



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
جامعة زيان عاشور-الجلفة
Université Ziane Achour – Djelfa
كلية علوم الطبيعة والحياة
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
قسم العلوم الفلاحية والبيطرية
Département des Sciences Agronomiques et Vétérinaires

Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Sciences alimentaires
Spécialité : Agro-Alimentaire et Contrôle de Qualité

Thème

Etude de la tolérance de l'orge au chrome hexavalent

Présenté par : MELFOUF Ghania

ORICHA Abir Inas

Examiné par le jury composé de :

Président	NEDJIMI Bouzid	Pr. Université de Djelfa
Promoteur	HACHI Mohamed	MCA Université de Djelfa
Examineur	BEZINI Elhadi	MAA Université de Djelfa

Remerciements

Louanges à Dieu le tout puissant et le miséricordieux qui a guidé mes pas vers cette issue.

J'exprime toute ma gratitude à mon encadreur MOHAMMED HACHJ Professeur à l'université de Zain Achoure De Djelfa Pour avoir proposé et dirigé mon travail Et pour ses conseils et sa patience ,Je le remercie pour sa disponibilité, ses conseils et ses critiques constructives.

Je tiens à remercier les membres du jury, Monsieur Nedjimi Bouzid, et Bezini Elhadi pour la lecture attentive du mémoire ainsi que pour les remarques qu'ils m'adresseront lors de cette évaluation afin d'améliorer le manuscrit.

Je remercie tous ceux qui nous ont rendu service et qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ORICHA ABIR INAS ET MELFOUF GHANIA

Dédicace

***Avant de dédier ce travail nous remercions Dieu le clément,
le miséricordieux pour le courage, la patience et la santé
qu'il m'a donnée pour venir à bout de ce travail***

Je dédie ce travail à :

***Ma chère mère Ghania Rabouh que Dieu lui fasse
miséricorde***

***Ma chère mère Oum Elkheir qui a réussi grâce à ses prières et
son soutien***

***Mes frères MOHAMED, EL NAAS ,EL AKHDER ,SALEM
.YAHAJ ,***

***ABD ELKRJM (RABOUH) qui m'ont soutenu toutes ces
années et m'ont aidé et conseillé pour arriver ici***

Mes sœurs LEJLA SAFJA SALJMA JMANE

***Mes professeurs de l'école primaire à l'obtention du
diplôme***

Mon ami intime DJAMJLA BEN MOSTAFA

***Mes collègues de la promotion de l'agro-alimentaire et du
contrôle qualité***

A tous ceux que mon coeur a aimés et qui m'ont soutenu

GHANIA

Dédicace

C'est un grand honneur de dédier cette grande et humble action au plus aimé des gens à mon père, que Dieu le bénisse de sa grande miséricorde, et à ma mère qui a toujours été créditée de ses prières et de ses conseils pour moi

Et ma soeur aînée Aisha et ma deuxième mère, sa fille Abrar, ma soeur Fatima al-Zahra et ses enfants, en particulier sa fille Hadeel et son nouveau bébé Misbah, et ma soeur Najat, Omar, Hamada et Khaled, comme je ne l'oublie pas le dernier du cluster Ramzi.

Et je n'oublie pas mes amis, en particulier mon associé au mémoire melfouf Ghanaia

ABP

ABREVIATIONS ET ACRONYMES

°C : Celsius

ϵ : Coefficient d'absorption moléculaire

A : Absorption

ADN : Acide Désoxyribose nucléaire

BaCrO₄ : Chromate de baryum

CaCrO₄ : Chromate de calcium

Cr(0) : Chrome métallique

Cr(III) : Chrome trivalent.

Cr(VI) : Chrome hexavalent.

Cr²⁺ : Chrome bivalent.

Cr³⁺ : Chrome trivalent.

Cr⁶⁺ : Chrome hexavalent

CrO₄²⁻ : Oxyanions chromate

Fe : fer

FeCr₂O₄ : Chromite

K₂CrO₄ : chromate de potassium

MnO₂ : Les oxydes de manganèse

nm : nano mètre

L : Longueur de cellule 1cm

PbCrO₄ : chromate de plomb

pH : Potentiel d'hydrogéné

OH⁻ : anion hydroxyde

ROS : réactives d'oxygène

UV : Ultras violet

XIX^e : 19^{ème} siècle

EPA : Environmental Protection Agency

IARC : International Agency for Research on Cancer

ATSDR : Agency for Toxic Substances and Disease Registry

CIRC : Le Centre International de données sur le cancer

COV : composés organiques volatils

OHCOW *Hexavalent Chromium*. Ontario, Canada: Occupational Health Clinics for Ontario Workers.

