



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur

et de la Recherche Scientifique

Université de Tissemsilt

Faculté des Sciences et Technologies

Département des Science de la Nature et de la Vie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de

Master académique

Filière : **Ecologie et environnement**

Spécialité : **Protection des écosystèmes**

Thème

**La bioremédiation des sols pollués par
les métaux lourds dans la zone agricole
de Bougara**

Présenté par :

Mlle. RIAD Nour el houda

Mlle. HAID Maroua

Soutenu le : 12/06/2023

Devant le jury :

Mr.OUABEL H.	Président	MAA	Univ-Tissemsilt
Mr.TALEB Mohamed A.	Encadreur	MCA	Univ-Tissemsilt
Mr.MELIANI K.	Examineur	MAA	Univ-Tissemsilt

Année Universitaire : 2022-2023



Table des matières

Remerciement	
Dédicace	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
<i>Introduction</i> :.....	03
 <i>Chapitre 01 : Pollution des sols par les métaux lourds</i>	
1.1. Importance du sol :.....	05
1.2. Pollution du sol :.....	05
1.3. Métaux lourds :	06
1.3.1. Définition des métaux lourds :.....	06
1.3.2. Evolution dans le temps :	07
1.3.3. La classification des métaux lourds :	08
1.3.4. Effets des métaux lourds sur la santé humaine :.....	08
1.3.5. Les sources des métaux lourds dans l'environnement:	08
1.3.6. Toxicité des métaux lourds :	09
1.3.7. Interaction plantes - métaux lourds :.....	09
1.3.7.1. Reactive oxygene species ROS :.....	10
1.3.7.2. Tolérance aux métaux lourds chez les végétaux :.....	10
 <i>Chapitre 02 : La bioremédiation</i>	
 <i>2.1. La bioremédiation des métaux lourds</i>	
2.1.1. Bioremédiation :.....	12
2.1.1. Bio remédiation in situ :.....	13

2.1.1.1. Bioremédiation intrinsèque :	13
2.1.1.2. Bioventing :	13
2.1.1.3. Biosparging:	13
2.1.1.4. Bioaugmentation :	14
2.1.1.5. Biostimulation :	14
2.1.2. Bio remédiation ex situ :	14
2.1.2.1. Bioréacteurs à boues :	15
2.1.2.2. Biopiles de sol :	15
2.1.2.4. Landfarming :	15
2.1.2.3. Compostage :	15

2.2. La phytoremédiation des sols pollués

2.2.1. Définition :	17
2.2.2. Principes de la Phytoremédiation :	17
2.2.3. Les différents techniques de la phytoremédiation :	17
2.2.3.1. Phytoextraction :	18
2.2.3.2. Phytostabilisation :	19
2.2.3.3. Rhizofiltration :	19
2.2.3.4. Phytovolatilization :	19
2.2.4. Plantes phytoremédiantes :	20

Chapitre 03 : La zone d'étude

3.2. Identification de la zone d'étude:	21
3.2. Caractéristiques de la zone d'étude :	22
3.2.1. Caractéristiques édaphiques :	22
3.2.2. Caractéristiques Hydrologiques :	22
3.2.3. Caractéristiques pédologiques :	23
3.2.4. Climat :	23

3.2.5.Climagramme d'EMBERGER :	24
3.2.6.Les enjeux de la zone d'étude :	25
3.2.7.La pollution du sol :	26

Chapitre 04 : Matériel et méthodes

4.1.Objectif :	27
4.2.Matériel et produits utilisés :	27
4.3.Méthode de Travail :	28
4.3.1.Prélèvement d'échantillons :	28
4.3.2.Analyse physico-chimique :	28
4.3.3.Dosage des métaux lourds :	31
4.3.4.Préparation de pastille :	33
4.3.5.Calibration de l'appareil XRF de Marque Rigaku :	33
4.3.6.Plantation :	36
4.3.7.Plantation de Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>) :	37
4.3.8.Plantation de tournesol (<i>Helianthus Annuus</i>) :	37
3.4.9. Dosage des métaux lourds après plantation :	38

Chapitre 05 : Résultats et discussion

5.1. Identification du sol de la zone d'étude :	39
5.2. Test du calibrage MCA de l'appareil :	40
5.3. Analyse des métaux lourds dans le sol :	41
5.4. Analyse des métaux lourds les différentes parties des plants :	42
5.4.1. Etude de l'accumulation du Nickel (Ni) :	42
5.4.2. Etude de l'accumulation du Zinc (Zn) :	43
5.4.3. Etude de l'accumulation du Cuivre (Cu) :	44
5.4.4. Etude de l'accumulation du Chrome (Cr) :	44
5.4.5. Etude de l'accumulation du Plomb (Pb) :	45
5.4.6. Etude de l'accumulation du Cadmium (Cd) :	46

5.5.Synthèse de la culture des deux espèces :.....46

Conclusion :48

Annexe

Résumer

Remerciement

Nous remercions le Dieu de nous avoir donné assez de force et de courage pour mener à terme ce modeste travail.

Nous sincères gratitudes à notre promoteur **Mr. TALEB Mohamed A** on le remercie pour la qualité de son encadrement, pour sa patience, sa rigueur scientifique, son suivi et son encouragement durant notre préparation de ce mémoire.

Nous tenons à remercier le Professeur **Mr. OUABEL H** d'avoir accepté de présider ce jury. Nous voudrions particulièrement remercier le professeur **Mr. MELIANI K** pour ces conseils et pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous vifs remerciements adressent également aux : **Mr. BEKKI K** d'avoir nous aider et de nous à donner des documents en rapport avec notre travaille.

Nous remercions tous les ingénieurs de laboratoire de l'université de **TISSEMSILT** et tous les ingénieurs de laboratoire de recherche de chimie physique des macromolécules et interfaces Biologiques (LCPMIB) de l'université **MUSTAPHA STAMBOULI**.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants dans notre formation de master et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant nos recherches.

Nous remercions nos très Chers parents, qui ont toujours été là pour nous. Vous nous avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance.



Dédicace

Je dédie ce travail en témoignage de mon profond amour :

A Mon cher papa « **MOHAMED** » Je suis très fière d'être votre fille et de pouvoir enfin réaliser, ce que vous avez tant espéré et attendu de moi. Votre patience, vos conseils précieux ainsi que votre confiance en moi ont été pour beaucoup dans ma réussite.

A Ma chère maman « **FATMA** » Si dieu a mis le paradis sous pieds des mères, ce n'est pas pour rien. Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence. Puisse dieu le plus puissant te préserver et t'accorder santé et longue vie pleine de bonheur.

A Ma princesse et l'amour de mon cœur, ma nièce « **RAWAN** ».

A Mes chers frères « **AHMED, ABD ELKADER** » merci pour leur soutien moral.

A Mes chères sœurs « **KHADIDJA, BAKHTA, FATIMA** » merci d'avoir été avec moi tout au long de mes études.

A Ma chère cousine « **FARIDA** » merci pour leur amour.

A Mon binôme « **NOUR EL HOUDA** » merci pour les moments de joies et de stressé passé ensemble.

A Mon seconde moitié « **FATIMA** » merci de m'avoir encouragé et d'être à mes cotes aux moments les plus difficiles.

A Mes amies proches « **NADJIBA, HAYET, WARDA, AYMEN, OUSSAMA, SALEH** » pour leur patience, je vous souhaite une vie plein de succès, de joie et de bonheur.

A tous les étudiants de notre promotion « **2022-2023** » sans exception.

Maroua



Dédicace

Je teins c'est grand plaisir qui je dédie modeste travail :

A celui qui m'a manqué pendant de nombreuses années, à celui qui m'a vu comme un rêve et aujourd'hui c'est une réalité à mon cher père «**KOUIDER** », je souhaitais que tu sois avec moi maintenant, pour être fier de moi et voir ta fille obtienne son diplôme aujourd'hui.

A ma très chère mère «**FATMA** » celle qui m'a transmis l'a vie, le courage et l'amour pour leur soutien morale et matériel pour ça tendresse et pour l'encouragement qu'elle a ma donnée pendant mon parcours, merci pour votre patience et votre sacrifice.

Amon frère unique «**ABD ELKADER** », qui m'a soutenu à chaque étape et ne s'est jamais fatigué pour mon bonheur.

A Mes chères sœurs «**IMANE, NOUR ELIMANE** », qui m'a soutenue dans toutes mes démarches pour en arriver là grâce à son soutien moral, car elle la source de mon bonheur et le secret de mon sourire merci.

A mon fiancé «**ISMAIL** »qui m'a soutenu et ma comblé de sa générosité sans limité.

A mon binôme «**MAROUA** » je suis reconnaissant pour le moment, le temps, les jours et tout ce qui a fait de toi mon ami tu es devenu quelque chose qui ne finit jamais et qui n'a pas de fin.

A Ma sœur, qui n' pas donné naissance à ma mère «**FATIMA** » merci de m'avoir encouragé et d'être à mes cotes à tout moment.

A Mes amies «**NADJIBA, HAYET, WAHIBA, FARIDA** ».

Nour el houda



❖ Liste des abréviations

As : Arsenic.

CE : Conductivité Electrique

Cd : Cadmium.

Cr : Chrome.

Cu : Cuivre.

DSA : Direction des Service Agricoles.

E : Essentiel.

Et : Ecart types

Fe : Fer.

Hg : Mercure.

K : Potassium.

KCL: Potassium chloride

MCA : Multi Channel Analyzer.

Mg : Managés.

MO : Matière Organique.

N: Azote.

Ni : Nickel.

ND : Non Déterminer

P: Phosphore.

P: Précipitation annuelle.

Pb : Plomb.

PF: Paramétrés fondamentaux

PH : Potentiel Hydrogène.

Q : Quotient pluviométrique.

ROS : Reactive Oxygen Species.

Se : Sélénium.

T: Toxique.

XRF: Fluorescence à rayon X

Zn: Zinc.

❖ Listes des figures

Figure 1.1: Représentation schématique Origine de la pollution du sol.....	06
Figure 2.1: Techniques de biosparging.....	14
Figure 2.2: Techniques de biosparging.....	18
Figure 3.1: Localisation de barrage Bougara dans la wilaya de Tissemsilt.....	21
Figure 3.2: Barrage Bougara dans la wilaya de Tissemsilt.....	22
Figure 3.3: Climagramme d'Emberger.....	25
Figure 3.4: Irrigation avec les eaux du barrage.....	26
Figure 4.1: Sites de prélèvement des échantillons de sol.....	28
Figure 4.2: Mesure du pH à l'aide d'un pH mètre.....	29
Figure 4.3: Mesure de conductivité.....	30
Figure 4.4: Analyse granulométrique du sol.....	31
Figure 4.5: séchage et broyage des échantillons de sol pour le dosage des ETM.....	32
Figure 4.6: Mélange échantillon-acide borique avant et après broyage.....	33
Figure 4.7: Pastilles préparées au moyen de la presse hydraulique.....	33
Figure 4.8: Perle jaune utilisée lors de l'étalonnage spécial MCA.....	34
Figure 4.9: Pré germination des graines de la tomate.....	37
Figure 4.10: Repiquage des plantules de la Tomate dans les alvéoles dans la serre...37	
Figure 4.11 : Plantation du Tournesol en date du 04-03-2023 au niveau du laboratoire.....	38
Figure 5.1 : Différence de concentration de Ni (mg/kg).....	42
Figure 5.2 : Différence de concentration de Zn (mg/kg).....	43
Figure 5.3 : Différence de concentration Cu (mg/kg).....	44

Figure 5.4 : Différence de concentration de Cr (mg/kg).....	45
Figure 5.5 : Différence de concentration de Pb (mg/kg).....	45
Figure 5.6 : Différence de concentration de Cd (mg/kg).....	46

❖ Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Classification périodique des éléments.....	07
Tableau 1.2 : Classification de quelques métaux lourds selon leur densité et leur toxicité.....	08
Tableau 3.1 : Les données pluviométrique de la zone d'étude.....	23
Tableau 3.2 : Climagramme d'Emberger	25
Tableau 4.1 : Calibrage par les pièces de monnaies.....	35
Tableau 5.1 : Résultats de l'analyse des différentes pièces de monnaies.....	40
Tableau 5.2 : Concentration des ETM dans le sol (en mg/kg).....	41
Tableau 5.3 : Moyenne des concentrations des ETM (mg/kg) dans les plants.....	47



Introduction

Introduction :

Le sol est un élément essentiel de la biodiversité terrestre et joue un rôle crucial dans de nombreux processus écologiques. Malheureusement, les activités humaines ont un impact significatif sur la pollution des sols.

Les activités agricoles, telles que l'utilisation intensive d'engrais, de pesticides et de fertilisants, peuvent entraîner une contamination des sols par des produits chimiques nocifs. Les rejets industriels, tels que les déchets toxiques et les émissions de gaz polluants, peuvent également contribuer à la pollution des sols

La présence de métaux lourds dans les sols peut avoir de graves conséquences sur la fertilité des sols et la productivité agricole. Les métaux lourds tels que le plomb, le cadmium, le mercure, l'arsenic, entre autres, sont des polluants persistants qui peuvent s'accumuler dans les sols au fil du temps.

Ces métaux lourds peuvent altérer la structure du sol en provoquant des modifications physico-chimiques qui réduisent sa capacité à retenir l'eau et les nutriments essentiels. Ils peuvent également perturber les processus biologiques du sol en inhibant l'activité des micro-organismes bénéfiques qui contribuent à la décomposition de la matière organique et à la libération de nutriments pour les plantes.

Selon des estimations, plus de 25% des terres agricoles dans le monde sont contaminées par des métaux lourds (Brian, 2013). Cette pollution est principalement due aux activités industrielles, minières, agricoles et urbaines, où les métaux lourds sont rejetés dans l'environnement sous forme de déchets, d'émissions atmosphériques ou de pesticides.

Le mercure, le plomb et le cadmium sont des métaux lourds particulièrement toxiques pour les êtres vivants, y compris les humains, en raison de leur potentiel d'accumulation dans les tissus et de leurs effets néfastes sur le système nerveux et d'autres organes (Fabrégat, 2010).

La décontamination de ces métaux lourds dans les sols est en effet une préoccupation majeure. Les méthodes traditionnelles de décontamination, telles que l'excavation et l'élimination des sols contaminés, sont souvent coûteuses, destructrices et peuvent causer d'autres problèmes environnementaux.

Cependant, de nouvelles méthodes de bioremédiation ont été développées et adoptées pour atténuer la pollution chimique, y compris la dégradation des métaux lourds dans les sols. La bioremédiation fait référence à l'utilisation de micro-organismes, de plantes ou de leurs enzymes pour dégrader ou transformer les polluants chimiques en substances moins toxiques.

La zone agricole de Bougara, qui s'étend sur une superficie de 798 hectares, est malheureusement confrontée à un grave problème de pollution des sols par les métaux lourds. Cette pollution est principalement causée par l'irrigation des terres agricoles avec les eaux provenant du barrage local. Les eaux du barrage, à leur tour, sont contaminées par les eaux usées qui y sont déversées. Cette contamination par les métaux lourds a un impact direct sur la qualité des sols de la zone agricole

Notre étude vise à évaluer l'efficacité de la tomate (*Solanum lycopersicum*) et du tournesol (*Helianthus annuus*) en tant que plantes de remédiation pour les sols contaminés par les métaux lourds dans la zone agricole de Bougara. Nous avons pour objectif de comparer les concentrations de métaux lourds dans le sol avant la plantation de ces plantes et des différentes parties des plants après une période d'environ 3 mois. De plus, nous cherchons à évaluer la capacité d'accumulation de ces plantes pour différents métaux lourds présents dans le sol en analysant les concentrations dans les différentes parties des plantes, notamment les racines, les tiges et les feuilles. Cette étude nous permettra de déterminer si la tomate et le tournesol sont efficaces pour réduire la concentration de métaux lourds dans le sol et d'évaluer leur potentiel en tant que plantes de remédiation dans la zone d'études contaminées.

