



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique



Université Ziane Achour-Djelfa

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences Agronomiques et Vétérinaires

### MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Eau et Environnement

#### Thème

Etude de la phytoremédiation du chrome hexavalent par  
deux plantes spontanées de la ville de Djelfa : *Avena sativa*  
*L.* et *Marrubium vulgare L.*

Présentée par : GHEZAL Meriem

LEBBAZ Nihal

Devant le jury composé de :

M. AdliBenziane	MCA-Université de Djelfa	Président
M. Hachi Mohamed	MCA-Université de Djelfa	Promoteur
M. Hamidi Mohamed	MCA-Université de Djelfa	Co-Promoteur
M. Touati Mostefa	MCA-Université de Djelfa	Examineur
M. BeziniElhadi	MAA-Université de Djelfa	Examineur

AU : 2020-2021



## *Remerciements*

*Toute notre gratitude, grâce et remerciement vont à Dieu le tout puissant qui nous a donné la force, la patience le courage et la volonté pour élaborer ce modeste travail.*

*Au terme de ce travail nous tenons à exprimer nos profonds respects et nos sincères remerciements à nos promoteurs Hachi Mohamed, d'avoir bien voulu accepter de diriger ce modeste travail avec autant d'attention et de patience, ainsi pour ses conseils et ses orientations.*

*Nous remercions tous les membres du jury qui vont certainement enrichir cette recherche et la rendre plus performante.*

*À tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce travail ici l'expression de notre sympathie.*

*Toute notre gratitude va à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation*

*C'est malheureux que la situation actuel dans cette pandémie, la maladie de Corona, qui nous a empêchés de présenter notre travail, et nous demandons à Dieu de nous protéger de cette calamité*



## *Dédicace :*

*C'est avec un très grand honneur que je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères au monde mes chers parents pour leurs amour et bonté et que sans eux je n'aurai jamais pu atteindre mon objectif, que dieu me les garde.*

*Je dédie cette modeste réalisation :*

- *A ma très chère sœur FATNA Et ses enfants ABDELLAH et AMINE.*
- *A mes chers frères, MOHAMED, AZIZ et YASIN.*
- *A toute la famille «GHEZAL » et « BENHAFFAF ».*
- *A mon amie et deuxième sœur NIHAL.*

*Sans oublier mon fiancé ABDERAOUF.*

*\* اللهم وفقنا لما تحبه وترضاه \**

*MERJEM*





*Dédicace :*

*Je dédie ce modeste travail à ma chère  
mère*

*A mon cher père et je leur souhaite la  
longévité pour sa compréhension,  
Son aide et son soutien moral et financier*

*A mes frères*

*A ma sœur*

*A toute la famille*

*A tous mes amis, particulièrement Ghazel  
Meriem et Makar Djihad*

*A ceux qui m'ont soutenu pendant toute  
la durée de mes études*



*nihal*



# **SOMMAIRE**

# Sommaire

Liste d'abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 1

## CHAPITRE I: SYNTHESEBIBLIOGRAPHIQUE

1.Introduction..... 3

2. Pollution des sols par le chrome hexavalent..... 3

2.1. Définition :..... 3

2.1.1. Un site contaminé :..... 3

2.1.2. Les éléments métalliques :..... 3

2.1.3. Le chrome..... 4

2.1.4. Chrome hexavalent..... 4

2.1.5. Chrome trivalent..... 4

2.2 .Réactivité chimique du chrome dans l'environnement..... 5

2.2 .1.Etats d'oxydation ..... 5

2.2.2. Spéciation du chrome dans l'environnement..... 5

2.3 .Sources du chrome dans l'environnement..... 5

2.3.1. Source naturelle..... 5

2.3.2. Sources anthropiques..... 6

2.4. Rejets dans l'environnement..... 6

2.41..Transfert et distribution du chrome dans l'environnement..... 7

2.42..Transfert dans les êtres vivants..... 7

2.5. Teneurs du chrome dans les sols..... 7

2.6. Teneurs du chrome dans les eaux..... 8

2.6.1. Eaux souterraines..... 8

2.6.2. Eaux de surface..... 8

2.6.3. Eaux de mer.....	8
2.6.4. Eaux de distribution.....	8
2.6.5. Eaux embouteillées.....	8
2.7. Toxicité du chrome.....	8
2.7.1 Chez les animaux.....	8
2.7.2. Chez les végétaux.....	9
2.7.3. Chez les micro-organismes.....	9
2.8. Les inconvénients des techniques non biologiques.....	10
3. Traitement de site pollué par le chrome avec des techniques biologiques.....	10
3.1. Définition de la phytoremédiation.....	10
3.2. Le choix de l'espèce végétale pour phytoremédiation.....	10
3.3. Le choix de la technique de dépollution.....	11
3.4. Diverses techniques de phytoremédiation.....	12
3.4.1. Phytoextraction.....	12
3.4.2. Phytostabilisation.....	13
3.4.3. La phytodégradation.....	14
3.4.4. Phytovolatilisation.....	15
3.4.5. Rhizofiltration .....	15
4. Présentation des espèces utilisées .....	15
4.1. <i>Avena sativa</i> L. ....	15
4.1.1. Définition .....	15
4.1.2. Classification de l'Avoine.....	16
4.1.3. Type de sols et climat.....	17
4.1.4. Caractères morphologiques .....	17
4.2. <i>Marrubium vulgare</i> .....	17
4.2.1. Définition.....	17
4.2.2. Classification de <i>Marrubium vulgare</i> .....	18

4.2.3. Description botanique .....	18
4.2.4. Le nom vernaculaire .....	19
4.2.5. Répartition géographique.....	20
4.2.6. Utilisation de la plante .....	20
5. Conclusion .....	20
<b>CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES</b>	
6.Introduction.....	21
7. Matériel.....	21
7.1. Verrerie.....	21
7.2. Appareillages .....	21
7.3. Petit matériel et consommables.....	22
8. Les produits .....	22
9. Méthodes .....	23
9.1. Implantation et arrosage avec le chrome.....	23
9.2. Séchage, extraction et analyse du chrome hexavalent .....	24
9.2.1. Séchage des échantillons .....	24
9.2.2. Préparation des solutions d'extraction.....	24
9.2.3. Extraction du chrome à partir du sol.....	25
9.2.4. Extraction du chrome hexavalent à partir des plantes.....	25
9.2.5. Dose du chrome hexavalent par spectrophotométrie UV-Visible.....	26
9.3.Courbe d'étalonnage .....	27
9.3.1 Préparation des solutions.....	27
9.3.2.Établissement de la courbe d'étalonnage .....	27
10..Les facteurs caractérisant le phénomène de phytoremédiation.....	28
10.1. Facteur de translocation (FT) .....	28
10.2. Facteur d'enrichissement (FE) .....	28
10.3. Le facteur de bioaccumulation (FB) .....	29

## CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

11. Introduction .....	30
12. Morphologie des deux espèces de plante avant et après contact avec le chrome hexavalent .....	30
13. Séchage des échantillons de plante et de sol .....	31
14. Résultats de l'analyse du chrome hexavalent dans les échantillons de sol et de plantes.....	31
14.1. Courbes d'étalonnage.....	31
14.2. Présence du chrome dans les échantillons du sol et de plantes.....	33
14.2.1. Chrome hexavalent dans <i>Avena sativa</i> .....	33
14.2.2. Chrome hexavalent dans <i>Marrubium vulgare</i> .....	35
15. Résultat des facteurs caractérisant le phénomène de phytoremédiation .....	37
15.1. Facteurs de translocation .....	37
15.2. Facteur d'enrichissement .....	38
15.3. Facteur de bioaccumulation .....	38
16. Teneur moyenne en chrome hexavalent dans les deux espèces .....	38
17. Discussions .....	39
17.1. Facteurs de translocation .....	40
17.2. Facteur d'enrichissement .....	41
17.3. Facteur de bioaccumulation .....	41
18. Conclusion .....	41
Conclusion générale .....	42
Références bibliographiques.....	43
Annexes	
Résumé	

## Liste des abréviations utilisées

ÉTM : Éléments de Traces Métalliques.

AS: *Avena Sativa*.

MB: *Marrubium vulgare*.

ND : Non détectée.

Cr(III) : Chrome trivalent

Cr(VI) : Chrome hexavalent

Pb : Plomb

Hg : Mercure

Cd : Cadmium

Cu : Cuivre le

Ni : Nickel

Zn : Zinc

As : Arsenic

Se : Sélénium.

Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Oxyde chromique.

FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> : Chromite

CaCrO<sub>4</sub> : Chromatite;

PbCrO<sub>4</sub> : Crocoïte

pH : potentiel hydrogène

FT : Facteur de translocation.

FE : Facteur d'enrichissement.

FB : Le facteur de bioaccumulation.

Eq. : Equation.

## Liste de la figure :

Figure 01 : Famille de techniques de dépollution des sols par lieu de traitement.

Figure 02 : Phytoextraction.

Figure 03 : Rhizodégradation.

Figure 04 : Phytodégradation.

Figure 05 : Phytovolatilisation.

Figure 06 : l'appareil végétatif de l'avoine.

Figure 07: *Marrubium vulgare*.

Figure 08: Morphologie des fleurs et fruits de *M .vulgare*.

Figure 09:l'arrosage des deux plantes (a) *Marrubium vulgare* (b) *Avena sativa* par chrome.

Figure 10 : Extraction du chrome hexavalent à partir des échantillons de sol.

Figure 11 : Extraction du chrome hexavalent à partir des échantillons de plantes.

Figure 12 : Morphologie des espèces de plantes avant et après contact avec le chrome hexavalent (a) AS avant contact avec le chrome (b) AS après contact avec le chrome (c) MV avant contact avec le chrome (d) MV après contact avec le chrome.

Figure 13 : Feuilles et racines des espèces *Avena sativa* et *Marrubium vulgare* après séchage.

Figure 14 : Solutions standard de chrome hexavalent après contact avec 1.5 Diphenylcarbazide.

Figure 15 : l'analyse de solution par UV-Visible.

**Liste du tableau :**

Tableau 01 : Les inconvénients des techniques non biologiques.

Tableau02 : Classification de l'Avoine.

Tableau03 : Classification de Marrubium.

Tableau04 : établissement de la courbe d'étalonnage.

Tableau 05: Les résultats d'analyse de la plante (*Avena sativa*).

Tableau 06: Les résultats d'analyse de la plante (*Marrubium vulgare*).

Tableau 07 : les résultats des facteurs (FT-FE-FB) des espèces *Avena sativa* et *Marrubium vulgare*.

# INTRODUCTION

## GENERALE

**Introduction générale :**

Le sol constitue un milieu de transfert situé à l'interface du milieu aquatique, l'atmosphère et la biosphère. Le sol étant un milieu intégrateur et accumulateur, c'est un ensemble de sources (naturelles et/ou anthropiques) et de mécanismes (sédimentation, apports atmosphériques, enfouissement, érosion, transport,...), qui peuvent être à l'origine de la dégradation de sa qualité conduisant à une perte de certaines de ses fonctions (Callier L. et al., 2002). La pollution par les éléments métalliques est un problème persistant et d'un grand intérêt, parmi ces éléments, le chrome est un polluant très occupant.

Le chrome est un métal présent en petites quantités dans la nature (Decker M. et Dosso O., 2006). Il est présent dans l'environnement principalement sous deux formes : le Cr(III) et le Cr(VI). La forme hexavalent, que l'on retrouve dans les rejets industriels, est très toxique et très soluble dans l'eau. Cette solubilité lui confère une grande mobilité dans les écosystèmes (Desjardin V., 2002). Le chrome métallique et ses sels sont très utilisés dans l'industrie, principalement dans la métallurgie, la fabrication de produits réfractaires et de produits chimiques. Des cas de pollutions importantes peuvent exister à l'aval de rejets d'eaux usées industrielles et d'eaux de circuits de refroidissement utilisant du chrome. Si le chrome trivalent est indispensable à l'organisme humain et animal à une certaine dose, des teneurs trop importantes peuvent entraîner un risque pour la santé. De même, les composés du chrome hexavalent présentent des risques avérés pour la santé (Decker M. et Dosso O., 2006). Les analyses du sol, de l'eau de surface ou souterraine permettent de déterminer si les niveaux de contamination par le Cr(VI) excèdent les limites réglementaires qui sont de l'ordre de 0.1 mg/L pour le Cr(VI) (Joradp., 2009).

Il existe plusieurs méthodes pour la remédiation des sols contaminés par le chrome hexavalent. On peut citer entre autres, les méthodes physico-chimiques, thermiques ou biologiques (Anonyme, 2016).

