variance à un seul facteur : cas de l'humidité... ..	42
Tableau.N° 13 : Analyse de la variance à un seul facteur : cas de l'humidité.....	43
Tableau N°14 : Analyse de la variance à un seul facteur : cas de matière organique.....	44
Tableau N°15 : Analyse de la variance à un seul facteur : cas de matière organique.....	45

Introduction générale

Introduction

Le problème environnemental majeur par les émissions industrielles, le trafic routier et les déchets urbains dus aux activités humains réside dans la contamination du sol, de l'eau et de l'air par une diversité des composants organiques et inorganiques (Adriano., 2001. Alimenta et al., 2004). Parmi les principaux polluants inorganiques du sol ceux qui ont le plus retenu l'attention c'est les métaux rejetés en plus ou moins grandes quantités par les activités humaines.

Les métaux lourds n'étant pas dégradables dans le sol ils peuvent persister a long temps et constituent un danger potentiel par bioaccumulation au long de la chaîne trophique.

Les études menées par Zerrouki., 2013 on montrés que les sols à proximité des RN14 et RN23 sont pollués par les métaux lourds.

Récemment, de plus en plus d'études sont menées sur la réhabilitation des sols contaminés par des métaux lourds. La capacité de certains invertébrés des sols à tolérer ou même à accumuler des métaux a ouvert de nouveaux domaines de la recherche sur le traitement des sols portant sur la bioremediation.

La bioremédiation doit faire face à un environnement hétérogène dans lequel la plupart du temps, le(s) contaminant(s) est (sont) présent(s) en association avec des particules du sol, dissous dans la solution du sol, etc. (Geoffrey et Perchet., 2008).

C'est dans ce contexte que se situé le présent travail dont l'objectif majeur est d'étudier la capacité de vers de terre vis à vis l'accumulation des métaux lourds (Zinc et Cuivre) présente dans un sol à proximité des routes (le cas des routes nationales N°14 et N°23 de la wilaya de Tiaret).

Dans un notre plan de travail en première étape nous précéderons a une hypothèses bibliographie et en suite une partie expérimental: dans le premier chapitre nous représentons le matériel et les méthodes suivi pour atteindre notre objectif nous choisirons deux routes nationales à densités de trafic routier élevé (RN N°14 qui relie Tiaret avec la capitale et RN N°23 avec le sud), et dans le deuxième chapitre l'échantillonnage et la méthodologie employée pour les prélèvements du sol, les échantillons seront traités au niveaux de laboratoire de recherche Agro-biotechnologie de l'Université Ibn Khaldoun Tiaret .

Dans le troisième chapitre sera consacré à la présentation et la discussion des résultats, nous traitons principalement des études de la variabilité des concentrations en métaux lourds dans le sol. Aussi on a étudié. Les effets des facteurs physico-chimiques (pH, CEC, H%).

Introduction

En fin nous développons une conclusion qui synthétisera les principaux résultats et leurs conséquences sur les efforts à poursuivre sur le plan de l'amélioration, la technique et le mode de traitement de sols à appliquer dans ce domaine.

PARTIE I:

Synthèses bibliographique

Chapitre I :

Sol et métaux lourds

I.1. Définition des métaux lourds

D'un point de vue purement chimique, les éléments de la classification périodique formant des cations en solution sont des métaux.

D'un point de vue physique, le terme «métaux lourds» désigne les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes (environ 65 éléments), caractérisés par une forte masse volumique supérieure à 5 g.cm^3 (Adriano., 2001, In Huynh., 2009).

D'un point de vue purement scientifique et technique, les métaux lourds peuvent être également définis comme :

- Tout métal ayant une densité supérieure à 5,
- Tout métal ayant un numéro atomique élevé, en général supérieur à celui du Sodium ($Z=11$),
- Tout métal pouvant être toxique pour les systèmes biologiques (DiBenedetto., 1997).

D'un autre point de vue biologique, on en distingue deux types en fonction de leurs effets physiologiques et toxiques : métaux essentiels et métaux toxiques.

a) Les métaux essentiels sont des éléments indispensables à l'état de trace pour de nombreux processus cellulaires et qui se trouvent en proportion très faible dans les tissus biologiques (Loué., 1993).

Certains peuvent devenir toxiques lorsque la concentration dépasse un certain seuil. C'est le cas du cuivre (Cu), du nickel (Ni), du zinc (Zn), du fer (Fe).

Par exemple, le zinc (Zn), à la concentration du milli-molaire, est un oligo-élément qui intervient dans de nombreuses réactions enzymatiques (déshydrogénases, protéinase, peptidase) et joue un rôle important dans le métabolisme des protéines, des glucides et des lipides (Kabata et Pendias., 2001).

b) Les métaux toxiques ont un caractère polluant avec des effets toxiques pour les organismes vivants même à faible concentration. Ils n'ont aucun effet bénéfique connu pour la cellule. C'est le cas du plomb (Pb), du mercure (Hg), du cadmium (Cd) (Huynh., 2009).

I.2. Principales propriétés physico-chimiques

I.2.1. Solubilité

La Solubilité dans l'eau indique la tendance à la mobilisation du métal par lessivage ou par ruissellement. La solubilité dépend de l'élément, des conditions chimiques de la phase aqueuse (pH,...) et des phases solides environnantes.

La solubilité d'un élément peut varier selon sa spéciation, c'est à dire sa séparation entre différents états de valence, qui représente un paramètre essentiel notamment pour l'arsenic et le chrome (Huynh ; 2009).

I.2.2. Stabilité

Contrairement aux contaminants organiques, les éléments métalliques sont indéfiniment stables en tant que tels et ne se dégradent pas dans l'environnement (Huynh . ,2009).

I.2.3. Volatilité

La volatilité influe sur la libération par évaporation naturelle des polluants infiltrés dans les sols. D'une façon générale, les métaux sont considérés comme non volatils à l'exception du mercure. (Lemièrè., 2001 In Kentour et Belkacem., 2012).

I.3. Toxicité des éléments traces métalliques

Les métaux considérés dans notre étude ont des effets très différents sur le milieu vivant. Quelques-uns sont nécessaires pour les organismes ; ils sont dits « essentiels », bien qu'à des fortes concentrations, ils peuvent être nocifs pour les organismes.

Parmi ces éléments qui sont essentiels (micronutriments), et dont l'absence entrave le fonctionnement ou empêche le développement d'un organisme, on trouve Fe, Mn, Zn et Cu pour les plantes et les animaux. Ces éléments constituent des enzymes et protéines qui sont très importantes dans les processus métaboliques des organismes, ils peuvent devenir toxiques en fortes concentrations. (Alloway et Ayres., 1997) ; l'augmentation de la concentration devient alors une menace directe pour l'environnement du fait de l'augmentation de leur disponibilité pour les plantes.

En outre, depuis quelques années, les pluies acides augmentent la mobilité des métaux dans le sol et causent donc une augmentation de leur concentration dans les produits agricoles.(Benedetto., 1997). En raison de la faible exposition humaine par ingestion directe, le nombre des éléments traces pouvant potentiellement contaminer l'homme est limité. Les métaux les plus toxiques pour l'homme sont le cadmium, le plomb et le mercure.

I.4. Contamination des sols par les métaux lourds

I.4.1. Définition du sol

Le mot sol désigne des choses assez différentes selon le point de vue sous lequel on se place. Pour le spécialiste en pédologie, le sol est une entité parfaitement définie et complètement caractérisée aux plans morphologique, hydrique, minéralogique et biologique. Le géologue, lui, définira le sol comme étant tout ce qui recouvre la roche-mère, objet principal de ses investigations. Enfin, il existe aussi une approche fonctionnelle qui décrit le

sol à partir des interactions entre ses différents constituants, qu'ils soient inertes (eau, air, minéraux...) ou qu'il s'agisse d'êtres vivants, végétaux ou animaux (Sirven., 2006).

I.4.2. Définition de la pollution des sols

La pollution des sols résulte de l'accumulation anormale d'éléments toxiques ou d'agents pathogènes liés à l'activité humaine, se fait sous forme de rejets directs à partir des sites producteurs, ou bien par retombées aériennes après la dispersion des éléments toxiques dans l'atmosphère (Zerrouki., 2013).

I.4.3. Origine des éléments trace métalliques dans le sol

Les EMT sont naturellement présents dans les sols en faible quantité. Ils sont en partie libérés lors de l'altération de la roche mère et constituent le fond pédogéochimique : concentration naturelle d'une substance dans un horizon de sol, résultant de l'évolution géologique et pédologique, à l'exclusion de tout apport d'origine anthropique (Figure 01) (Baize., 1997).

Une seconde partie, plus ou moins important selon la situation géographique, issue d'apports exogènes provient essentiellement de l'activité humaine (Tableau N° 01).

➤ De façon diffuse, émis par l'activité industrielle, les moyens de transport et amené par voie atmosphérique.

➤ Localement soit de façon ponctuelle par l'apport de déchet contaminés, soit de façon répétée et cumulative par l'activité agricole. Ces sources apportent une contribution variable en fonction du pays considérés. En France l'apport principal en Eléments Trace Métalliques se fait par la voie agricole pour le cuivre et le zinc et par les retombées atmosphériques pour le cadmium et le plomb.

Tableau N° 01 : Sources naturelles et anthropiques de quelques métaux lourds (*1000t/an). Selon Pichard., (2003) In Sarmoum (2005).

Métaux lourds	Sources anthropiques	Sources naturelles	Total
Cadmium	7.6	1.3	8.9
Plomb	332	12	344
Zinc	132	45	177

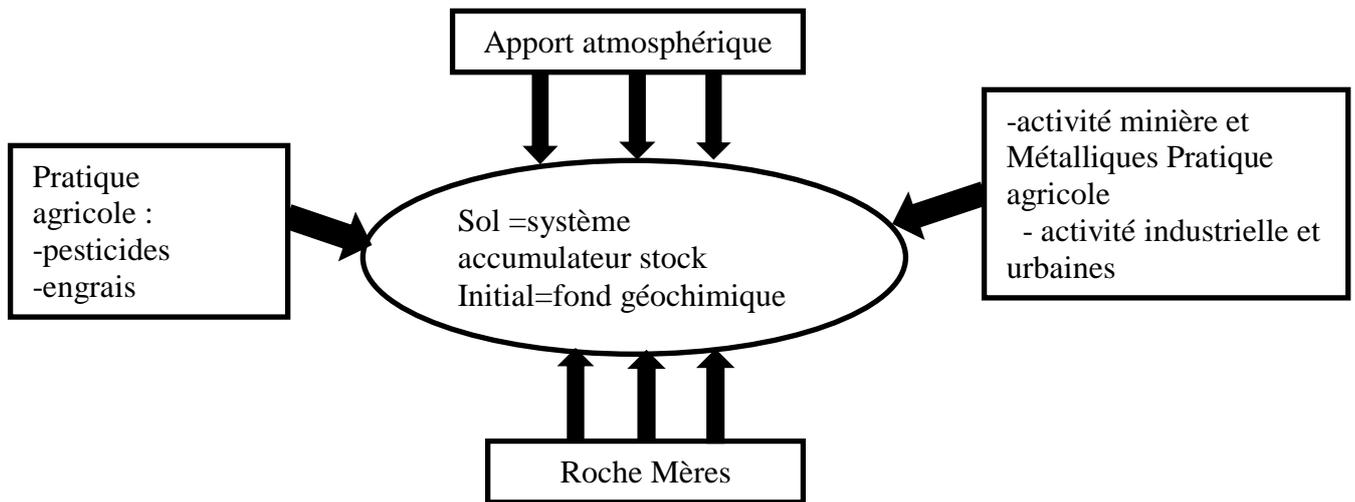


Figure 01 : Origine des métaux lourds dans le sol (d'après Robert et Juste., 1999).

➤ Les sources principales de la pollution des sols et des végétaux à proximité des infrastructures routières sont les apports d'origine atmosphérique (dépôts secs et poussières précipitées par les pluies) et le ruissellement provenant des chaussées (Figure 02).

Le problème principal avec les métaux lourds comme le plomb, le cadmium, le cuivre et le mercure est qu'ils ne peuvent pas être biodégradés, et donc persistent pendant de longues périodes dans des sols.

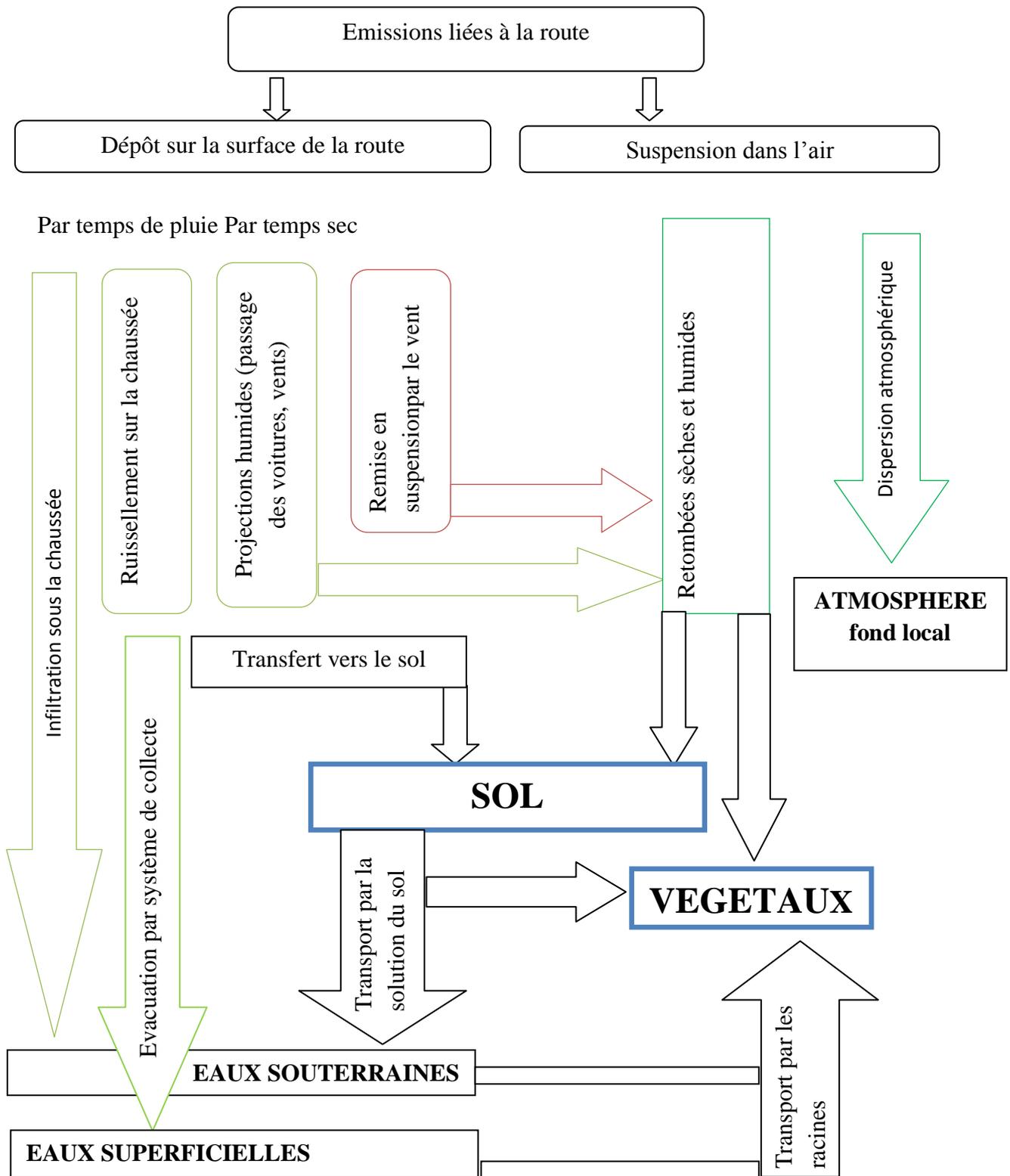


Figure 02 : Principales voies de dispersion des polluants émis en milieu routier (Pagotto., 1999).