La structure de ce travail est organisée de manière cohérente, en commençant par une revue bibliographique approfondie sur les métaux lourds et la bioremédiation dans le premier et le deuxième chapitre. Ensuite, nous décrivons la zone d'étude et présentons le matériel et les méthodes utilisés dans le troisième et le quatrième chapitre. Les résultats obtenus et leur interprétation font l'objet du cinquième chapitre. Enfin, nous concluons notre travail par une synthèse générale, qui résume les principales conclusions et met en évidence l'importance de nos résultats. Cette structure permet de suivre une progression logique et de fournir une vue d'ensemble complet de notre étude.

À travers cette étude, notre objectif est de fournir des informations précieuses sur ce sujet.



*Chapitre 01 : Pollution
des sols par les métaux
lourds*

1. Pollutions des sols par les métaux lourds :

1.1. Importance du sol :

C'est une matrice complexe composée de fragments de roche, de particules de différentes tailles (sable, limon, argile), des débris animales et végétales. Les espaces entre ces éléments (pores) sont occupés par l'eau et l'air, mais aussi par la multitude de micro-organismes qui y vivent (Brian, 2013). Le sol est un milieu vivant qui abrite une incroyable diversité d'organismes vivants atteignant 25% de la diversité actuellement décrite sur terre (Brian, 2013 ; Imtiaz et *al.*, 2016). Il remplit de nombreuses fonctions essentielles à la vie :

- Les sols sont une source de nutrition (Bliffert et Peraud, 2004).
- Les sols sont des filtres et des tampons qui fournissent de l'eau potable et régulent les inondations (Umme et *al.*, 2016).
- Les sols sont impliqués dans le cycle de l'azote (N), du phosphore (P) et du potassium (K), qui sont essentiels à la croissance des plantes et des cultures (Umme et *al.* 2016).
- C'est aussi un témoin de notre histoire (fouilles archéologiques) (Vodyanitskii, 2016).

1.2. Pollution du sol :

La pollution des sols se manifeste par de fortes concentrations de composés potentiellement dangereux (métaux lourds, hydrocarbures, solvants halogénés) pour l'environnement et la santé (Huamain et *al.* , 1999).

L'origine anthropique de la dégradation des sols est généralement due à diverses activités humaines (de l'agriculture à l'industrie) qui appauvrissent le sol de la matière organique, des éléments minéraux et des micro-organismes, le transformant en sol contaminé (Qi et *al.*, 2015). Certaines sources anthropiques de dégradation des sols sont (**Figure 1.1**) :

- La déforestation et les incendies de forêt entraînent une perte de végétation et accélèrent l'érosion des sols (Wenyu et *al.*, 2018).
- Le trafic industriel et automobile émet de grandes quantités de déchets toxiques et de polluants riches en métaux lourds (Pengyan et *al.*, 2018).

- Les boues d'épuration, les déchets industriels et domestiques sont déposés et accumulés au sol dans des décharges autorisées ou non contrôlées (Pengyan et *al.*, 2018).

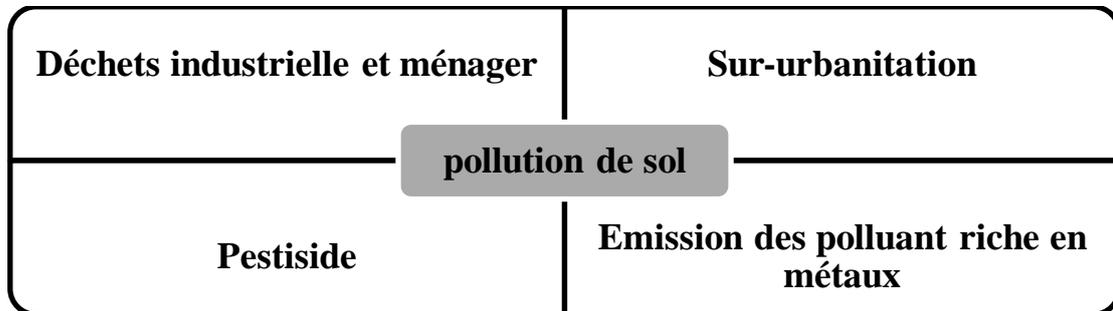


Figure 1.1 : Représentation schématique Origine de la pollution du sol.

Les sols contaminés sont à leur tour une source possible de diffusion directe ou indirecte de polluants dans l'environnement par l'eau, la poussière dans l'air ou par des organismes qui transfèrent des polluants le long de la chaîne alimentaire. Les conséquences sont avant tout des atteintes à la biodiversité végétale et animale et à l'équilibre des écosystèmes dans divers milieux (Lei et *al.*, 2016).

1.3. Métaux lourds :

Les métaux lourds jouent un rôle vital dans la nature car ils sont essentiels à la croissance normale des plantes. Ces métaux lourds participent également aux fonctions de base de la réaction d'oxydation, des électrons de transfert et du métabolisme de l'acide nucléique, et font partie de plusieurs enzymes.

La disponibilité de ces métaux de base dans le milieu est très importante, mais leurs concentrations excessives peuvent provoquer plusieurs effets toxiques par conséquent.

1.3.1. Définition des métaux lourds :

Ce sont des éléments métalliques dont la masse volumique est plus haut que 5g/cm³. Les métaux pour lesquels des mesures de contrôle et de réduction des émissions dans l'ensemble des compartiments air, eau, sols ont été mises en place aux niveaux international, européen et national, regroupent un ensemble de composés métalliques reconnus pour leurs effets toxiques. La Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance a été la première à suivre les métaux dans l'environnement et à établir des protocoles internationaux pour

réduire les émissions de trois métaux lourds (*Cadmium* (Cd), *Mercur*e (Hg), *Plomb* (Pb)), d'après Aarhus en 2012. Les Parties sont tenues de déclarer les émissions atmosphériques de ces trois métaux et sont encouragées à le faire pour de nombreux autres métaux :

- *Arsenic* (As)
- *Chrome* (Cr)
- *Cuivre* (Cu)
- *Manganèse* (Mg)
- *Nickel* (NI)
- *Sélénium* (Se)
- *Zinc* (Zn)

L'union Européenne a proposé la définition retenue par le droit européen et les lois des États membres : « Par métal lourd, on entend tout composé d'antimoine, d'arsenic, de cadmium, de chrome hexa valent, de cuivre, de plomb, de mercure, de nickel, de sélénium, de tellure, de thallium et d'étain, ainsi que comme tout composé de ces métaux sous forme de matériaux, à condition qu'ils soient classés comme substances dangereuses » (**Tableau 1.1**).

Tableau 1.1 : Classification périodique des éléments (Fourest, 1993).

Bloc S												Bloc p					
H		■ Métaux lourds de densité > 5															He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	Bloc d										Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Te	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Bloc f														
Lanthanides			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
Transuraniens			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Cf	Bk	Es	Fm	Md	No	Lr	

1.3.2. Evolution dans le temps :

Les métaux lourds comme tous autres métaux ont connu une augmentation incessible durant ces dernières années vu leurs importances dans l'industrie et le développement technologique que connaît le monde actuel.

1.3.3. La classification des métaux lourds :

Les métaux lourds peuvent être classés en se basant sur leur densité (Huynh, 2009) et selon leurs effets physiologiques et de toxicité donc on distingue deux types d'ETM (métaux toxiques et métaux essentiels ou micronutriments) (**Tableau 1.2**) :

Tableau 1.2 : Classification de quelques métaux lourds selon leur densité et leur toxicité (Adriano, 2001).

Métaux	Plantes	Animaux	Densité
Cd	T	T	8,65
Cr	-	E	7,20
Cu	E	E	8,92
Ni	T	E	8,90
Pb	T	T	11,34
Zn	E	E	7,14

1.3.4. Effets des métaux lourds sur la santé humaine :

Parmi les éléments chimiques minéraux, les métaux occupent une place prépondérante dans notre monde moderne car ils interviennent dans la plupart des secteurs d'activité. Par ailleurs, ils sont, pour beaucoup d'entre eux, indispensables au monde vivant (Fer, Zinc...) parfois en très faible quantité (oligo-éléments essentiels). Certains de ces oligo-éléments (Chrome, Nickel, Manganèse...) indispensables à petite dose, deviennent toxiques à forte concentration. Enfin, il y a des métaux comme le Mercure, le Plomb et le Cadmium qui sont uniquement toxiques pour les organismes vivants (PICOT, 2002). L'intoxication au Cadmium, chez la femme enceinte, a été liée à la diminution, de la durée de la grossesse, du poids du nouveau-né et récemment, au dysfonctionnement du système endocrinien et/ou immunitaire chez l'enfant (SCHOETERS *et al.*, 2006).

1.3.5. Les Sources des métaux lourds dans l'environnement :

Leur présence dans les sols peut être naturelle ou anthropogénique.

1.3.5.1. Origine naturelle :

Les métaux lourds sont naturellement présents dans les roches et sont libérés lors de l'altération pour former le fond géochimique. Les principales sources naturelles sont l'altération minérale, l'érosion et le volcanisme (Bourrelier et Berthelin, 1998). Les

concentrations naturelles de ces métaux lourds dans le sol varient selon le type de roche, la vitesse d'altération (Singh et *al.*, 2003).

1.3.5.2. Origine anthropique :

L'activité humaine anthropique augmente considérablement la concentration de métaux lourds dans l'activité naturelle. Ces activités ont entraîné la diffusion de nombreux polluants métalliques toxiques de la croûte vers divers compartiments environnementaux (Teklić et *al.*, 2008). Par conséquent, les écosystèmes sont menacés par divers métaux lourds d'extraction et de raffinage des minéraux, utilisation d'engrais et de pesticides, fabrication de batteries, produits chimiques, traitement des déchets solides (y compris le traitement des boues d'épuration, irrigation des eaux usées, gaz d'échappement des véhicules et la plupart des activités industrielles (Teklić et *al.*, 2008).

1.3.6. La toxicité des métaux lourds :

Les métaux lourds sont des éléments chimiques cinq fois plus denses que l'eau. Les métaux lourds les plus souvent impliqués dans les intoxications humaines sont : Le plomb, le chrome, le fer et le manganèse sont requis par l'organisme en petites quantités, mais les mêmes éléments deviendront toxiques une fois qu'ils sont en grande quantité (Fallon, 2006). L'exposition aux métaux lourds, en particulier les composés métalliques qui ne jouent aucun rôle physiologique dans le métabolisme cellulaire, est potentiellement dangereuse. L'ingestion de métaux provenant de l'eau ou des aliments peut altérer le métabolisme d'autres éléments essentiels Zn, Cu, Fe, Se, etc. Étant donné que la plupart des métaux lourds peuvent former des complexes avec des particules organiques, l'accumulation benthique est généralement liée à la teneur en matière organique (Dell'anno et *al.*, 2003). La forme ionisée des métaux lourds est la forme toxique. Bien que les formes conjuguées et liées filtrées des métaux lourds semblent elles-mêmes non toxiques, ce sont les formes divalentes de ces métaux libérées de ces complexes qui sont responsables du cytotoxique. En général, les métaux et leurs composés altèrent le fonctionnement du système nerveux central, du système hématopoïétique, du foie etc...

1.3.7. Interaction plantes – métaux lourds :

Les métaux lourds pénètrent dans les plantes principalement à partir des solutions du sol par les racines et se déplacent le long de la chaîne alimentaire. La plupart des métaux lourds ingérés sont stockés dans les racines, où ils sont précipités sous forme de

sels métalliques insolubles, ancrés aux parois cellulaires par de la pectine chargée négativement, et soit précipités dans les espaces intercellulaires, soit accumulés dans des vacuoles (Muhammad et *al.*, 2015).

L'accumulation excessive de métaux lourds dans les tissus végétaux à plusieurs effets néfastes en affectant directement ou indirectement le métabolisme des plantes et réduisant ainsi, la productivité des plantes. L'accumulation de métaux lourds dans les tissus végétaux entraîne une germination réduite des graines, un allongement réduit des racines, une biomasse végétale réduite et une inhibition de la biosynthèse de la chlorophylle. Au sein des cellules, le plomb affecte la photosynthèse, la respiration, les réactions enzymatiques, la nutrition minérale et plusieurs autres facteurs physiologiques (Muhammad et *al.*, 2015). L'un des effets les plus courants de la toxicité des métaux lourds chez les plantes est la surproduction de ROS (*reactive oxygen species*). Ceci est le résultat de l'interférence des métaux lourds avec l'activité de transfert d'électrons.

1.3.7.1. Reactive oxygen species ROS:

Appelée (*espèces réactives de l'oxygène*) sont un groupe de radicaux libres, de molécules réactives et d'ions dérivés de l'O₂ (Asada et Takahashi, 1987). Les ROS sont produits par l'activité de transfert d'électrons des chloroplastes, des mitochondries, des membranes plasmiques ou comme sous-produit de diverses voies métaboliques localisées dans différents compartiments cellulaires. Dans des conditions de croissance normales, la production de ROS dans différents compartiments cellulaires est faible. Cependant, divers stress environnementaux tels que la sécheresse, la salinité, le froid et la toxicité des métaux peuvent perturber l'homéostasie cellulaire et augmentés la production lorsqu'ils sont maintenus dans une certaine mesure. Les ROS jouent deux rôles différents dans les plantes. À de faibles concentrations, il fonctionne comme une molécule de signalisation qui Médie de multiples réponses végétales chez les plantes, y compris des réponses en situation de stress. Des niveaux élevés de ROS causent des dommages oxydatifs aux lipides, aux protéines et à l'ADN, entraînant une altération des propriétés membranaires telles que la fluidité.

1.3.7.2. Tolérance aux métaux lourds chez les végétaux :

Certains éléments métalliques sont indispensables aux organismes vivants à faible concentration. À des concentrations élevées, cependant, il agit comme un facteur de stress qui provoque des changements dans les réponses physiologiques. Le terme «

sensibilité » décrit les effets du stress qui peuvent entraîner la mort des plantes. En revanche, le terme « tolérance » fait référence à une réponse de la plante qui permet aux plantes de survivre et de produire une progéniture face au stress métallique (Levitt, 1980). Deux stratégies principales sont impliquées dans ce phénomène de résistance.

- ✓ Stratégies d'évitement que les plantes utilisent pour se protéger du stress métallique en limitant leur apport.
- ✓ Stratégie de résistance. Il s'agit de réactions qui permettent de limiter les effets nocifs des métaux dans la plante.



Chapitre 02 :
La bioremédiation



2.1. La bioremédiation

2.1. BIOREMEDIATION DES METAUX LOURD :

Les nombreux cas de pollution par les métaux lourds génèrent autant de sites contaminés qu'il faut réhabiliter. Les méthodes physico-chimiques de dépollution de ces sites utilisées in situ et ex situ présentent désavantages d'être coûteuses et lourdes à mettre en œuvre. De plus, elles perturbent fortement l'activité biologique des sols et altèrent leur structure physique (Glick, 2007). Le besoin de nouvelles techniques économiquement compétitives et pouvant préserver les caractéristiques du sol s'est fait sentir et l'utilisation des biotechnologies s'est avérée être une alternative et de plus en plus sollicitée.

2.1.1. Bioremédiation :

Le terme "bioremédiation" est dérivé de la combinaison des mots "bio", qui se réfère à la vie et aux organismes vivants, et "remédiation", qui signifie résoudre un problème (Banerje et *al.*, 2013). Il représente une approche très prometteuse pour l'assainissement des sols contaminés par des composés organiques et inorganiques, réputés nocifs pour la santé humaine et l'environnement. La bioremédiation utilise des micro-organismes, tels que des bactéries, des champignons ou des plantes, pour dégrader, transformer ou éliminer ces polluants, rétablissant ainsi la qualité du sol. Cette méthode offre de nombreux avantages par rapport aux techniques traditionnelles de dépollution, car elle est souvent moins coûteuse, plus durable et respectueuse de l'environnement. De plus, la bioremédiation peut être adaptée à différents types de sols contaminés, ce qui en fait l'une des options les plus viables pour restaurer les écosystèmes affectés par la pollution.