LISTE DES FIGURES

- Figure 01:** Effets toxicologiques du chrome hexavalent sur l'homme
- Figure02:** Effets du chrome hexavalent (Cr (VI)) sur l'écosystème et le santé humaine
- Figure03 :** Les principales techniques de phytoremédiation (Mahar et al; 2016)
- Figure 04 :** Vue ventrale et dorsale du grain d'orge (Souillah, 2009)
- Figure 05:** Forme du sol après mélange
- Figure 06:** (*Hordeum vulgare*) L(local)
- Figure07:** l'orge importé (Canada)
- Figure08:** Début de la germination de l'orge locale après 24h
- Figure09:** Début de la germination de l'orge importé après 24h
- Figure10:** formation du système racinaire des germes d'orge local (3jours)
- Figure11:** formation du système racinaire des germes d'orge importé (3jours)
- Figure12:** la forme d'orge local après 7 jours
- Figure13:** la forme d'orge importé après 7 jours
- Figure 14:** Cultiver de l'orge en pot
- Figure 15 :** l'orge ressemble à 7 jours après l'ajout de chrome hexavalent
- Figure 16 :**Séparation des feuilles, des racines et du sol
- Figure 17 :** placer les échantillons de feuilles et de racines et le sole au à une température de 75°C
- Figure 18 :**Extraction du chrome hexavalent à partir des échantillons de sol
- Figure 19 :** Solutions standard de chrome hexavalent après contact avec 1.5 Diphenylcarbazine
- Figure 20 :** Analyse de solution par UV-Visible.
- Figure21 :** Morphologie des avant (à gauche) et après (à droite) contact avec le chromehexavalent
- Figure22 :** Evolution de la quantité du Cr(VI) dans le sol en fonction du volume ajouté
- Figure23 :** Comparaison de la quantité de chrome dans deux types d'orge dans le sol
- Figure24 :** Evolution de la quantité du Cr(VI) dans les racines
- Figure25 :** Evolution de la quantité du Cr dans les racines pour les deux variétés v1 et v2
- Figure26 :** Comparaison de la quantité du Cr dans les feuillues pour les deux variétés v1 et v2

Figure27 : Evolution de la présence du Cr(VI) dans les feuilles des deux variétés en fonction du chrome ajouté

Figure28 : Longueur des feuilles pour les deux variétés

Figure29 : Développement de la longueur des feuilles avec la présence de chrome pour les deux variétés v1 et v2

Figure30: Comparaison de la longueur des feuilles d'orge entre les deux cas variétés de l'orge

LISTE DES TABLEAUX

Tableau N°01: Avantages et inconvénients de la phytoremediation.....	23
Tableau N°02: Définition et principales caractéristiques des procédés de ..phytoremédiation et les avantages et inconvénients de chaque procédé	24
Tableau N°03: Résultat des facteurs caractérisant le phénomène de phytoremédiation	53

Sommaire

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

INTRODUCTION GENERALE.....1

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I: POLLUTION DES SOLS PAR LE CHROME HEXAVALENT

1. Introduction.....	5
2. Generalite sur le	6
2.1. Le chrome trivalent, cr(III).....	7
2.2. Le chrome hexavalent cr(VI).....	8
3. Chrome dans l'environnement.....	8
3.1. Chrome dans l'eau.....	8
3.2. Chrome dans le sol.....	9
3.3. Chrome dans les plantes.....	9
4. Dynamique du chrome dans le sol.....	10
4.1. Oxydation du chrome trivalent.....	11
4.2. Réduction du chrome hexavalent.....	12
5. Utilisation de chrome (VI).....	14
6. Applications industrielles.....	14
7. Toxicite du chrome.....	15
7.1. Sur la santé humaine.....	15
7.2. Sur les plantes.....	18

CHAPITRE 02

TRAITEMENT DES SOLS CONTAMINES PAR LE CHROME

1. Introduction.....	20
2. Traitements des sols contaminés par le chrome	20
3. Classement en fonction du lieu de traitement.....	21
3.1. Traitements hors site (ou ex situ).....	21
3.2 . Traitements sur site (ou on site).....	21
3.3.traitements in situ (ou en place).....	21
3.4 . Confinement	21