I.4.4.Évolution des métaux lourds dans le sol

Selon, Duchaufour (1997), dont le plus part, les métaux lourds sont retenus par le complexe d'échange (surtout sa fraction organique) mais avec certaines différences importantes, qui expliquent leur faible mobilité.

I.4.4.1. Équilibre entre la forme adsorbée et la solution du sol

La désorption ne libère dans la solution de sol que de très faibles concentration (souvent à peine dosables), ce qui limite l'absorption par la plante.

I.4.4.2. Immobilisation et rétrogradation

Elles ont lieu sous les deux formes organique et minérale ; immobilisation au sein de composés humiques polymérisés stables ; rétrogradation, par incorporation dans certains réseaux silicatés et dans des oxydes insolubles, Fe_2O_3 , MnO_2 $Al_2 O_3$.

Cette rétrogradation est plus rapide et plus complète que pour les nutriments, cela d'autant plus que le pH est plus élevé. (Duchaufour., 1997).

I.4.4.3. Transport et la rétention des métaux lourds dans le sol

Les métaux lourds ont une affinité plus ou moins grande vis-à-vis des matières en suspension (MES). De manière générale, ils sont plus facilement retenus par les particules de petite taille (Colandini., 1997). La granulométrie des particules en suspension, mais aussi celle du sol donc une réelle importance. De plus, elles participent au colmatage du sol et donc à la diminution de la porosité, qui a une influence directe notamment sur la cinétique d'infiltration et sur la filtration mécanique.

Leur transport à travers le sol se fera donc par lessivage ou lixiviation selon qu'ils se trouvent sous forme particulaire ou dissoute. Les proportions de métal adsorbé aux matières en suspension varient fortement d'une observation à l'autre. Ainsi, la quantité de cadmium associée aux particules en suspension varie entre 10% à 100%, cette variation est de 30% à 100% pour le zinc. Seul le plomb présente un comportement relativement homogène d'une étude à l'autre et son taux de fixation aux particules en suspension semble être compris entre 80 et 100%.

D'après Chebbo (1992), la fraction dissoute des métaux tels que Zn, Pb, Cd, Cu, dans les eaux de ruissellement pluvial, ne représenterait pas plus de 50% de la quantité totale. La présence de particules en suspension ne suffit pas à prévoir la fraction dissoute des métaux lourds. En fait et étant donné le caractère arbitraire de la différenciation entre la fraction dissoute et particulaire (en deçà de $0,45\mu m$ les composés sont considérés comme dissous), la répartition granulométrique des particules sur les quelles peuvent être fixés les métaux et la

comparaison à la porosité du sol récepteur nous informera sur la capacité de filtration mécanique du sol plus que ne le ferait la répartition entre les fractions dissoute et particulaire. Ce qui ne sera pas retenu mécaniquement pourra éventuellement circuler sous forme particulaire, colloïdale ou dissoute, ou être retenu par des processus physico-chimiques.

Cependant, la rétention des métaux qu'elle soit mécanique (par filtration des particules) ou physico-chimiques ne peut pas être considérée comme définitive.

En effet, même s'ils sont liés aux particules de la matrice solide, les métaux peuvent être remobilisés et à nouveau transportés lors de variation des conditions physico-chimiques de milieu environnementale. La rétention des métaux lourds par les particules doit être corrélée aux conditions physico-chimiques du milieu (pH), qui déterminent la forme chimique des éléments mais aussi à la composition (minérale ou organique) et à la granulométrie des particules mises en jeu.

Les métaux lourds peuvent être liés aux particules par différents mécanismes.

La plupart des schémas d'extraction distinguent cinq fractions :

➤ La fraction échangeable regroupe les métaux adsorbés physiquement (adsorption non spécifique) facilement remobilisables par échange d'ions.

➤ La fraction acido-soluble liée aux carbonates.

➤ La fraction réductible liée à des oxydes métalliques (Fe, Mn, Al).

➤ La fraction oxydable (ou organique) regroupe les métaux liés à la matière organique.

Lorsque cette matière organique (en milieu oxydant) est dégradée, les métaux sont alors relargués.

➤ La fraction résiduelle représente les métaux faisant partie intégrante de la matrice solide, ils sont difficilement remobilisables.

D'après Colandini (1997), la proportion de métaux lourds remobilisables lors d'une variation des conditions physico-chimiques se situe entre 80 et 90 %.

Le risque de relargage du cadmium est plus élevé que celui du zinc. Le plomb et le cuivre présentent un risque de relargage équivalent, un peu plus faible que celui des deux autres métaux. Finalement, la contamination des eaux souterraines par les métaux lourds n'incombe pas uniquement à la fraction dissoute des métaux contenus dans les eaux de ruissellement pluvial mais aussi, et principalement, au relargage éventuel lors d'un changement des conditions environnementales du milieu.

Plutôt que de s'intéresser à la rétention des éléments traces dans le sol, il serait plus judicieux, d'un point de vue écologique de s'intéresser à leur relargage éventuel.

La plupart des autres s'accordent à dire que des facteurs tels que le pH, la CEC, la teneur et la qualité de l'humus et la teneur en argile sont des paramètres qui affectent la mobilité des métaux lourds. C'est en cela que leurs variations peuvent représenter un sérieux problème de contamination notamment de la flore (Bielek., 1998).

I.4.4.4. Transformation des métaux

La transformation par voie biologique des métaux se fait par deux processus. Le premier et le plus important est l'oxydation ou la réduction microbienne, le deuxième est la conversion d'un composé métallique organique en un composé inorganique, et inversement. L'oxydation bactérienne peut avoir lieu directement par les enzymes ou par l'intermédiaire de l'action qu'ont les micro-organismes sur le pH. A titre d'exemple, on peut citer la transformation du mercure sous l'action des micro-organismes en méthylmercure ou diméthylemercure. Les composés alors obtenus sont volatils, plus disponibles et d'une toxicité beaucoup plus élevée. Le deuxième type de transformation est la biodégradation des composés organométalliques (Yaron et Al., 1996).

I.4.4.5. Comportement des métaux lourds dans le sol

En fait, il existe des différences notables de comportement entre les métaux lourds, on peut les classer par mobilité croissante : plomb < cuivre < zinc < cadmium ; le « pH-seuil », au-dessous duquel cette mobilité augmente brusquement, varie dans le même sens : Pb, pH 4 – Cu, 5 – Zn, 5.5 – Cd, 6 (Hornburg et Brummer., 1989 cité In Duchaufour., 1997), Quant au manganèse sa mobilité varie, suivant le pH.

I.4.4.6. Interaction entre les métaux lourds

Le plomb et le cadmium interagissent entre eux. Ainsi, en présence de plomb, le cadmium est à saturation du sol, 80 fois moins adsorbé qu'en absence de plomb (Richter., 1987). De même, le cuivre et le zinc sont en compétition pour les sites d'adsorption. Le cuivre est généralement plus fortement adsorbé par la matière organique que le zinc (Mesquita et Al., 1998). La plupart des études faites sur la capacité d'un sol à retenir les métaux lourds s'attachaient le plus souvent à un métal.

Cette approche monométallique ne prend pas en compte la compétition qui existe entre les différents métaux, notamment vis-à-vis des sites d'adsorption, ce qui a pour conséquence de surestimer le pouvoir de rétention du sol (Plassard., 1999).

De plus, la toxicité de certains métaux peut être exaltée par la présence des autres. Par exemple, il a été montré que le cadmium était 5 fois plus toxique lorsqu'il est en présence de cuivre (Chevalier., 1995).

I.5. Cas des métaux étudiés : le zinc et le Cuivre

I.5.1. Zinc (Zn)

I.5.1.1. Généralité

Le zinc est indisponible au métabolisme des êtres vivants (oligo-éléments) ; en particulier comme coenzyme. Le zinc, dernier élément de la première série de transition de la classification périodique des éléments, de masse atomique 65,37 g/mol, appartient au groupe II-B. Sa structure électronique est $[Ar] 3d^{10}4s^2$. En raison du remplissage complet de la couche 3d, le Zinc est exclusivement présent sous l'état d'oxydation (+II) dans le milieu naturel. Cet élément possède 5 isotopes stables ^{64}Zn , ^{66}Zn , ^{67}Zn , ^{68}Zn et ^{70}Zn dont les abondances relatives sont respectivement 48.89%, 27.81%, 4.11%, 18.56% et 0.62%, et 6 isotopes radioactifs identifiés ^{62}Zn , ^{63}Zn , ^{65}Zn ($t_{1/2}=245$ ans), ^{69}Zn ($t_{1/2}=55$ min), ^{72}Zn et ^{73}Zn (Adriano., 2001 In Boukirat et Bouknine., 2014).

Le teneur en Zinc dans les sols varie entre 10 et 300 mg-Kg⁻¹ et sont en moyenne de 50 mg-Kg⁻¹ (Adriano., 1986, Pais et Benton., 2000)

I.5.1.2. Pollution des sols par le Zinc

Le zinc est présent dans l'écorce terrestre principalement sous forme de sulfure (blende), accessoirement sous d'autres formes telles que la smithsonite (ZnCO_3), l'hémimorphite, ou l'hydrozincite (Pichard., 2003 cité In Sarmoum., 2005).

➤ Les engrais chimiques du groupe superphosphates constituent une importante cause de contamination des sols par le zinc puis qu'ils titrent de 50 à 1430 ppm de zinc selon leur origine géologique et leur degré de purification (Barrow., op. cit. In Ramade).

➤ Temps de demi vie de Zinc dans les sédiments et le sol $t_{1/2}= 2100$ années (d'après Bowen In Levin et Kimball In Ramade).

I.5.1.3. Utilisations

Le zinc est principalement utilisé pour les revêtements de protection des métaux contre la corrosion (galvanoplastie, métallisation, traitement par immersion), dans la composition de divers alliages, dans les constructions immobilières et les équipements pour l'automobile (Kentour et Nouar., 2012).

Les apports anthropiques de zinc dans l'environnement résultent de trois groupes d'activités :

- Les sources minières et industrielles.
- Les épandages agricoles.
- Les activités urbaines et le trafic routier.

I.5.1.4. Effets biologiques du zinc

Le zinc est un métal essentiel, c'est-à-dire nécessaire en quantité généralement faible, à la vie d'un grand nombre d'organismes (Pichard., 2003, cité In Sarmoum et Al ., 2005).

➤ Effets sur les végétaux

Chez les végétaux, une augmentation de la concentration en zinc dans le sol provoque une augmentation dans les tissus des plantes. Les formes de zinc absorbées par les plantes sont surtout le zinc hydrate et Zn^{2+} , et aussi les formes complexées du zinc.

Le zinc se concentre préférentiellement dans les feuilles matures de la plantes. (Kentour et Nouar., 2012).

➤ Effets sur les animaux

Chez les mammifères en particulier, l'absorption et l'excrétion du zinc sont régulés afin de maintenir une teneur constante en zinc quel que soit le niveau d'exposition.

En conséquence le potentiel de bioaccumulations du zinc est faible chez les mammifères (Kentour et Nouar., 2012).

➤ Effets sur l'homme

Le zinc est l'un des oligo-éléments les plus abondants chez l'homme .Il intervient au niveau de la croissance, du développement osseux et cérébral et de la reproduction.

Le zinc absorbé est transporté de façon active au niveau du plasma, Il est en majorité complexé à des ligands organiques tels que l'albumine ou certaine acides aminés.

Le zinc, sous sa forme métallique, présente une faible toxicité par inhalation et par voie orale.

Par contre, certains composés du zinc sont responsables d'effets délétères chez l'homme. Des cas de mortalité ont été rapportés chez l'homme après inhalation de vapeurs de zinc. L'excès de zinc provoque des irritations de peau, des nausées et de l'anémie. Une exposition intensive au zinc peut provoquer des désordres respiratoires (Kentour et Nouar., 2012).

I.5.2 Le Cuivre (Cu)

I.5.2.1 Généralité

Le cuivre est un élément chimique de symbole Cu et de numéro atomique 29. Métal de couleur rougeâtre, il possède une haute conductivité thermique et électrique à température ambiante, le seul métal pur ayant une meilleure conductivité électrique est l'argent (Hurlbut et Klein., 1982 ; Mahan., 1987 In Matias., 2008).

Le cuivre est un des rares métaux qui existe à l'état natif ; on le trouve le plus fréquemment sous forme de sulfure ou de sulfosel. Dans le cycle sédimentaire, Cu est associé aux minéraux argileux, et spécialement associé au carbone et manganèse.

En conditions acides, Cu est plus soluble que dans les milieux tamponnés (Matías., 2008)

Le cuivre est un élément ubiquiste sur Terre, présent dans le fond pédogéochimique (Adriano., 2001). Il est présent dans l'environnement, sa concentration dans l'écorce terrestre est estimée à environ 70 ppm (30 à 100 ppm).

Le cuivre pourrait bien être le premier métal à avoir été utilisé, étant donné que des pièces datant de 8700 avant Jésus-Christ. Ont été trouvées. En 2004, la production mondiale de cuivre est de 16.015 millions de tonnes. Les sels de cuivre, comme le sulfate ou l'oxychlorure, présentent des propriétés fongicides mises à profit pour la viticulture et l'agriculture (Anonyme., 2007 In Matías., 2008).

Les activités anthropiques peuvent entraîner ponctuellement un enrichissement des sols en Cu jusqu'à des concentrations près de 150 fois supérieures au fond pédogéochimique.

Il est très largement employé dans la fabrication de matériels électriques (fils, enroulements de moteurs, dynamos, transformateurs), dans la plomberie, dans les équipements industriels, dans l'automobile et en chaudronnerie.

Le transport par le vent des poussières de sol, les éruptions volcaniques, les décompositions végétales, les feux de forêts et les aérosols marins constituent les principales sources naturelles d'exposition.

Dans les eaux, le Cuivre provient pour la majeure partie de l'érosion des sols par les cours d'eau : 68 % ; de la contamination par le Sulfate de Cuivre : 13 % ; et des rejets d'eaux usées qui contiennent encore du Cuivre, même après traitement.