Le procédé de la bio remédiation consiste à exploiter la capacité naturelle que possèdent de nombreux organismes vivants à dégrader les polluants en composés inertes (Vidali, 2001). Ces organismes peuvent être indigènes (déjà présents dans la zone polluée), ou exogènes (introduits au milieu), ou encore être prélevés directement sur le site contaminé, cultivés au laboratoire puis réintroduits dans le sol (Mulligan ; Yong, 2004).

La bio remédiation se déroule généralement en conditions d'aérobie, cependant l'application de systèmes de bio remédiation en conditions d'anaérobie permet la dégradation d'un certain nombre de molécules récalcitrantes (Charissou ; Lejeune, 2009).

2.1.1. Bio remédiation in situ :

La bioremédiation est une option très intéressante pour le traitement des sols contaminés, car elle implique l'utilisation de processus biologiques directement appliqués sur le site à dépolluer, évitant ainsi la nécessité d'excavation (Hanna, 2004). Ce type de traitement tire parti des capacités des microorganismes à dégrader les contaminants présents dans le sol. Les microorganismes, tels que les bactéries ou les champignons, sont capables de transformer les composés organiques et inorganiques nocifs en substances non toxiques ou moins toxiques. Cela permet de réduire les risques pour la santé humaine et l'environnement en éliminant efficacement les polluants. De plus, la bioremédiation est considérée comme une approche respectueuse de l'environnement, car elle favorise l'utilisation des processus naturels plutôt que de méthodes plus agressives (Banerjee et al., 2016). Plusieurs, sont les méthodes de la bioremédiation in situ citons ainsi :

2.1.1.1. Bio remédiation intrinsèque :

Alternativement appelée bio remédiation passive ou atténuation naturelle, la bio remédiation intrinsèque est un processus de dégradation naturelle qui ne dépend que du métabolisme des microorganismes natifs, pour détruire les contaminants dangereux, en n'utilisant aucune étape artificielle pour améliorer l'activité de biodégradation (Kumar et al., 2018).

2.1.1.2. Bio venting :

Le bio venting implique une stimulation contrôlée du flux d'air, fournissant de l'oxygène pour augmenter l'activité microbienne, et par conséquent améliorer la biorestoration (Brown et al., 2017).

2.1.1.3. Biosparging :

Dans le biosparging (**Figure 2.1**), l'air est introduit dans le sol pour favoriser la capacité de dégradation des microorganismes. Contrairement au bioventing, l'air est introduit à l'intérieur de la zone saturée, provoquant le mouvement ascendant des polluants volatils. L'efficacité du biosparging dépend de la perméabilité du sol, qui détermine la disponibilité des polluants pour les microorganismes ainsi pour la biodégradabilité des polluants (Godheja et al., 2019).

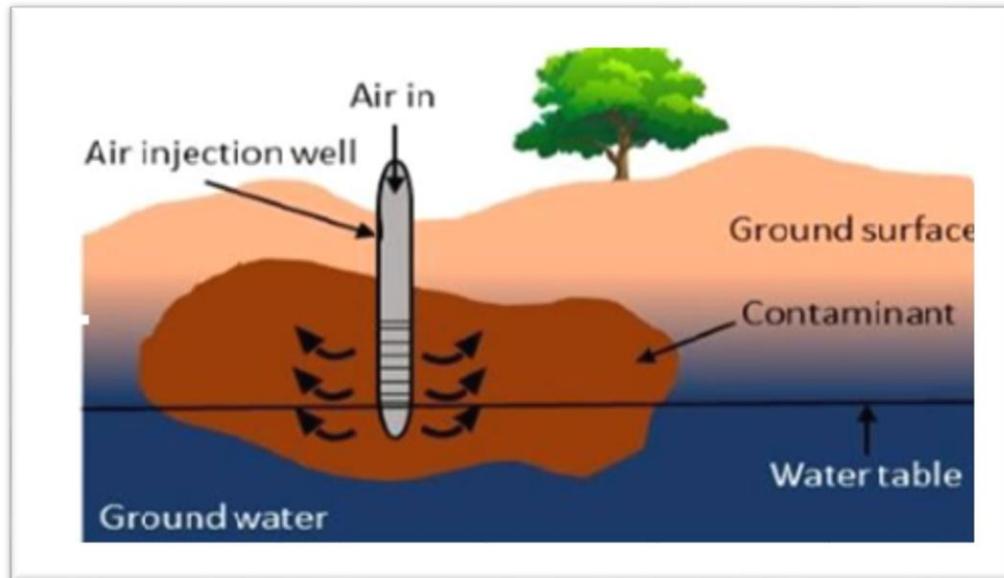


Figure 2.1 : Techniques de biosparging (Kumar et *al.*, 2018)

2.1.1.4. **Bio augmentation :**

La bio augmentation est une technique consiste à l'ajout de cultures de microorganismes à la surface du milieu contaminé pour augmenter la biodégradation des contaminants organiques. Elle est largement utilisée pour décontaminer les sites pollués par des hydrocarbures.

La bio augmentation est principalement efficace dans les sites où les concentrations des polluants sont très élevées (Lyouin et *al.*, 2001).

2.1.1.5. **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) (M Vidali , 2001).

2.1.2. **Bio remédiation ex situ :**

Les techniques ex-situ permettent un meilleur contrôle des conditions environnementales, conduisant à une augmentation du taux de biodégradation par rapport aux techniques de traitement in situ. De plus, grâce à la possibilité d'homogénéisation du sol pollué, l'opération est généralement plus uniforme et prend moins de temps. Cependant, ces techniques sont plus coûteuses en raison de

l'excavation, de l'assainissement du site et du traitement. De plus, l'excavation du sol entraîne une augmentation de la mobilité des polluants et de leur exposition (Azubuiké et al., 2018).

2.1.2.1. Bioréacteurs à boues :

Le terme " bioréacteur " fait référence à tout équipement ou installation manufacturée qui prend en charge un système. Les bioréacteurs à boues sont utilisés pour traiter les polluants d'hydrocarbures en toute sécurité et facilement. Les contaminants sont conservés dans un conteneur de confinement où, à l'aide de divers types de dispositifs pour mélanger les boues. Un mélange est obtenu consistant en un système triphasé solide, liquide et gazeux. Le biofilm formé stimule la biodégradation des polluants et augmente le niveau de biomasse (Salehi et al., 2017).

2.1.2.2. Biopiles de sol :

La bio remédiation par les biophiles consiste en l'empilement de sols contaminés dans des piles contenant des conditions optimales afin de stimuler l'activité des micro-organismes aérobie. Les éléments d'optimisation sont l'arrosage, l'aération et la lixiviation. Son utilisation est de plus en plus prise en compte grâce à ses caractéristiques de construction et au rapport coût bénéfice favorable qui permettent une bio remédiation efficace, à condition qu'un contrôle adéquat des nutriments, de la température et de l'aération soit assuré (Whelan,et al., 2015) .

2.1.2.3. Compostage :

Le compostage est un processus contrôlé de dégradation des constituants organiques d'origine végétale et/ou animale par une succession de communautés microbiennes évoluant en conditions du milieu, entraînant une montée en température et conduisent à l'élaboration d'une matière organique humifiée et stabilisée (Francou, 2004).

2.1.2.4. Landfarming :

Le landfarming est l'un des technologies de bio remédiation les plus élémentaires en raison de son faible coût.

Le landfarming peut être classé comme technologie ex-situ ou in-situ selon l'endroit où le traitement du lieu. Il existe certaines limitations et inconvénients liés à cette technique, tels que la nécessité d'un grand espace de travail, la limitation de l'activité

microbienne en raison d'un environnement défavorable, le coût d'excavation supplémentaire et la faible efficacité dans l'élimination des polluants inorganiques. L'un des principaux inconvénients de la mise en décharge sont la libération de composés organiques volatils dans l'environnement (Ortega et *al.*, 2018).



*2.2. La pyhtoremédiation des
sols pollue*

2.2. LA PHYTOREMÉDIATION DES SOLS POLLUE :

2.2.1. Définition :

La phytoremédiation est une technique corrective qui semble efficace contre un large éventail de contaminants organiques et inorganiques. Il peut être utilisé pour des substrats solides, liquides ou gazeux (Pilon ; Smits, 2005). La phytoremédiation est une option largement étudiée ces dernières années pour éliminer ce type de contamination sur de grandes surfaces où l'excavation n'est pas possible compte tenu des volumes envisagés (Janssen et *al.*, 2015).

La phytoremédiation est une technique hautement appréciée par rapport aux techniques conventionnelles. Il est également capable de maintenir le potentiel écologique du site et bénéficie d'une très bonne image publique (Macci et *al.*, 2016 ; Masciandaro et *al.*, 2013). Son principal inconvénient est que la reprise est lente, estimée à plusieurs années voire même plusieurs décennies (Evlard, 2013).

2.2.2. Principes de la Phytoremédiation :

La phytoremédiation consiste en l'utilisation de plantes et de leurs microbes associés et classée selon le mécanisme de remédiation appliqué au contaminant. (Mench et *al.*, 2010).

La stabilisation, l'extraction, la décomposition, la volatilisation et la filtration par les racines sont les principales actions de la plante pour la phytoremédiation (**Figure 2.2**). Leur principe est basé sur la décomposition des polluants en composés plus simples et moins toxiques qui sont utilisés par les plantes elles-mêmes ou par les microbes qui leur sont associés (Bert et *al.*, 2012).

2.2.3. Les différents techniques de la phytoremédiation :

La phytoremédiation implique la dégradation, l'élimination (par accumulation ou dissipation) ou l'immobilisation des contaminants (Bruce ; Pivetz, 2001).

La phytoremédiation est actuellement divisée en cinq domaines d'application différents (Pulford et Watson, 2003 ; Vavasseur et *al.*, 2003).

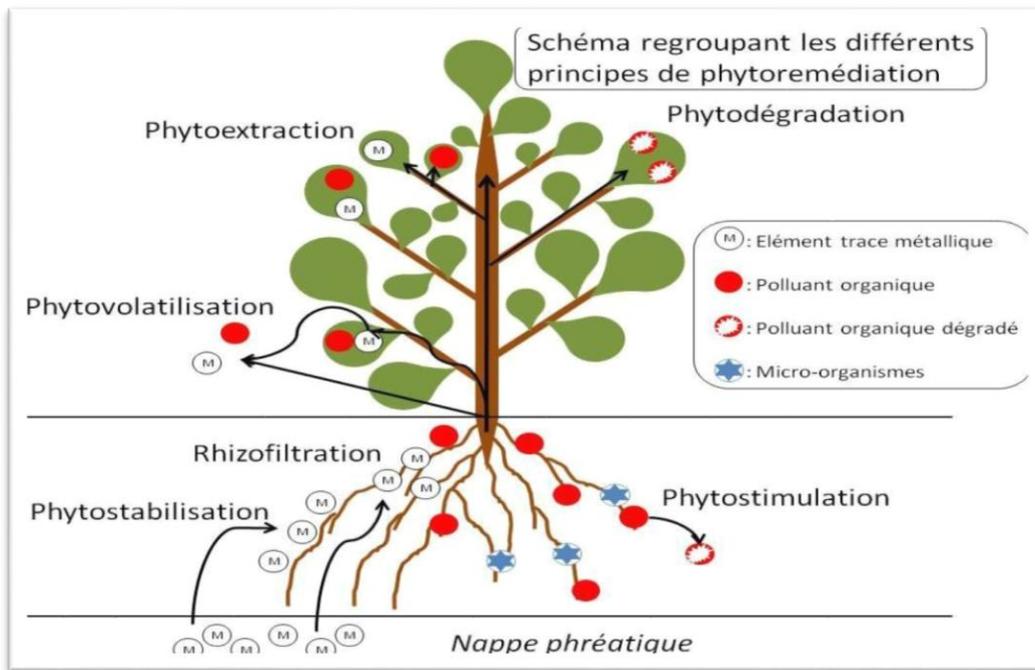


Figure 2.2 : Techniques de biosparging (Kumar et *al.*, 2018)

2.2.3.1. Phytoextraction :

La phytoextraction est une technique de dépollution basée sur la capacité des plantes à absorber les polluants du sol (ou de l'eau) par leurs racines, à les transporter jusqu'au sol et à les accumuler. Cette technique est particulièrement adaptée aux sols à contamination diffuse où les contaminants sont présents en surface dans des proportions modérées. En combinaison avec l'ajout d'agents chélateurs, il peut améliorer la mobilité et l'absorption des éléments dans les plantes (Huang et *al.*, 1997).

L'extraction botanique est influencée par les caractéristiques physiologiques et génétiques des plantes. Des observations récentes soulignent l'importance de la sélection des plantes, qui doit porter une attention particulière à certains critères (Phieler et *al.*, 2013) :

- (i) Croissance rapide et production élevée de biomasse.
- (ii) Tolérance aux métaux.
- (iii) Capacité à accumuler de grandes quantités de métaux au-dessus du sol.
- (iv) Système racinaire profond et étendu.
- (v) Caractéristiques du sol traité.
- (vi) Adaptable (natif ou adaptatif).

(vii) Nécessitent peu d'entretien.

La fraction enrichie en métal est ensuite soit recyclée par incinération, pyrolyse ou gazéification (Chalot et *al.*, 2012 ; Bert et *al.*, 2017), soit récupérée de l'ETM par chélation et utilisée par l'industrie, soit utilisée à des fins pharmaceutiques. (Mahar et *al.*, 2016).

2.2.3.2. Phytostabilisation :

La stabilisation des plantes vise à envahir le sol contaminé pour immobiliser les ETM dans le sol. Cette technologie réduit le transfert de contaminants vers les eaux souterraines et l'air. De plus, la couverture végétale limite l'érosion hydrique et éolienne d'une part et le contact direct avec les animaux et les humains d'autre part (Mahar et *al.*, 2016). Les ETM sont immobilisés dans la rhizosphère par divers mécanismes, notamment l'adsorption au niveau des racines, la précipitation dans la rhizosphère, la complexion et les changements d'état de valence des métaux (Bolan et *al.*, 2011).

Les contaminants ne sont pas extraits du sol et doivent être surveillés en permanence pour s'assurer qu'ils restent stables.

2.2.3.3. Rhizofiltration :

Ce dernier cas est très similaire au cas précédent. Nous sommes là pour traiter la pollution organique. Selon (Steckemann et *al.*, 2011).

«La décomposition des rhizomes fait référence à la dégradation de contaminants principalement organiques par l'action des racines et des Microbes associés (Steckemann et *al.*, 2011). Les plantes utilisées ne peuvent pas transmettre d'éléments toxiques à l'organisme. Par conséquent, l'efficacité de cette méthode dépend de l'importance de la vie microbienne présente dans l'appareil racinaire. Semblable à la photolyse, il s'agit ici de décomposer les polluants en substances moins toxiques et de les réintégrer dans le cycle de la matière.

Des plantes telles que la luzerne (*Medicago Sativa*) ainsi que le trèfle (*Trifolium repens*) peuvent être utilisées dans cette technique (Bert et *al.*, 2013).

2.2.3.4. Phytovolatilization :

La phytovolatilisation utilise les plantes pour déplacer les ETM du sol vers l'atmosphère. En effet, certains éléments (As, Hg et Se) peuvent exister sous forme

gazeuse dans l'environnement. Dans ce processus, l'ETM est absorbé par les racines, transporté vers les parties aériennes et converti en une forme volatile avant d'être rejeté dans l'atmosphère.

Cette technique a d'abord été utilisée pour assainir les sols contaminés par le mercure en le convertissant en $(CH_3)_2$ (Kabata ; Pendias., 2011).