Les traitements physiques constituent la majorité des techniques mises en œuvre. Elles consistent à séparer et concentrer les polluants, sans les modifier ou les détruire. Les procédés d'extraction, de lavage et de confinement sont les plus souvent utilisés (Scriban R., 1999). Les traitements chimiques ont pour but de détruire les polluants ou de les transformer en une forme moins nocive pour l'environnement; et ceci par l'intermédiaire de réactions chimiques se produisant entre le polluant et le réactif ajouté. Ils peuvent être applicables in situ ou après excavation des sols. La majorité des procédés exigent que les sols soient sous forme de boues

ou que les contaminants soient mobilisés dans un milieu liquide (Masten et Davies., 1997). Les méthodes de remédiation thermique consistent généralement à l'incinération et la désorption thermique. Elles sont employées pour la décontamination des sols pollués par les produits organiques. Ces technologies utilisent les hautes températures pour réduire les polluants en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O (Lecomte p., 1998).

Les méthodes physico-chimiques de dépollution des sites pollués, utilisées in situ et ex situ, présentent l'inconvénient d'être coûteuses et lourdes à mettre en œuvre (Raskin I *et al.*, 1994). De plus, elles perturbent fortement l'activité biologique des sols, altérant la structure physique de ces derniers, et laissent souvent un sol totalement stérile.

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 intéressante. La capacité de certaines plantes à tolérer ou même à accumuler des métaux a permis d'ouvrir de nouvelles voies de recherche sur le traitement des sols par phytoremédiation (Halli A., 2016).

La phytoremédiation, apparue au début des années 1990, consiste l'utilisation de plantes capables de croître sur des sols à forte teneur en métaux et susceptibles d'immobiliser ou absorber une quantité appréciable de polluant. Cette technique, appelée phytoremédiation, est prometteuse car elle est peu coûteuse et plus respectueuse d'environnement contrairement aux méthodes conventionnelles (Repellini F., 2000).

A cause des activités de la tannerie exerçant dans la ville de Djelfa (Korichi A., 2019), la pollution des sols par le chrome hexavalent est un problème à priorité trop élevée.

Notre travail s'intéresse à déterminer le pouvoir de phytoremédiation de certaines plantes spontanée dans la ville de Djelfa, nous avons analysé les sols et les partie sous-sol et aérienne de deux espèces de plante (*Avena sativa L.* /*Marrubium vulgare*). Le choix de ces espèces est basé sur leur pouvoir de phytoremédiation important décrit dans les travaux antérieurs (Korichi A., 2019).

**CHAPITRE I : SYNTHÈSE**

**BIBLIOGRAPHIQUE**

## **1. Introduction :**

La pollution par les Éléments de Traces Métalliques (ETM) toxiques est un problème environnemental majeur. La libération de ces métaux sans traitement représente une menace sérieuse pour la santé publique à cause de leur persistance (Decker M. et Dosso O., 2006).

Le chrome se retrouve dans les trois compartiments de l'environnement, l'eau, l'air et le sol mais aussi par extension dans les organismes vivants. Le chrome peut être présent en forte quantité de manière naturelle suite à l'altération des massifs riches en ETM, mais également suite aux activités anthropiques comme la prospection minière, le traitement du bois, la métallurgie, la chimie (catalyseur) et l'industrie (tannerie, chromage) (Anonyme, 2015).

Dans ce chapitre nous aborderons, Pollution des sols par le chrome hexavalent et nous traitons l'élimination biologique du chrome hexavalent. Cette technique consiste à utiliser le potentiel biologique du sol ou à apporter des organismes vivants dans ce sol pour réduire, voire éliminer la pollution présente. Les organismes utilisés pour ces procédés, peuvent être des micro-organismes endogènes ou exogènes, ou bien des plantes. Dans ce dernier cas on parle de phytoremédiation (Desjardin V., 2002). Et aussi la présentation des deux plantes *Avena sativa* et *Marrubium vulgare*.

## **2. Pollution des sols par le chrome hexavalent**

### **2.1. Définition :**

#### **2.1.1. Site contaminé :**

Un site contaminé contient une ou plusieurs substances, organiques ou inorganiques, pouvant être nocives pour l'environnement et les êtres vivants.

Les analyses de sol, d'eau de surface ou souterraine permettent de déterminer si les niveaux de contamination excèdent les limites réglementaires de divers contaminants (Anonyme, 2016).

#### **2.1.2. Les éléments métalliques :**

Éléments naturellement présents dans les sols dont certains sont indispensables aux plantes.

Ils font partie des oligo-éléments et des ETM. On utilise également l'expression métaux lourds, qui correspond à une définition physique (masse volumique supérieure à 5 g/cm<sup>3</sup>) ou bien oligo-éléments. Les ETM les plus connus pour leur toxicité sont le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le zinc (Zn). Il faut ajouter à cette liste l'arsenic (As) et le sélénium (Se), qui ne sont que des Eléments Traces et non pas des métaux (Ait Ahmed O., 2015).

### **2.1.3. Le chrome :**

Est un élément chimique de symbole Cr et de numéro atomique 24 son étymologie vient du grec chroma signifiant couleur, car les composés du chrome font partie de la série des métaux de transition. C'est un métal dur, d'une couleur grise acier-argenté. Il résiste à la corrosion (Cotte A. et Duret A., 2010).

Le chrome est connu pour intervenir dans différentes réactions chimiques et biologiques qui peuvent modifier sa spéciation et par conséquent son comportement dans l'environnement. Il peut y avoir oxydation du chrome (III) ou réduction du chrome (VI) (Desjardin V., 2002).

Le chrome trivalent (Cr<sup>3+</sup>) est un oligoélément essentiel. Il est assez répandu dans la nature et c'est sous cette forme que l'on retrouve le chrome dans l'alimentation. La forme hexavalent (Cr<sup>6+</sup>), quant à elle, est moins abondante, très toxique, cancérigène et a pour origine principale la métallurgie (Cotte A. et Duret A., 2010).

### **2.1.4. Chrome hexavalent :**

La forme Cr<sup>6+</sup> est la forme considérée comme présentant le plus de menaces pour en raison de sa haute solubilité, de sa capacité de pénétrer les membranes cellulaires et de son fort pouvoir oxydant (Desjardin V., 2002).

### **2.1.5. Chrome trivalent :**

Le chrome trivalent [Cr (III)] est l'état du chrome la plus stable, donc plus répandu dans la nature : on en trouve dans des minerais, tels que la chromite, qui contient de l'oxyde chromique (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Les sels de chrome trivalent peuvent être employés dans la teinture des textiles, l'industrie de la céramique et du verre, ainsi qu'en photographie. Il s'agit surtout d'un oligoélément essentiel ayant un rôle dans le métabolisme du glucose, des protéines et

des lipides. C'est sous cette forme que l'on retrouve le chrome dans l'alimentation, les compléments alimentaires et les spécialités pharmaceutiques (Cotte A. et Duret A., 2010).

## 2.2. Réactivité chimique du chrome dans l'environnement :

### 2.2.1. Etats d'oxydation :

L'isotope le plus abondant est le  $^{52}\text{Cr}$ . Comme d'autres métaux de transition, le chrome peut exister sous plusieurs formes de valence pouvant aller de  $-2$  à  $+6$ . Les formes les plus couramment rencontrées dans les valeurs de pH et de potentiel redox trouvées dans l'environnement sont les formes  $3+$  et  $6+$  ( $\text{Cr(III)}$  et  $\text{Cr(VI)}$ ). La forme (III) est considérée comme la forme la plus stable, donc moins réactive et par conséquent moins toxique (Desjardin V., 2002).

### 2.2.2. Spéciation du chrome dans l'environnement :

Le chrome hexavalent  $\text{Cr(VI)}$  :

Le chrome hexavalent est un oxydant puissant. On les retrouve sous des formes d'oxydations qui sont très solubles dans l'eau et qui répondent aux équations suivantes selon le pH:



Les deux équations ci-dessus montrent qu'à faibles pH, proche de 0,  $\text{H}_2\text{CrO}_4$  est l'espèce dominante alors qu'entre 0,6 et 6 environ, c'est  $\text{HCrO}_4^-$ . Pour des pH  $> 6$ , c'est l'ionchromate  $\text{CrO}_4^{2-}$  qui est dominant. Etant donné qu'on ne retrouve pas de pH proche de 0 dans les matrices environnementales (Desjardin V., 2002).

## 2.3. Sources du chrome dans l'environnement :

### 2.3.1. Source naturelle :

Le chrome ne se trouve pas à l'état natif que dans les météorites. Les minéraux les plus importants (plus de quarante minéraux ont été identifiés comme contenant du chrome) sont :

-la chromite ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) ;

-la chromatite ( $\text{CaCrO}_4$ ) ;

-la crocoïte ( $\text{PbCrO}_4$ ).

Le chrome est surtout concentré dans certains minéraux (silicates de fer et magnésium ou olivines) des basaltes ou serpentines (Amiri N. et Nedjadi R., 2016).

### **2.3.2. Sources anthropiques :**

#### **2.3.2.1. Usage industriel :**

Durant le XVIII<sup>e</sup> siècle, le chrome fut principalement utilisé comme pigment dans la peinture. De nos jours, on l'utilise principalement (à 85%) dans les alliages de métaux. Le chrome est utilisé dans le chromage des métaux (et évite ainsi leur corrosion), le tannage du cuir, la teinture de tissus, les matériaux d'enregistrement audio et vidéo (oxyde de chrome) ou encore la fabrication de pigments (le chromate de plomb est un pigment jaune et l'oxyde de chrome est utilisé dans l'industrie du verre pour donner la couleur vert émeraude). Il est également employé pour faire des alliages comme l'acier inoxydable (70% Fe, 20% Cr, 10% Ni), utilisé dans de nombreux domaines, comme par exemple dans l'agroalimentaire. Plusieurs de ses sels sont de puissants oxydants (Charenete M., 1993).

#### **2.3.2.2. Usage domestique :**

Le chrome est ubiquitaire : constituant de multiples objets de la vie courante en acier inox, il est présent à l'état de trace dans de nombreux produits. On en trouve dans le matériel de bureau tel que les colles, encres, stylos, timbres de caoutchouc et autoadhésifs. On signale aussi la présence de chrome dans les savons, détergents et cosmétiques, les lessives mais aussi dans les peintures, cirages, cuirs, sprays, émail, décongelant, allumettes de sécurité, piles sèches, produits de nettoyage des métaux, lames et crème à raser (Desjardin V., 2002).

### **2.4. Rejets dans l'environnement :**

Dans l'atmosphère, les principales sources d'émission de chrome sont l'industrie chimique, la combustion de gaz naturel, d'huile et de charbon. S'ajoute à cela le transport par le vent des poussières de routes, les usines de production de ciment et les industries utilisant le chrome ou des composés du chrome (Desjardin V., 2002).

Dans les eaux naturelles, le chrome peut provenir de filons métallifères (chromite). Cependant, cela est assez rare du fait de sa faible solubilité. La présence de chrome dans les eaux est donc le plus souvent anormale. Elle est due principalement à des rejets d'eaux usées industrielles et à la pollution par les véhicules (Desjardin V., 2002).

#### **2.4.1. Transfert et distribution du chrome dans l'environnement :**

Le chrome dans l'air est la plupart du temps présent sous forme de particules fines d'un diamètre de 1 $\mu$ m environ. Ces particules, qui se fixent sur la pluie ou la neige, se déposent ensuite progressivement sur les sols et dans les eaux Transfert sol-eau. Le chrome hexavalent est transformé de manière importante en chrome trivalent dans les sols et les sédiments. Ce phénomène est d'autant plus important que les sols sont riches en matière organique et que le pH est faible (Charenete M., 1993).

#### **2.4.2. Transfert dans les êtres vivants :**

##### **2.4.2.1. Chez les végétaux :**

Sous sa forme adsorbée sur des hydroxydes métalliques, le chrome est peu disponible pour les plantes. Cependant, en présence de chrome dans les sols, on constate une quantité plus importante de chrome dans les végétaux avec une concentration supérieure dans les racines, que dans les feuilles et que dans les graines. Les essais montrent une meilleure translocation du chrome vers la tige à partir d'une solution de chrome VI qu'avec une solution de chrome III (Decker M. et Dosso O., 2006).

##### **2.4.2.2. Chez les animaux :**

Des facteurs de bioconcentration ont été déterminés pour différents organismes. Ils représentent le rapport entre la concentration du chrome dans l'organisme vivant et sa concentration dans le milieu. Le chrome VI ne s'accumule pas chez les poissons alors que le chrome III s'y accumule davantage (Decker M. et Dosso O., 2006).

#### **2.5. Teneurs du chrome dans les sols :**

Le chrome fait partie des éléments chimiques ubiquistes présents à la surface de la terre à des concentrations inférieures à 0,1% (la teneur moyenne des sols mondiaux est de 50 mg/kg). Le chrome présent dans le sol provient essentiellement de la roche mère. Il est

essentiellement présent sous forme de chrome trivalent, plus rarement sous forme de chrome hexavalent (Charenete M., 1993).