Les activités industrielles sont généralement à l'origine des niveaux de contamination les plus élevés mais qui restent en principe localisée, dans des situations de pollution « concentrée »

Les activités agricoles sont également à l'origine de la contamination en Cu des sols, principalement de façon diffuse. L'apport d'amendements organiques (boues de station d'épuration, fumiers et lisiers de porc en particulier) peuvent engendrer un accroissement des concentrations en Cu dans les sols jusqu'à des valeurs de l'ordre de 600 mg kg⁻¹ (Baker et Senft., 1995 ; Adriano., 2001).

Cependant, la source de contamination diffuse des sols agricoles la plus répandue est liée à l'application des fongicides à base de Cu sur les cultures, principalement en viticulture et en arboriculture (Loué., 1993).

Le cuivre contamine les eaux environnantes à des doses et concentrations infimes de $10 \mu\text{g.l}^{-1}$, (Leckie et Davis., 1975 In Matías., 2008).

I.5.2.2. Le domaine du cuivre

Le cuivre, est un métal chalcophile extraordinairement coloré. La plus grande partie du cuivre est cependant incorporée à la terre sous forme de minerai, le plus important et le plus répandu est la chalcopyrite, sulfure de fer et de cuivre dans lequel la nature révèle un phénomène très significatif de la physiologie terrestre. On les trouve surtout dans les roches éruptives basiques, pauvres en quartz, situées en profondeur, dans la bordure montagneuse la plus volcanique est recelée la plus grande partie du cuivre de la Terre. (Mudronja., 2007)

Le cuivre transmet également très bien l'élément sonore. Sa très bonne sonorité permet de l'utiliser comme instrument à vent ou à percussion. Il absorbe avidement des gaz comme l'hydrogène, l'oxyde carbonique, le dioxyde sulfurique. Il se combine facilement avec les autres éléments, des acides faibles comme le vinaigre. (Mudronja., 2007)

I.5.2.3. Rôle du cuivre

➤ Chez les végétaux

Dans 1930, le cuivre est reconnu comme élément essentiel pour les végétaux sous forme de fines traces (Alloway., 1995). Il joue un rôle important dans divers processus métaboliques, en participant à la constitution de différentes protéines (Marschner., 1995) :

- la plastocyanine pour la photosynthèse.
- les super-oxydes dismutases pour la lutte contre le stress oxydant.
- les peroxydases pour la lignification.
- les oxydases pour l'oxydation de composés tels que les ascorbates, les diamines, les phénols.
- les cytochromes oxydases pour la respiration cellulaire.
- L'action de la vitamine B1 semble être liée à la présence de traces de cuivre ; la teneur en vitamine B1 des tissus végétaux et animaux est parallèle à la teneur en cuivre.
- Il est également contenu dans les aliments les plus importants selon un taux (exemple : 4 mg/ kg. de pain et 2 mg/kg de pommes de terre).

De plus, le cuivre joue également un rôle sur la viabilité des pollens (Loue., 1993).

La teneur moyenne de cuivre dans les végétaux est généralement inférieure à $20 \text{cg.g}^{-1} \text{MS}$ (Kabata-Pendias et Pendias., 1992). En deçà d'une concentration de 2 à $5 \text{cg.g}^{-1} \text{MS}$ dans les parties végétatives, les symptômes de carence en cuivre sont observés : croissance ralentie, déformation et blanchissement des jeunes feuilles, nécrose de l'apex. De nombreux processus

métaboliques sont alors affectées et des graves maladies végétales, atteignant les céréales et les légumineuses (Loue., 1993) : métabolisme des hydrates de carbone, de l'azote ou encore des parois cellulaires. Inversement, au-delà de 20 à 100 $\text{cg.g}^{-1}\text{MS}$, ce sont les symptômes de toxicité qui apparaissent, inhibant la croissance de racines avant celle des parties aériennes.

Cette toxicité peut se traduire par une déficience en fer et une chlorose en conséquence du dérèglement de la peroxydation des lipides et de la destruction des membranes. En sol, la toxicité du cuivre est rarement observée du fait des fortes liaisons du métal pour les différentes composantes du sol.

Les végétaux disposent d'un mécanisme de tolérance aux éléments traces métalliques. Pour le cuivre, les mécanismes principaux sont la compartimentation de complexes solubles ou non, dans le cytoplasme ou les vacuoles (Marschner., 1995).

La toxicité peut être induite à des concentrations très différentes, selon la plante et le sol étudié.

➤ **Chez l'homme et l'animal :**

Le Cuivre est un élément essentiel chez l'homme et l'animal à très faible dose (oligo-élément), impliqué dans de nombreuses voies métaboliques, notamment pour la formation d'hémoglobine et la maturation des polynucléaires neutrophiles et remplace même le fer pour le transport de l'oxygène chez l'espèce d'arthropode, le limule, dont le sang est bleu (Fergusson., 1990 In Matías., 2008 ; Alloway et Ayres., 1997). Il est absolument nécessaire à la formation sanguine. Certaines formes d'anémie ne peuvent être guéries que par le cuivre, et le taux de cuivre du sérum est de 106 $\mu\text{g}\%$ chez l'homme et de 107 $\mu\text{g}\%$ chez la femme (Mudronja., 2007). De plus, il est un co-facteur spécifique de nombreuses enzymes et métalloprotéines de structure. Cependant le Cuivre en excès produit des radicaux libres responsables de lésions cellulaires au niveau de l'ADN et d'organites tels que les mitochondries ou les lysosomes (Marschner., 1995).

Chez l'homme et les mammifères, régulés par le foie, le cuivre intervient dans la fonction immunitaire et contre le stress oxydant, son manque cause le syndrome de Menke, mais à dose plus élevée et sous ses formes oxydées, un puissant poison pour l'Homme, causant la maladie de Wilson (Plumlee et Ziegler., 2003 In Matías., 2008), les mollusques, les moules et les limaces, les limaçons et des escargots terrestres, ainsi que des seiches et des crabes, respirent à l'aide d'un pigment sanguin (L'hémocyanine) contenant du cuivre pris la place de fer. (Mudronja., 2007)

L'énigme du cuivre dans le domaine du vivant se présente dans la structure des moules et des escargots et également dans la structure des oiseaux comme les turakos, l'ensemble de l'organisme contient environ 0,2 à 0,3 g de cuivre (la teneur de cuivre en les plumes d'oiseaux : 0,76 à 1 mg % et en moyenne de 0,4 mg % pour le corps humain). Il est réparti, dans l'organisme, d'une façon très différenciée. (Mudronja ., 2007) Tableau 02 : Un gramme de tissu humide contient de Cu en gamma (un millionième de gramme)

l'organisme	Cerveau	Reins	Pancréas	Poumon	Cœur	Rate	Muscles	Foie	Os
contient en gamma (un millionième de gramme)	3	2,98	3	2,5	3	1,78	3	7,5	3

Chapitre II :

Dépollution des sols

II.1. Introduction:

Le but de la dépollution des sols est de restituer les sites dans un état aussi proche que possible de l'état antérieur à la pollution. En outre, la ou les techniques de traitement des sols ne doivent pas être plus polluantes que le résultat de la dépollution. C'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir de transfert de pollution. (Perchet., 2008)

Critères auxquels doivent répondre les techniques de dépollution :

- Enlever ou neutraliser les matières incriminées,
- Peser aussi peu que possible sur les ressources mises en œuvre (eau, air, énergie, capital...);
- Ne pas provoquer d'émissions secondaires (eau et air du processus) contenant des polluants ;
- Obtenir un taux important de recyclage du matériau traité ;
- Minimiser la quantité et le danger potentiel des matières résiduelles ;
- Ne pas produire de nouvelles substances toxiques par l'enlèvement ou le transfert de celles déjà existantes.

La dépollution des sites contaminés par des sources de pollution variées est contrainte par différents facteurs, la nature de la pollution étant le premier. Toutefois, la dépollution d'un site encore en activité sera beaucoup plus contraignante que celle d'un site fermé (Legrand., 2006 *in* Perchet., 2008). Les traitements proposés peuvent être définis en trois grandes familles :

- Les procédés « in situ », réalisés dans le sol en état ;
- Les procédés « on site », traitements sur place des sols excavés ;
- Les procédés « hors site » ou « off site » ou « ex situ », nécessitant l'évacuation.

Ces différents procédés sont dépendants d'un facteur de temps, sachant que les traitements « in situ » demandent un temps plus long que ceux réalisés hors site. Enfin, le type de traitement choisi dépendra également de la nature du ou des polluants, certains d'entre eux présentant la caractéristique d'être biodégradables et d'autres non.

Ainsi trois méthodologies peuvent s'appliquer pour le traitement de polluants non biodégradables :

- Les traitements physico-chimiques ;
- Les traitements thermiques ;
- Les méthodes de confinement.

Ces trois méthodologies s'appliquant essentiellement pour le traitement de polluants non biodégradables, nous exposerons dans un quatrième temps les techniques liées à la biodégradation.

La nécessité de dépolluer les sites contaminés a conduit au développement de nouvelles technologies biologiques s'appuient sur le métabolisme et l'activité des communautés de bactéries, champignons, végétaux supérieurs qui ont pour objectif de détruire, évacuer, dégrader ou stabiliser les polluants (Chedly., 2006).

II.2. La bio remédiation : mise en œuvre

La bio remédiation, c'est-à-dire l'emploi de procédés biologiques pour détruire, ou de rendre moins toxiques des polluants industriels qui contaminent le cycle biogéochimique des substances naturelles, en utilisant des activités biologiques naturelles. Au stade actuel de décontamination, la bioremédiation est utilisés depuis environ un siècle afin d'éliminer divers composés anthropogéniques ou d'origine naturelle présents dans l'environnement. Cette technique a de multiples applications, incluant le nettoyage des eaux du sol, du sol, de boues industrielles. La bio remédiation, est une option avantageuse pour diminuer la pression exercée sur l'environnement, (l'air, l'eau ou le sol). (Chedly., 2006)

La bioremédiation est basée sur l'utilisation de souches microbiennes (bactéries et/ou champignons) (Boopathy., 2000 In Perchet; 2008). Il existe des micro-organismes capables de dégrader efficacement des polluants comme les produits pétroliers, les huiles et les graisses, les hydrocarbures mono et polycycliques, les BPC (biphénylpolychlorés), etc. En plus d'éliminer les composés ayant des effets néfastes pour l'environnement, cette technique permet de diminuer les coûts d'assainissement (Biogénie., 1994 in Perchet., 2008). Les microorganismes ont besoin de nutriments et de source carbonée pour fournir l'énergie nécessaire à leur croissance et leur survie. La bioremédiation doit faire face à un environnement hétérogène dans lequel la plupart du temps, le(s) contaminant(s) est (sont) présent(s) en association avec des particules du sol, dissous dans la solution du sol, etc. Pour cette raison, la bioremédiation se doit d'avoir une approche pluridisciplinaire, prenant ainsi en compte la microbiologie, l'ingénierie, l'écologie, l'écotoxicologie, la pédologie et la chimie.

II.3. Principe de la bio remédiation :

Le procédé de la bioremédiation consiste à activer la capacité naturelle que possèdent de nombreux organismes, la plupart des temps microscopiques (bactéries, micro algues, champignons), à dégrader les polluants en composés inertes, comme l'eau et le gaz

carbonique. Ces organismes peuvent être indigènes (déjà présents dans la zone polluée), ou exogènes (ajoutés au milieu), ou encore être prélevés sur le site contaminé, cultivées au laboratoire puis réintroduits dans le sol (bio augmentation). La bioremédiation se déroule généralement en condition d'aérobie, cependant l'application de systèmes de bioremédiation en condition d'anaérobie permet la dégradation d'un certain nombre de molécules récalcitrantes (Chedly., 2006).

- Les principales technologies utilisées dans la bioremédiation sont les suivantes :

II.3.1. La bio augmentation :

Cette technologie consiste à introduire des cultures de microorganismes à la surface du milieu contaminé dans l'objectif d'augmenter la biodégradation des contaminants organiques. Généralement les microorganismes sont sélectionnés sur la base de leur aptitude à dégrader les composés organiques présents dans le site à dépolluer. La culture peut comprendre une ou plusieurs espèces des microorganismes. Des éléments nutritifs sont généralement apportés dans la solution contenant les microorganismes. Cette suspension de microorganisme est apportée à la surface du sol dans les conditions naturelles ou injecte dans le site contaminé sous pression. Cette technologie est largement utilisée pour décontaminer les sites contenant des hydrocarbures : Les microorganismes choisis sont des bactéries dotées d'une grande capacité de digestion de ces hydrocarbures.

II.3.2. La bio filtration :

Elle consiste à l'utilisation d'un bio filtre pour traiter les émissions gazeuses : le principe consiste à utiliser des microorganismes pour dégrader les polluants contenus dans l'air à traiter : la phase aqueuse (l'air contaminé) est mise en contact avec une phase aqueuse dans laquelle se développe la population microbienne, connue aussi sous le nom de la biomasse. Dans une unité de bio filtration, l'air à épurer (à dépolluer) traverse d'abord un filtre et un humidificateur afin de supprimer les particules (poussières, graisses) présentes dans le gaz et d'amener le niveau d'humidité à 100%. L'air est ensuite introduit dans un réacteur (une cuve) contenant un garnissage formé de matériaux très poreux (très avide pour l'humidité). A la surface des particules qui constituent le garnissage se trouve un biofilm qui correspond à une pellicule d'eau contenant des microorganismes (bactéries et champignons) dont la fonction est de dégrader les polluants présents dans l'air à traiter. Cette technologie est par exemple utilisée pour traiter l'air pollué par le xylène ou par des composés azotés

II.3.3. La bio stimulation :

Cette technologie consiste à stimuler l'activité des populations microbiennes indigènes (présentes dans le sol ou dans les eaux souterraines) par apport de nutriments et par ajustement des conditions du milieu (potentiel d'oxydo-réduction, humidité).

II.3.4. Le compostage:

Un procédé biologique contrôlé qui assure la transformation et la valorisation des matières organiques (sous-produits de la biomasse, déchets organiques d'origine biologique) en un produit stabilisé, hygiénique, semblable à un terreau riche en composés humiques le compost. C'est la fermentation des ordures ménagères organiques (résidus alimentaires) et des déchets verts (feuillages, résidus de jardinage) afin de produire un compost réutilisable en agriculture ou dans le jardin pour fertiliser la terre. L'aération et l'humidité sont deux éléments indispensables pour entretenir les conditions d'une bonne fermentation. Le compostage peut se faire chez soi ou collectivement par des procédés industriels.

II.3.5. La biolixiviation :

Elle est favorisée par la voie biologique (généralement bactérienne). Elle correspond à une méthodologie de solubilisation des métaux lourds grâce à des bactéries acidophiles fonctionnant en présence ou en l'absence d'oxygène. Deux facteurs sont importants pour la biolixiviation :

- ✓ la température qui doit être comprise entre 25 et 35 °C.
- ✓ La taille des particules qui doivent être très proches de celle des bactéries.