2.2.4. Plantes phytoremédiantes :

Plus de 400 espèces végétales sont maintenant connues pour être des super accumulateurs des métaux, elles sont capables d'accumuler de fortes concentrations de métaux dans la biomasse aéroportée. Ces espèces sont des métallophytes et appartiennent à la végétation naturelle des sols riches en métaux. Il y a plus de taxons dans les super accumulateurs métalliques, qui sont plus de 11 genres et 87 espèces, citons : (*Astéracée, Brassicaceae, Caryophyllaceae, Cyperaceae, Cunouniaceae, Fabaceae, Flacourtiaceae, Lamiaceae, Poaceae, Violaceae et Euphobiaceae,*) (Prasad et al., 2004).

D'autre part, certaines plantes sont avérées tolérantes aux métaux, appelées «excluseurs», qui limitent l'absorption et/ou le mouvement des métaux des racines aux pousses (Brooks, 1998). La plupart d'entre eux (317 espèces) sont associés à une suraccumulation de nickel. Les deuxièmes plus courantes sont les espèces associées à une suraccumulation de zinc, mais elles se trouvent en nombre beaucoup plus faible. Les autres métaux touchés par la suraccumulation sont le cadmium, le plomb, le cuivre, l'arsenic, l'or, le cobalt, le manganèse et le thallium (Brooks, 1998).



*Chapitre 03 : La zone
d'étude*

3.1. Identification de la zone d'étude :

La zone d'étude correspond au périmètre agricole irrigué par le barrage de Bougara, qui s'étend sur une superficie d'environ 798 hectares. Ce périmètre agricole bénéficie d'une valeur considérable grâce à la présence de cette source d'eau, située en aval du barrage de Dahmouni sur le même cours d'eau de Nhar Ouassel. La zone couvre les wilayas de Tissemsilt et de Tiaret, à environ dix kilomètres au sud de la ville de Tissemsilt (**Figure 3.1**).

Le barrage de Bougara est principalement alimenté par les eaux usées traitées provenant de la station d'épuration de Tissemsilt, à raison de 20 000 mètres cubes par jour. Cette source d'eau est cruciale pour soutenir les activités agricoles dans la région et garantir l'irrigation des terres agricoles dans le périmètre concerné.



Figure 3.1 : Localisation de barrage Bougara dans la wilaya de Tissemsilt.

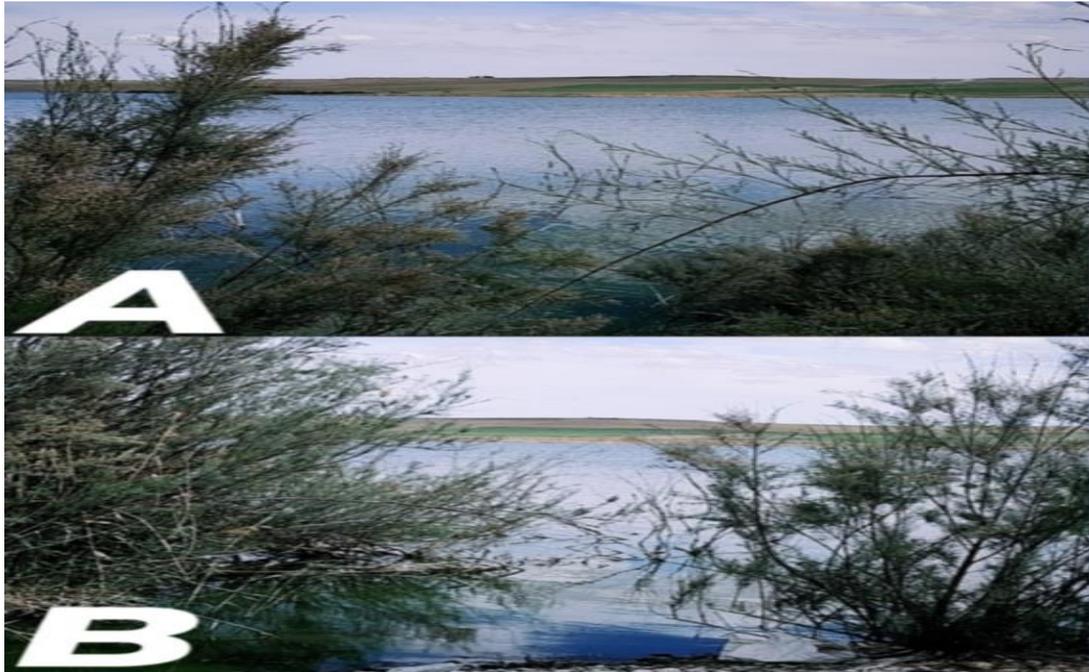


Figure 3.2 (A, B) : Barrage Bougara dans la wilaya de Tissemsilt (le 30-04-2023).

3.2. Caractéristiques de la zone d'étude :

3.2.1. Caractéristiques édaphiques :

La région environnant le barrage de Bougara abrite des terres agricoles de grande valeur. Ces terres sont principalement composées de sols sablonneux, avec des limons fins d'une couleur foncée. La culture des céréales, en particulier, a connu des rendements pouvant atteindre jusqu'à 25 quintaux par hectare (DSA, 2007).

Cependant, au sud du barrage, on trouve des terres à faible rendement qui se caractérisent par un relief accidenté et une apparence rocheuse. Ces zones présentent des défis supplémentaires pour l'agriculture en raison de leur nature inhospitalière et de la difficulté d'exploiter les sols de manière productive (DSA, 2007).

3.2.2. Caractéristiques Hydrologiques :

Le barrage de Bougara joue un rôle crucial dans la régulation des eaux de l'Oued Nahr Ouassel en réduisant les risques d'inondations et en créant une réserve d'eau en amont de la structure. Les fonctions hydrologiques de ce réservoir sont multiples et comprennent notamment le prélèvement d'eau pour l'irrigation des terres agricoles environnantes. De plus, le barrage permet également le développement d'activités telles que l'aquaculture, le tourisme et la création d'un habitat propice à la faune. Ces utilisations diverses contribuent à la valorisation de la zone environnante et à la

conservation des ressources hydriques pour différents besoins (AECOM ; Tecsalt , 2010).

3.2.3. Caractéristiques pédologiques :

La région autour du barrage de Bougara présente une variété de types de sols. On y trouve principalement des sols calcaires.

La zone appartenant à Tiaret présente de sols riches en matière organique, notamment dans les zones humides, ce qui les rend très fertiles (AECOM ; Tecsalt, 2010).

3.2.4. Climat :

Les conditions climatiques d'un barrage sont déterminées par plusieurs facteurs, notamment sa situation géographique, les caractéristiques de la circulation atmosphérique et le relief de la région environnante (Ladjal , 2013).

3.2.4.1. Température :

Selon les données climatiques de l'ANBT, la température moyenne annuelle observée dans le bassin du barrage est d'environ 11.62° C. Les températures mensuelles minimales et maximales sont respectivement de -2 ° C et 28 ° C. le mois de Janvier et décembre partagent la température la plus basse, tandis que le mois de juillet est le plus chaud avec 28°C (ANBT,2020).

3.2.4.2. Pluviométrie :

La végétation est étroitement liée aux précipitations, qui jouent un rôle essentiel dans la détermination du climat local (Emberger, 1955). Dans la zone d'étude, le climat présente deux saisons bien définies : une saison humide avec un hiver froid et une saison sèche avec un été chaud. Cependant, comme c'est le cas dans de nombreuses régions du bassin méditerranéen, les précipitations ne sont pas uniformément réparties tout au long de l'année.

Tableau 3.1 : Les données pluviométrique de la zone d'étude (Abderrahim, 2016)

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin.	Juill.	Aout.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
P	54.4	54.3	51.26	38.1	32.0	10.85	1.85	8.61	24.5	32.3	51.5	47.4
Mm	1	8		5	2					4	1	4

3.2.4.3. Vent :

La zone d'étude est en effet caractérisée par des vents dominants qui soufflent du nord-ouest, et la présence marquante du Sirocco est notable pendant la saison estivale.

3.2.4.4. Gelée :

L'altitude locale et l'exposition jouent un rôle déterminant dans la présence de gel. Pour la zone d'étude, le phénomène de gel devient notable dès le mois de décembre. Cependant, les gelées tardives peuvent persister jusqu'en avril, ce qui constitue un facteur préoccupant pour les cultures.

3.2.4.5. Neige :

La neige, quoiqu'elle reste une source d'eau non négligeable, elle en demeure quasiment absente dans la zone d'étude ne dépassant guère les 6 jours par an.

3.2.5. Climagramme d'EMBERGER :

Le quotient d'Emberger est particulièrement adapté aux régions méditerranéennes dans lesquelles il permet de distinguer différents étages bioclimatiques. (Emberger, 1955) à préciser 5 étages bioclimatiques :

Humide, subhumide, aride, semi-aride et saharien et 4 variantes thermiques : A hiver froid $m < 0^{\circ}\text{C}$; A hiver frais $0 < m < 3^{\circ}\text{C}$; A hiver doux ou tempéré $3^{\circ}\text{C} < m < 5^{\circ}\text{C}$; A hiver chaud $m < 7^{\circ}\text{C}$.

La détermination de l'étage bioclimatique d'une zone se fait par le biais du climagramme d'Emberger. Le quotient pluviométrique et la température minimale moyenne permettent de positionner la région sur le climagramme.

Le quotient est calculé par la formule suivante :

$$Q2 = \frac{2000P}{M^2 - m^2}$$

D'où :

Q2: quotient pluviométrique ;

P: Précipitation annuelle en mm ;

M: Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud exprimée en K

m : Moyenne des températures minimales du mois le plus froid exprimée en K avec:
 $K = ^\circ C + 273,15$

Après calcul on obtient les résultats suivants.

$$P = 407,12 \text{ mm}$$

$$M = 36,64 + 273 = 309,64$$

$$m = 1,47 + 273 = 274,4$$

Donc $Q = 39,64$ et $3 < m < 5^\circ$

La valeur du quotient de la région égale à **39.64** ce qui permet de classer la zone d'étude dans l'étage bioclimatique semi-aride à hiver frais (**Figure 3.3**)

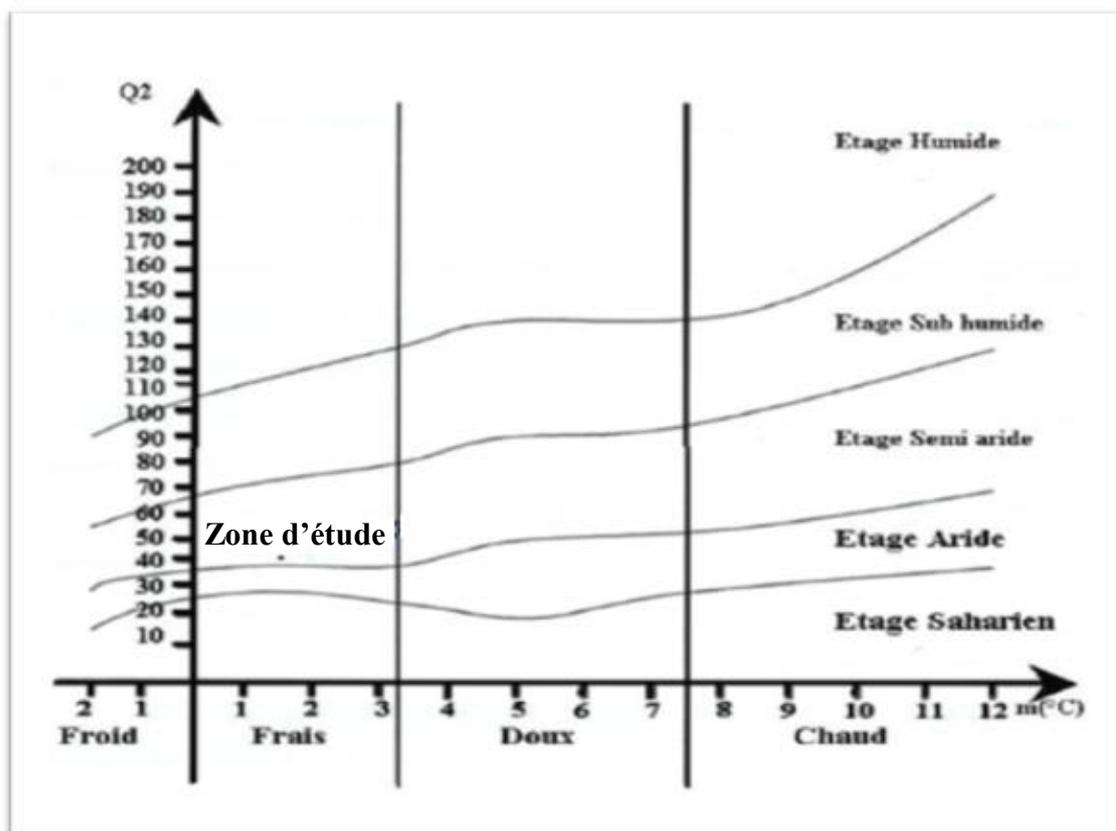


Figure 3.3 : Climagramme d'Emberger.

3.2.6. Les enjeux de la zone d'étude :

Les terres agricoles et le barrage sont affectés par les activités suivantes :

- Prélèvement d'eau excessif (pompage) pour l'irrigation des terres agricoles (**Figure 3.4**).
- Les eaux usées brutes sont évacuées de la station d'épuration et une petite partie est filtrée et envoyée directement au barrage de Bougara.

- Créer des routes secondaires courtes pour obstruer les champs de blé et les terres agricoles, en doublant les routes d'accès au barrage de Bougara.
- Utilisation d'engrais, de pesticides et de produits chimiques sur les terres agricoles (agriculture intensive).
- Dégradation artificielle : Activités humaines telles que la chasse, la pêche, le pâturage et la pollution (déchets des activités touristiques).



Figure 3.4: Irrigation avec les eaux du barrage (le 30-04-2023).

3.2.7. La pollution du sol :

Les métaux lourds représentent l'une des principales menaces pour la qualité des sols et des eaux de la zone d'étude de Bougara. Ces métaux sont principalement émis par les gaz d'échappement des véhicules, les engins agricoles et d'autres activités industrielles.

Cependant, la principale source de contamination par les métaux lourds dans la région provient des eaux mal traitées issues de la station d'épuration et de l'assainissement des habitations environnantes du barrage.



Chapitre 04 :
Matériel et méthodes

4. Matériel et méthodes

4.1. Objectif :

L'objectif de cette étude est d'analyser l'influence de la tomate (*Solanum Lycopersicum*) et du tournesol (*Helianthus Annuus*) dans la dépollution des sols contaminés par des métaux lourds.

L'étude se propose de comparer les concentrations de métaux lourds dans le sol avant la plantation de ces cultures, sur une période d'environ 3 mois. L'objectif est d'évaluer la capacité d'accumulation de ces plantes vis-à-vis des différents métaux lourds présents dans le sol à travers les différents organes des plants (Tiges, feuilles et racines).

La méthode de travail pour la réalisation de ce travail s'articule sur cinq phases bien distinctes, soit celle :

- Prélèvement d'échantillons et analyse physico-chimiques du sol.
- Analyses physico-chimiques des échantillons du sol
- Dosage des métaux lourds à partir des échantillons du sol
- Plantation de *Solanum Lycopersicum* et de *Helianthus Annuus*
- Un second dosage des métaux lourds pour le sol et les différentes parties des plants (tiges, feuilles et racines).

4.2. Matériel et produits utilisés :

Le matériel et les produits utilisés dans les analyses sont :

- Des assiettes pour sécher les échantillons de sol.
- L'étuve pour le séchage des échantillons à une température de 60°C pendant 48h.
- Mortier et son pilon pour le broyage.
- Tamis pour le tamisage de l'échantillon.
- Des petites bouteilles pour porter la poudre broyée.
- Les étiquette pour nommer les échantillons.
- Balance pour faire la mesure des quantités.
- Verre de montre.
- Bécher de 100 ml.
- PH-mètre pour la détermination de PH.
- Conductimètre pour la mesure de CE.