## **2.6. Teneurs du chrome dans les eaux :**

### **2.6.1. Eaux souterraines :**

Le chrome dans les eaux souterraines se trouve essentiellement sous forme trivalente. Les eaux souterraines ont des teneurs en chrome relativement faibles en moyenne inférieures à 1 µg/L (Callier L. et al, 2002).

### **2.6.2. Eaux de surface :**

Les eaux de surface ont des teneurs en chrome qui varient de 1 à 10 µg/L (Desjardin V., 2002)

### **2.6.3. Eaux de mer :**

Des mesures dans l'eau de mer indiquent des teneurs naturelles en chrome variant de 0,04 à 0,5 µg/L, En mer du Nord, on a obtenu une valeur de 0,7 µg/L (Desjardin V., 2002).

### **2.6.4. Eaux de distribution :**

La limite pour les eaux destinées à la consommation humaine est de 50 µg/L pour le chrome total (Decker M. et Dosso O., 2006).

### **2.6.5. Eaux embouteillées :**

D'après les données disponibles dans la littérature actuelle, il semble que les eaux embouteillées ne contiennent pas de chrome (Decker M. et Dosso O., 2006).

## **2.7. Toxicité du chrome :**

### **2.7.1. Chez les animaux :**

La forme hexavalent n'est pas la source nutritionnelle car elle est très toxique et mutagène.

En principe, l'homme et l'animal absorbent peu de chrome par inhalation, mais beaucoup à travers des aliments et l'eau potable. Les composés chromiques absorbés avec les aliments sont relativement inoffensifs, mais les chromates sont fortement

toxiques. La résorption dans le tube intestinal dépend beaucoup de la structure chimique du chrome (Desjardin V., 2002).

### **2.7.2. Chez les végétaux :**

Le chrome ne semble pas être essentiel à la vie des plantes. Sa toxicité vis-à-vis du règne végétal estrade dans les systèmes naturels. Certaines plantes poussent sur des sites hautement contaminés en chrome. Certains auteurs s'accordent à dire qu'il n'y a pas d'absorption du chrome par les végétaux ou seulement une absorption racinaire sans passage vers les autres parties de la plante (Losi et al., 1994). Mais une étude récente a montré que la jacinthe d'eau cultivée en milieu riche en chrome hexavalent était capable de le réduire au niveau de ses racines. Le Cr(III) est alors stocké au niveau de celles-ci mais aussi dans d'autres tissus comme les feuilles et le pétiole sous forme libre ou complexée avec des oxalates (Lytle et al, 1998).

### **2.7.3. Chez les micro-organismes :**

Le chrome n'est pas un métal essentiel pour la croissance des micro-organismes. Le chrome a un effet toxique sur les bactéries saprophytes et nitrifiantes, sur les champignons filamenteux, les algues et sur le phytoplancton. Le chrome (VI) altère le matériel cellulaire, le métabolisme et les réactions physiologiques (Desjardin V., 2002).

**2.8. Les inconvénients et les avantages des méthodes de traitement des sols**

**Tableau 01 : Comparaison entre les techniques physico-chimiques et biologiques**

Les inconvénients des techniques physico-chimiques (Yennek M. <i>et</i> Zaouche M., 2017)	Les avantages de la phytoremédiation (Vila M ,2006); (Suresh B. <i>et</i> Ravishankar G., 2004).
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Coût élevé</li> <li>-Impossible d’appliquer dans les sols argileux</li> <li>-Utilisation des solutions toxiques pour l’environnement.</li> <li>-Consommation énergétique très importante.</li> <li>-Surface des sols traités faibles</li> <li>-Profondeur de traitement maximal est de 6m</li> <li>-Les propriétés texturales et de fertilisation des sols sont complètement détruites.</li> <li>-Ces techniques détruisent les populations de micro-organismes et organismes des sols</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-faible coût</li> <li>-Utilisation de l’énergie soleil</li> <li>-Le travail in situ réduit les risques -Améliorer de la qualité des sols.</li> <li>-La croissance du système racinaire permet une aération des sols ce qui stimule l’activité microbologique</li> <li>-Les végétaux participent également à la diminution de l’érosion.</li> <li>-les plantes diminuent l’infiltration des eaux de surface polluées vers les nappes phréatiques.</li> <li>-l’avantage principal des techniques biologiques réside dans leur mise en œuvre sur le site même (in situ).</li> </ul>

**3. Traitement de site pollué par le chrome avec des techniques biologiques :**

**3.1. Définition de la phytoremédiation :**

phyto" = végétal ; "remedium" = rétablissement de l'équilibre.

La phytoremédiation est définie comme étant un groupe de technologies qui utilise les plantes pour réduire, enlever, dégrader, ou immobiliser les contaminants présents dans les sols, les boues, les sédiments, les eaux de surface, les eaux souterraines ainsi que les eaux usées (Fournon D., 1999).

**3.2. Le choix de l'espèce végétale pour phytoremédiation :**

Les plantes peuvent être choisies en fonction de la nature du contaminant présent dans le sol (type de polluant), car il faut que la plante utilisée soit capable d’extraire le polluant, en

fonction du climat, et également en fonction de sa biomasse, de façon à ce qu'elle puisse accumuler une quantité importante de polluants(Hezzat H.,2012).

Le choix des espèces à utiliser pour fixer le chrome présent dans les sols dépend de plusieurs paramètres :

- Les caractéristiques physico-chimiques du sol.
- La forme des polluants dans les sols.
- Le degré de tolérance des végétaux choisis.
- La production de biomasse.
- Les mécanismes d'absorption de la plante.
- Et le transport vers les parties aériennes de la plante. (Rebhi A., 2019)

### **3.3. Le choix de la technique de dépollution :**

Le choix de la technique de dépollution se fait en fonction de plusieurs critères. On peut citer notamment :

La superficie du site et le volume de terres polluées.

Le coût des traitements.

La nature et le degré de pollution du site.

La stabilité des substances à dépolluer.

Les objectifs de dépollution.

Quatre techniques sont envisageables selon le type de pollution :

Traitement in situ : Ce mode de traitement permet d'extraire et de traiter les polluants sur place; ils sont soit dégradés, soit fixés dans le sol grâce à des liants hydrauliques.

Traitement sur site après excavation des terres : Il permet d'extraire et de traiter les terres à dépolluer, qui peuvent être laissées ensuite sur le site ou évacuée après traitement.

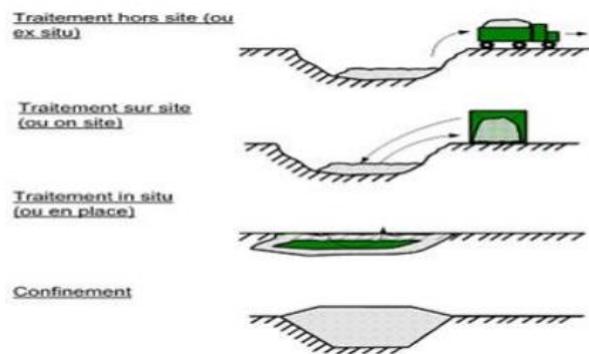
Traitement hors situ : Il permet d'excaver et d'évacuer les déchets, terres et eaux polluées vers un centre de traitement ou de stockage adapté (Ait Ahmed O., 2016).

Confinement : Il permet de laisser les terres à dépolluer sur le site en empêchant la propagation des polluants grâce à une barrière étanche : couverture imperméable, paroi

moulée, évitant ainsi l'érosion des sols, la percolation de l'eau vers la nappe et le ruissellement sur les terres polluées.

Excavation ex-situ : cette mesure de dépollution intervient suite à la mise en évidence lors des investigations de terrains de contaminations dans les sols. Elle constitue un traitement ex-situ destiné à la libération rapide et à s'affranchir des problèmes d'encombrement des sous sols.

La dépollution des sols par excavation ex-site est notamment mise en œuvre dans le cadre de transactions immobilières. Elle vise à l'élimination des terres contaminées et aussi au remblaiement avec du matériau sain (figure01) (Ait Ahmed O., 2016).



**Figure 01 : Famille de techniques de dépollution des sols par lieu de traitement (ColombanoSetal.2010).**

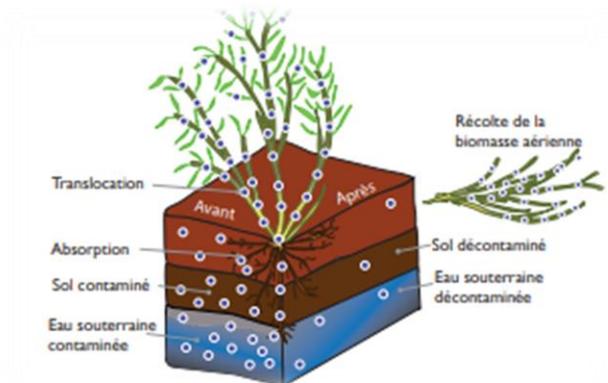
### 3.4. Diverses techniques de phytoremédiation :

Dans la section qui suit, nous décrirons les diverses techniques de phytoremédiation, qui sont basées sur différents principes d'action (extraction, stabilisation, dégradation, volatilisation ou filtration). Même si ces processus ne sont pas mutuellement exclusifs et peuvent opérer simultanément, il convient de bien distinguer leur fonctionnement propre (Anonyme, 2016).

#### 3.4.1. Phytoextraction

Dans la phytoextraction, aussi appelée phytoaccumulation, les plantes retirent du sol les contaminants, comme les éléments de traces métalliques et métalloïdes biodisponibles, ainsi que certains types de contaminants organiques et les accumulent dans leurs parties aériennes que l'on peut par la suite récolter (Figure02). C'est la méthode de phytoremédiation la plus utilisée. Ces technologies peuvent prendre plusieurs années avant

que des niveaux satisfaisants de décontamination soient atteints dans le sol (Anonyme, 2016).

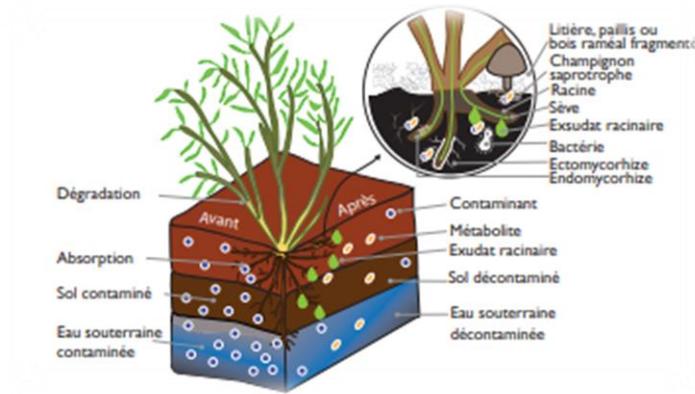


**Figure 02 : Phytoextraction (Anonyme, 2016)**

A maturité les plantes sont récoltées, incinérées, et les cendres sont alors stockées dans un lieu sécurisé. Une partie des métaux pourra ensuite être retraitée, puis réutilisée. On pourra renouveler la culture jusqu'à obtenir des taux acceptables de métaux dans le sol (Hezzat H., 2012).

### 3.4.2. Phytostabilisation

Dans la phytostabilisation, les plantes réduisent la mobilité et la biodisponibilité des contaminants dans le sol ou la rhizosphère, par immobilisation chimique (précipitation, stabilisation, absorption ou piégeage) ou prévention des mouvements latéraux ou en profondeur via l'érosion ou le lessivage. La phytostabilisation empêche ainsi la dispersion des contaminants dans les eaux de surface et souterraines. Une couverture terrestre végétale minimise l'érosion éolienne ou aqueuse, ainsi que le contact direct entre les animaux et les polluants. Les plantes peuvent minimiser la formation de lixiviation contaminé et limiter la migration d'un panache (ou masse) de contaminants dissous dans l'eau souterraine. Pour éviter que les contaminants ne soient éventuellement relargués dans l'environnement, la phytostabilisation exige un suivi à long terme. Durant la phytostabilisation, il peut y avoir conversion des polluants sous des formes moins biodisponibles, par exemple, lorsque ceux-ci précipitent dans la rhizosphère (Figure03) (Repellini F., 2000).