II.4. Avantages et limitations:

II.4.1. Avantages de la bio remédiation:

- Elle est souvent applicable sur le site (bioremédiation in situ) ou à proximité immédiate (quand des installations ex situ sont nécessaires), ce qui réduit les coûts de transport et de manutention.
- Elle perturbe généralement moins le biotope que les méthodes physico-chimiques (sauf pour les sols excavés).
- Elle élimine le polluant en permanence et, appliquée in situ, rend le biotope apte à relancer un processus d'autoépuration en cas de nouvelle pollution du même genre.
- Elle élimine les effets à long terme possibles avec les méthodes fondées sur le confinement.

➤ On peut associer, dans une chaîne de traitement, plusieurs techniques biologiques (exemples : un composteur et un bio filtre ; deux ou plusieurs réacteurs en cascade, etc....)

➤ Les techniques biologiques peuvent également être couplées aux techniques de dépollution physico-chimiques.

II.4.2. Limites techniques :

La bioremédiation se heurte à des difficultés techniques multiples liées :

➤ A la nature, la concentration et le volume des produits à traiter. Les microflores sont plus efficaces à des dilutions relativement faibles, situées entre un seuil minimum nécessaire pour induire l'activité enzymatique (ou un Co métabolisme) et un seuil maximum inhibiteur de l'activité microbienne.

➤ A la non existence ou aux difficultés d'adaptation des souches indigènes et/ou à l'obtention des souches efficaces in situ.

➤ A l'hétérogénéité de la dispersion du polluant dans le biotope, liée elle-même à la nature du sous-sol et à la porosité de celui-ci. Dans certains sols très hétérogènes sur le plan granulométrique, la circulation (naturelle ou forcée) des fluides (gaz et eaux) utilisés pour une dépollution in situ se fait uniquement par les zones de grande perméabilité, excluant de la dépollution une grande masse de sol.

➤ Aux modifications physico-chimiques qui surviennent dans ce biotope:

➤ Modifications des teneurs en oxygène et variations de température saisonnières qui Rendent la bioremédiation inefficace en hiver, dilution due aux pluies, etc...,

➤ A des effets négatifs possibles sur l'environnement. Par exemple, la transformation microbienne de polluants peut produire des composés plus toxiques que le composé d'origine; l'utilisation des réacteurs à boue est destructrice de la structure du sol, etc...

Chapitre III :

Généralité sur les vers de terres

III.1. Généralité sur le Ver de terre

Les vers de terre, aussi appelés lombriciens (annélides, oligochètes) représentent une composante majeure de la macrofaune du sol dans la plupart des écosystèmes terrestres. En 1994, plus de 3600 espèces de vers de terre, réparties en 15 familles, avaient été recensées dans le monde, auxquelles s'ajoutent plus de 60 nouvelles espèces chaque année. On estime à 7000 environ le nombre total d'espèces, la majorité vivant sous les tropiques (Lavelle et al., 1998). Ils jouent un rôle important dans leur environnement grâce à différents mécanismes physico-chimiques et biologiques, permettant d'améliorer la fertilité et de préserver la structure du sol (Stork et Eggleton., 1992 ; Lavelle et Al., 1997). Aussi, en affectant les propriétés physiques et chimiques du sol, ils modifient le biotope des communautés microbiennes (Lavelle et Al., 1997).

III.2. Systématique

Phylum : Annelida

Classe : Clitellata

Sous-classe : Oligochaeta

Ordre : Haplotexida

Sous-ordre : Lumbricina

Superfamille : Lumbricoidea

Famille : Lumbricidae

Genre: Lumbricus

III.3. Morphologie des vers des terres

III.3.1. La forme

Il a la forme d'un cylindre blanc rose, allongé, effilé aux deux extrémités, et formé de 110 à 180 anneaux, distincts extérieurement, correspondant à la métamérisation interne.

La région antérieure porte la bouche ; elle est plus effilée et couleur violacée ; la région postérieure, plus renflée et aplatie, porte l'anus (Boue et Chnton., 1974 In Bouakka et Hassan., 2013).

Le corps est légèrement aplati dorso-ventralement, le côté dorsal plus coloré que la face ventrale. Celle-ci présente de petites soies en forme de crochets que l'on sent en promenant le doigt d'arrière en avant ; visibles à la loupe, elles sont disposées, pour chaque anneau, en quatre groupes de deux ; chaque groupe de deux soies correspond à une rame d'un parapode très réduit (Grasse., 1970 In Bouakka et Hassan., 2013).

Du trente-troisième au trente-septième anneau et toujours plus près de la tête, on voit un renflement dorsal des téguments, la selle ou clitellum surtout bien visible au moment de l'accouplement (Boue et Chnton., 1974 In Bouakka et Hassan., 2013

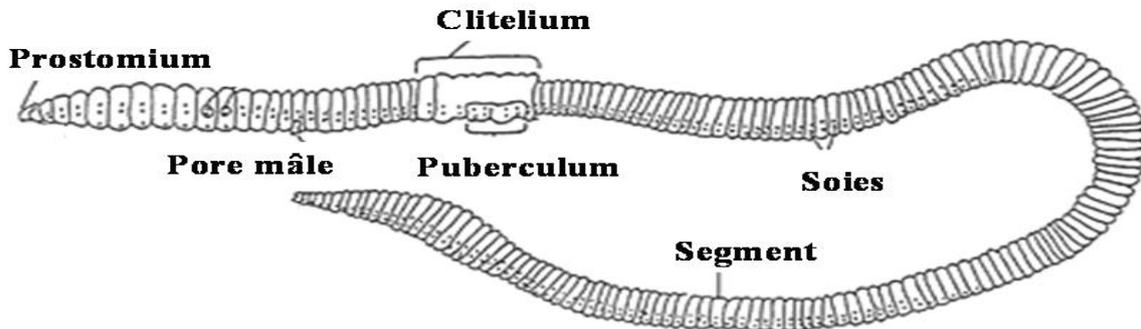


Figure 03 : Morphologie des vers des terres après Marion et Daniel., (2014)

III.3.2. La taille :

La longueur est difficile à exprimer parce que le corps surtout chez les vers de terre, est si extensible qu'entre la contraction et la longation normales, la longueur peut varier de plus du simple au double. Les nombres publiés concernent souvent des exemplaires conservés, peut être contractés à des degrés inégaux. L'échelle de taille des oligochètes est très étendue il y a des vers de terre géants. Dépasser un peut 2m (Grasse et Al., 1970 In Bouakka et Hassan ., 2013).

III.4. Taxonomie et catégories écologiques

Les vers de terre sont omniprésents dans tous les sols tropicaux ou tempérés et leur diversité taxonomique est très importante. Les grandes glaciations du quaternaire ont provoqué l'extinction des vers de terre. Les régions tropicales sont beaucoup plus riches.

Selon des critères morphologiques et comportementaux les vers de terre se répartissent en trois grandes catégories écologiques : les épigés, les anéciques et les endogés. (Bouché., 1977 In Huynh., 2009)

Tableau N° 03 : Principales caractéristiques des trois catégories écologiques de vers de terre décrites par Bouché (1972 ; 1977) (MO = Matière Organique).

	Espèce épigée	Espèce anécique	Espèce endogée
Alimentation	Litière décomposée à la surface du sol ; peu ou pas d'ingestion de sol	MO décomposée à la surface du sol, dont une part est emmenée dans les galeries ; un peu d'ingestion de sol	Sol minéral avec préférence pour matériau riche en MO
Pigmentation	Sombre, souvent ventrale et Dorsale	Moyennement sombre, souvent uniquement dorsale	Peu ou pas pigmenté
Taille adultes	Petite à moyenne (10-30 mm)	Grande (10-110 cm)	Moyenne (1-20 cm)
Galeries	Pas ; quelques galeries dans 1ers cm de sol par espèces intermédiaires	Grandes galeries verticales et permanentes dans horizon minéral	Galeries continues, extensives, subhorizontales, souvent dans les 15 premiers cm de sol
Mobilité	Mouvements rapides en réponse à perturbation	Retrait rapide dans galerie mais plus lents que les épigés	Généralement lents
Longévité	Relativement courte	Relativement longue	Intermédiaire
Temps de génération	Court	Long	Court
Survie à sécheresse	Sous forme de cocons	Quiescence	Diapause
Prédation	Très importante, surtout par oiseaux, mammifères et arthropodes prédateurs	Importante, surtout quand ils sont en surface, un peu protégés dans leur galerie	Faible ; un peu par oiseaux qui creusant le sol et arthropodes prédateurs
Photo			

III.5. Ver de terre et métaux lourds

Les vers de terre sont plus sensibles aux teneurs en métaux lourds que les autres invertébrés dans le sol (Bengtsson *et Al.*, 1992 In Huynh.2009) et leur capacité à accumuler des métaux lourds souvent plus élevée que pour d'autres espèces animales (Beyer *et Al.*, 1982 In Huynh.2009). Cependant, les métaux lourds ont des effets variables en fonction des espèces, du stade de développement, du mode de vie (lieu de vie et régime alimentaire) et de leur capacité d'adaptation face à la pollution. Ces effets varient également suivant la nature du métal, sa forme chimique et les propriétés du sol.

L'augmentation de la teneur en métaux lourds au-delà d'un certain seuil réduit la densité des vers (Pizl et Josen., 1995) et influe négativement sur leur croissance pondérale, leur développement sexuel et la production de cocons (Spurgeon et Hopkin., 1999 In Huynh.2009).

(Spurgeon et Al., 2000 In Huynh., 2009) ont observé une réduction significative du taux de survie de 4 espèces de vers de terre pour des concentrations en zinc comprises entre 2000 – 3600 ppm. De plus, ils ont noté des pertes significatives de poids à partir de 1200 – 2000 ppm de zinc. Par ailleurs, (Depta *et Al.*, 1999 In Huynh., 2009) indiquent que l'un des mécanismes potentiels d'adaptation des vers à la pollution est l'évitement. Les vers, placés en sols pollués, seraient ainsi en mesure de différencier la matière organique selon son niveau de contamination.

La capacité d'accumulation de métaux lourds des vers (étudiée sur quelques espèces) a été reconnue dans la littérature dès la fin du 19^{ème} siècle (Hopkin., 1989 In Huynh., 2009). Chez les vers de terres, les métaux lourds s'accumulent notamment dans les tissus digestifs soit par voie orale après leur ingestion, soit par voie cutanée chez les vers de terre n'ayant pas de cuticule protectrice et vivant en contact permanent avec le sol. De nombreuses études ont permis d'identifier les paramètres dont dépend ce processus de bioconcentration l'espèce de ver et sa catégorie écologique, le type de métal et sa spéciation, les propriétés physiques et chimiques du sol, la saison et quand il s'agit d'une pollution diffuse, la distance à la source de contamination. Ainsi, les métaux lourds complexes sont moins disponibles pour le ver de terre (Hartenstein et Hartenstein., 1981 In Huynh., 2009).

Enfin, l'étude de l'accumulation des métaux lourds dans les tissus des vers pourrait être un bon bioindicateur de disponibilité des métaux lourds dans le sol (Lanno et Mc carty., 1997 ; Conder et Lanno., 2000 ; Conder *et Al.*, 2001 ; Oste et Al., 2001 In Huynh., 2009).

PARTIE II:

Etude expérimentale

Chapitre I:

Présentation de la zone d'études

I. Localisation de la zone d'étude

I.1. Situation géographique

La zone d'étude est localisée dans la wilaya de Tiaret a une superficie 20086 Km² sa position au Nord-Ouest d'Algérie, sur les hauts plateaux Ouest entre la chaîne Tellienne au Nord et la chaîne Atlasseinne au Sud. De sa part sa position stratégique dans l'Atlas Tellien, Tiaret constitue une porte incontestable et passage obligé pour les aboutissements dans les étendues du Sud. Ces limites géographiques sont :

- Au Nord et Nord-Est ; la wilaya de Relizane ; Tissemsilt et Médéa.
- A l'Est, la wilaya de Djelfa ;
- Au l'Ouest, la wilaya de Saida, Mascara.
- Au Sud, la wilaya de Laghouet, El Bayadh.

I.2. Caractéristiques climatiques

Le climat de la région de Tiaret est de type semi-aride à hiver froid, les précipitations annuelles moyennes s'élèvent à 350 mm .les températures connaissant de grandes fluctuations dans la région (en de ça de 0°C).cette influence de la température freine quelque peu le processus d'alimentation des nappes souterraines qui en fait ne s'opère que sur une période assez courte (janvier à avril).

Les données climatiques moyennes de la région en 2013 figurent sur le tableau N° 03.

Tableau N° 04: Données climatiques relatives à la région de Tiaret (Source : Station météorologique d'AIN BOUCHEKIF, Wilaya de Tiaret., 2013)

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
Pluviométrie (mm)	49.1	40.2	36.8	39.9	36.9	9.7	5.4	13.5	30.1	36.9	39.3	41
T° moyenne Mensuelle (C°)	5.2	7	10.2	11.2	13.5	23.2	25.8	28	22.4	17.9	13	6.9

I.3. Le réseau routier

I.3.1. Le réseau routier externe

Le chef-lieu de la commune de Tiaret et le carrefour de plusieurs voies de communications d'une importance nationale ; mais dans l'état reste au demeurant moyen.

I.3.2. Les routes nationales

La ville de Tiaret est liée généralement par trois principaux axes de route qui sont :

- ✓ La R.N -14 : cet axe relie Tiaret aux Wilaya de Saida et Mascara ainsi que Alger par Tissemsilt.
- ✓ La R.N -23 : c'est un axe très important entre Tiaret et Relizane d'une part, d'autre part entre Tiaret et Aflou.
- ✓ La R.N -90 : Un troisième axe très important reliant la commune au Nord par Oued Rhiou et au Sud à travers Ain Guessma.

I.3.3. Les chemins de la wilaya :

Le réseau secondaire est généralement dans un état moyen. Il draine un volume de Trafic peu important par rapport au réseau primaire. On note deux Chemins de Wilaya :

- ✓ CW -07 : c'est le plus important, car il relie Tiaret à Bouchekif.
- ✓ CW-11 : Relie la commune à sidi Hosni à l'Est, et à Mechra aSfa à l'Ouest. (DPAT.,

2012).