- Four à moufle pour l'incinération de la MO.
- Creuset.
- Plaques alvéolaires pour la culture.
- Dessiccateurs pour protéger l'échantillon contre humidité.
- Des tamis avec couvercles et fond.
- Spectromètre XRF de Marque Rigaku pour le dosage des métaux lourds.
- L'eau distillée et déminéralisée a été utilisée pour le nettoyage des outils de manipulation.
- L'Acide borique pour grossir la pastille.

4.3. Méthode de Travail :

4.3.1. Prélèvement d'échantillons :

Au total 24 échantillons de sol ont été prélevés de la zone d'étude sur une profondeur variant entre 0-20 cm (**Figure 4.1**).



Figure 4.1: Sites de prélèvement des échantillons de sol.

4.3.2. Analyse physico-chimique :

Les analyses physico-chimiques du sol ont été réalisées au laboratoire pédologique de l'université de Tissemsilt. Les facteurs étudiés comprennent la granulométrie, le pH, la conductivité électrique (CE) et la matière organique (MO).

4.3.2.1. Analyse du PH :

Le pH mesure la concentration en ions H^+ de sol. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14.

Le pH est une expression logarithmique de l'acidité d'une solution. C'est le logarithme négatif de la concentration H^+ . $PH = - \log H^+$

a- Détermination de pH:

La mesure du pH se fait sur une suspension du sol (rapport sol/eau = 2/5) d'abord dans l'eau distillée, puis dans une solution KCL.

b- Mode opératoire :

1-Dans un bécher de 100 ml, on mélange 02 g de sol séché et tamisé avec 100 ml d'eau distillée.

2-Remuer le mélange sol/eau avec une cuillère ou autre jusqu'à ce qu'il soit totalement mélangé.

3-Le mélange sol/ eau est agité pendant 30 minutes puis on attend trois minutes et on répète cinq fois ce cycle (agité/attendre).

4-Laisser le mélange reposer jusqu'à ce qu'une couche surnageante (liquide plus clair au-dessus du sol) se forme (environ 5 min) (**Figure 4.2**).

5- Après l'étalonnage de pH mettre (par les solutions tampon) introduire avec précaution l'électrode de verre dans la suspension (l'échantillon).

6- Lire le pH quand l'aiguille est stabilisée.

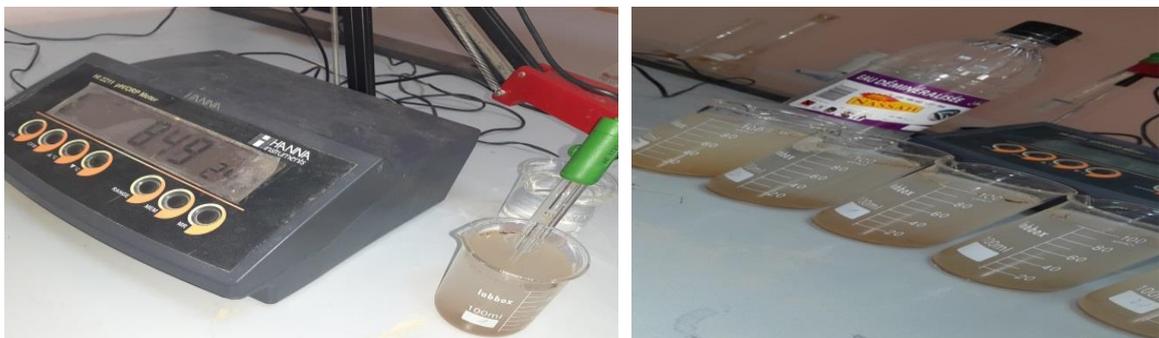


Figure 4.2 : Mesure du pH à l'aide d'un pH mètre (le 20-02-2023).

4.3.2.2. Conductivité électrique :

Basée sur l'extraction des sels d'un échantillon, solubles dans l'eau, dans des conditions bien définies et dans un rapport sol sec/eau égal à 1/5 (m/m). Deux électrodes en platine maintenues en parallèle dans une colonne d'extrait aqueux de sédiment permettent de mesurer le courant conduit par les ions présents.

❖ Mode opératoire :

- 1- Le protocole est le même que celui appliqué dans la mesure du pH sauf pour l'appareil qui est le conductimètre (**Figure 4.3**).



Figure 4.3 : Mesure de conductivité (le 20-02-2023).

4.3.2.3. Détermination de la Matière organique (MO) :

La détermination de la teneur en matière organique a été obtenue par la méthode de dosage du carbone organique.

❖ Mode opératoire :

- 1-On mesuré 50g de sol de chaque échantillon.
- 2- Nous mettons cette quantité dans 05 creusets.
- 3- Puis nous mettons les 05 creusets dans le four à moufle à une température de 400 C° pendant 06 heures.
- 4-06 heures après on sort les 05 creuset du four à moufle et on a mis dans un dessiccateur pour protéger la substance contre l'humidité.

5-Enfin nous répétons la mesure encore une autre fois et calculons (la quantité finale- la quantité initiale).

4.3.2.4. Analyse granulométrique par tamisage :

La méthode granulométrique la plus couramment utilisée est le tamisage. Cette méthode permet de déterminer les tailles des grains de sable ou de graviers présents dans le sol. Elle consiste à passer le matériau à travers une série de tamis de tailles différentes, avec des mailles carrées généralement.

Lors du tamisage, le matériau est progressivement réduit en taille en passant d'un tamis à l'autre. Les particules plus grosses que la taille de la maille restent sur le tamis correspondant, tandis que les particules plus petites passent à travers les mailles et sont recueillies sur le tamis inférieur. Ce processus permet de séparer les différentes fractions granulométriques du matériau, en classant les particules en fonction de leur taille.

Les tamis utilisés dans cette méthode sont normés et ont des ouvertures de mailles de taille connue. Les fractions granulométriques obtenues sont ensuite pesées pour calculer la distribution des tailles de particules dans le matériau.

❖ Mode opératoire :

- 1- On utilise la série des tamis suivante en mm : **(2mm, 1mm, 0.315mm, 0.16mm, 0.8mm)** (Figure 4.4).
- 2- On mesure 01 kg de chaque échantillon.
- 3- Puis on met chaque échantillon dans le tamis (vibreuse électrique) pendant 3 min.
- 4- On mesure la quantité de chaque tamis.

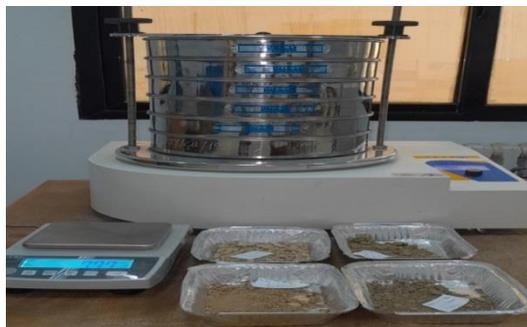


Figure 4.4 : Analyse granulométrique du sol (le 21-02-2023).

4.3.3. Dosage des métaux lourds :

4.3.3.1. Travaux préparatifs :

Avant de procéder au dosage des métaux lourds, les échantillons de sol ont été préparés afin d'obtenir une poudre homogène adaptée à l'analyse avec un spectromètre XRF (X-ray fluorescence).

La préparation des échantillons de sol implique généralement plusieurs étapes. Tout d'abord, les échantillons sont séchés pour éliminer toute trace d'humidité (**Figure 4.6**). Ensuite, ils sont broyés pour réduire la taille des particules et obtenir une poudre fine.

Une fois la poudre obtenue, elle est tamisée pour éliminer les éventuels agrégats ou matériaux indésirables de manière à obtenir dix grammes de poudre fine d'un calibre de $140\mu\text{m}$ (**Figure 4.5**). Cela garantit une homogénéité de l'échantillon et facilite la mesure précise des métaux lourds.



Figure 4.5 : séchage et broyage des échantillons de sol pour le dosage des ETM (le 12-12-2022).

4.3.3.2. Dosage par fluorescence X :

Les analyses ont été réalisées au laboratoire de recherche de chimie physique des macromolécules et interfaces biologiques de l'université *Mustapha Stambouli, Mascara*, sous la supervision du Dr. Bekki Khaled

Pour l'analyse XRF, une quantité d'échantillon de 3g est généralement recommandée. Cependant, lorsque la quantité d'échantillon disponible est insuffisante, il est possible d'utiliser un additif liant tel que l'acide borique pour augmenter la taille de la pastille sous l'échantillon. Cette méthode permet de créer une pastille solide et homogène, ce qui facilite l'analyse XRF.

L'acide borique est souvent utilisé comme additif car il a la propriété de fondre et de

se solidifier lorsqu'il est chauffé. En mélangeant l'échantillon avec de l'acide borique, il est possible de former une pastille compacte qui assure une meilleure représentativité de l'échantillon lors de l'analyse XRF

4.3.4. Préparation de pastille :

La préparation de la pastille se fait en ajoutant 1% d'acide borique à l'échantillon à analyser. Ensuite, à l'aide d'un moule à pastiller et d'une presse, la poudre est soumise à une pression d'environ 25 tonnes pendant quelques secondes. Sous l'effet de cette pression, une pastille homogène d'environ 32 mm de diamètre et de 2 à 3 mm d'épaisseur est obtenue, prête à être analysée directement (**Figure 4.6**).

La pastille ainsi formée offre une surface plane et uniforme pour l'analyse XRF, ce qui permet d'obtenir des mesures précises et reproductibles. La pression exercée lors de la préparation de la pastille contribue à consolider les particules de l'échantillon et à former une matrice solide (**Figure 4.7**).



Figure 4.6 : Mélange échantillon-acide borique avant et après broyage (12-02-2023).



Figure 4.7: Pastilles préparées au moyen de la presse hydraulique (12-02-2023).

4.3.5. Calibration de l'appareil XRF de Marque Rigaku :

❖ Calibrage MCA :

Pour effectuer l'étalonnage, on place l'échantillon d'étalonnage MCA (sous forme d'une pastille jaune appelée perle) dans le passeur d'échantillons, comme illustré dans la **(Figure 4.8)**. Cette perle jaune d'étalonnage contient une composition précise en certains métaux. Lorsque l'échantillon d'étalonnage est analysé par l'appareil, le programme ajuste automatiquement le système pour corriger toute dérive dans les valeurs des positions des pics correspondants et leurs intensités.

La perle jaune d'étalonnage est conçue pour servir de référence lors de l'analyse XRF. Elle contient des concentrations connues et précises de différents métaux, ce qui permet d'établir une relation entre les signaux mesurés par l'appareil et les concentrations réelles des métaux dans les échantillons. Cette étape d'étalonnage garantit une mesure précise et fiable des concentrations en métaux dans les échantillons testés.



Figure 4.8: Perle jaune utilisée lors de l'étalonnage spécial MCA (12-02-2023).

❖ Test au moyen d'échantillons connus :

Afin de garantir une calibration MCA appropriée, il est essentiel d'utiliser des échantillons de référence ayant une composition chimique précise et certifiée pour certains métaux. Cependant, dans notre laboratoire, nous n'avons pas d'échantillons de référence disponibles. Par conséquent, nous avons choisi d'utiliser des pièces de monnaie nationale comme alternative pour tester l'appareil (**Tableau 4.1**).

Les pièces de monnaie nationale sont généralement composées de métaux spécifiques avec des concentrations connues. Bien que ces concentrations ne soient pas certifiées, elles sont généralement constantes et permettent une utilisation pratique dans les tests de calibration préliminaires.

Tableau 4.1 : Calibrage par les pièces de monnaies

Les pièces Algériennes	Composition élémentaire
<p>5DA</p>  <p>www.facebook.com/Alger1970</p>	<p>Acier : Fer +trace de carbone</p>
<p>10DA</p>  <p>http://www.egb.fr</p>	<p>Cœur :</p> <p>97% Aluminium ; 3% Magnésium</p> <p>Couronne :Acier (AISI 430)</p>
<p>20DA</p>  <p>http://www.egb.fr</p>	<p>Cœur :</p> <p>92% Cuivre 6% Aluminium 2% Nickel</p> <p>Couronne :Acier (AISI 430).</p>
<p>50DA</p>  <p>http://www.egb.fr</p>	<p>Cœur : Acier (AISI 430)</p> <p>Couronne : 92% Cuivre 6% Aluminium ,2% Nickel</p>
<p>100DA</p>  <p>http://www.egb.fr</p>	<p>Cœur :</p> <p>87% Cuivre 13% Nickel</p> <p>Couronne : Acier (AISI).</p>
<p>200DA</p>  <p>http://www.egb.fr</p>	<p>Cœur :92% Cuivre 6% Aluminium 2% Nickel</p> <p>Couronne :75% Cuivre 25% Nickel</p>

Pour chaque pièce de monnaie, nous avons choisi les éléments spécifiques à analyser en fonction de leur composition présumée.

- **Mode opératoire de méthode XRF :**

Le principe de l'analyse consiste à placer l'échantillon à analyser sous un faisceau de rayons X généré par l'appareil de spectrométrie de fluorescence X. L'échantillon est irradié par ces rayons X pendant quelques minutes.

Sous l'effet de cette irradiation, les atomes présents dans l'échantillon émettent de l'énergie sous forme de fluorescence caractéristique qui est, par la suite captée par le détecteur de l'appareil, qui convertit ensuite le signal en données quantitatives. Les résultats de l'analyse apparaissent alors sur l'écran de l'appareil, fournissant des informations sur la concentration des éléments chimiques présents dans l'échantillon.

4.3.6. Plantation :

4.3.6.1. Préparation de substrat de culture :

Les échantillons de sol ont été disposés dans des alvéoles, avec une partie placée dans une serre située au barrage et l'autre partie installée au laboratoire de l'université de Tissemsilt. Cette approche a été adoptée dans le but de favoriser une germination et un développement optimaux des plantes, en leur offrant des conditions environnementales adaptées à chaque lieu. Cette démarche permet d'optimiser les chances de réussite de l'expérimentation et d'obtenir des résultats plus fiables et représentatifs.

4.3.6.2. Matériel végétal utilisé :

La tomate (*Solanum lycopersicum*) et le tournesol (*Helianthus annuus*) sont des plantes qui ont été sélectionnées pour leur capacité à absorber les métaux lourds. Ces deux espèces végétales sont considérées comme des bioaccumulateurs (Yang et al., 2009), ce qui signifie qu'elles peuvent absorber et accumuler des quantités significatives de métaux lourds présents dans le sol. Leur utilisation dans cette expérimentation permettra d'évaluer leur potentiel en termes de dépollution des sols contaminés.

Au total, 16 alvéoles de tomates et 16 alvéoles de tournesols ont été cultivés dans la serre située au barrage et au laboratoire de l'université de Tissemsilt. Ces plants ont été soumis à un arrosage régulier, assurant ainsi des conditions optimales de croissance et de développement.

4.3.7. Plantation de Tomate (*Solanum lycopersicum*) :

Les graines de tomates, préalablement désinfectées, ont été placées pour germer dans des boîtes de Pétri, sur un support de coton (**Figure 4.9**). Une fois que les graines ont germé, elles ont été transplantées dans les plaques alvéolaires braillement préparées (**Figure 4.10**) à la fois dans la serre du barrage et au laboratoire de l'université de Tissemsilt.



Figure 4.9: Pré germination des graines de la tomate (04-03-2023)



Figure 4.10: Repiquage des plantules de la Tomate dans les alvéoles dans la serre.

4.3.8. Plantation de tournesol (*Helianthus Annuus*) :

Dans le cas des graines de tournesol, elles ont été semées directement dans les alvéoles préparées, sans passer par l'étape de germination sur coton. Les alvéoles ont été arrosées régulièrement avec de l'eau du robinet, assurant ainsi une hydratation adéquate des graines et favorisant leur germination et leur développement ultérieur (**Figure 4.11**).