**Figure 03 : Rhizodégradation (Anonyme, 2016).**

Une plante utilisée pour la phytostabilisation doit avoir plusieurs caractéristiques :

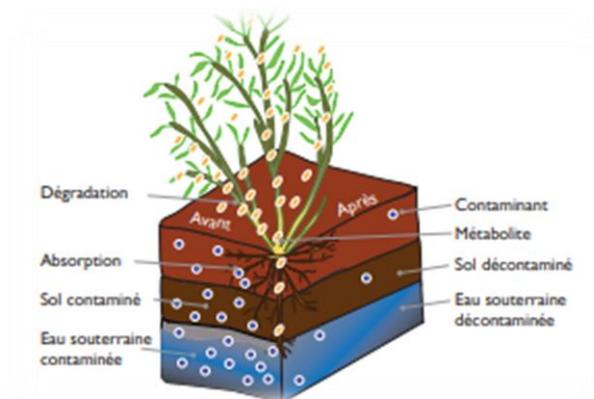
- Être adaptée aux conditions climatiques et de cultures du site choisi.
- Accumuler des métaux dans les parties racinaires et/ou la rhizosphère.
- Avoir une bonne production de biomasse afin d'avoir un bon couvert végétal.
- Être tolérante aux formes de pollution à traiter (Repellini F., 2000).

### 3.4.3. Phytodégradation :

La phytodégradation est la dégradation des polluants organiques. Cette dégradation peut avoir lieu dans la plante après absorption du composé puis dégradation dans les cellules par des enzymes spécifiques.

Les polluants organiques (hydrocarbures) sont transformés en substances non toxiques par des réactions enzymatiques dans le sol ou dans la plante. La plante métabolise le contaminant dans ses tissus au niveau de ses tiges et de ses feuilles ou à l'extérieur de ceux-ci grâce à des enzymes qu'elle sécrète.

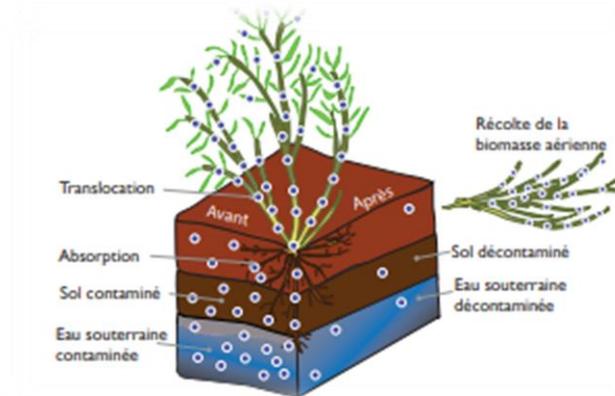
Ce système est une sorte de phytodécontamination, concernant en particulier les composés organiques et les hydrocarbures (Figure 04) (Repellini F., 2000).



**Figure04 : Phytodégradation (Anonyme, 2016).**

### 3.4.4. Phytovolatilisation :

Dans la phytovolatilisation, des polluants organiques et certains composés inorganiques sont extraits du sol par les plantes, transportés dans leur système vasculaire, puis rélargies dans l'atmosphère par transpiration (Figure05). C'est une technologie attrayante parce que les polluants sont ainsi entièrement volatilisés (sous forme de gaz), et il n'est donc pas nécessaire de récolter et de traiter les plantes utilisées. Par contre, le risque du transfert des polluants vers l'atmosphère doit être bien caractérisé avant d'entreprendre de la phytovolatilisation (Dominique F., 2017).



**Figure 05 : Phytovolatilisation (Anonyme, 2016).**

### 3.4.5. Rhizofiltration :

C'est un procédé similaire à la phytoextraction dans lequel les composés métalliques sont accumulés au niveau des racines. La rhizofiltration s'utilise plus facilement sur des cultures hors-sol ou l'élément à dépolluer est de l'eau contaminée. Dès que les racines sont saturées en métaux, on récolte les plantes puis on les traite selon le même principe qu'en phytoextraction (Repellini F., 2000).

## 4. Présentation des espèces utilisées

### 4.1. *Avena sativa* L :

#### 4.1.1. Description :

*Avena sativa* L. ou appelé aussi l'avoine est une plante glabre annuelle avec un système racinaire très développé. C'est une plante de grande taille et de port dressé, de 90 à 150 centimètres d'hauteur mesurés à partir de la surface du sol jusqu'au-dessus du panicule. Les feuilles sont en forme de ruban et engainant autour de la tige, près de leur insertion, elles possèdent une ligule blanchâtre qui permet de distinguer l'avoine en herbe des autres céréales (Figure 06) (Paul S. *et al*, 2008).



**Figure 06 : l'appareil végétatif de l'avoine (Boumellal W et Amrouche M., 2017)**

#### 4.1.2. Classification de l'Avoine :

Critère	Avoine
Règne	Plante
Division	Magnoliophytae
Classe	Liliopsida
Sous-classe	Commelinidae
Ordre	Cyperales
Famille	Poaceae
Sous-famille	Pooideae
Tribu	Aveneae
Genre	Avena
Espèce	<i>Avena Sativa L.</i>

**Tableau 02 : Classification de l'Avoine (Amghar D., 2019).**

#### 4.1.3. Type de sols et climat :

L'avoine peut être utilisée dans des sols légers (sableux), moyens (limoneux) et lourds (argileux) et peut se développer dans des sols nutritionnellement pauvres. Cependant, la plante prélève des quantités substantielles d'azote du sol et ceci est particulièrement

important pour la qualité et le rendement du fourrage. L'avoine tolère des sols acides, neutres et basiques. La limite de pH varie entre 4,5 et 7,0 mais l'avoine préfère les pH entre 5,5 et 6,5. Elle ne peut pas se développer à l'ombre. L'avoine est tolérante vis-à-vis du froid et n'est pas affectée par les gels ou la neige. Elle a une plus grande tolérance aux pluies par rapport à d'autres céréales comme le blé, le seigle ou l'orge. Elle exige un sol sec ou partiellement humide et peut tolérer la sécheresse. Elle est très répandue dans les pays tempérés et subtropicaux et largement utilisée pour la production fourragère dans les mêmes régions (Paul S.*et al*, 2008).

#### **4.1.4. Caractères morphologiques :**

L'avoine est une plante de grande taille et de port dressé, de 90 à 150 centimètres de hauteur mesurés à partir de la surface de sol jusqu'au dessus du panicule, et selon les conditions de croissance (Boumellal W.*et Amrouche M.*, 2017).

La tige comporte une série de noeuds et d'entre-noeuds, et les feuilles sont alternes.

Les lames des feuilles sont plates et nombreuses, d'environ 5 à 20 millimètres de large. Les entre-noeuds sont normalement allongés, au nombre de 4 à 7, et l'entre noeuds supérieur est souvent aussi long que la longueur totale des autres entre-noeuds. À maturité, la tige se termine par une panicule lâche et clairsemée (Figure06) (Paul S.*et al*,2008).

#### **4.2. *Marrubium vulgare* :**

##### **4.2.1. Description :**

Le nom *Marrubium* dérive du mot hébreu marrob (jus amer), en anglais horehound(Amiri N.*et Nedjadi R*, 2017).

*Marrubium vulgare* ou marrube blanc est une espèce très répandue dans le bassin méditerranéen et utilisé pour ses vertus thérapeutiques (figure 07) (Taleb D., 2018).



**Figure 07: *Marrubium vulgare* (Taleb D., 2018).**

#### **4.2.2. Classification de *Marrubium vulgare* :**

In Judd et al. (2002), la position systématique de l'espèce *Marrubium vulgare* est comme suit :

Règne	Végétale
Sous règne	Plantes vasculaires
Embranchement	Angiosperme
Classe	Eudicots
Ordre	Lamiales
Famille	Lamiacées
Genre	<i>Marrubium</i>
Espèce	vulgare

**Tableau03 : Classification de *Marrubium* (Taleb D., 2018)**

#### **4.2.3. Description botanique :**

Le marrube blanc est une plante herbacée vivace pouvant atteindre 80 cm de hauteur, à tige quadrangulaire cotonneuse. Les feuilles pétiolées, ovales ou arrondies, à limbe crénelé sur les bords, sont blanchâtres et duveteuses sur la face inférieure. Les fleurs petites, blanches, avec un calice à dents crochues sont groupées en verticilles globuleux à l'aisselle des

feuilles. Le fruit est un tétra-akène. Toute la plante dégage une odeur forte, sa saveur est âcre et amère (figure 08) (Taleb D., 2018).



**Figure 08: Morphologie des fleurs et fruits de *M. vulgare* (Taleb D., 2018).**

Le genre *Marrubium* est muni d'un calice à 10 dents, dont les 5 commissurales plus courtes, toutes terminées en pointe épineuse. C'est une plante herbacée à tiges et face inférieure des feuilles blanches tomenteuses. Les inflorescences sont en glomérules verticillés. Les bractées sont linéaires aigues. Les fleurs sont blanches (figure 08) (Taleb D., 2018).

En Algérie, on retrouve 6 espèces différentes au sein de ce même genre:

*Marrubium vulgare*, *Marrubium supinum*, *Marrubium peregrinum*, *Marrubium alysson*, *Marrubium alyssoides* Pomel et *Marrubium de serti* de Noé. (Taleb D., 2018).

#### 4.2.4. Le nom vernaculaire :

En Algérie : En arabe elle est connue par le nom Marrioua

En kabyle par le nom de Marrnouyeth

Au Maroc : c'est Merrîw

En Tunisie : Marroubia

En français : Marrube blanc

En anglais : Harehound, En italien : Marrubbio (Taleb D., 2018).

#### **4.2.5. Répartition géographique :**

Le genre *Marrubium* comporte quelques 40 espèces, répandues principalement le long de la méditerranée, les zones tempérées du continent eurasiatique et quelques pays d'Amérique Latine

Elle pousse dans toute l'Afrique du Nord et est commune dans toute l'Algérie et presque dans toute l'Europe, au centre et au Sud-ouest de l'Asie et aux Canaries.

Floraison : Mai-septembre (Taleb D., 2018).

#### **4.2.6. Utilisation de la plante :**

L'espèce végétale *Marrubium vulgare* est également employée comme : anti-nociceptif, antispasmodique, anti-oedématogénique, insecticide, anti-inflammatoire, antimicrobien et antifongique (Amiri N. et Nedjadi R., 2017).

#### **5. Conclusion :**

On peut conclure que les formes de chrome hexavalent en solution et solubles peuvent pénétrer dans l'environnement avec des quantités importantes qui peuvent avoir des effets néfastes sur l'environnement.

L'utilisation des plantes pour traiter les sols pollués est un procédé émergent. Cette technologie est basée sur la capacité des plantes et/ou des micro-organismes associés à leur système racinaire à absorber, retenir et transformer les polluants en substances moins toxiques.

Le but du traitement est d'immobiliser le chrome hexavalent par des plantes spontanées de la région de Djelfa.

**CHAPITRE II :**  
**MATERIEL ET**  
**METHODES**

## **6. Introduction :**

Dans ce chapitre, nous discutons la partie pratique de notre travail, qui est l'implantation et arrosage avec le chrome ; extraction et analyse du chrome hexavalent ceci afin de connaître la capacité des deux plantes à leur résister au chrome hexavalent et de connaître le mécanisme de traitement impliqué par la plante.

## **7. Matériel :**

Pour réaliser nos différentes manipulations, nous avons utilisé le matériel suivant :

Produits chimiques, Verrerie, Appareillage, tubes en plastique.

### **7.1. Verrerie:**

Erlenmeyers 250 ml.

Béchers de volumes 500ml, 250 ml, 50 ml, 5 ml.

Pissette.

Tubes en verre pour l'ébullition à reflux.

Verre de montre.

Pipettes graduée 5 ml, 2ml et 0.5 ml avec poire.

Eprouvettes 50 ml, 10 ml et 5 ml.

### **7.2. Appareillages :**

Micropipettes 200  $\mu$ l. 100  $\mu$ l.

Balance de précision de marque Ohaus, modèle Pioneer PA 64.

Agitateur magnétique de marque Stuart, modèle SB162.

Centrifugeuses de type Medispin.

Spectrophotomètre de marque Biochrom WPA lightwave II.

**7.3. Petit matériel et consommables :**

Papier hygiénique.

Sacs en plastique.

Papier aluminium.

Coton.

Bavette médicale jetable.

Seringue en plastique médical 5 ml.

Mortier et pilon en bois.

Lunettes et gants de protection.

Tubes en plastique.

**8. Les produits :**

L'eau distillée.

1.5 Diphenylcarbazidede Sigma-Aldrich.

Ethanol à 95 ° de Riedel de Haen.

Carbonate de sodiumde Sigma-Aldrich.

Bichromate de potassium(Riedel- de Haen).

Hydroxide de soduim 1 kg (Riedel- de Haen).

Acide nitrique 59% (Sigma Aldrich).

Acide chlorhydrique (37%) de Riedel de Haën.

Acide sulfurique à 95-97% de Riedel de Haën.

## 9. Méthodes :

Notre travail expérimental peut se divisé en 2 étapes principales.