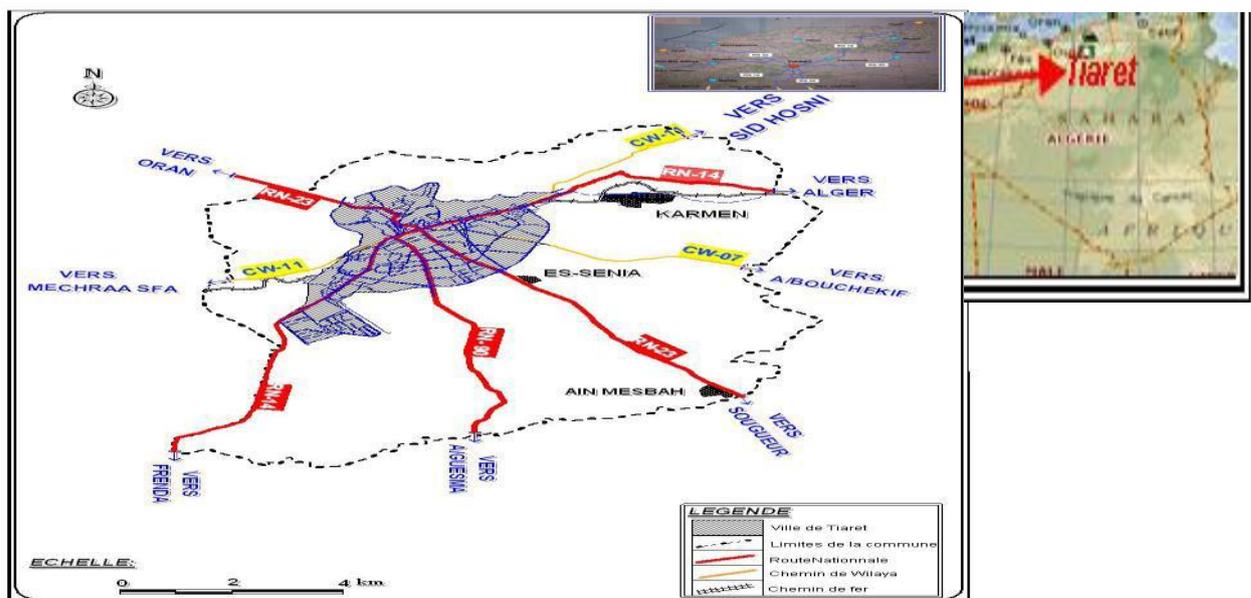


Figure N° 04 : Carte des réseaux routiers de la zone d'étude (Source URBATIA, 2013)

I.3.4. Le parc automobile de la commune de Tiaret :

Selon le service des cartes grises de la daïra de Tiaret, le parc automobile de la commune de Tiaret est constitué de 59178 véhicules tous types confondus dont 36243 sont à essence et 19935 véhicules sont Gasoil.

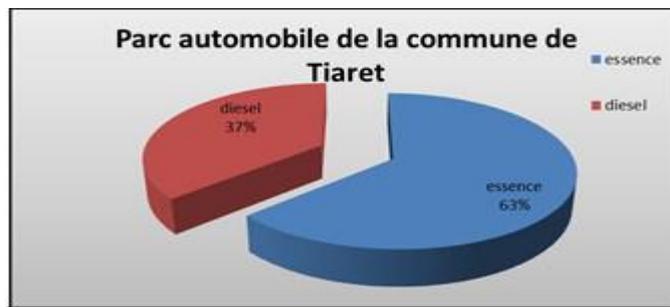


Figure N° 05 : Répartition du parc automobile de la commune de Tiaret selon le type de carburant.-(Service Carte Grise, Wilaya de Tiaret, Communication personnelle ., 2013)

Enfin, le réseau routier constitue l'importance de tout développement économique d'une agglomération dans la mesure où il permet les liaisons entre les différentes zones. Son état influe sur les commodités de circulation. Cependant les services compétents doivent intervenir pour une meilleure prise en charge du réseau de Tiaret conformément à la croissance démographique, et par voie de conséquence la croissance économique qu'enregistre l'entité en question (Boukirat., 2012).

Chapitre II :
Origine du matériel
expérimenté

II. Origine du matériel expérimenté

II.1. Choix du site

Les sols étudiés, sont des sols localisant à proximité des routes nationales (N° 14 et N°23). Ce contexte nous place en dehors de la bio remédiation et de l'éco toxicologie et nous rattache à la problématique de la pollution du sol.

Le choix des sols sera raisonné pour couvrir la gamme des propriétés qui modifient la biodisponibilité des éléments traces : pH, CEC, H%, taux d'argile.

II.2. Choix des métaux : le Zinc et le Cuivre

Tout élément est toxique quand il est absorbé en excès par rapport aux capacités d'assimilation de l'organisme.

En raison de la faible exposition humaine par ingestion directe, le nombre d'éléments traces pouvant potentiellement contaminer l'homme est limité.

En dehors de l'aspect toxicité, les éléments qui ont permis d'orienter le choix des métaux à étudiés sont les suivants :

- ✓ L'aspect quantitatif, avec le bilan réalisé sur les sources d'émission des polluants en milieu routier a mis en évidence que les principaux éléments traces métalliques émis par le trafic et les infrastructures routières sont le cuivre et le zinc. Le cuivre provient à 99,9% de l'usure des garnitures de freins, sa source est quasi unique, lorsque le zinc a des sources plus variées.
- ✓ D'autre part le comportement chimique du cuivre et du zinc est très différent de celui des autres polluants car le zinc est un oligo-élément. Mais devient toxiques à fortes concentrations.

II.3. Choix de ver de terre

Les vers de terre sont plus sensibles aux teneurs en métaux lourds que les autres invertébrés dans le sol (Bengtsson *et Al.*, In Huynh., 2009) et leur capacité à accumuler des métaux lourds souvent plus élevée que pour d'autres espèces animales (Beyer *et Al.*, In Huynh., 2009).

Les vers, placés en sols pollués, seraient ainsi en mesure de différencier la matière organique selon son niveau de contamination. L'étude de l'accumulation des métaux lourds dans les tissus des vers pourrait être un bon bioindicateur de disponibilité des métaux lourds dans le sol (Lanno et carty., In Huynh., 2009).

II.3.1. Systématique

Phylum : Annelida

Classe : Clitellata

Sous-classe : Oligocheata

Ordre : Haplotexida

Sous-ordre : Lumbricina

Superfamille : Lumbricoidea

Famille : Lumbricidae

Genre: Lumbricus

II.4. Protocole expérimental

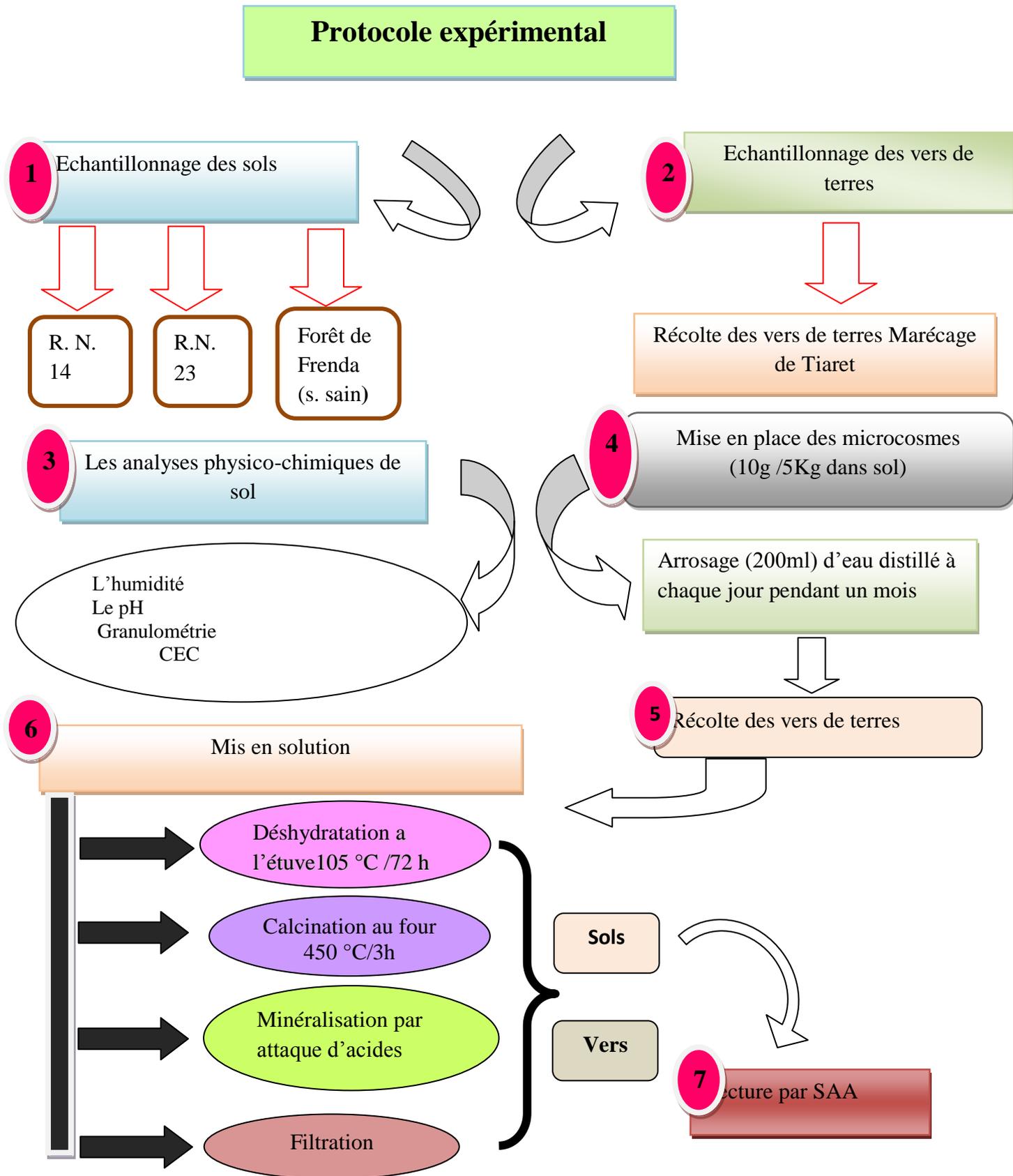


Figure N°06 : Représentation du processus d'analyse des ETM sur les sols et vers de terre

II.1. Prélèvement des échantillons

➤ Cas des échantillons du sol

Dans un premier temps, 22 échantillons de sol ont été prélevés à environ 30 cm de profondeur à partir de l'horizon de surface (horizon A), dans les sols localisant à proximité de deux routes nationales (routes nationales N° 14 et N°23), a été prélevé en 14-04-2015 afin de déterminer les teneurs des métaux lourds (Zn et Cu) dans ces sols, sachant que le cuivre est considéré comme un élément ayant une forte tendance à s'accumuler dans les horizons de surfaces (Kabata et Pendias., 1992).

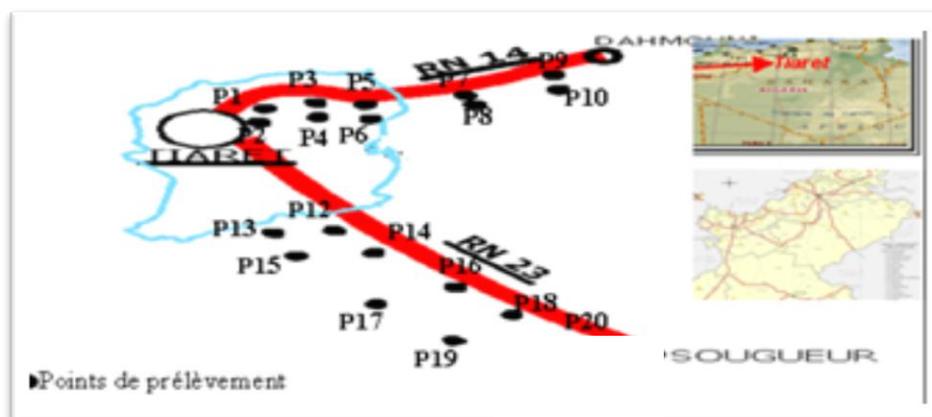


Figure N° 07 : Localisation des points de prélèvement dans la zone d'étude (Zerrouki ., 2013).

➤ Cas des échantillons des vers de terres

La récolte des vers de terres se fait au niveau de marécage de Tiaret (barrage de dahmoni) à surface a profondeur 30cm de l'horizon A

II.2. Traitement des échantillons du sol

L'objectif de la préparation de l'échantillon avant analyse est d'obtenir un échantillon représentatif dans lequel la concentration en polluants est aussi proche que celle présente dans le sol. C'est souvent l'étape la plus longue et celle qui génère le plus des sources d'erreur dans la chaîne analytique.

Au laboratoire, les échantillons sont séchés à l'air; broyés et ensuite tamisée (<2mm). Quelque paramètre physico-chimique du sol, notamment le pH, H%, le CEC et la granulométrie ont été déterminés par les méthodes habituelles (Afnor., 1999).

II.2.1. L'analyse physicochimique des échantillons de sol

L'échantillon destiné au laboratoire est soumis aux différents traitements suivants :

- Séchage à l'air, puis broyage
- Réduction des mottes
- Tamisage à 2mm (avec pesée du refus si nécessaire)
- Division (le cas échéant)
- Mise en boîte et identification

Les caractéristiques physico-chimiques du sol; la structure, la texture et la composition lui confèrent des caractéristiques particulières qui influencent les phénomènes d'infiltration et de rétention des éléments traces métalliques. Selon la norme NF ISO 11 464 de prétraitement des sols pour analyses physicochimiques (Afnor., 1999).

La détermination de la distribution de la taille des particules, ou composition granulométrique du sol, est appelée analyse granulométrique. La séparation des particules par groupes de taille est réalisée par tamisage avec un diamètre de 2 mm.

La détermination des différentes classes de particules minérales identifiées s'effectue selon leur taille. L'échelle utilisée est celle d'Atterberg qui donne 5 classes de particules :

- Argiles : 0 à 2 μm
- Limons fins : 2 à 20 μm
- Limons grossiers : 20 à 50 μm
- Sables fins: 50 à 200 μm
- Sables grossiers : 200 μm à 2mm

II.2.2. Préparation des solutions et extraction des éléments métalliques

Les échantillons (sol et ver de terre) ont été récoltés après un mois. Ils ont fait l'objet d'une série d'opérations qui sont:

- **Déshydratation:** à l'étuve à $105^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 72 heures pour avoir l'état sec.
- **Broyage et Calcination:** cette étape est éminemment critique car elle peut être source de contamination ou de perte. Pour cela, le broyeur utilisé est un mortier en agate. Les matériaux constituant le broyeur sont le titane et l'acier garantis sans « métaux lourds ». 0.5 à 1 g de la poudre obtenue est calcinée dans un four dont la température est augmentée progressivement jusqu'à 450°C , à l'aide des capsules en quartz pour obtenir poudre fine .
- **Minéralisation et mise en solution:** la poudre fine obtenue, après calcination, est placée dans une solution d'acides (10 ml d'acide fluorhydrique HF 40% et 3 ml d'acide

perchlorique ClHO_4 70%) puis chauffée dans un bain de sable sous la haute, jusqu'à l'évaporation totale de la solution (minéralisation à chaud).

En dehors du bain de sable on lui ajoute 1 ml d'acide nitrique 65% (HNO_3) et 10 ml d'eau distillée et on la laisse 30 min de contact à froid; après on les places dans le bain de sable jusqu'à effervescence (minéralisation à froid)

- **Filtration et dilution:** transférer le mélange obtenu dans une fiole à 100ml par filtration sur papier de filtration $0.2\mu\text{m}$ et ajuster au trait de jauge par l'eau distillée. Les solutions sont ensuite stockées dans des tubes à essai à bouchons en liège.

Cette méthode permet le dosage de l'ensemble des éléments traces : spectrométrie d'absorption atomique. (Cité In Boukirat et Temar., 2012)

Chapitre III:

Résultats et discussions

Le transport routier peut être la source de différentes nuisances et pollutions. La construction, l'utilisation et l'entretien des infrastructures routières engendrent des perturbations susceptibles de porter atteinte aux ressources naturelles, aux systèmes écologiques et à l'homme. Ils sont à l'origine à la fois d'une pollution de l'atmosphère, des eaux et des sols.