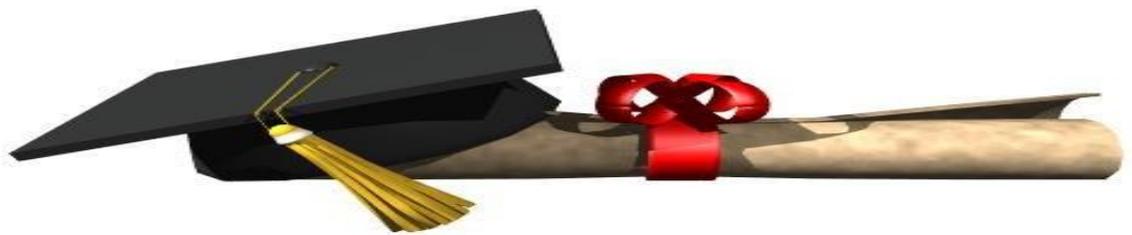
Figure 4.11 : Plantation du Tournesol en date du 04-03-2023 au niveau du laboratoire.

3.4.9. Dosage des métaux lourds après plantation :

En date du 20/05/2023, la collecte complète du matériel végétal, ainsi que des échantillons de sol de culture, a été réalisée dans le but de procéder à de nouvelles analyses afin de déterminer la quantité de métaux lourds absorbés par chaque espèce végétale et d'évaluer l'impact de l'expérience sur la qualité du sol. Avant les analyses, une préparation du matériel végétal et des échantillons de sol a été effectuée, comprenant les étapes suivantes :

- Les plantes des deux espèces ont été récoltées dans leur intégralité (**Figure 4.13**), puis chaque partie (tiges, racines et feuilles) a été séparée.
- Chaque partie a été séchée dans une étuve pendant 24 heures à une température de 50°C.
- Les parties séchées ont ensuite été broyées jusqu'à obtenir une poudre fine.
- La poudre obtenue a été tamisée pour éliminer les particules indésirables.
- Ensuite, des pastilles ont été préparées en utilisant 3 grammes de poudre et en ajoutant 1% d'acide borique comme additif liant.
- Pour la préparation du sol ayant fait l'objet de culture, les mêmes étapes que celles mentionnées avant plantation ont été suivies.

Enfin, La procédure de mesure des métaux lourds pour les tiges, les racines, les feuilles des plantes de tomate et de tournesol, ainsi que le sol, a été effectuée



*Chapitre 05 : Résultats
et discussion*

Ce chapitre est dédié à la présentation et à l'interprétation des résultats obtenus lors de cette étude. Nous commencerons par évaluer les caractéristiques physico-chimiques du sol dans la zone d'étude, en analysant des paramètres de la texture, le pH, la conductivité électrique et la teneur en matière organique. Ensuite, nous procéderons à une étude descriptive des métaux lourds présents dans le sol, en examinant leur concentration avant et culture. Enfin, nous étudierons le pouvoir accumulateur de la tomate et du tournesol pour les différents métaux lourds présents dans le sol, en évaluant leur capacité à absorber et à accumuler ces métaux dans leurs différentes parties, telles que les racines, les tiges et les feuilles.

5.1. Identification du sol de la zone d'étude :

Le sol de la zone d'étude est principalement constitué de sols limoneux-argileux qui sont adaptés à la culture de la tomate et du tournesol. Ces sols offrent des conditions favorables à la croissance et au développement de ces plantes (Huat, 2008 *in* Labeled et Bentamra, 2018). Cependant, en raison de leur porosité élevée, il existe un risque d'infiltration des métaux lourds dans les nappes phréatiques.

La variation du pH du sol dans la zone d'étude se situe entre 8.19 et 8.77, avec une valeur moyenne de 8.46. Cette alcalinité du sol est attribuée à la présence de la roche mère calcaire (Abderrahim, 2016).

Dans l'ensemble des échantillons étudiés, la conductivité électrique est relativement faible, se situant entre 0.4 et 0.57. Cela indique une faible salinité du sol, ce qui peut être attribué à la situation temporaire actuelle. En effet, les agriculteurs de la région utilisent de plus en plus les eaux du barrage de Bougara pour l'irrigation. Ces eaux, qui présentent une salinité élevée, peuvent transmettre au fil du temps des quantités importantes de sels aux sols agricoles, ce qui pourrait entraîner une augmentation de la salinité dans le futur.

Dans la zone d'étude, la teneur en matière organique du sol varie de moyennement riche à très riche. La matière organique est une source essentielle d'éléments minéraux pour les plantes, contribuant à leur croissance et à leur développement. La présence d'une teneur élevée en matière organique dans le sol est bénéfique car elle favorise la fertilité du sol.

En conclusion, les sols de la zone d'étude sont globalement meubles, ce qui est bénéfique pour l'agriculture. De plus, la présence d'une quantité appréciable de matière

organique dans les sols offre une source importante de nutriments pour les cultures, favorisant ainsi leur croissance et leur développement. Ces caractéristiques sont favorables à l'activité agricole dans la zone d'étude.

5.2. Test du calibrage MCA de l'appareil :

L'utilisation d'un calibrage MCA avec des valeurs connues des Éléments Traces Métalliques (ETM) dans la monnaie nationale revêt une importance capitale pour garantir la précision des résultats de dosage dans cette expérience. Cela permet d'évaluer la fiabilité du spectromètre utilisé lors de l'expérimentation en comparant les mesures obtenues avec les valeurs attendues des ETM de la monnaie nationale. Ainsi, le calibrage MCA permet de vérifier la justesse et l'exactitude des mesures réalisées, assurant ainsi la validité des résultats obtenus dans cette étude (**Tableau 5.1**).

Tableau 5.1 : Résultats de l'analyse des différentes pièces de monnaies.

ETM Pièces		Valeurs de référence (%masse)					Valeurs expérimentales (%masse)				
		Cu	Al	Ni	Mg	Fe	Cu	Al	Ni	Mg	Fe
5 Da	Cœur					acier					
	Couronne					acier					
10 Da	Cœur		97		3			96.2		3.14	
	Couronne					Acier					0.511
20 Da	Cœur	92	6	2			90	7.47	2.02		
	Couronne					acier					0.0904
50 Da	Cœur					acier					96.3
	Couronne	92	6	2			2.27	0.658	0.782		
100 Da	Cœur	87		13			86		13.1		
	Couronne					acier					0.109
200 Da	Cœur	92	6	2			90	7.23	2.29		
	couronne	75		25							0.0535

Le **tableau 5.1** met en évidence une correspondance remarquable entre les valeurs de référence et celles obtenues lors de l'expérience. Cette concordance démontre la grande précision de l'appareil utilisé pour les mesures. Les résultats obtenus sont donc fiables et témoignent de la performance de l'instrument de mesure.

5.3. Analyse des métaux lourds dans le sol :

L'analyse des éléments traces métalliques (ETM) a révélé une augmentation de leur concentration en profondeur dans le sol. Les échantillons prélevés à une profondeur de 20 à 40 cm présentent généralement des concentrations plus élevées en ETM que ceux prélevés à une profondeur de 0 à 10 cm (**Tableau 5.2**). Cette augmentation de la concentration en ETM en profondeur peut être attribuée à la nature sableuse du sol, qui favorise l'infiltration des métaux lourds provenant de diverses sources, essentiellement, les eaux d'irrigation contaminées et les résidus de fertilisants.

En comparant les concentrations des métaux lourds dans les deux horizons aux normes de l'AFNOR U44-41, il est important de signaler que le nickel (Ni), le zinc (Zn), le cuivre (Cu) et le chrome (Cr) présentent des concentrations considérablement élevées par rapport aux valeurs de tolérance. Cette situation soulève des préoccupations quant à une éventuelle contamination toxique, ce qui constitue une menace pour la santé humaine étant donné qu'il s'agit d'une zone agricole.

Tableau 5.2: Concentration des ETM dans le sol (en mg/kg)

ETM	Horizon	Min	Max	Moy	ET	Valeurs limites (Norme AFNOR U44-41)
Ni	H0-10	16,70	1850	830,02	675,29	50
	H10-20	130	1640	916,88	450,51	
Zn	H0-10	20,4	1970	622,07	826,19	300
	H10-20	36	1790	500,22	527,20	
Cu	H0-10	22	3180	820,6	1034,07	100
	H10-20	149	6034	482,62	424,09	
Cr	H0-10	15,5	913	323,73	422,15	150
	H10-20	46	911	478,93	328,85	
PB	H0-10	7,07	691	245,08	301,39	100
	H10-20	40,7	677	211,3	235,00	
Cd	H0-10	ND	ND	ND	ND	2
	H10-20	ND	ND	ND	ND	

Avec : **H0-10** (Horizon 0-10cm) ; **H10-20** (Horizon 10-20cm) ; **Min** (minimale) ; **Max** (maximale) ; **Moy** (moyenne) ; **ET** (écart type) ;

5.4. Analyse des métaux lourds les différentes parties des plants :

Les plantules de tomate et de tournesol, ayant atteint une hauteur moyenne de 22 cm et 18 cm respectivement, et montrant une différenciation de plus de 4 feuilles pour les deux espèces, ont été soumises à une série de préparations en vue du dosage des éléments traces métalliques (ETM). Ces préparations comprenaient la récolte, la séparation des différentes parties de la plante, le séchage, le broyage et la préparation des pastilles pour l'analyse.

Après dosage, une analyse a été réalisée afin de mieux comprendre le pouvoir accumulateur de *Solanum lycopersicum* et *Helianthus annuus*. Cette analyse a porté sur une comparaison entre les différentes parties des deux espèces pour chaque élément trace métallique (ETM) étudié.

5.4.1. Etude de l'accumulation du Nickel (Ni) :

La comparaison entre les différentes parties de la tomate et du tournesol révèle une accumulation significative de Ni (nickel) dans les tiges et les feuilles du tournesol (**Figure 5.1**), tandis que l'accumulation est moindre dans les feuilles de la tomate. Cette observation est particulièrement intéressante, car la récolte des tiges et des feuilles est plus facile à réaliser que celle des racines, ce qui facilite le processus d'exploitation et de récupération d'importante quantité de cette molécule.

Il est important de noter que les feuilles de la tomate présentent une accumulation non négligeable. Cependant, il est indéniable que le tournesol présente une capacité d'accumulation nettement supérieure. En effet, à la fois les tiges et les racines du tournesol accumulent des quantités plus élevées de Nickel, ce qui conduit à un effet d'accumulation global plus important (8500mg/Kg) que celui observé chez la tomate (5290mg/Kg).

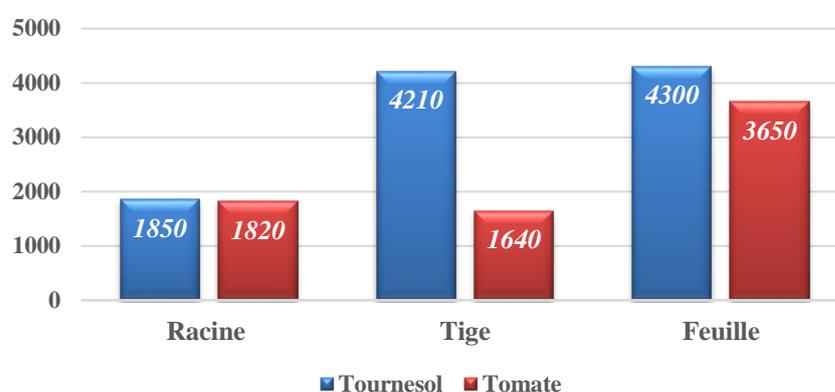


Figure 5.1 : Différence de concentration de Ni (mg/kg)

5.4.2. Etude de l'accumulation du Zinc (Zn) :

Le zinc est un oligo-élément essentiel pour toutes les plantes, mais sa présence dans le sol doit être maintenue à des niveaux faibles. Cependant, dans notre zone d'étude, la concentration de zinc dans le sol est devenue élevée (plus de 500mg/kg), entraînant ainsi une pollution.

La (Figure 5.2) qui compare l'accumulation de zinc dans les différentes parties de la tomate et du tournesol démontre que la tomate accumule environ deux fois plus de zinc que le tournesol dans les racines, et légèrement plus dans les feuilles. Cependant, il est intéressant de noter que la concentration de zinc dans les tiges du tournesol est d'environ trois fois celle des tiges de la tomate.

Dans le contexte de la dépollution des sols au zinc, il est crucial de se concentrer sur la partie aérienne des plantes, notamment les tiges et les feuilles, qui sont faciles à récolter. En combinant la quantité de zinc accumulée dans la partie aérienne, le tournesol présente des chiffres supérieurs à ceux de la tomate, avec des quantités respectives de 3850 mg/kg et 3050 mg/kg. Cette constatation souligne l'avantage du tournesol pour une dépollution efficace des sols, ce qui en fait un choix privilégié dans la zone d'étude.

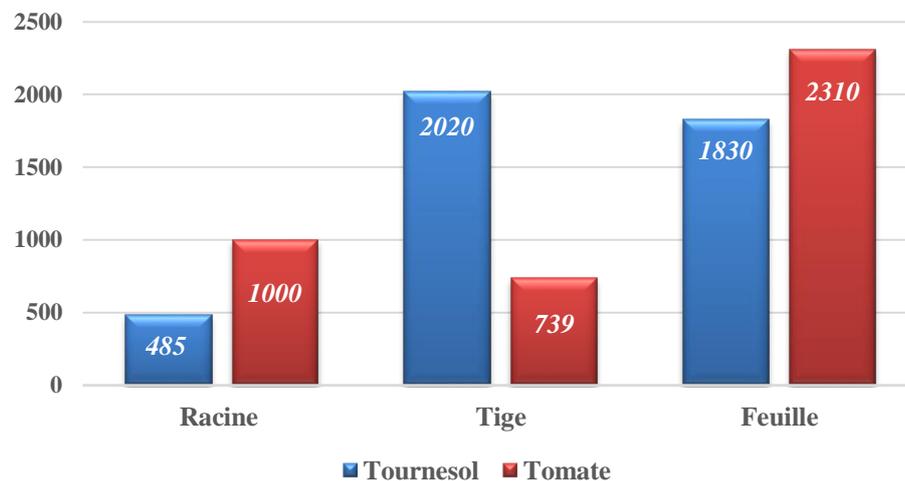


Figure 5.2 : Différence de concentration de Zn (mg/kg)

5.4.3. Etude de l'accumulation du Cuivre (Cu) :

Le cuivre est un oligo-élément indispensable au bon fonctionnement des plantes, jouant un rôle vital dans divers processus biologiques tels que la photosynthèse, la respiration et la formation de chlorophylle. Cependant, dans notre zone d'étude, sa présence dépasse la norme établie par les différentes organisations, ce qui entraîne un effet contraire à son importance pour les plantes.

Dans l'ensemble, le pouvoir d'accumulation des deux espèces, à savoir la tomate et le tournesol, est pratiquement similaire. Cependant, on observe une légère supériorité du tournesol au niveau de la partie aérienne, avec une concentration de 2960 mg/kg , comparativement à 2519 mg/kg pour la tomate (**Figure 5.3**).

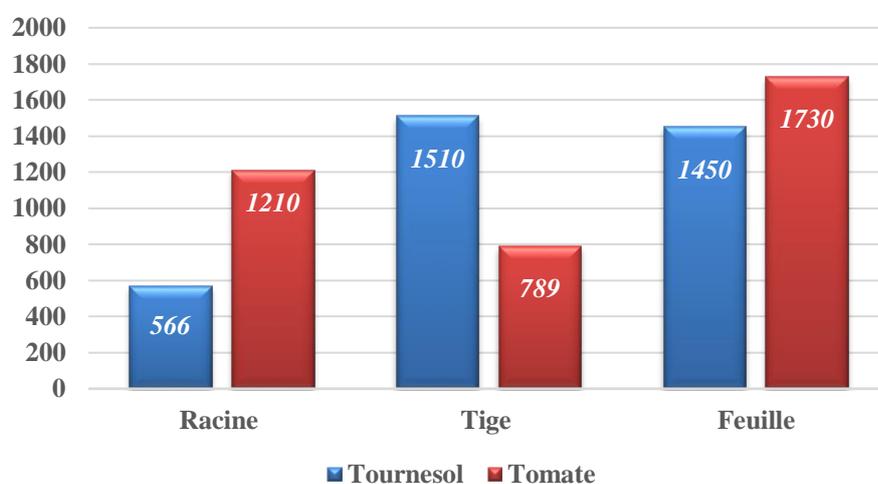


Figure 5.3 : Différence de concentration Cu (mg/kg)

5.4.4. Etude de l'accumulation du Chrome (Cr) :

Le chrome joue un rôle important dans divers processus biologiques, tels que le métabolisme des lipides et des protéines et la résistance au stress. Cependant, une présence excessive de chrome dans le sol, le cas de notre zone d'étude, entraîne des effets néfastes sur le développement des plantes et sur la santé humaine.