### 9.1. Implantation et arrosage avec le chrome :

La première étape est la plantation des deux espèces végétales spontanées utilisées (*Avena sativa* et *Marrubium vulgare*), la première espèce a été implantée en 18 pots à partir des graines. La deuxième a été trouvé poussée spontanément dans la ville de Djelfa (position 34.6626584, 3.2280882). Cette espèce a été transplantée dans 16 pots en plastique pour un contrôle des paramètres extérieurs, à savoir la lumière, l'humidité et l'exposition au chrome hexavalent. Cette étape a été réalisée en mois de Février 2021.

Pour savoir l'effet du chrome hexavalent sur le développement des deux espèces, et leurs capacités de rétention du chrome hexavalent, après une durée de 10 jours, ce qui permet à la plante de pousser et s'adapter avec le nouveau environnement, nous avons effectué un arrosage des deux espèces avec des solutions de chrome hexavalent avec une concentration de 100 mg/L (figure09), cette étape a été étalée sur une période de 15 jours avec des doses journalière de 5 ml pour chaque échantillon. La préparation de la solution du chrome hexavalent a été réalisée par dissolution de 676.68mg dans cinq litres d'eau distillée.



**Figure 09: Arrosage des deux plantes (a) *Marrubium vulgare* (b) *Avena sativa* par chrome**

## **9.2. Séchage, extraction et analyse du chrome hexavalent :**

### **9.2.1. Séchage des échantillons :**

En premier lieu, nous avons séparé les feuilles, les racines et le sol des différents échantillons, nous l'avons exposée au soleil pendant une période de 8 à 10 jours jusqu'au séchage total.

Les échantillons de racines et de feuilles séchés ont été par la suite broyés manuellement et traités avec une solution acide d'aqua regia à fin d'extraire le chrome hexavalent. Par contre les échantillons du sol ont été traités par un mélange d'hydroxyde de sodium et de bicarbonate de sodium.

### **9.2.2. Préparation des solutions d'extraction :**

Afin de réaliser l'extraction du chrome, nous avons préparé trois solutions.

#### **a/Solution de carbonate de sodium à 0.28 mol/L:**

Pour cela 14.8g de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a été dissout dans 500 ml d'eau distillée,

#### **b/Solution de soude :**

Elle a été préparée par dissolution de 10 g de NaOH dans 500 ml d'eau distillée.

#### **c/Aqua regia :**

Ça été préparée en mélangeant un volume de 150 ml d'acide chlorhydrique à 37% avec 50 ml d'acide nitrique à 59% avec 200 ml d'eau distillée. Ce réactif est un acide très fort formé par la combinaison d'acide nitrique concentré et d'acide chlorhydrique concentré. Il est généralement utilisé pour éliminer les métaux comme l'or et le platine des substances, pour préparer cette solution, nous avons mélangé 150 ml de HCl (37%) avec 150 ml d'eau distillée, en même temps dans un autre Erlenmeyer, 50 ml d'acide nitrique ( 59%) a été mélangé avec 50 ml d'eau distillée, et finalement les deux solutions sont mélangées ensemble pour obtenir la solution aqua regia.

### 9.2.3. Extraction du chrome à partir du sol:

L'extraction du chrome dans les échantillons du sol a été réalisée selon la méthode d'extraction basique décrite par (Oliveira et al. 2012). Pour cela, 0.4 g de sol sec a été pesée dans un tube de 100 ml, on a ajouté 4 ml de solution de bicarbonate à 0.28 mol/L, et 4 ml de solution d'hydroxyde de sodium à 0,5mol /L. On a placé le mélange dans une plaque chauffante pendant 60 min à une température de 100 °C avec une agitation continue (figure10). Après refroidissement, les échantillons ont été filtrés avec une seringue jetable et coton, centrifugés pendant 10 minutes à 1500 tours/min et le contenu en chrome hexavalent a été déterminé par spectrophotométrie UV-Visible à 540 nm.



**Figure10 : Extraction du chrome hexavalent à partir des échantillons de sol**

### 9.2.4. Extraction du chrome hexavalent à partir des plantes :

Une masse bien déterminée des racines et/ou de feuilles a été mise en contact avec 10 ml d'aqua regia, le mélange a été conduit à l'ébullition à reflux pendant deux heures, par la suite le mélange a été refroidi et filtré et centrifugé à 1500 tr/min. Le liquide a été analysé pour la détermination de la teneur en chrome hexavalent.

L'extraction du chrome a été réalisée selon la méthode d'extraction acide des échantillons de plantes décryptée par RAI, D(1989). Pour ce faire, de plante sèche (racine ou feuilles) a

été mélangé avec 10 ml d'Aqua Regia dans un tube de verre ; ce mélange a été placé dans un Agitateur pendant 120 minutes à une température de 100 °C (Figure 11).



**Figure11 : Extraction du chrome hexavalent à partir des échantillons de plantes**

Après refroidissement, les échantillons ont été filtrés, par seringue jetable et coton; centrifugés pendant 10 minutes à 1500 tours/min et le contenu en chrome a été déterminé par spectrophotométrie UV-Visible.

#### **9.2.5. Dose du chrome hexavalent par spectrophotométrie UV-Visible :**

Pour le dosage du chrome hexavalent, nous avons utilisé la méthode décrite par Rodier J., 2009. En solution légèrement acide, le chrome hexavalent réagit avec la 1,5-Diphenylcarbazine pour donner une coloration rouge violette susceptible d'un dosage par spectrométrie d'absorption moléculaire.

Lors du dosage, les ions Cr(IV) oxydent la 1,5-Diphenylcarbazine en 1,5-Diphénylcarbazonne et sont donc réduite en chrome trivalent. La forme énolique de la carbazonne réagit avec les ions chrome trivalent pour former un complexe avec une coloration rouge-violette, ce complexe est susceptible d'être analyser par UV-Visible à 540 nm (Rodier J., 2009).

Cette méthode permet de mesurer des concentrations allant de 5µg/L à 0,5 mg/L, dans le cas où l'intervalle de mesure est étendu nous avons procédé à une dilution de l'échantillon.

### 9.3. Courbe d'étalonnage :

#### 9.3.1. Préparation des solutions :

a/ Préparation d'une solution acide de 1.5-Diphenylcarbazine :

- 1,5-Diphenylcarbazine chimiquement pure 0,2 g.
- Ethanol à 95 ° q.s.p.100 mL.
- Solution d'acide sulfurique à 176 g/L : 400 mL.

b/ Préparation d'une solution mère étalon de chrome à 1 g/L :

- Dichromate de potassium (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) 2,829 g.
- Eau distillé q.s.p. 1 000 mL.

c/ Préparation de solution fille étalon de chrome à 5 mg/L :

- Solution mère étalon 0,5 mL.
- Eau distillé q.s.p. 100mL.

#### 9.3.2. Établissement de la courbe d'étalonnage :

Dans des séries de fioles jaugées de 50ml bouchées et émeri et numéroté, on introduit successivement les volumes présentés dans le tableau 04 en agitant après chaque addition :

**Tableau04 : établissement de la courbe d'étalonnage :**

Numéro des fioles	1	2	3	4	5	6	7
Solution étalon de Cr (VI) à 5mg/l (ml)	0	0,5	1	2	3	4	5
Eau permutée (ml)	50	4,95	49,0	48,0	47	46	45
Correspondance en mg/L de Cr(VI)	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5

Dans des tubes à essai on introduit 5mL de chaque solution et on a ajouté 0,3 ml de l'acide 1,5-Diphenylcarbazine, nous avons mélangé puis laissé au repos pendant 10 minutes pour permettre un développement complet de la coloration rouge-violette.

Dans des cuvettes en plastique, les solutions étalons de chrome hexavalent ont été analysées par spectrophotométrie UV-Visible à 540 nm. L'élaboration de la courbe d'étalonnage a été réalisée avant de commencer chaque série d'analyse.

Les concentrations en chrome hexavalent ont été déterminées par extrapolation sur les courbes d'étalonnage. Ainsi les taux du chrome dans la matière sèche (mg/kg) ont été calculés en utilisant les masses solides correspondantes.

## 10. Les facteurs caractérisant le phénomène de phytoremédiation :

Pour la détermination de la capacité des plantes à remédier le sol contaminés par le chrome hexavalent, et pour la démonstration du mécanisme impliqué dans le processus de phytoremédiation, nous avons calculé trois paramètres, à savoir le facteur de bioaccumulation, le facteur de translocation et le facteur d'enrichissement.

### 10.1. Facteur de translocation (FT) :

Pour l'estimation de la capacité de phytoremédiation des plantes, l'estimation de la translocation est d'une grande importance. Le facteur de translocation reflète la relation entre les concentrations de chrome dans les tissus aériens et celle des tissus dans les racines (Eq. 1) (Nouri et al., 2009) :

$$TF = \frac{[Cr(VI)]_{\text{feuille}}}{[Cr(VI)]_{\text{racine}}} \dots\dots\dots (Eq. 1)$$

$[Cr(VI)]_{\text{feuille}}$  est la concentration du chrome hexavalent dans les feuilles.

$[Cr(VI)]_{\text{racine}}$  est la concentration du chrome hexavalent dans les racines.

Lorsque  $TF > 1$ , cela indique que la plante peut efficacement transporter le chrome de la racine vers la feuille et peut être plus adaptée à la phytoremédiation car les métaux stockés dans la partie aérienne sont facilement éliminables (Xu. J et al., 2020).

### 10.2. Facteur d'enrichissement (FE)

Ce paramètre est identifié comme la concentration en chrome hexavalent dans les feuilles divisée par sa concentration dans le sol ; le facteur d'enrichissement pourrait être calculé selon (Eq. 2) (Lorestani. B et al., 2011).

$$FE = \frac{[Cr(VI)]_{\text{feuille}}}{[Cr(VI)]_{\text{sol}}} \dots\dots\dots (Eq. 2)$$

[Cr(IV)] sol est la concentration du chrome hexavalent dans le sol.

Si  $EF < 1$ , l'espèce végétale est considérée comme stabilisateur du chrome, alors que une valeur  $EF > 1$  indique que c'est une espèce accumulatrice.

### 10.3. Le facteur de bioaccumulation (BF)

BF est un paramètre important utilisé pour renseigner sur la capacité des plantes à accumuler les métaux lourds dans les sols. il est exprimé comme le rapport des polluants dans les racines sur ceux présents dans les sols (Eq. 3) (Xu. J et al., 2020).

$$BF = \frac{[Cr(VI)]_{racine}}{[Cr(VI)]_{sol}} \dots\dots\dots (Eq. 3)$$

Lorsque  $BF > 1$ , cela suggère que la plante est un bon accumulateur de chrome et est idéale pour la phytostabilisation liée à l'accumulation de chrome dans les racines (Xu. J et al., 2020).

**CHAPITRE III :**  
**RESULTATS ET**  
**DISCUSSIONS**

## 11. Introduction :

Dans ce chapitre, les résultats des concentrations et des taux de chrome dans les différents échantillons de plants et de sol sont présentés, ainsi les discussions y compris une comparaison avec les résultats trouvés dans la littérature, l'objectif était de connaître la capacité des deux plantes (*Avena sativa* et *Marrubium vulgare*) à résister et à remédier les sols contaminés par le chrome hexavalent.

## 12. Morphologie des deux espèces végétales avant et après contact avec le chrome hexavalent :

La figure 12 montre que les deux plantes sont affectées par le chrome hexavalent, ce qui représente un stress appréciable, mais elles sont toujours vivantes malgré la présence du chrome avec un taux élevé, cette observation nous confirme le bon choix des espèces.



**Figure12 :Morphologie des espèces végétales avant et après contact avec le chrome hexavalent (a) AS avant contact avec le chrome (b) AS après contact avec le chrome (c) MV avant contact avec le chrome (d) MV après contact avec le chrome.**

### 13. Séchage des échantillons de plante et de sol :

Cette opération a été effectuée à l'air libre, à titre d'exemple, la figure 13 montre la morphologie d'*Avena sativa* après séchage et *Marrubium vulgare*.



**Figure 13 : Feuilles et racines des espèces *Avena sativa* et *Marrubium vulgare* après séchage.**

### 14. Résultats de l'analyse du chrome hexavalent dans les échantillons de sol et de plantes :

#### 14.1. Courbes d'étalonnage :

Pour s'assurer que l'analyse est la plus proche des valeurs réelles, les courbes d'étalonnage ont été répétées avant chaque série d'analyse. Avant d'être analysé, les échantillons ont été mélangés avec le réactif 1.5 Diphenylcarbazine, laissés pendant 10 min à fin de permettre à la couleur rouge violette de se développer. La figure 14 illustre la différente solution standard de chrome hexavalent après développement de la coloration.