Les processus de transferts entre la phase solide et la phase liquide sont multiples ; ils dépendent fortement de la nature de la liaison entre les métaux et la phase solide, appelée également phase porteuse ou phase de rétention, ainsi que des conditions physico-chimiques régnant dans le sol.

III.1. Etude de la variabilité des concentrations en métaux lourds dans le sol

Les teneurs du sol en métaux lourds (Cu et Zn) varient considérablement entre les points de prélèvement choisis pour cette étude.

Tableau N°05 : Statistiques descriptives sur les concentrations des Elément Trace Métallique (en ppm) dans le sol.

	N	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
zinc sol	22	638,50	62,00	910,00	213,51
cuivre sol	22	31,68	8,00	130,00	25,50

L'examen du tableau N°05 permet de constater une forte contamination du sol par le zinc ($638,50 \pm 213,51$ ppm) avec une variabilité remarquable entre les différents points de prélèvements ; le contenu du selon Cuivre été ($31,68 \pm 25,50$ ppm).

La comparaison des valeurs enregistrées, sur le terrain avec celles des normes internationales décrites par AFNOR X31 en 1996 (Tab.06), dans les gammes appropriées de pH du sol, comme indique le tableau 05, des contaminations significatives nettement prononcées en éléments considérés dans les deux sites d'étude. (Zerrouki., 2013).

Tableau 06 : Normes internationales pour la contamination des sols en éléments traces métalliques.

ETM	Valeur seuils en ppm				
	Directive 86/278/EEC	Arrêté de 8 Janvier 1998	Projet de révision de la directive européenne (2000)		
			5<pH<6	6<pH<7	7<pH
Zn	150 à 300	300	60	150	200
Cu	10 à 20	50	0,3	0,8	11

III.2. Teneurs des métaux lourds dans les vers de terres (Zn et Cu)

Après le dosage du cuivre et du zinc dans les vers de terres, les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tab.07).

Tableau N°07 : Statistiques descriptives sur les concentrations du Zinc et le Cuivre (en ppm) dans les vers de terres.

	N	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
Zn VT (ppm)	22	107,23	65,60	144,00	33,08
Cu VT (ppm)	22	2,10	0,20	7,40	2,27

L'étude du tableau N°07 montre que les valeurs du zinc dans les vers de terres sont (107,23±33,08ppm) plus élevées que les valeurs du Cuivre trouvées dans vers de terres sont (2,10±2,27ppm).

De nombreuses études ont montré que les vers de terre évoluant dans des sites contaminés pouvaient stocker les métaux lourds dans leurs tissus. La durée de vie des ETM dans les tissus semble variable selon les espèces étudiées.

Selon Ulrike In Geiszinger (1998) a montré qu'il n'y avait pas de relation stricte entre la concentration des éléments traces métalliques dans les sols et celle retrouvée dans les tissus des vers de terres, donc probable que les vers de terre parviennent à réguler partiellement la concentration en éléments toxiques dans leurs tissus.

III.3. Effet des facteurs physico-chimiques du sol sur l'accumulation des ETM par les vers de terres

Le transfert du Zn et Cu vers les vers de terres est certainement conditionnée par les paramètres physico-chimiques du sol, notamment le pH du sol, la CEC et le taux des argiles et par la matière organique. Dans le but d'étudier ces effets, nous avons réalisé une analyse de corrélation dotée d'une analyse de variance de ces paramètres.

III.3.1. Effet du pH du sol

Les vers sont généralement absents des sols très acides ($\text{pH} < 3.5$) et sont peu nombreux dans les sols à $\text{pH} < 4.5$. Il existe un pH optimal pour chaque espèce, la majorité des espèces de régions tempérées se trouvent dans des sols à pH compris entre 5.0 et 7.4).

Le pH du sol c'est le facteur qui influence la mobilité et la biodisponibilité des éléments trace métalliques, un sol à pH acide entraîne la désorption des cations métalliques et donc leur mise en solution sous forme de sels métalliques.

L'étude de cet effet a été représentée par des corrélations entre le pH du sol et les teneurs de Zn et le Cu (en ppm) dans les vers de terres (Curry et Al In Céline., 2008)

- **Cas du zinc**

Après le dosage du zinc dans les vers de terres, les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tab.08)

Tableau N°08: Analyse de la variance à un seul facteur: cas de pH.

	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyen carré	F	p
pH	9338,1	11	848,9	0,6218	0,77**
Erreur	13652,6	10	1365,3		

L'analyse de variance (tableau 08) indique un effet hautement significatif ($p < 0,01^{**}$) de pH sur le zinc de ver de terre.

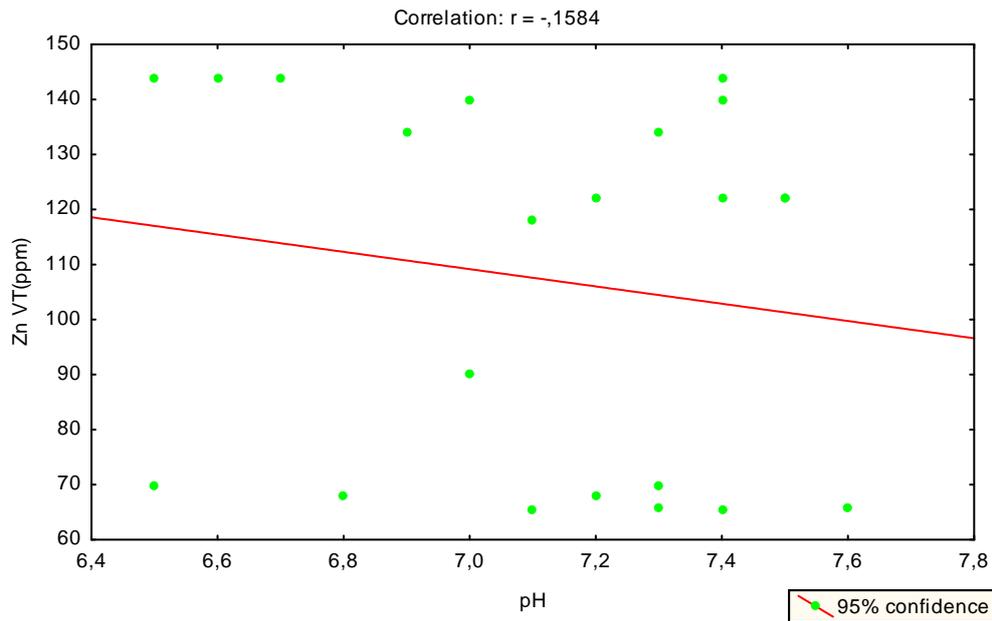


Figure N°08 : Corrélation entre le pH de la rhizosphère et l’accumulation du Zinc par les vers de terres.

La figure N°08 représente la corrélation entre le pH de la rhizosphère et le Zinc des vers de terres est une corrélation négative est remarquable ($r = - 0,15$).

• **Cas du cuivre**

Après le dosage du cuivre dans les vers de terres, les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tab.09)

Tableau09 : Analyse de la variance à un seul facteur : cas de pH

	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyen carré	F	P
pH	39,88	11	3,62	0,52	0,84
Error	68,49	10	6,84		

L’analyse de variance (tableau09) montre un effet hautement significatif ($p < 0,001$).

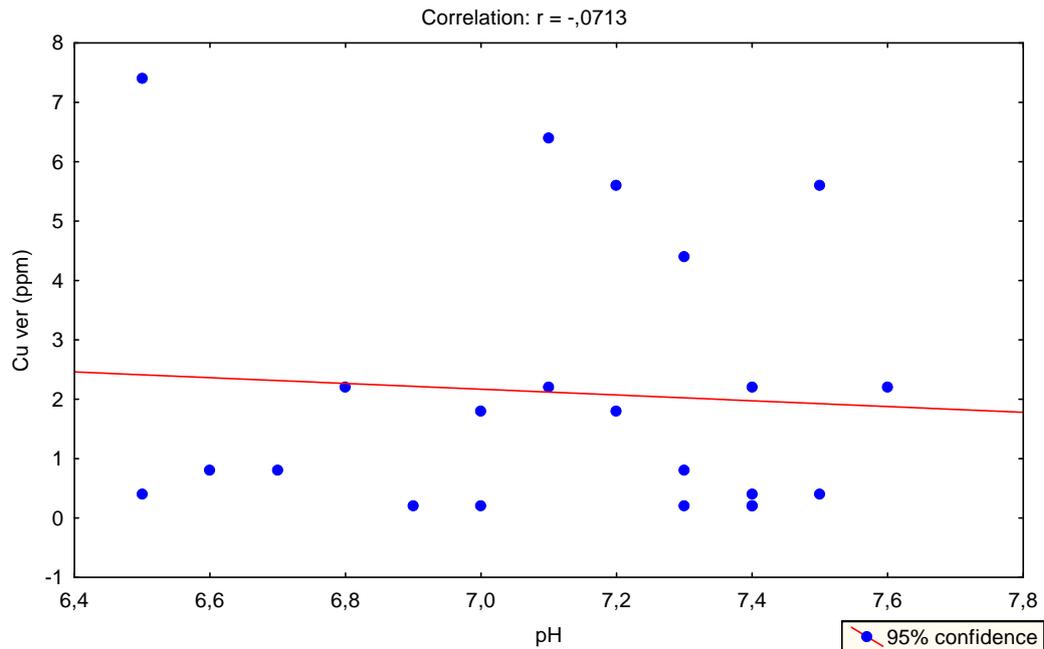


Figure N°09: Corrélation entre le pH de la rhizosphère et l'accumulation du Cuivre par les vers de terres.

La figure N°09 indique la corrélation entre pH du sol et Cu de vers de terres, qui est une relation négative ($r = -0.07$).

Le pH est un facteur prépondérant de la rétention des métaux car il contrôle la totalité des processus affectant le comportement de ces éléments (Bourg, 1988 In Martinelli., 1999).

On constate qu'à pH faible, les cations métalliques sont plus disponibles d'être absorbés par les vers de terres. Le zinc, relativement mobile est facilement adsorbé par les constituants du sol organiques et minéraux.

Différentes interprétations ont été avancées pour expliquer l'influence du pH du sol sur l'accumulation du cuivre dont cuivre en raison des implications du pH dans de multiples réactions chimiques du sol (dissolution/précipitation, adsorption/désorption, complexation) difficilement identifiables les unes des autres

Les vers de terres peuvent modifier la chimie et la biodisponibilité des éléments traces dans le sol, dont le Zinc, en modifiant le pH de la rhizosphère. (Zerrouki., 2013).

III.3.2. Effet de la CEC du sol

La capacité d'échange de cations est interdépendante et détermine une grande part des quantités de polluants retenus, dont l'adsorption des polluants peut être représentée par la CEC qui correspond à la quantité de cations maximale que le sol peut retenir par adsorption physico-chimique.

L'étude de cet effet a été représentée par des corrélations entre la CEC du sol et les teneurs du Zn et le Cu dans les vers de terres.

- **Cas zinc**

Après le dosage du zinc dans les vers de terres, les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tab.10).

Tableau 10: Analyse de la variance à un seul facteur : cas de la CEC

	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyen Carré	F	p
CEC	22990,7	21	1094,8		
Errer		0			

L'analyse de variance montre un effet pas significatif.

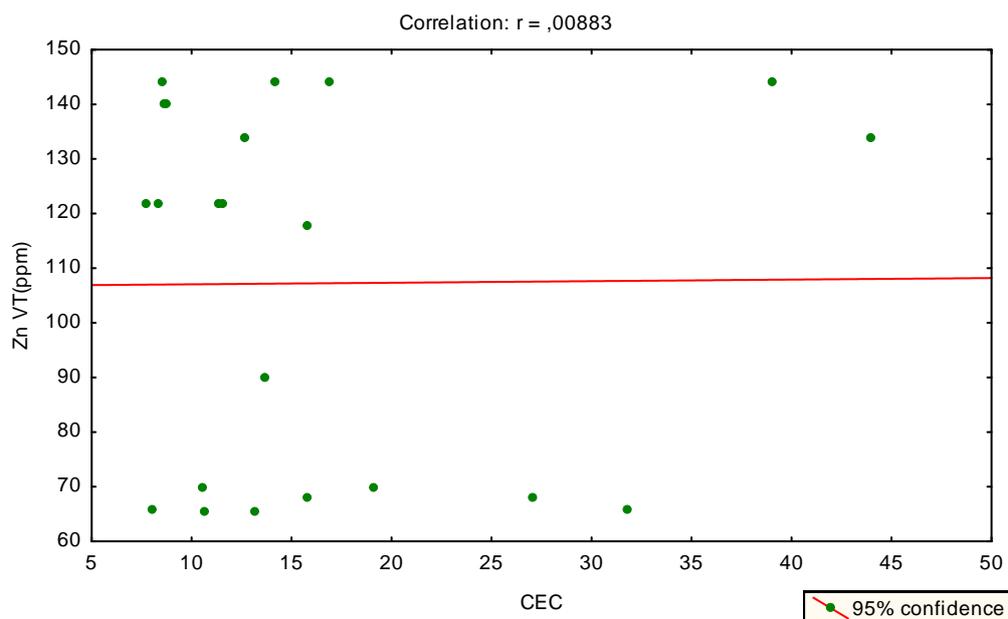


Figure N°10 : Corrélation entre la CEC et l'accumulation du Zinc par les vers de terres.

La CEC du sol est corrélée positivement avec les concentrations du zinc dans les vers de terres ($r = 0,008$) comme le montre la Figure N°10.

- **Cas du Cuivre**

Après le dosage du zinc dans les vers de terres, les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tab.11).

Tableau N°11: Analyse de la variance à un seul facteur: cas de CEC.

	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyen Carré	F	p
CEC	108,3782	21	5,16087		
Errer		0			

La concentration du cuivre dans le sol se fait par une liaison résultante d'une force d'attraction électrostatique qui se déroule entre les cations du Cu qui sont chargé positivement et la surface du sol qui est chargé négativement. Cette force d'attraction favorise l'échange cationique entre le sol et le Cu cette théorie a été confirmée dans le tableau 11 ou nous remarquons un effet pas significatif.

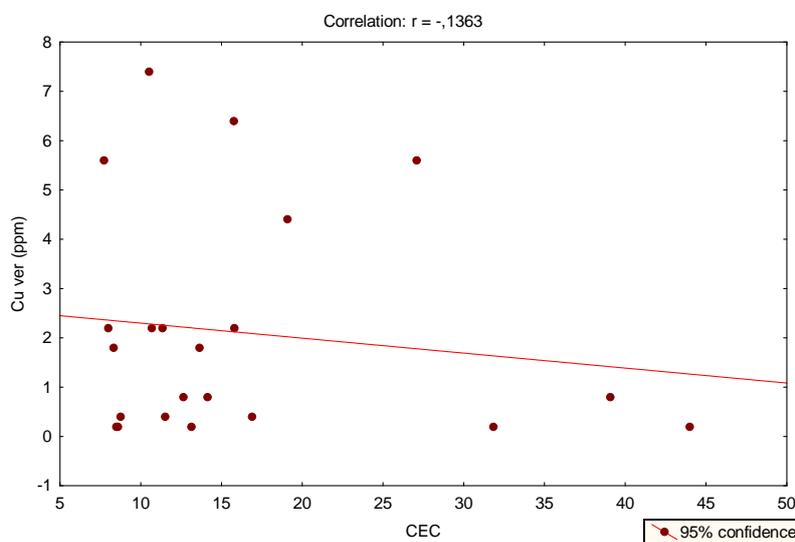


Figure N°11 : Corrélacion entre la CEC et l'accumulation du Zinc par les vers de terres.