Lors de l'expérience, la culture des deux espèces révèle une nette supériorité de plus de quatre fois en termes d'accumulation du cuivre pour le tournesol, avec une concentration de 1022 mg/kg , par rapport à la tomate qui présente une concentration de 237 mg/kg . En ce qui concerne la partie aérienne, comprenant les tiges et les feuilles, le tournesol démontre un pouvoir accumulateur de plus de dix fois supérieur à celui de la

tomate, avec une concentration de 938 mg/kg pour le tournesol et 93 mg/kg pour la tomate (**Figur5.4**).

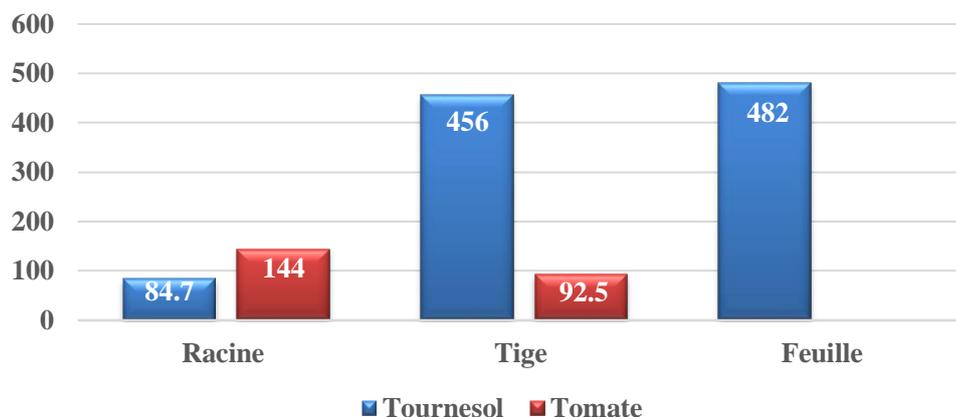


Figure 5.4 : Différence de concentration de Cr (mg/kg)

5.4.5. Etude de l'accumulation du Plomb (Pb) :

Le plomb est un métal lourd toxique qui se trouve à des concentrations significatives dans la zone d'étude. Dans certains cas, sa présence dépasse même trois fois les normes de tolérance.

L'expérimentation sur l'effet des tomates et du tournesol sur la dépollution des sols de la zone d'étude a donné des résultats modestes, avec une absence totale de plomb dans les tiges et les feuilles des deux espèces. Cependant, on observe une concentration trois fois supérieure dans les racines de la tomate, atteignant 250 mg/kg, par rapport aux racines du tournesol qui enregistrent une concentration de 85 mg/kg (**Figure 5.5**).

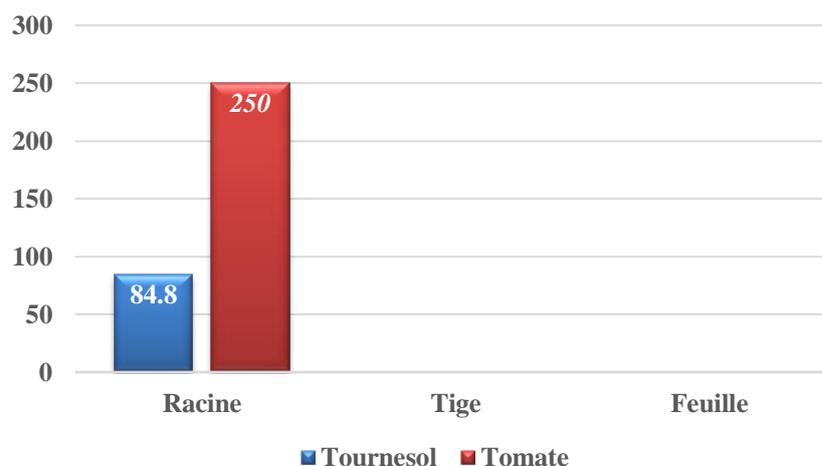


Figure 5.5 : Différence de concentration de Pb (mg/kg)

5.4.6. Etude de l'accumulation du Cadmium (Cd) :

Le cadmium n'est détecté dans aucune partie des deux espèces lors du dosage effectué. Cette absence de cadmium peut être expliquée par l'absence totale de cet élément dans le sol de la zone d'étude (**Figure 5.6**) et (**Tableau 5.2**)

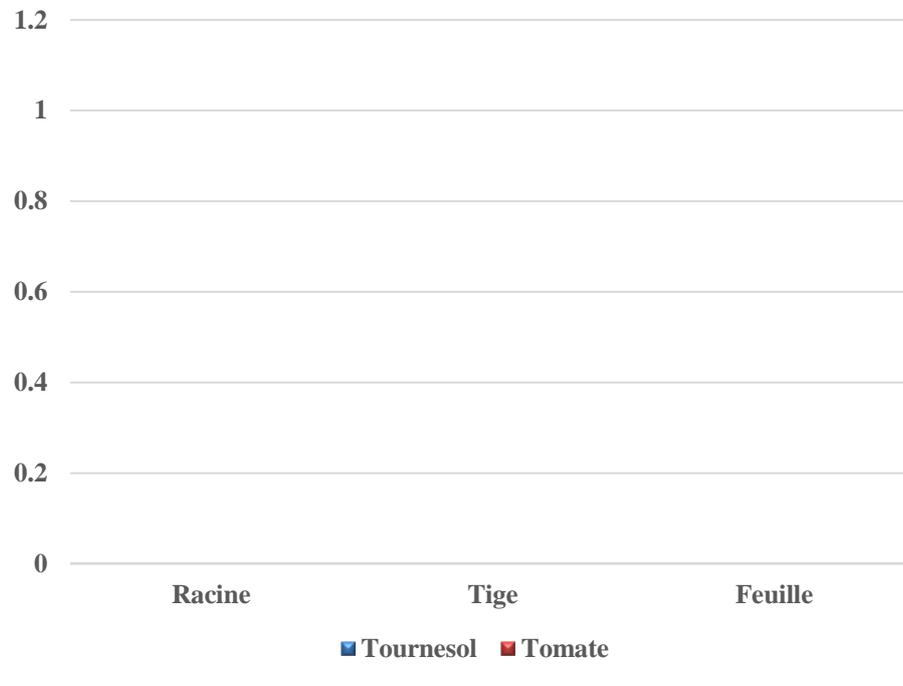


Figure 5.6 : Différence de concentration de Cd (mg/kg)

5.5. Synthèse de la culture des deux espèces :

La comparaison entre *Solanum lycopersicum* (tomate) et *Helianthus Annuus* (tournesol) en termes de pouvoir accumulateur pour le nickel, le zinc, le cuivre et le chrome révèle que le tournesol est plus performant. Il présente ainsi un potentiel phytoremédiateur important pour la restauration des sols pollués dans la zone d'étude. L'efficacité du tournesol est particulièrement notable dans la forte accumulation de ces métaux lourds dans les parties aériennes, c'est-à-dire les tiges et les feuilles.

Bien que le tournesol présente de meilleures performances d'accumulation pour les métaux mentionnés précédemment, il est important de souligner que la tomate joue également un rôle significatif en tant que phytoremédiateur, notamment dans l'accumulation du plomb. Le plomb est considéré comme l'un des métaux les plus toxiques et dangereux pour la santé humaine. Ainsi, la capacité de la tomate à accumuler efficacement le plomb la rend précieuse dans les efforts de dépollution des sols contaminés par cette substance nocive.

Tableau 5.3 : Moyenne des concentrations des ETM (mg/kg) dans les plants.

<i>ETM</i>	<i>Solanum lycopersicum</i>			<i>Helianthus Annuus</i>		
	Racine	Tige	Feuille	Racine	Tige	Feuille
<i>Ni</i>	1820	1640	<u>3650</u>	1850	4210	<u>4300</u>
<i>Zn</i>	1000	739	<u>2310</u>	485	<u>2020</u>	1230
<i>Cu</i>	1210	789	<u>1730</u>	566	<u>1510</u>	1450
<i>Cr</i>	<u>114</u>	92,5	ND	84,7	456	<u>482</u>
<i>Pb</i>	<u>250</u>	ND	ND	<u>84,8</u>	ND	ND
<i>Cd</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND



Conclusion

Conclusion :

Cette étude a été menée dans le périmètre agricole de Bougara, qui couvre une superficie de 798 hectares. Ce périmètre bénéficie de l'irrigation grâce aux eaux du barrage de Bougara, provenant de Nhar Ouassel et de la station d'épuration de Tissemsilt. Ce barrage est spécifiquement utilisé pour l'irrigation des terres agricoles de la région.

L'étude climatique révèle que la zone d'étude se situe dans l'étage bioclimatique semi-aride à hiver frais, caractérisé par une irrégularité des précipitations tout au long de l'année.

Les analyses menées au laboratoire ont permis d'identifier les caractéristiques du sol, telles que sa texture, son pH, sa conductivité électrique et sa teneur en matière organique. Les résultats obtenus sont les suivants :

- La zone d'étude abrite des sols limoneux-argileux ce qui le rend propice à la culture de la tomate et du tournesol.
- Le pH du sol dans la zone d'étude varie de 8.19 à 8.77, avec une moyenne de 8.46. Cette alcalinité du sol est attribuée à la présence de roches mères calcaires
- La conductivité électrique du sol est relativement faible, se situant entre 0.4 et 0.57. Cela indique une faible salinité du sol.
- La teneur en matière organique du sol varie de moyennement riche à très riche, ce qui indique une qualité favorable pour les différentes cultures.

Les concentrations de nickel (Ni), de zinc (Zn), de cuivre (Cu) et de chrome (Cr) dans le sol de la zone d'étude sont considérablement élevées par rapport aux valeurs de tolérance établies par la norme AFNOR U44-41. Cette situation suscite des inquiétudes quant à une possible contamination toxique, ce qui représente une menace pour la santé humaine étant donné que la zone est utilisée à des fins agricoles. Il est donc essentiel de prendre des mesures appropriées pour remédier à cette situation et minimiser les risques pour la santé des personnes exposées à ces sols contaminés.

Les plantules de tomate et de tournesol, après 3 mois de plantation dans les sols pollués de la zone d'étude, ont atteint une hauteur moyenne de 22 cm et 18 cm respectivement. De plus, elles ont montré une différenciation de plus de 4 feuilles

pour les deux espèces. Au cours de cette période, des analyses ont été réalisées pour évaluer l'accumulation des métaux lourds dans les différentes parties des plants, à savoir les racines, les tiges et les feuilles. Les résultats sont les suivants :

- Le tournesol présente un pouvoir accumulateur supérieur pour le nickel, le zinc, le cuivre et le chrome. Cela indique que le tournesol est plus performant dans l'accumulation de ces métaux lourds, ce qui lui confère un potentiel phytoremédiateur important pour la restauration des sols pollués dans la zone d'étude. Notamment, l'efficacité du tournesol est particulièrement remarquable dans la forte accumulation de ces métaux lourds dans les parties aériennes, c'est-à-dire les tiges et les feuilles.
- La tomate joue un rôle important en tant qu'accumulateur de plomb, l'un des métaux les plus toxiques et dangereux pour la santé humaine. Bien qu'elle soit efficace dans l'accumulation de plomb, sa pratique présente une limitation en raison du fait que cette accumulation se concentre principalement dans les racines.

Grâce à cette étude, notre objectif est d'apporter une meilleure compréhension d'une problématique préoccupante dans ce milieu. Nous avons exploré une solution non coûteuse par rapport aux autres méthodes disponibles, même si cela nécessite plus de temps jusqu'à ce que les plantes atteignent leur maturité. Nous espérons que cette recherche servira de base pour des expérimentations futures dans un proche avenir, afin de poursuivre nos efforts visant à trouver des solutions durables pour cette problématique.



*Les références
bibliographiques*

Les références bibliographiques

- 1- **Abderrahim, A. 2016.** Contribution à l'étude de l'effet de l'irrigation en eaux usées épurés du barrage BOUGARRA sur le rendement de l'orge (Saïda 183) dans le périmètre agricole de Tissemsilt. Mémoire master. Université Ibn Khaldoun Tiaret. 59p.
- 2- **ADRIANO D.F.,(2001).**Trace elements in terrestrial environment: biochemistry, bioavailability and risks of metals, 2nd edition. New York : Springer.
- 3- **AECOM-TecSult, 2010.**Étude du cadastre des zones humides. (2010). Caractérisation environnementale (Composante 3) et Actions prioritaires et scénarios tendanciels et alternatifs (Composante 4).
- 4- Agence Nationale des Barrages et Transferts (**ANBT, 2020**).
- 5- **Asada K et Takahashi M., 1987** -*Production and scavenging of active oxygen in photosynthesis*, in *Photoinhibition: Topics of Photosynthesis*.Ed. D. J. Kyle, C. B. Osmond, et C. J. Arntzen, Amsterdam,pp. 227–287.
- 6- **Azubuike C.C., Chikere C.B., Okpokwasili G.C.,2018** -Bioremediation techniques—classification based on site of application: Principles, advantages, limitations and prospects. *World J. Microbiol. Biotechnol.*32, e1.80
- 7- **Banerjee A., Roy A., Dutta S., Mondal S., 2016** -*Bioremediation of hydrocarbon*. 4 :1303–1313.
- 08- **Bert, V., Hadj-Sahroui, A., Leyval, C., Fontaine, J., & Ouvrard, S. (2012).** Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués. État de l'art et guide de mise en oeuvre (ADEME Edit). Angers: EDP Sciences.
- 9- **Bert V, Allemon J, Sajet P et al 2017.** Torrefaction and pyrolysis of metal-enriched poplars from phytotechnologies: Effect of temperature and biomass chlorine content on metal distribution in end- products and valorization options. *Biomass and Bioenergy* ;96:1–11.
- 10- **Bourelle P.H. et Berthelin J., 1998-** *Contamination des sols par les éléments traces: les risques et leur gestion*. Ed. Lavoisier, Paris, 42p.
- 11- **Bolan NS, Park JH, Robinson B et al 2011.** Chapter four :

Phytostabilization: A green approach to contaminant containment. *Advances in Agronomy*. Vol 112, 145–204.

12- Bliffert C. et Peraud R., 2004- *Chimie de l'environnement : air, eau, sol et déchets*. Ed. Boeck, 477 p.

13- Brian A., 2013- Heavy Metals in Soils : Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability, *Environmental Pollution* 22. BJ Alloway, UK, 613p.

14- Brown LD., Cologgi DL., Gee KF., Ulrich AC., 2017- Bioremediation of Oil Spills on Land. *Elsevier Inc.* Amsterdam, Pays-Bas.

15- Bruce, E. et Pivetz, A., 2001. Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites. Ground Water Issue. Office of Solid Waste and Emergency Response. Office of Research and Development United States Environmental Protection Agency. EPA/540/S-01/500 February 2001, 1-5.

16- Brooks, R.R., 1998. Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals. (ed.) CAB International, Wallingford, UK, 380 p.

17- CATSIKI V.A ET CATSIELLERI C.H. (1992), Presence of chromium in p.nobles collected from a polluted area. *Fresenius envir.Bull. L*, p644-649.

18- Charissou A-M., Lejeune PH ., 2009- Etat de l'art sur les potentialités des techniques de bioaugmentation dans le traitement des déchets, sédiments et sols pollués. pp .100.