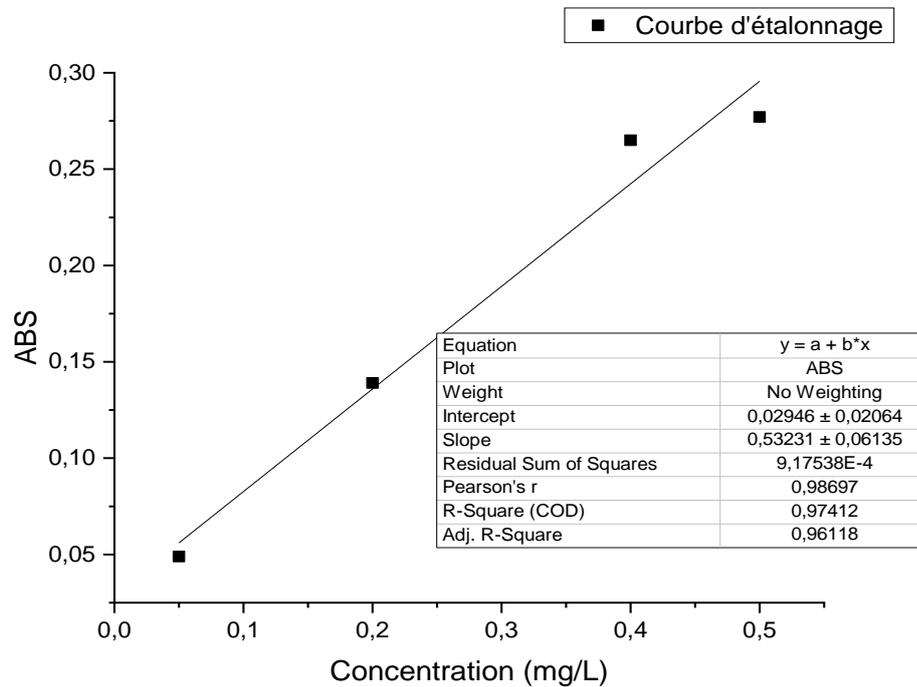
**Figure 14 : Solutions standard de chrome hexavalent après contact avec 1.5 Diphenylcarbazide.**

Les échantillons colorés ont été passé par la suite au spectrophotomètre UV-Visible dans des cuvettes en plastique, à 540 nm pour la détermination de l'absorbance ABS (Figure 15).



**Figure 15 : Analyse de solution par UV-Visible.**

A titre indicatif, la courbe d'étalonnage de la date 22/4/2021 est présentée dans la figure 16.



**Figure 16 : Courbe d'étalonnage de date 22/4/2021.**

Le reste des courbes d'étalonnage sont regroupées dans l'annexe 1.

## 14.2. Présence du chrome dans les échantillons du sol et de plantes :

### 14.2.1. Chrome hexavalent dans *Avena sativa* :

Le tableau 05 regroupe les résultats des concentrations en chrome hexavalent dans le sol et les différentes parties de l'espèce *Avena sativa*.

**Tableau 05 : Les résultats d'analyse de la plante (*Avena sativa*) :**

N° d'échantillons d'AS	Echantillons de sol		Echantillons des racines		Echantillons de feuilles	
	Concentration du Cr(VI) (mg/L)	Taux du Cr(VI) (mg/kg)	Concentration du Cr(VI) (mg/L)	Taux du Cr(VI) (mg/kg)	Concentration du Cr(VI) (mg/L)	Taux du Cr(VI) (mg/kg)
AS 1	0,145544554	2,910891089	ND	ND	0,06112979	26,34905
AS 2	0,135643564	2,712871287	0,03295072	21,96714947	ND	ND
AS 3	0,1059405-94	2,118811881	ND	ND	0,31474141	83,26492
AS 4	0,114191419	2,283828383	0,07052282	9,660659678	0,44248652	126,4247
AS 5	0,100990099	2,01980198	0,02543606	2,031653827	0,3109842	58,67264
AS 6	0,044884488	0,897689769	0,04985817	3,85600601	0,10997351	38,72307
AS 7	0,152145215	3,04290429	0,39552141	13,85849358	ND	ND
AS 8	0,124092409	2,481848185	1,26719393	115,4092831	0,44248652	53,96177
AS 9	0,24620462	4,924092409	0,0235577	0,913080044	0,79378558	149,2078
AS 10	1,297359736	25,94719472	0,17572467	24,13800436	0,15130281	29,20904
AS 11	0,162046205	3,240924092	0,20818182	46,26262626	0,44636364	74,14678
AS 12	0,15379538	3,075907591	0,21181818	21,83692596	0,28090909	47,61171
AS 13	0,143894389	2,877887789	0,25	52,08333333	0,21	9,433962
AS 14	0,335313531	6,706270627	0,29	19,07894737	0,39181818	130,6061
AS 15	0,251155116	5,02310231	ND	ND	0,32272727	161,3636
AS 16	0,2	4	ND	ND	0,17545455	38,9899
AS 17	0,7	14	0,31363636	142,5619835	0,32454546	48,43962

\*ND non détectée

Après analyse du chrome hexavalent dans les échantillons de sol, de feuilles et de racines dans l'espèce *Avena sativa*, nous pouvons conclure que la concentration et le taux de chrome hexavalent sont trop proches. Les concentrations dans le sol varient entre 0.044 et 1.297 mg/L et dans les racines et les feuilles, elles sont entre 0 et 1.267 mg/L ; 0 et 0.793 mg/L respectivement. Cette variabilité limitée de la concentration de chrome hexavalent est due au fait que les conditions opératoires ont été contrôlées, en l'occurrence la présence du chrome hexavalent dans le sol. Cette variation de concentration de chrome est due à la méthode d'arrosage à différents endroits du sol ou probablement à la nature et texture du sol.

En ce qui concerne les taux du chrome dans la matière sèche (mg/kg), les résultats sont trop variables. Pour les échantillons de sol, ils passent de 0,897 à 25,947 mg/kg, tandis que pour les feuilles et les racines ils varient entre 0-161 mg/kg ; 0-142 mg/kg respectivement (tableau 05).

Cette grande variabilité du taux du chrome dans les échantillons de sol par rapport au poids sec est due à la texture du sol qui n'est pas parfaitement homogène. Pour les échantillons d'*Avena sativa*, la variabilité dans les échantillons de sol influe considérablement le taux du chrome dans les deux parties de plantes.

#### 14.2.2. Chrome hexavalent dans *Marrubium vulgare* :

Les résultats de la concentration en chrome hexavalent dans les échantillons de l'espèce *Marrubium vulgare* sont présentés dans le tableau 06.

**Tableau 06: Les résultats d'analyse de la plante (*Marrubium vulgare*).**

N° d'échantillons de <i>MV Marrubium vulgare</i>	Echantillons de sol		Echantillons des racines		Echantillons de feuilles	
	Concentration du Cr(VI) (mg/L)	Taux du Cr(VI) (mg/kg)	Concentration du Cr(VI) (mg/L)	Taux du Cr(VI) (mg/kg)	Concentration du Cr(VI) (mg/L)	Taux du Cr(VI) (mg/kg)
MS 1	0,912373737	18,24747475	0,11983592	5,38346458	0,06123645	2,02367
MS 2	0,308333333	6,166666667	0,28684442	23,3206844	0,08028128	1,59604
MS 3	0,205639731	4,112794613	0,19015529	28,3813864	0,26047466	5,20949
MS 4	0,221632997	4,432659933	0,29563434	19,9348846	0,37269265	25,1309
MS 5	1,177525253	23,55050505	0,08028128	8,02010764	0,01435687	0,28708
MS 6	1,55993266	31,1986532	ND	ND	0,39671843	13,1625
MS 7	2,029882155	40,5976431	0,03926165	21,1084122	0,26340463	5,56763
MS 8	2,203535354	44,07070707	0,03779666	6,52792052	0,46059185	12,3615
MS 9	2,800589226	56,01178451	0,10958101	13,0453588	0,09493115	4,89588
MS 10	0,37543771	7,508754209	0,23727273	4,74545455	0,46272727	9,25454
MS 11	0,34743771	6,948754209	0,33727273	6,74545455	0,19363636	3,87272
MS 12	0,52143771	10,42875421	0,36272727	7,25454545	0,19363636	3,87272
MS 13	0,41443771	8,288754209	0,21	4,2	0,23545455	4,70909
MS 14	0,38143771	7,628754209	0,29181818	5,83636364	0,27181818	5,43636
MS 15	0,39943771	7,988754209	0,59545455	11,9090909	0,47363636	9,47272
MS 16	0,38143771	7,628754209	0,07	1,4	0,27545455	5,50909

D'après le tableau 06. Nous constatons que les concentrations en chrome hexavalent dans les solutions de sol varient entre 0.205 et 2.800 mg/L. Tandis que dans les racines et les feuilles de *Marrubium vulgare*, elles ont été trouvées d'être inférieure à 0.595 mg/L et 0.473 mg/L respectivement.

En termes de taux de chrome par kg d'échantillons, les résultats on montrés des taux entre 4.112 et 56.011mg/kg.

Pour les feuilles et les racines de *Marrubium vulgare*, le taux du chrome hexavalent varient entre 0.028 - 28.381 mg/kg et 0.287 - 25.130 mg/kg respectivement. Cette fluctuation des taux de chrome dans les différentes parties de plante et de sol est due probablement à la texture du sol et/ou à la résistance au stress de cette espèce végétale.

### 15. Résultat des facteurs caractérisant le phénomène de phytoremédiation :

Les facteurs de caractérisation du phénomène de phytoremédiation sont regroupés dans le tableau 07.

**Tableau 07 : les résultats des facteurs (FT-FE-FB) des espèces *Avena sativa* et *Marrubium vulgare*.**

<i>Avena sativa</i>				<i>Marrubium vulgare</i>			
N d'échant	FT	FE	FB	N d'échant	FT	FE	FB
AS1	1,41218356	9,05188405	6,40984949	MV1	0,70812324	4,5389634	6,40984949
AS2	0,44897377	3,63551122	8,09737991	MV2	2,22730159	18,0353071	8,09737991
AS3	12,5631381	39,2979311	3,12803463	MV3	0,07959795	0,24898513	3,12803463
AS4	13,0865515	55,3564888	4,23002873	MV4	0,07641433	0,32323479	4,23002873
AS5	28,8792522	29,0487107	1,00586783	MV5	0,03462694	0,03483012	1,00586783
AS6	10,0422736	43,1363583	4,29547728	MV6	0,09957904	0,42773952	4,29547728
AS7	0,28814205	1,31230376	4,55436394	MV7	3,47051047	15,8059677	4,55436394
AS8	0,46756872	21,7425752	46,5013468	MV8	2,13872305	99,4535022	46,5013468
AS9	163,411539	30,3015871	0,18543113	MV9	0,00611952	0,00113475	0,18543113
AS10	1,210085	1,12571079	0,93027414	MV10	0,82638823	0,7687676	0,93027414
AS11	1,60273615	22,8782845	14,2745171	MV11	0,62393302	8,90634249	14,2745171
AS12	2,18033025	15,4789144	7,09934395	MV12	0,45864611	3,25608652	7,09934395
AS13	0,18113208	3,27808551	18,0977638	MV14	5,52083333	99,9147374	18,0977638
AS14	6,84555904	19,4752147	2,84494146	MV15	0,14608011	0,41558935	2,84494146
AS15	ND	32,1242982	ND	MV16	ND	ND	ND
AS16	ND	9,74747475	ND				
AS17	0,33977936	3,45997286	10,1829988				

#### 15.1. Facteurs de translocation :

D'après le tableau 07 le facteur de translocation de l'espèce *Avena sativa* peut atteindre des valeurs trop élevées de l'ordre de 163, par contre pour l'espèce *Marrubium vulgare*, il varie entre 0 et 3.935.

Pour le facteur de translocation dans la majorité des échantillons de la plante *Avena sativa*, les valeurs sont supérieures à 1. Cela indique que la plante possède une bonne capacité translocatrice. Cela indique que la plante peut transférer efficacement le chrome à partir des racines vers les feuilles et peut être adaptée à la phytoremédiation.

Les résultats de facteur de translocation dans la plupart des échantillons de *Marrubium vulgare* montrent que les valeurs sont inférieures à 1. Cela indique que la plante ne peut être pas considérée comme une plante translocatrice du chrome hexavalent contrairement à *Avena sativa*.

### **15.2. Facteur d'enrichissement**

Les résultats expérimentaux montrent que le facteur d'enrichissement dans la majorité des échantillons de l'espèce AS est supérieur à 1, il peut aller jusqu'à 55 mg/kg dans certains cas. Pour certains échantillons (AS2, AS7), Ce facteur est inférieur à 1. Ce qui confirme que cette espèce est un bon accumulateur de chrome hexavalent.

Pour l'espèce *Marrubium vulgare*, seulement six échantillons ont un facteur d'enrichissement supérieur à 1, tandis que les autres peuvent aller jusqu'à 5. Ce qui montre un pouvoir plus ou moins important de phytoremédiation de cette espèce.