La CEC du sol est corrélée négativement avec les concentrations du Cuivre dans les vers de terres ($r = -0,13$) comme le montre la Figure N°11.

La concentration du cuivre dans le sol se fait par une liaison résultante d'une force de d'attraction électrostatique qui se déroule entre les cations du Cu qui sont chargé positivement et la surface du sol qui est chargé négativement cette force d'attraction favorisent l'échange cationique entre le sol et le Cu cette théorie a été confirmée où en remarquons un effet significatif de CEC sur les concentrations du Cu au niveau du sol ; d'autre part d'après la loi de coulomb d'échange augmente avec la valence de l'ion et à charge égale le cation y ont le

plus grand rayon non hydrate et préférentiellement adsorbé (Alloway., 1995 b In Zerrouki.,2013).

III.3.3. Effet de l'Humidité du sol

Les vers de terre sont composés à 80-90 % d'eau lorsqu'ils sont pleinement hydratés et, même s'ils peuvent supporter des pertes en eau, ils restent très sensibles aux faibles humidités.

L'humidité du sol c'est un facteur clé qui régule l'abondance et l'activité des vers en milieu naturel et les populations lombriciennes répondent relativement rapidement à des variations de ce facteur du milieu. (Satchell., 1967 ; Hartensein., 1983 et Al In Céline, 2008).

- **Cas du zinc**

Après le dosage du zinc dans les vers de terres, les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tab.12).

Tableau 12 : Analyse de la variance à un seul facteur : cas de H%

	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyen carré	F	P
H%	16575,7	11	1506,9	2,34	0,094
Errer	6415,0	10	641,5		

L'analyse de variance (tableau 12) montre un effet significatif.

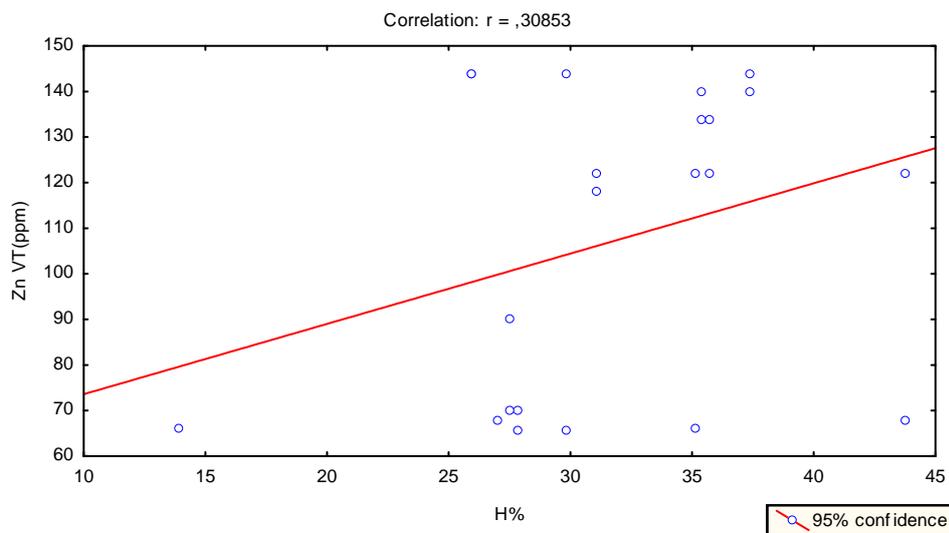


Figure N°12 : Corrélation entre l'Humidité et l'accumulation du zinc par les vers de terres.

L'humidité du sol est corrélée positivement avec les concentrations du zinc dans les vers de terres ($r = 0,31$) comme le montre la Figure N°12.

- **Cas du Cuivre**

Après le dosage du zinc dans les vers de terres, les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tab.13).

Tableau N°13 : Analyse de la variance à un seul facteur : cas de l'humidité.

	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyen Carré	F	P
H%	47,17	11	4,28	0,70	0,71
Errer	61,20	10	6,12		

L'analyse de variance (tableau 13) montre un effet très significatif.

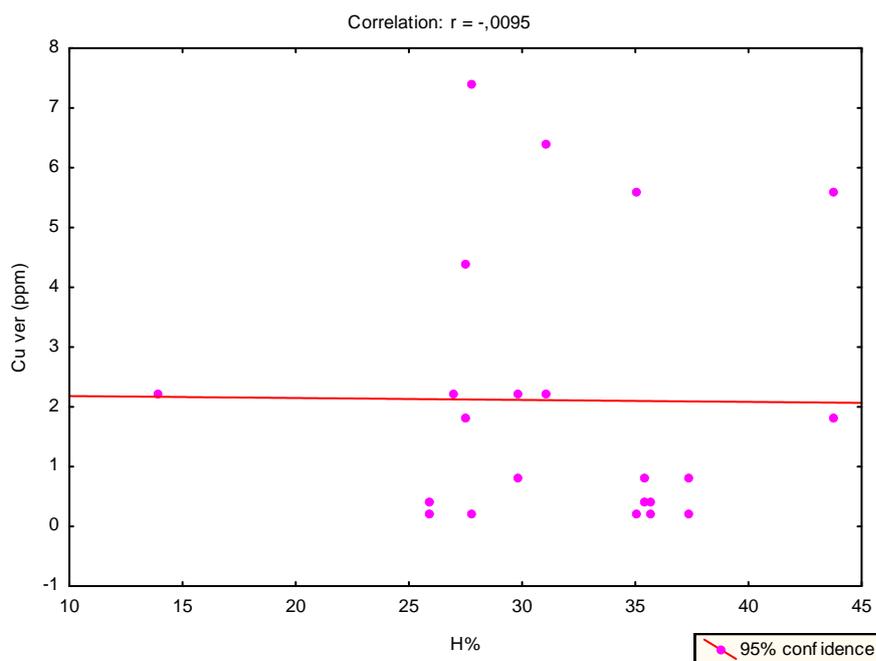


Figure N°13 : Corrélation entre l'Humidité et l'accumulation du Cuivre par les vers de terre.

L'humidité du sol est corrélée Négativement avec les concentrations du Cuivre dans les vers de terres ($r = -0,009$) comme le montre la Figure N°13.

III.3.4. Effet de la matière organique du sol

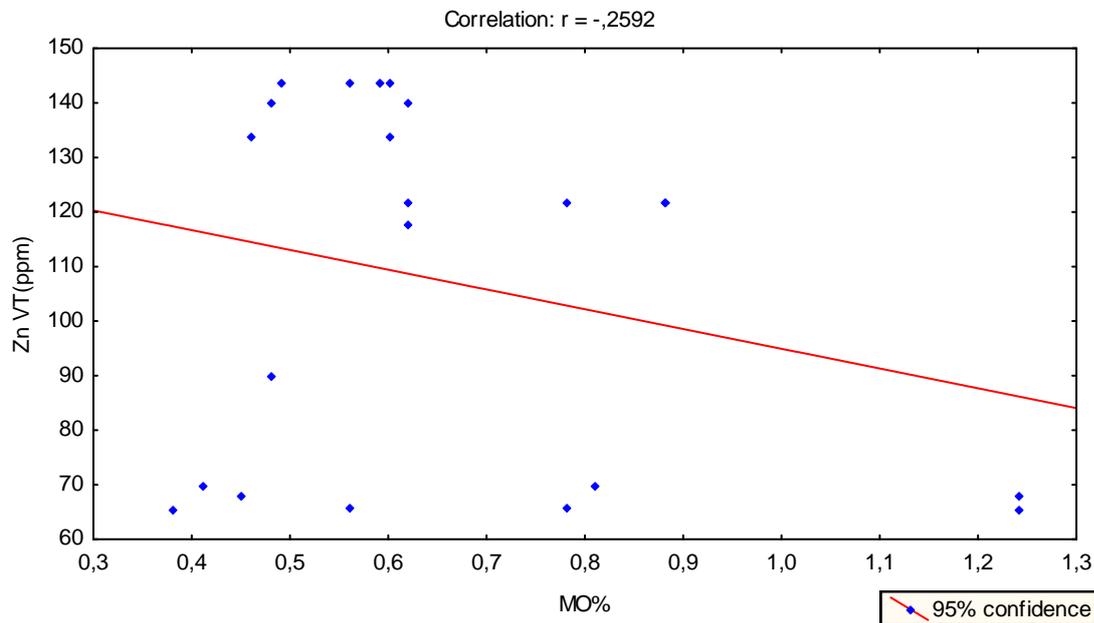
- **Cas du Zinc**

Après le dosage du zinc dans les vers de terres, les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tab.13).

Tableau N°14: Analyse de la variance à un seul facteur: cas de matière organique.

	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyen Carré	F	P
MO%	16803,1	13	1292,5	1,67	0,23
Errer	6187,5	8	773,4		

L'analyse de variance (tableau 14) montre un effet très significatif.

**Figure N°14 :** Corrélation entre la MO et l'accumulation du Zinc par les vers de terre.

Les matières organiques du sol est corrélée Négativement avec les concentrations du Cuivre dans les vers de terres ($r = -0,26$) comme le montre la Figure N°14.

• Cas du Cuivre

Dans les sols, le cuivre se fixe préférentiellement sur la matière organique (cela concerne de 25 à 50 % du cuivre), la plus grande partie du cuivre reste fortement adsorbée dans les quelques centimètres supérieurs du sol, spécialement sur les matières organiques présentes (Adriano., 2001. et al ; In Zerrouki., 2012).

Après le dosage du zinc dans les vers de terres, les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tab.15).

Tableau 15: Analyse de la variance à un seul facteur: cas de matière organique.

	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyen Carré	F	P
MO%	75,57818	13	5,81371	1,41798	0,316748
Erreur	32,80000	8	4,10000		

L'analyse de variance (tableau 15) montre un effet très significatif.

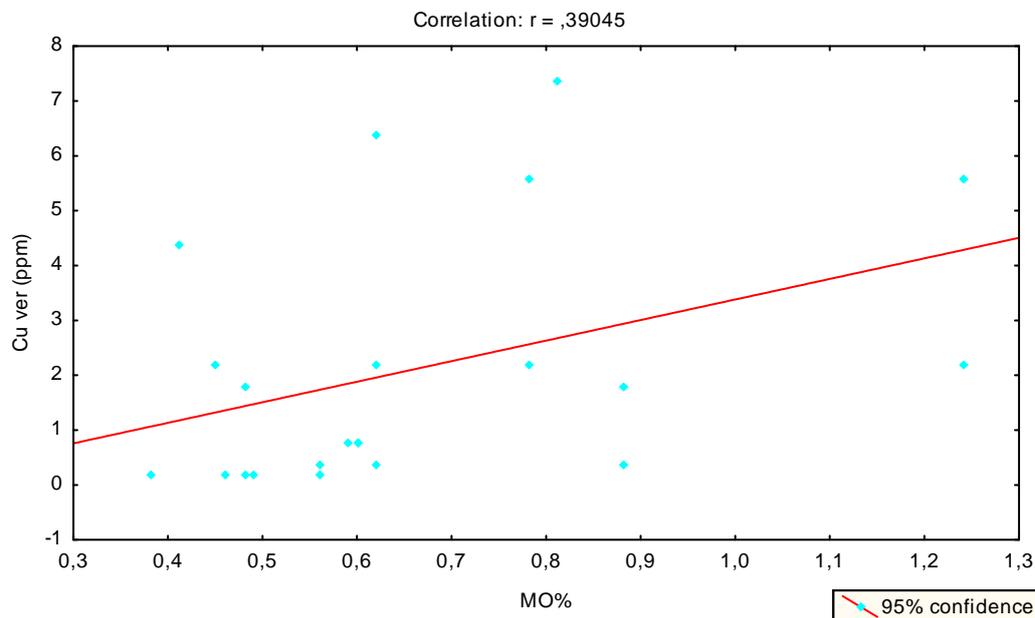


Figure N°15 : Corrélation entre les Matières Organiques et l'accumulation du Cuivre par les vers de terre.

Les matières organiques du sol est corrélée positivement avec les concentrations du Cuivre dans les vers de terres ($r = 0,39$) comme le montre la Figure N°15,

La quantité, la qualité et la localisation des matières organiques sont des facteurs importants pour les vers et dépendent surtout, dans les parcelles agricoles, qui se nourrissent de matière organique plus ou moins décomposée, à la surface ou dans le sol. (Céline ., 2008). Ils sont très importants dans les processus de pédogénèse, principalement en raison de leur consommation de matière organique qu'ils vont fragmenter et mélanger intimement aux particules minérales pour former des agrégats aqueux stables (Brown ., 2000). D'une manière générale, les vers de terre diminuent la taille des particules organiques et minérales. Plus de 50% des agrégats présents en surface du sol sont issus des vers de terre.

III.4. Corrélation : Elément Trace Métallique ver de terre – Elément Trace Métallique sol

Les vers de terre ont un contact intime avec le sol que ce soit au niveau de leur derme (contact externe) ou lors de l'ingestion (contact). Ils sont donc susceptibles d'accumuler les polluants présents dans le sol, selon leur classe écologique (endogée, épigée ou anécique), les vers de terres sont plus ou moins sensibles aux éléments traces métalliques ils consomment de grandes quantités de matières organiques ces espèces ont été largement employées dans diverses expériences étudiant leur influence sur la biodisponibilité des métaux dans le sol, pour les plante ou pour les vers eux même. Généralement, les études portant sur ces vers rapportent une augmentation de la disponibilité des métaux présents dans le sol en leur présence. (Tomlin. ,1992. In Ulrike., 2009).

- **Cas du Zn**

Après le dosage du zinc dans les vers de terres, les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Figure N° 16).