19- Chalot M, Blaudez D, Rogaume Y et al 2012. Fate of trace elements during the combustion of phytoremediation wood. *Environ Sci Technol*;46:13361–9.

20- DELL'ANNO A, MEI MI, LANNI ET DIANOVARO R, (2003). Impact of Bioavailable Heavy metals on Bacterial Activities.

21- Direction des services agricoles, .

22- Emberger, L. 1955. Une classification biogéographique des climats. *Rec.Travaux , laboratoire botanique , géologique, fac sc.7(11) : 3-43*

23- Evlard, A. (2013). Le potentiel du saule pour la phytostabilisation des sols pollués par les éléments traces métalliques. Université de Liège.

24- Fabrégat s., 2010- *Les métaux lourds : une pollution de long terme* [en ligne]. Disponible sur : < <https://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/air/metaux-lourds.php4> > consulté le 22/06/2021.

- 25- FALLON L MD JR.(2006).** Infancy Through adolescence :Heavy Metal Poisoning Gate Encyclopedia of Children's Health. P866-868.
- 26- Fourest E.,1993-***Etude des mécanismes de biosorption des métaux lourds par des biomasses fongiques industrielles en vue d'un procédé d'épuration des effluents aqueux contaminés* (thèse) [en ligne].Disponible sur <http://www.theses.fr/1993GRE10142>.
- 27- Francou C., 2004-**Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbain influence de la nature des déchets et du procédé de compostage recherche indicateurs pertinents :290.
- 28- Glick BR., 2007-** Promotion of plant growth by bacterial ACC deaminase. *Crit. Plant. Sci.* 26 :227– 242.
- 29- Godheja J.,Modi D.R., Kolla V., Pereira A.M., Bajpai R., Mishra M., Sharma S.V., Sinha K., Shekhar S.K.,2019** -Environmental remediation: Microbial and nonmicrobial prospects. *In MicrobialInterventionsin Agriculture and Environment.* Springer. Singapore, 1 :379–409 .
- 30- Hanna K., 2004-** Etude de faisabilité de l'utilisation de molécules « cage » dans la dépollution des sols : solubilisation et extraction de polluants organiques par les cyclodextrines. Thèse doctorat.Université Lyon. France, P 59.
- 31/[http://ebiblio.univmosta.dz/bitstream/handle/123456789/5606/memoire% 20fin% 20d %27etude% 202018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://ebiblio.univmosta.dz/bitstream/handle/123456789/5606/memoire%20fin%20d%27etude%202018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)-biblio.univ-mosta.dz**
- 32- Huamain C., Chunrong Z., Cong and T., Yongguan Z., 1999-** Heavy Metal Pollution in Soils in China: Status and Countermeasures. *Ambio*, 28, 130-134.
- 33- HUYNH. (2009).** Impact des métaux lourds sur l'interaction plantes/ verre le terre/ microflore tellurique tjesse de doctorat. Univ-paris Est p169.
- 34- Huang J., Chen J, Berti WR et al 1997.** Phytoremediation of lead-contaminated soils: Role of synthetic chelates in lead phytoextraction. *Environ Sci Technol*; 31:800-5.
- 35- Imtiaz MR., Mujawara LH., Shahzade T., Almeelbia T., Ismaila I, Oves M., 2016-** Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils. *Microbiological Research*, 183, 26-41.
- 36- Janssen, J., Weyens, N., Croes, S., Beckers, B., Meiresonne, L., Van Peteghem, P., Vangronsveld, J. (2015),** Phytoremediation of Metal Contaminated Soil Using

Willow: Exploiting Plant-Associated Bacteria to Improve Biomass Production and Metal Uptake. *International Journal of Phytoremediation*, 17(11), 1123–36.
<http://doi.org/10.1080/15226514.2015.1045129>

37- Kabata-Pendias A, *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press, 2011.

38-Kumar V., Shahi S.K., Singh S., 2018-Bioremediation: Aneco-sustainable approach for restoration of contaminated sites. *In Microbial Bioprospecting for Sustainable Development*. Springer: Singapore, pp. 115–136.

39- Ladjal, R., 2013. Problématique de la mobilisation et de la préservation des ressources hydrique dans le Sersou, Magister hydraulique, université, Tlemcen (Alger). 125 pp

40- Lei C., Guobo W., Yucen Z., Zhenyao S., 2016- Evaluating the impacts of soil data on hydrological and nonpoint source pollution prediction. *Science of the Total Environment*, 564, 19-28.

41- LEVITT J., 1980. Responses of plants to environmental stresses. Volume II: Water, radiation, salt, and other stresses. Academic Press, New York.

42- Lyoun .,D.4,Vogel .,T.M.,2001-Bioaugmentation as a strategy for the treatment of persistent pollutants in : Moo-Young,M(Ed), *Comprehensive Biotechnology* (Second Edition) , Academic Press , Burlington , pp.69-81 .

43- Macci, C., Peruzzi, E., Doni, S., Poggio, G., & Masciandaro, G. (2016). The phytoremediation of an organic and inorganic polluted soil: A real scale experience. *International Journal of Phytoremediation*, 18(4), 378–86.
<http://doi.org/10.1080/15226514.2015.1109595>

44- Masciandaro, G., Macci, C., Peruzzi, E., Ceccanti, B., & Doni, S. (2013). Organic matter –microorganism – plant in soil bioremediation: a synergic approach, 399–419.
<http://doi.org/10.1007/s11157-013-9313-3>

45- Mahar A, Wang P, Ali A et al 2016. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. *Ecotoxicol Environ Saf*;126:111–21.

46- Mench, M., Lepp, N., Bert, V., Schwitzguébel, J.-P., Gawronski, S. W.,

Schröder, P., & Vangronsveld, J. (2010). Successes and limitations of phytotechnologies at field scale: outcomes, assessment and outlook from COST Action 859. *Journal of Soils and Sediments*, 10(6), 1039–1070. <http://doi.org/10.1007/s11368-010-0190-x>

47- Muhammad S., Sana K., Ghulam A., Naeem S., Muhammad N., Muhammad S., Muhammad A., et Camille D., 2015 -Heavy Metal Stress and Crop Productivity , pp.14-15 in : Khalid Rehman Hakeem. *Crop Production and Global Environmental Issues*. [en ligne]. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/286922829_Heavy_metal_stress_and_crop_productivity (consulté le 01/05/2021).

48- Mulligan C.N., Yong R.N., et Gibbs B.F., 2004-Remediation technologies for metalcontaminated soilsand groundwater: an evaluation. *Engineering Geology* 60: 193-207

49- M. Vidali (2001), Bioremediation. An overview*, *Pure Appl. Chem.*, Vol. 73, No. 7, pp. 1163–1172.

50- Ortega M.F., Guerrero D.E., García., Martínez M.J., Bolonio D., Llamas J.F., Canoira L., Gallego J.L.R., 2018-Optimization of landfarming amendments based on soil texture and crude oil concentration. *Water Air Soil Pollut.* 229

51- Pengyan Z., Chengzhe Q., Xin H., Guohua K., Mingzhou Q., Dan Y., Bo P., Yanyan L., Jianjian H., Richard PD., 2018- Risk assessment and source analysis of soil heavy metal pollution from lower reaches of Yellow River irrigation in China. *Science of the Total Environment*, 633, 1136- 1147.

52- PICOT A., 2002-Expert européen de toxicologie.Le trio mercure,plomb,cadmium.Les métaux lourds : de grands toxiques.2022.

53- Pilon-Smits, E., 2005. Phytoremédiation . *Annual Review of Plant Biology*, Vol. 56: 15-39.

54- Phieler R, Voit A, Kothe E 2013. Microbially supported phytoremediation of heavy metal contaminated soils: Strategies and applications. In: Schippers A, Glombitza F, Sand W (eds.). *Geobiotechnology I*. Springer Berlin Heidelberg,, 211–35.

55- Prasad MN. Ed V. 2004. Heavy Metal Stress in Plants.Springer Berlin Heidelberg,

Berlin, Heidelberg.

56- Pulford, I.D. et Watson, C., 2003. Phytoremediation of heavy metal contaminated land by trees. A review. *Environment International*, Vol. 29: 529-540.

57- Qi W., Zhiyi X., Fangbai L., 2015. Using ensemble models to identify and apportion heavy metal pollution sources in agricultural soils on a local scale. *Environmental Pollution*, 206, 227-235.

58- Salehi M.A., Hakimghiasi N., 2017- Hydrodynamics and mass transfer in three-phase airlift reactors for activated carbon and sludge filtration. *Adv. Environ. Technol.* 2 : 179–184.

59- SCHOETERS G., DEN HOND E., ZUURBIER M ., NAGINIENE R ., VAN DENHAZEL P., STILIANAKIS N., RONCHETTI R et KOPPE J.G., 2006- Cadmium and children exposure and health effects. *Acta Paediatr.* 95(suppl), 50-54.

60- Singh O.V., Labana S., Pandey G., Budhiraja R., et Jain R.K., 2003- Phytoremediation : an overview of metallic ion decontamination from soil. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 61, 405-412, SL.

61- Sterckeman, T., Ouvrard, S. & Leglise, P., 2011. Phytoremediation des sols - Principes et définitions. Dans: s.l:s.n, p. 1.

62- Teklić T., Hancock JT., Engler M., Paradicović N., Cesar V., Lepeduš H., Štolfa I. et Bešlo D., 2008- Antioxidative responses in radish (*Raphanus sativus L.*) plants stressed by copper and lead in nutrient solution and soil. *Acta Biol Crac* 50:79-86.

63- Umme A., Adeel M., Sidra W., Riffat -Naseem M., 2016- Enrichment, geo accumulation and risk surveillance of toxic metals for different environmental compartments from Mehmood Booti dumping site, Lahore city, Pakistan. *Chemosphere*, 144, 2229-2237.

64- Vavasseur, A., Peltier, G. et Bourguignon, J., 2003. Biodépollution, Bioremediation. Des plantes pour nettoyer les sols et les eaux. *CLEFS CEA.*, Vol. 48: 85-88.

65- Vidali M., 2001- bioremediation. *Pure Appl. Chm.* 73(7) : 1163-1172.

66- Vodyanitskii YN., 2016- Biochemical processes in soil and groundwater contaminated by leachates from municipal landfills (Mini review). *Annals of agrarian science*, 14, 249 -256.

67- Wenyu H., Huifeng W., Lurui D., Biao H., OleK B., Hans Christian BH., Yue H et Peter EH., 2018- Source identification of heavy metals in peri-urban agricultural soils of southeast China: An integrated approach. *Environmental Pollution* , 23 , 650

68-Y Yang ,FS Zhang ,HF Li,RF Jiang –Journal of environmental management ,2009-Elsevier.Accumulation of cadmium in the edible parts of six vegetable species grown in Cd-contaminated soils



❖ Annexe :

Tableau 01 : Production minière mondiale de métaux lourds (Brian, 2013).

Element	Symbol	World production			
		1973 [11]	1994 [3]	2004 [3]	2010 [10]
Antimony	Sb	–	106,000	112,000	135,000
Arsenic	As	–	43,000	37,500	54,500
Barium ^a (59%)	Ba	–	4,300,000	6,900,000	6,900,000
Cadmium	Cd	17,200	18,100	17,200	22,000
Chromium ^b (46.5%)	Cr	–	9,570,000	17,000,000	22,000,000
Cobalt	Co	–	18,500	46,900	88,000
Copper	Cu	7,116,900	9,430,000	14,500,000	16,200,000
Gold	Au	–	2,300	2,470	2,500
Lead	Pb	3,487,000	2,800,000	3,150,000	4,100,000
Manganese ^c (35–40%)	Mn	–	7,190,000	11,000,000	13,000,000
Mercury	Hg	9,300	1,760	1,750	1,960
Molybdenum	Mo	–	104,000	139,000	234,000
Nickel	Ni	710,000	906,000	1,400,000	1,550,000
Selenium	Se	–	1,880	1,500	2,260
Silver	Ag	–	13,900	19,500	22,200
Thallium (kg)	Tl	–	15,000	15,000	10,000
Tin	Sn	233,800	184,000	250,000	261,000
Tungsten	W	–	26,000	60,000	61,000
Vanadium	V	–	33,900	44,000	56,000
Zinc	Zn	5,709,400	6,810,000	9,100,000	12,000,000

Résumer

Cette étude a été réalisée dans la zone agricole de Bougara, qui est irriguée par le barrage de Bougara. Le climat de la région est semi-aride à hiver frais, avec des précipitations irrégulières. Les sols de cette zone sont favorables à la culture de la tomate et du tournesol, ils présentent des texture meuble d'ordre argileux-sableux et limoneux-sableux. Cependant, les concentrations de nickel, zinc, cuivre, chrome et plomb dans le sol dépassent les normes de sécurité établies, ce qui constitue un risque de contamination toxique pour la santé humaine. Des plantules de tomate et de tournesol ont été cultivées dans ces sols pollués et des analyses ont été effectuées pour mesurer la présence de métaux lourds dans les différentes parties de chaque espèce. Il a été constaté que le tournesol est capable d'accumuler efficacement les métaux lourds, notamment le nickel, le zinc, le cuivre et le chrome dans les parties aériennes soit les tiges et les feuilles, tandis que la tomate accumule principalement du plomb dans ses racines. Cette étude souligne la nécessité de prendre des mesures pour remédier à la contamination des sols et détermine d'une manière préliminaire que le tournesol pourrait être une solution potentielle de phytoremédiation.

Mots clé : Bioremédiation , Barrage Bougara , Pollution ,Sol ,Métaux lourds, Plante

Abstract

This study was carried out in the agricultural zone of Bougara, which is irrigated by the Bougara dam. The climate of the region is semi-arid with cool winters, with irregular rainfall. The soils of this area are favorable for the cultivation of tomatoes and sunflowers, they have loose textures of clay-sandy and loamy-sandy order. However, the concentrations of nickel, zinc, copper, chromium and lead in the soil exceed the established safety standards, which constitute a risk of toxic contamination for human health. Tomato and sunflower seedlings were grown in these polluted soils and analyze were carried out to measure the presence of heavy metals in the different parts of each species. It has been found that sunflower is able to effectively accumulate heavy metals, including nickel, zinc, copper and chromium in the aerial parts of stems and leaves, while tomato mainly accumulates lead in its roots. This study highlights the need for action to address soil contamination and determines in a preliminary way that sunflower could be a potential phytoremediation solution.

Key words: Bioremediation , Bougara Dam , Pollution ,Soil , Plants .Heavy metal.

الملخص

أجريت هذه الدراسة بمنطقة بوقرة الزراعية المروية بسد بوقرة. مناخ المنطقة شبه جاف مع شتاء بارد مع عدم انتظام هطول الأمطار. تربة هذه المنطقة مواتية لزراعة الطماطم وعباد الشمس ، ولديها قوام رملية طينية ورملية طينية. ومع ذلك ، فإن تركيزات النيكل والزنك والنحاس والكروم والرصاص في التربة تتجاوز معايير السلامة المعمول بها ، مما يشكل خطر التلوث السام على صحة الإنسان. تمت زراعة شتلات الطماطم وعباد الشمس في هذه التربة الملوثة وأجريت التحليلات لقياس وجود المعادن الثقيلة في الأجزاء المختلفة من كل نوع. لقد وجد أن عباد الشمس قادر على تراكم المعادن الثقيلة بشكل فعال ، بما في ذلك النيكل والزنك والنحاس والكروم في الأجزاء الهوائية من السيقان والأوراق ، بينما تتراكم الطماطم بشكل أساسي في جذورها. تسلط هذه الدراسة الضوء على الحاجة إلى اتخاذ إجراءات لمعالجة تلوث التربة وتحدد بطريقة أولية أن عباد الشمس يمكن أن يكون حلاً محتملاً للمعالجة النباتية

الكلمات المفتاحية : المعالجة الحيوية، سد بوقرة، التلوث، التربة، النبات، المعادن الثقيلة