### **15.3. Facteur de bioaccumulation**

Pour l'espèce *Avena sativa*, la majorité des échantillons ont un facteur de bioaccumulation supérieur à 1, il peut atteindre une valeur de 143, cela suggère que la plante est un accumulateur favorable de chrome et idéale pour la phytostabilisation liée à l'accumulation de chrome dans les racines.

Pour l'espèce *Marrubium vulgare*, 12 échantillons ont trouvés avec des  $FB < 1$ , ce qui nous permet de dire que c'est une espèce avec des capacités de bioaccumulation limitées.

## **16. Teneur moyenne en chrome hexavalent dans les deux espèces :**

Dans une comparaison entre les deux espèces et pour estimer la capacité de chaque espèce à accumuler le chrome hexavalent, nous avons calculé les taux moyens du chrome hexavalent dans les deux espèces, les résultats obtenus montrent que le taux moyen du chrome dans le sol de l'avoine est de l'ordre de 5.2 mg/kg, par contre dans les

racines ce taux est proche de 28 mg/kg, pour les feuilles ce taux atteint une valeur importante de l'ordre de 63 mg/kg. Ce qui confirme les résultats des facteurs, qui suggèrent que cette espèce est avérée très intéressante de point vue phytoremédiation du chrome hexavalent. Le mécanisme impliqué est un mécanisme de phytoextraction (Anonyme., 2016)

Pour l'espèce *Marrubium vulgare*, nous avons trouvé des taux de l'ordre de 17.8 ; 10.5 et 7 mg/kg pour le sol, les racines et les feuilles respectivement.

En comparant les deux espèces, nous pouvons élucider que *Avena sativa* est plus performante de point de vue élimination du chrome hexavalent dans le sol. La plante *Marrubium vulgare* à une capacité d'accumulation limitée, donc elle peut être considérée comme stabilisatrice.

### **17. Discussions :**

En comparant nos résultats avec les travaux de (Diwan H et al., 2007). Les auteurs ont trouvés un taux de chrome hexavalent dans les racines et les feuilles d'un génotype de la plante *Pusa Jai Kisan* de l'ordre de 890 et 1300 mg/kg respectivement, ces valeurs sont nettement supérieures à celle trouvées pour *Avena sativa*, ça est due probablement à la forte charge de chrome appliquée par les auteurs sur le sol de cette plante (qui peut aller jusqu'à 400 mg/kg).

En comparaison avec d'autres travaux antérieurs, (Santoshk p., 2012) ont a trouvé un taux du chrome de l'ordre de 5 mg/kg dans l'espèce végétale *Pistiastratiotes*. Ce résultat est largement inférieur à celle trouvés pour nos deux espèces, ce qui montre l'efficacité appréciable de ces dernières.

Dans le même contexte, nous avons trouvé que les résultats du solde l'espèce *Marrubium vulgare* sont proches des résultats trouvés par (Berrabah Y., 2018) lors de l'analyse du sol pollué dans le parcours de Oued Mellah. Elle a trouvé des taux de chrome dans le sol allant de 0.02 mg/kg à 31.1 mg/kg. (Korichi A., 2019) a trouvé des valeurs de taux entre 0.6 et 51 mg/kg. Ces résultats ont été expliqués par une forte charge de pollution chromique dans l'Oued Mellah, selon les auteurs, une grande variabilité a été remarquée en fonction de la position des échantillons dans l'Oued Mellah. Cette variation est due à plusieurs facteurs, tels que la texture du sol, la distance par rapport au parcours de l'Oued et par rapport à la tannerie de la ville de Djelfa, qui

représente la source principale de pollution par Cr(VI). Cette pollution est causée principalement par les déversements des eaux usées non traitées efficacement.

Cette légère différence entre nos résultats et les résultats de (Korichi A., 2019) est due à plusieurs facteurs, dont la différence dans la nature et la texture du sol et de son environnement, car leur expérience était dans un milieu pollué principalement par les déversements des eaux usées non traitées efficacement, par contre nos expérience ont été effectuée dans des conditions contrôlées.

Nous avons remarqué que pour l'espèce *Avena sativa*, un teneur en chrome dans le sol trop faible a été remarqué, cela peut être expliqué par une forte capacité de translocation de cette espèce, ce qui diminue la teneur en chrome dans le sol.

Pour les résultats de plantes, (Korichi A., 2019) a trouvé que les concentrations de chrome hexavalent dans les racines et les feuilles et d'avoine est de l'ordre de 5 mg/kg et 1,2 mg/kg respectivement, tandis que la concentration en chrome hexavalent du *Marrubium vulgare* varie entre 0.8 à 7.8 mg/kg dans les racines et 0.6 à 8 mg/kg dans les feuilles. Nous notons qu'il y a une nette différence entre les résultats que nous avons obtenus et les résultats des recherches de l'étudiant (Korichi A., 2019). Cette grande différence dans les résultats est due à la différence dans les conditions opératoires (la nature du sol, humidité et la concentration des polluants), ou probablement est due à l'introduction du chrome dans le sol avec des teneurs plus élevés.

### **17.1. Facteurs de translocation :**

En ce référent aux travaux de (Korichi A., 2019), nous avons trouvé que nos résultats sont proches de leurs résultats pour l'espèce *Marrubium vulgare*. Tandis que pour l'espèce *Avena sativa*, nos résultats ont été trouvés très différents. L'auteur a trouvé des valeurs de FT dans *Marrubium vulgare* varient entre 0.157 et 2, et dans *Avena sativa* de l'ordre de 0.4.

Cette différence entre nos résultats et les résultats de (Korichi A., 2019) dans la plante d'*Avena sativa* est probablement due à plusieurs facteurs, en l'occurrence la différence dans la nature et la texture du sol et de son environnement. Et peut-être sur le plan statistique, (Korichi A., 2019) a trouvé un seul échantillon, ce qui n'est pas assez suffisant pour confirmer les résultats. Pour l'espèce *Marrubium vulgare*, nous n'avons pas remarqué de différence significative, cela confirme nos résultats.

**17.2. Facteur d'enrichissement :**

En comparant nos données à celles trouvées dans les travaux de (Korichi A., 2019), nous avons constaté qu'il y a une nette différence dans les résultats des deux espèces. Pour la plante *Avena sativa* le facteur peut atteindre 2 alors que pour l'espèce *Marrubium vulgare* il varie entre 0.04 et 2, ce qui est trop faible par rapport à notre cas (5 pour MV et 55 pour AS)

Cette différence entre nos résultats et les résultats de (Korichi A., 2019) est due probablement à la forte capacité de notre espèce *Avena sativa* dans les conditions extrêmes de pollution par le chrome.

**17.3. Facteur de bioaccumulation :**

En comparant nos résultats avec ceux trouvés dans les travaux de (Korichi A., 2019), il a trouvé un FB de entre 0.25 et 1, ce qui est en accord avec les résultats de notre espèce *Marrubium vulgare*, Cela confirme la capacité d'accumulation limitée de cette espèce.

Pour l'espèce *Avena sativa*, l'auteur a trouvé des facteurs de bioaccumulation autour de 8.33. Par contre dans notre cas il peut atteindre 143 ce qui confirme la capacité d'accumulation importante de cette espèce dans le traitement des sols contaminés.

**18. Conclusion :**

A travers ces résultats, on peut conclure que les deux espèces peuvent être utilisées efficacement dans les traitements des sols contaminés par le chrome hexavalent, tandis que l'espèce *Avena sativa* est d'une capacité supérieure à celle de *Marrubium vulgare*.

**CONCLUSION**  
**GENERALE**

**Conclusion générale :**

Le chrome représente un problème prioritaire vis-à-vis de l'environnement, en raison de sa toxicité pour les organismes vivants, et comme les techniques de décontamination physique et chimique présentent plusieurs inconvénients, les techniques biologiques étaient la meilleure alternative, c'est la phytoremédiation.

Ce travail avait pour objectif principal d'étudier la capacité des deux plantes à traiter les sols contaminés par le chrome hexavalent et savoir quelles techniques sont utilisées pour la phytoremédiation.

Cette étude a permis de tirer les conclusions suivantes:

Les deux plantes sont affectées par le chrome hexavalent, mais elles ont la capacité de survivre malgré la présence de chrome à un taux élevé, et ce résultat confirme le bon choix des espèces.

Pour le facteur de translocation la plante *Avena sativa* peut parfois transférer efficacement le chrome à partir des racines vers les feuilles et peut être adaptée à la phytoremédiation dans certains cas.

La plante *Marrubium vulgare* ne peut n'être pas considérée comme un plant translocatrice du chrome hexavalent.

D'après les résultats du facteur d'enrichissement, les deux plantes peuvent être considérées comme stabilisatrice et bioaccumulatrice à la fois.

Pour le facteur d'accumulation la plante *Avena sativa* est un accumulateur favorable du chrome et idéale pour la phytostabilisation liée à l'accumulation de chrome dans les racines. Tandis que *Marrubium vulgare* est une espèce avec des capacités de bioaccumulation limitées.

Cette étude peut être suivie par une exploitation de l'espèce *Avena sativa* à échelle pilote ou semi-pilote en vue d'un traitement des sols contaminés en environnement naturel.

**REFERANCE  
BIBLIOGRAPHIQUE**

## Les Références:

### A

---

Ait Ahmed O., 2016-Dépollution des sols par la méthode électrocinétique .Thèse de doctorat., U.S.T.O-Oran.

Amghar D., 2019- Contribution à l'étude de l'influence d'un herbicide, leGhyphosate et d'un fongicide, le Moncozébe , sur la germination , la croissance et la physiologie de deux céréales : *Hordeum vulgare L.* et *Avena sativa L.*Mémoire deMaster ., U.M.M.T.O-TiziOuzou.

Amiri N.et Nedjadi R., 2017- Etude de l'activité insecticide de l'extrait de *Marrubiumvulgare* (L., 1753) à l'égard de deux espèces d'insectes *Ceratitiscapitata* (Wied., 1824) et *Ephestiakuehniella* (Zeller, 1879).Thèse Master., U. A.M.B-BOUIRA.

Anonyme,2016- La phytoremediation .Société québécoise dephytotechnologie,Boul. Pie-IX.

Anonyme,2015-Le chrome dans l'eau potable. Document de consultation publique.

### B

---

Berrabah Y., 2018- Etude de la pollution des sols par le chrome hexavalent dans la ville de Djelfa et ces périphéries, Mémoire de Master, U.Z.A.D-Djelfa.

Boumellal W.et Amrouche M.,2017-L'effet de la date de semis sur la culture de l'avoine (*Avena sativa.L*) sur quelques paramètres de croissance et de production dans la région de Khemis-Miliana. Thèse Master ., U.D.B.K-khemis Miliana.

### C

---

Charenete M.,1993-Etude de la pollution en Chrome de la Charente. Rapport.D.R.I.R.E.

Cotte Anne, Aude Duret. Le chrome trivalent : intérêts et limites des suppléments. Sciences pharmaceutiques., 2010. ffdumas-00593117. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00593117>, Submitted on 13 May 2011.146p.

Colombano, S, Saada, A, Guerin, V, Bataillard, P, Bellenfant, G, Beranger, S, Hube, D, Blanc, C, Zornig, C, Giradeau, I. (2010) Quelles technique pour quels traitements-Analyse

coûts bénéfiques (Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 08POLA06 0001386). France, BRGM° correspondant à la convention BRGM-MEEDDAT 2008 n Géosciences pour une Terre durable, 403 p.

Callier L, Clozel B, Nowak C., méthodes de recherche de l'origine de pollution (s) dans les sols ou dans les eaux souterraines., ORGM/RP.51260-FR aout 2002 n 47/2000.

## D

---

Desjar V., 2002- Réduction du Chrome (VI) par la souche *Streptomyces thermocarboxyidus* NH50 isolée à partir d'un sol pollué. Thèse de Doctorat. É.D.C.L-Lyon.

Decker M. Et Dosso O., 2006- Evaluation et gestion du risque sanitaire lié au dépassement de la limite de qualité du chrome dans l'eau de distribution. Mémoire de Ingénieur .E.N.D.S.P.R-Rennes.

Diwan H. Ahmad A. Iqbal M., 2007- Genotypic Variation in the Phytoremediation Potential of Indian Mustard for Chromium. Published online. Springer Science+BusinessMedia, LLC 2007.

Dominique Fournon. La phytoremédiation. Sciences pharmaceutiques. 1999. ffdumas-01617616ff. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01617616>, Submitted on 16 Oct 2017. 114p.

## F

---

Fournon D., 1999- La phytoremediation. Thèse de Doctorat. U.J.F.T-Tronche.

## J

---

Judd, W.S., Campbell, C.S., Kellogg, E.A., Stevens, P., 2000- Botanique systématique : Une perspective phylogénétique. 1ère Ed. Paris et Bruxelles.