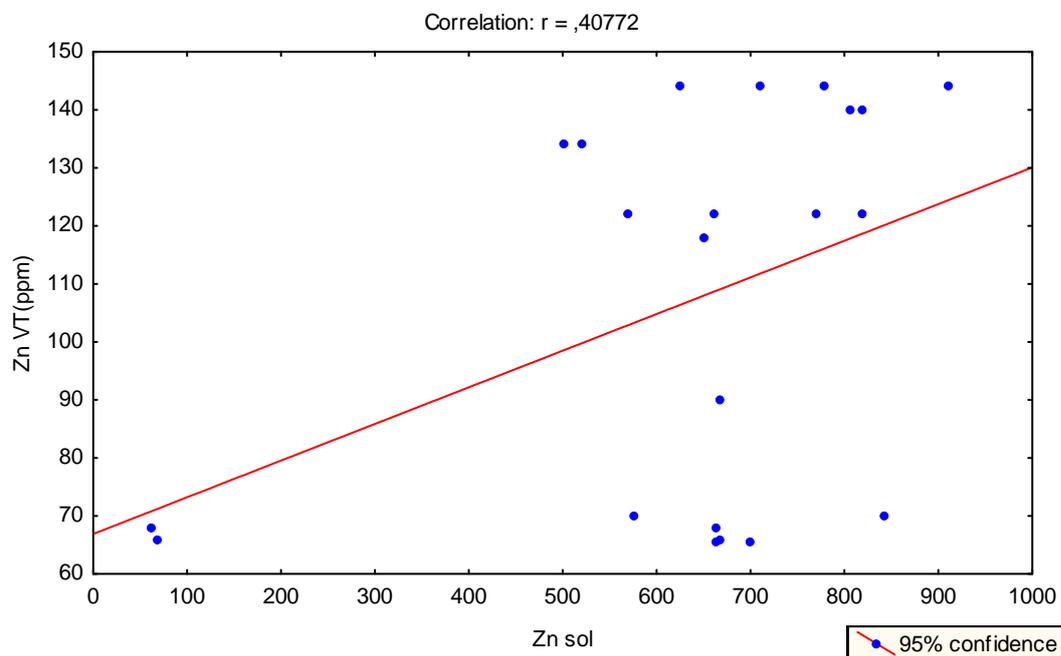


Figure N°16 : Corrélation entre le Zinc du sol et le Zinc des vers de terre.

- **Cas du Cuivre**

Après le dosage du zinc dans les vers de terres, les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Figure N° 16)

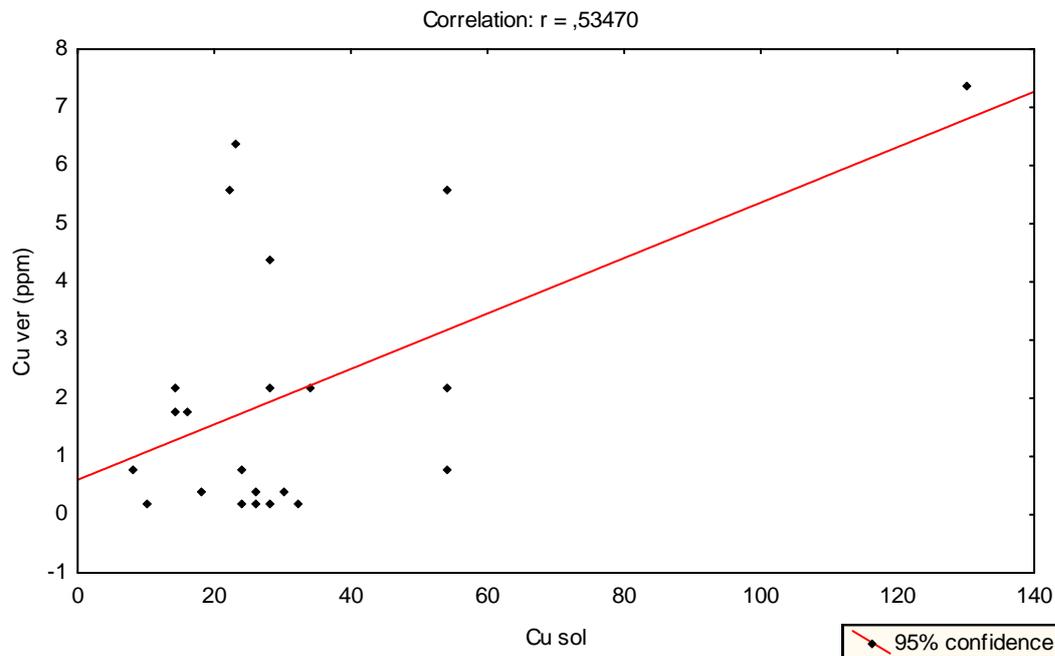


Figure N°17 : Corrélation entre le Cuivre du sol et le Cuivre des vers de terre.

La capacité des lombriciens à accumuler les métaux est reconnue dès la fin du 19^{ème} siècle ; les espèces *Lumbricus* terrestres sont d'avantage en contact avec les polluants puisqu'elles creusent profondément dans le sol. elles ont un contact intime avec le sol que ce soit au niveau de leur derme (contact externe) ou lors de l'ingestion (contact). Ils sont donc susceptibles d'accumuler les polluants présents dans le sol selon leur classe écologique (endogée, épigée ou anécique), (Langdon et Al., 2003 In Ulrike ., 2009).

Ces résultats montrent que les vers de terres représentent l'espèce écologique influençant le plus la biodisponibilité des métaux lourds. Cependant, cette influence peut se traduire par une augmentation ou une diminution de la disponibilité selon l'élément étudié. (Ulrike., 2009).

Conclusion générale

Conclusion générale

La prise de conscience du mauvais état sanitaire des sols conduit évidemment à la question de savoir quels sont les risques, pour la santé publique et pour les écosystèmes, dans chaque situation de pollution. D'une façon générale, la notion de risque inhérent à un polluant quelconque est intimement liée à sa possibilité de transfert vers l'organisme cible.

Concernant les métaux lourds, leurs effets sur les écosystèmes locaux et les mécanismes de leur transfert, du sol aux organismes vivants (notamment les invertébrés), sont encore mal compris. Il est donc très difficile de prévoir leurs effets à long terme, de modéliser le devenir des polluants d'un site contaminé, d'en évaluer les risques et donc de choisir une stratégie de remédiation.

Depuis quelques années, les biotechnologies ont montré que l'utilisation des invertébrés peut constituer une solution supplémentaire par rapport aux techniques classiques.

Bioremédiation mise en œuvre intentionnelle par l'homme d'un processus biologiques pour la décontamination des sols pollués par des métaux lourds. Cependant l'accumulation des métaux lourds, par vers de terres, est influencée par leurs biodisponibilités dans la solution du sol.

Les vers de terres sont plus sensibles aux teneurs en métaux lourds que les autres invertébrés dans le sol, et leur capacité à accumulation souvent plus élevée que pour d'autres espèces animales. L'augmentation de la teneur en métaux lourds au-delà d'un certain seuil réduit la densité des vers et influe négativement sur leur croissance pondérale, leur développement sexuel et la production de cocons. Les risques associés aux sols pollués sont en effet étroitement liés à la biodisponibilité des éléments métalliques. Une fois absorbés, ils peuvent retourner dans le sol (cycle biogéochimique), s'il n'y a pas d'exportations.

Pour répondre à ces objectifs, la démarche adoptée dans le cadre de ce travail, a consisté d'étudier la possibilité d'utiliser des vers de terres pour décontaminer un sol, localisant à proximité des routes à fortes pression de trafic routier, pollué par le zinc et le cuivre d'origine routière

Le protocole expérimental consiste à déterminer les concentrations de ces métaux, dans 22 échantillons du sol et 22 échantillons des vers de terres (10g).

Les résultats trouvés montrent les horizons de surface, des sols routiers, sont fortement contaminés par le zinc ($638,50 \pm 213,51\text{ppm}$) qui dépasse les normes internationales et par le cuivre ($31,68 \pm 25,50\text{ppm}$).

Conclusion générale

Le transfert des Elément Trace Métallique vers les vers de terres est influencé par des paramètres physico-chimiques du sol, tels que le pH du sol, la CEC et la matière organique et l'humidité.

A pH faible, le Cu et le Zn ont plus disponibles d'être absorbés par les vers de terres dont on a trouvé pour *les vers* que les corrélations entre le pH et le Cu et le Zn sont négatives avec ($r = -0,15$) et ($r = -0,07$). Respectivement ; par contre, La CEC du sol et humidité sont corrélés positivement avec les teneurs des Zn dans les vers ($r=0,008$) avec le Cuivre ($r= -0,13$) pour l'humidité ($r=0,31$) avec le Cuivre ($r= -0,009$) Pour le MO% ($r= -0,26$), ($r=0,93$) avec le Zn et Cu respectivement

D'une manière générale, On conclut que les vers de terre diminuent le taux de contamination des sols par les Elément Trace Métallique. Donc les résultats montrent l'importance de l'utilisation des vers de terres dans le projet de bio remédiation des sites pollués.

Les références bibliographiques

Les références bibliographiques

- ✚ **Adriano, D.C.(2001).**Trace Metals in Terrestrial Environments : Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals, Springer-Verlag, New york, Second éd, P. 866.
- ✚ **Afnor., (1999).** Qualité des sols. Edition AFNOR ; p 566
- ✚ **Alloway, B.J. (1995).** The origin of heavy metals in soils. In: Alloway, B.J. (Ed.). Heavy metals in soils. Chapman & Hall, London., Pp : 38-57.
- ✚ **Alloway, B.J. (1995).** The mobilisation of trace éléments in soils. Proceeding contaminated soils, 3rd International Conférence on the Biogeochemistry of Trace Eléments, Paris, France, Pp: 15-19 May, P.133.
- ✚ **Alloway, B.J., Ayres, D.C. (1997).** Chemical Principles of Environmental Pollution. Blackie Academic and Profesional, an imprint of Chapman and Hall, London, P. 394.
- ✚ **Baise, D. (1997);** Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France) ; Ed INRA ; P. 408.
- ✚ **Baker, A.J.M., mcgrath, S., Reeves, R.D., Smith, J.A.C.(1998).** Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology of a biological resource for phyoremediation of metal-polluted soils. In: Terry N and Banuelos G Ss. Phytoremediation, Ann Arbor Press, Ann Arbor, MI
- ✚ **Benedetto, Di. (1997).**Dossier SAM 1997 « Les Métaux Lourds » ; Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. Pp : 5 et 8.
- ✚ **BOUAKKA, M., HASSAN, A. (2013).** Développement des annélides dans certains sols agricoles amendés avec les boues sèches de la station de traitement des eaux usées d'Ain Bouchekif (W.Tiaret); mémoire d'ingénieur d'État en science Agronomique; Université Ibn Khaldoun Tiaret; Pp : 19- 20.
- ✚ **Boukirat. D et Temar. N., (2012).** Etude de la bioaccumulation des éléments traces métalliques (Pb, Cu) par l'Orge *Hordeum vulgare* L. Et Tournesol *Helianthus annuus* L.-Etude comparative ; mémoire d'Ingénieur d'État en science Biologiques ; Université Ibn Khaldoun Tiaret ; p 88.
- ✚ **Céline P, (2008).** Modélisation de la dynamique d'une population de vers de terre *Lumbricus terrestris* au champ. Contribution à l'étude de l'impact des systèmes de culture sur les communautés lombriciennes ; p74.
- ✚ **Chedly, A. (2006).** Bio remédiation / Phytoremediation, Université De Tunis Institut Supérieur De l'éducation Et De La Formation Continue.SN 232.p.32

Les références bibliographiques

- ✚ **DAVID, Chr. (2013).** Risques Biologiques et Biodépollution des sols; INRS; département Expertise et conseil technique, prévention des risques biologiques. Pp 6.
- ✚ **DPAT, (2012).** Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire.
- ✚ **Duchaufour, P. (1997).** Pédologie, sol, végétation, environnement. (5^{ième} édition) ; Abrégés ; Paris; éd : Masson .Pp : 264- 266.
- ✚ **Geoffrey, M., Thibault, P. (2008).** Etude De Bio remédiation De Sédiments Contaminés Par Des Composés Organiques Nitroé Persistentes; École doctorale : Sciences de la Matière. P.31.
- ✚ **HUYNH, D. (2009).** Impacts des métaux lourds sur l'interaction plante/ ver de terre/ microflore tellurique ; Thèse de Doctorat : Ecologie microbienne université Paris est Ecole Doctorale Science de la Vie et de la Santé. P. 4.
- ✚ **Kabata-Pendias, A., Pendias, H. (1992).** Trace éléments in soils and plants; 2nd édition CRC press, Boca Raton, FL.P.225.
- ✚ **KENTOUR, M ., Nouar, B, . (2012).** La phytoremédiation des sols agricoles contaminés au Zinc (Zn) par la pollution routière à l'aide de Tournesol (*Helianthus annuus*) dans la ville de Tiaret ; Thèse d'Ingénieur : Université Ibn Khaldoun –Tiaret.
- ✚ **Loué, A.(1993).** Oligoéléments en agriculture. Editions Nathan. P.577.
- ✚ **Maatoug, M.(2007).** Détection de la pollution de l'air d'origine routière par certaines espèces végétales bio accumulatrices de quelques métaux lourds (Pb, Zn, Cu). Revue pollution atmosphérique .Pp :385-394.
- ✚ **Marion, V ., Daniel, C. (2014) .** Guide pratique auxiliaires de cultures Les vers de terre ; Chambre d'Agriculture de la Vienne. P.20.
- ✚ **Marschner, H. (1995).** mineral nutrition of higher plants. Second edition. Academic press, London.
- ✚ **Matíasmiguel, S. A. (2008).** Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers Approches géochimique, minéralogique et hydro chimique; Thèse de Doctorat de l'Université Toulouse III- PAUL SABATIER. P. 489.
- ✚ **Mudronja, S. (2007).** Les 7 métaux; P. 107.
- ✚ **ONS. (1998).** Office nationale de statistique.
- ✚ **Pagotto, C. (1999).** Etude sur l'émission et le transfert dans les eaux et les sols des éléments traces métalliques et des hydrocarbures en domaine routier; Thèse de doctorat ; Université de Poitiers. P.252.

Les références bibliographiques

- ✚ **PERCHET G. Th.(2008).** Etude de bioremédiation de sédiments contaminés par des composés organiques nitro persistants; Thèse de doctorat : Sciences de la Matière. Pp: 27- 28.
- ✚ **Pierre. R ., Vincent .J. (2000).** Introduction à la bioremédiation des sols, des eaux et de l'air ; Laboratoire de Microbiologie IRD; Ed; Université de Provence AIX-Marseille E.S.G.B.M.A - E.S.I.L. Luminy. P. 7.
- ✚ **Ramade, F. (2007).** Introduction à l'écotoxicologie; Ed EMD S.A.S. France.Pp : 334 - 337.
- ✚ **Sarmoum, M., Latreche, K ., Dahmane, N. (2005).** Bioaccumulation des trois métaux lourds (Plomb, Zinc et Cadmium), chez *Xanthoria parietina*, dans la région Algéroise; Thèse de doctorat USTHB.
- ✚ **SIRVEN J-B. (2006).** Détection De Métaux Lourds dans les sols par spectroscopie d'émission sur plasma induit par laser (LIBS) ; Thèse de Doctorat : lasers et matière dense l'université bordeaux 1 École Doctorale De Sciences Physiques Et De l'ingénieur ; P. 28.
- ✚ **Ulrike, J. (2009).** Etude des interactions entre la plante *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh et le ver de terre *Aporrectodea caliginosa* (Savigny) : Application à la phytoremédiation de l'arsenic et de l'antimoine ; Thèse de Doctorat. PARIS. P. 214.
- ✚ **URBATIA, (2012).** Urbanismes Tiaret.

Annexe

Les déferentes Aparails qui sont utilisées :



Dessiccateur



Bain sable



Four à moufle



Agitateur



Etuve



Balance



PH mètre



SAA