Jean Rodier, Bernard Legube, Nicole Merlet, 2009. L'analyse de l'eau, 9<sup>ème</sup> édition Dunod(2009).

Joradp., 2009, JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE., Correspondant au 13 décembre 2009. 48<sup>ème</sup> ANNEE. N° 73.

## H

---

Hezzat H., 2012- Etude Critique des différents moyens de dépollution des eaux et des. Mémoire de Master . U.A.B B.T-TLEMEN.

Halli ahmed, mémoire de fin d'études : Essai de phytoremédiation d'un sol pollué au plomb par l'utilisation du colza (*Brassica napus* L) : effet de l'ajout d'un chélateur (EDTA)., protection de l'environnement ,2016. 143p.

## K

---

Korichi A., 2019- Inventory of phytoremedium plant species of hexavalent chromium near the route of OuedMellah. Mémoire de Master.U.Z.A.D-Djelfa.

## L

---

Lecomte P., 1998-les sites polluent, traitement des sols et des eaux souterraines.2em Edition. Edition TEC et DOC. Paris.

Lorestani B.,CheraghiM.,YousefiN., 2011-Phytoremediation potential of native plants growing on a heavy metals contaminated soil of copper mine in Iran.World Academy of science,Engineering and Technology.

Losi, M. E., Amrhein, C., and Frankenberger Jr, W. T.,1994- Environmental Biochemistry of Chromium.Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, vol. 136.

Lytle C., Lytle F.,W., Yang, N., Qian, J. H., Hansen, D., Zayed, A., and Terry, N.,1998- Reduction of Cr(VI) to Cr(III) by wetland plants : potential for in-situ metal detoxification. Environmental Science and Technology, vol. 32.

## M

---

Masten Susan J. et Davies Simon H.R., Efficacy of in-situ for the remediation of PAH contaminated soils Journal of Contaminant Hydrology.Volume 28, Issue 4, November 1997, Pages 327-335.

## N

---

Nouri J.,khorasani N. ;LorestaniB.,Karami M. ;HassaniA. ;Yousefi,N., (2009)- Accumulation of heavy metals in soil and uptake by plant species with phytoremediation potential.EnvIRON.Earth Sci.59(2).

## O

---

Oliveira F., Canevarin T., Guerra B., Perrira-Fillhoer., 2013 -proposition of simple method for chromium hexavalent determination in soils from remote places applying digital images: A case study from Brazilian Antractic, *Microchem.J.*109:165-169  
doi:<http://doi.org/10.1016/j.microc.2012.03.007>.

## P

---

Paulo Salgado<sup>1</sup>, Lê Hoà Bình, Vũ Chí Cương, Trần Văn Thủ., et Nguyễn Thị Hoa Lý<sup>1</sup>. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), France; Institut National de l'Élevage (NIAH), Vietnam, 88p.

## R

---

Rai D.; Eary L., Zachara, J.M.; 1989- Environmental chemistry of chromium. S. T. E., 86.

Raskin I., Kumar P. B. A. N., Dushenkov, S., & Salt, D. E. 1994.-  
Bioconcentration of heavy metals by plants. *Current Opinion in Biotechnology*, 5.

Repellini F., 2000 -La phytoremediation des sols pollués par les métaux.  
Rapport. U. S.T.S-E.L-Lyon.

Rebhi A., 2019-Pollution et remédiation. Cour, U. Z. A.D-Djelfa.

Rodier J., 2009-l'analyse de l'eau. Ed. Dunod. P. Paris.

## S

---

Santoshk P., 2012-Phytoremediation of Chromium and Cobalt using Pistiastratiotes: A sustainable approach. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*.

Scriban R., 1999-Biotechnologie : restauration par voie biologique des sols contaminés par les polluants organique 5eme édition, Ed lavoisirie.

Suresh B. et Ravishankar G., 2004 - Phytoremediation - A novel and promising approach for environmental clean-up. Article : *Critical Reviews in Biotechnology*. Vol 24.

## T

---

Taleb D.,2018-Evaluation de l'activité antimicrobienne, et Antioxydante des composés phénoliques du Marrube blanc « *Marrubiumvulgare* ».Mémoire de Master., U.M. M.T.O-TiziOuzou.

## V

---

Vila M., 2006 -Utilisation de plantes agronomiques et lacustres dans la dépollution des sols contaminés par le RDX et le TNT : Approches en laboratoire. These de doctorat, Toulouse.

## X

---

Xu. J.,ZhengeL.,Xu Wan X., 2020.Uptake and allocation of selected metals by dominant vegetation in ponyang Lake wetland : From rhizoshere to plant tissues.catena. 189.

## Y

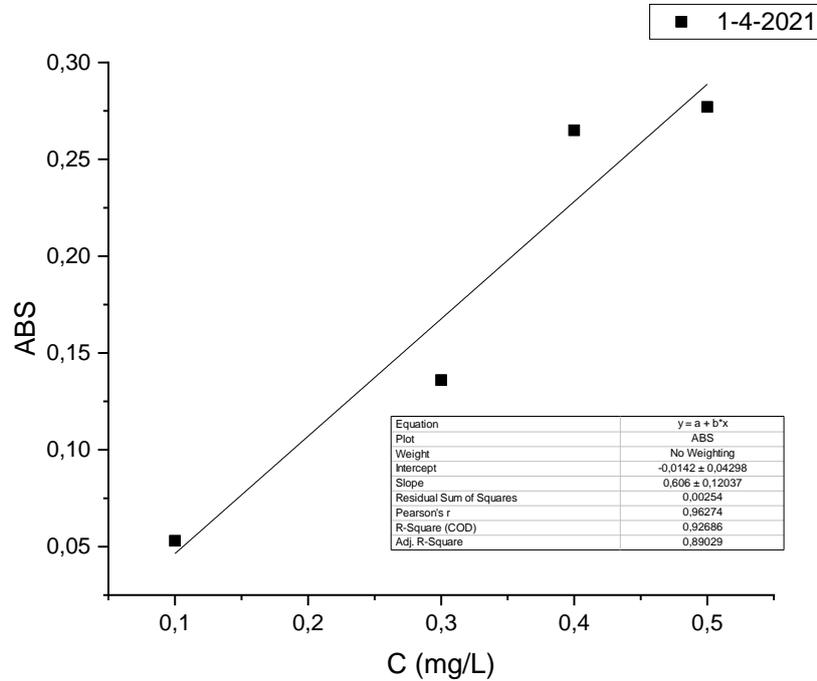
---

Yennek M., et Zaouche M., 2017- Optimisation mathématique des paramètres de la biostimulation d'un sol pollué aux carburants. Thèse Master. U.M.M.T.O-Tizi-Ouzou.

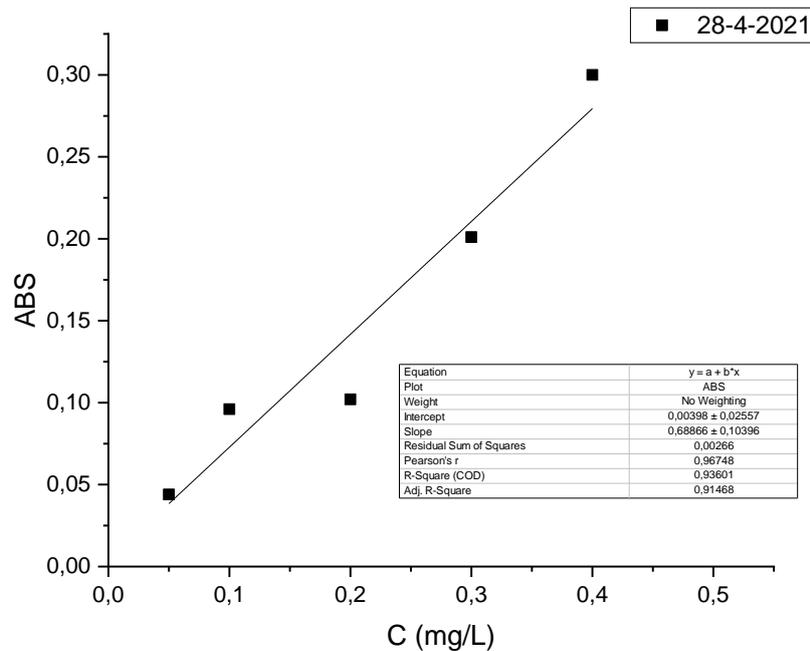
# **Annexes**

**Elaboration des courbes d'étalonnage :**

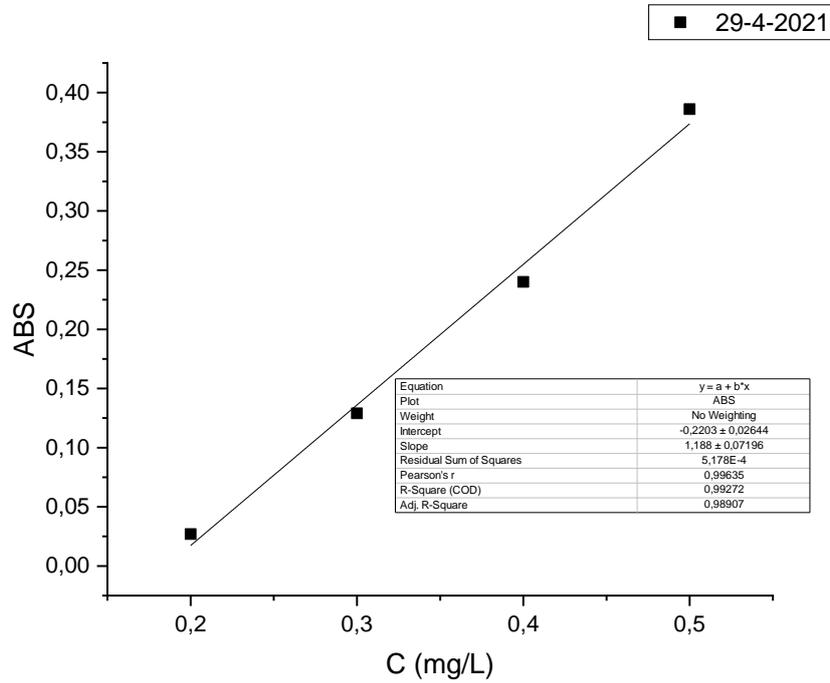
Les courbes d'étalonnage de l'analyse du chrome hexavalent sont représentées dans les figures A11, A12, A13 et A14



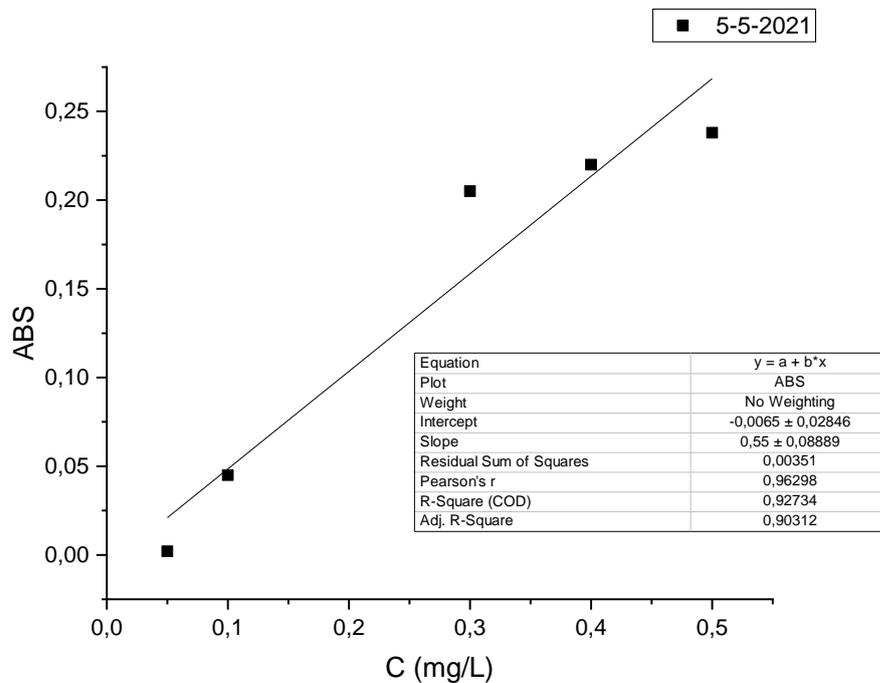
**Figure A11, Courbe d'étalonnage du chrome hexavalent de la date 1/4/2021**



**Figure A12, Courbe d'étalonnage du chrome hexavalent de la date 28/4/2021**



**Figure A13, Courbe d'étalonnage du chrome hexavalent de la date 29/4/2021**



**Figure A14, Courbe d'étalonnage du chrome hexavalent de la date 5/5/2021**