4. Classement en fonction de la nature des procédés employés.....	21
4.1. Les procédés biologiques.....	22
4.2. Les procédés thermiques.....	22
4.3 . Les procédés chimiques.....	22
4.4 . Les procédés physiques.....	22
5.1 avantages traitement physico-chimique.....	22
5.2. Inconvénients traitement physico-chimique.....	22
6. La phytoremediation du chrome hexavalent.....	22
6.1. Définition de la phytoremediation.....	23
6.2. Avantages et inconvénients de la phytoremédiation.....	23
6.3. Les différents mécanismes de phytoremédiation.....	23
7. Présentation des espèces utilisées.....	25
7.1. L'orge.....	25
7.2. Origine.....	25
7.3. Morphologie du grain d'orge.....	25
7.4. Description de la plante.....	26
7.5. L'orge pour l'alimentation animale.....	27
7.6. L'orge alimentaire.....	27
7.7. La consommation d'orge dans le monde.....	27
7.8. La consommation d'orge en algérie.....	28

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE III: MATERIEL ET METHODES

1.Introduction.....	31
2. Matériel.....	31
2.1. Objectif.....	31
2.2 .verrerie.....	31
2.3. Appareillage.....	31
2.4. Petit matériel et consommables.....	32
2.5. Produits.....	32
2.6. Precautions de securite.....	32
3. Methodes.....	32
3.1.prélèvement de sol.....	32
3.1.1composition de sol.....	32
3.2.prélèvement de grains d'orge.....	33

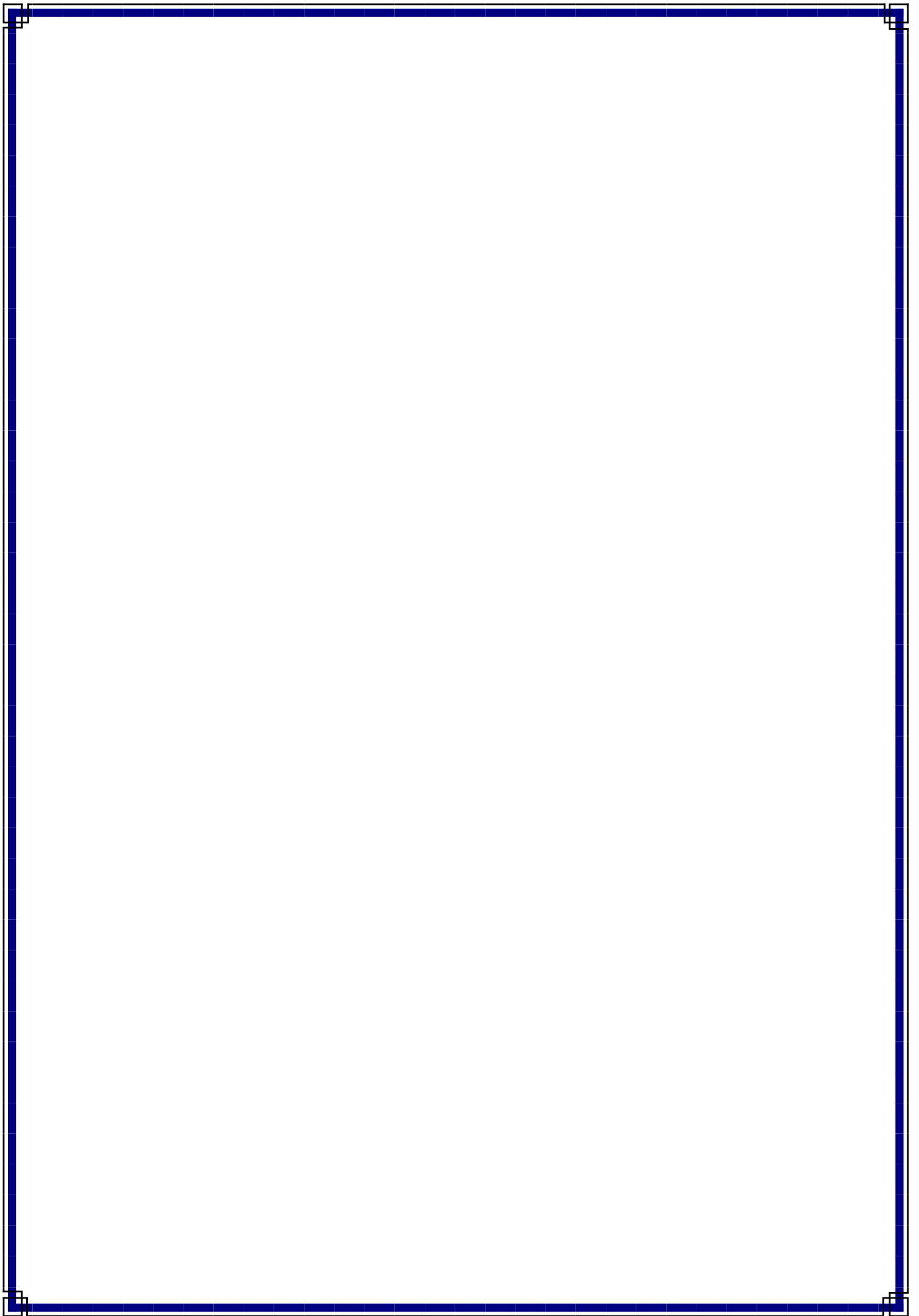
3.2.1.l'orge (hordeum vulgare l) (local).....	33
Préparation des solutions réactive.....	34
4.1. Solution de carbonate de sodium	34
4.2. Solution d'hydroxyde de sodium	34
4.3. Préparation d'une solution acide de1.5-diphenylcarbazide.....	34
4.4. Préparation de la solution d'acide sulfurique	34
4.5. Solution mère du chrome hexavalent a 1g/l.....	35
4.6. Solution fille étalon de chrome à 5 mg/l.....	35
5. Implantation et arrosage avec le chrome hexavalent	35
5.1. Méthode hydroponique de l'orge.....	35
5.2. Arrosage avec le chrome hexavalent.....	37
5.3. Séchage, extraction et analyse du chrome	39
5.3.1. Séchage du sol.....	39
5.3.2. Séchage des feuilles et des racines.....	39
5.4. Extractions du chrome à partir du sol	39
5.4.1. La filtration du sol	40
5.4.2. Extraction du chrome à partir des échantillons	40
5.5. Dosage du chrome par spectrophotomètre uv visible	40
5.5.1. Établissement de la courbe d'étalonnage	40
5.6. Dosage du chrome hexavalent dans les échantillons de sol et de plantes	42
5.7. Détermination des concentrations et des taux en chrome hexavalent dans les échantillons.....	42
5.7.1. Calcul des concentrations.....	42
5.7.1.1.calcul des taux	42
5.7.2. Détermination des facteurs caractérisant la phytoremediation.....	42
5.7.2.1. Facteur de bioaccumulation (FB).....	42
5.7.2.2. Facteur de translocation (FT).....	43
5.7.2.3.facteur d'enrichissement (FE).....	43

CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. Introduction	45
2. Morphologie des deux types d'orge avant et apres contact avec le chrome rhexavalent	45
3. Resultats de l'analyse du chrome hexavalent dans les echantillons de sol et de	

plantes.....	46
3.1. Présence du chrome dans les échantillons du les racines	47
3.2. Présence du chrome dans les feuilles	49
4. Discussion des resultats	52
4.1. Facteur caractérisant la phytoremédiation	53
4.2. Facteurs de translocation	55
4.3. Facteur d'enrichissement	55
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	56
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	57
RESUME.....	69

Introduction Générale



INROODUCTION GENERAL

Les effluents industriels sont les principales sources de pollution par le chrome hexavalent (Cr (VI)) dans l'environnement. La pollution par Cr (VI) est devenue l'une des préoccupations environnementales les plus graves au monde en raison de sa longue persistance dans l'environnement et de sa nature hautement toxique pour les organismes vivants. Pour son utilisation répandue dans les industries, le Cr (VI) est hautement toxique et l'un des contaminants environnementaux les plus courants.

Le Cr(VI) est souvent de nature non biodégradable, ce qui signifie qu'il reste longtemps dans l'environnement, pollue le sol et l'eau et pose des risques importants pour la santé des humains et de la faune. Chez les êtres vivants, la forme hexavalente du Cr est cancérigène, génotoxique et mutagène.

Le chrome est un élément naturel présent dans la poussière volcanique, les roches et le sol (Sharma et al; 2020).

Il a un potentiel redox élevé et peut exister dans divers états d'oxydation allant de (-2) à (+6). Cependant, les formes les plus stables sont le Cr trivalent (Cr (III)) et le Cr hexavalent (Cr (VI)) (Jiang et al; 2015).

Les propriétés

Physiques chimiques et toxicologiques du Cr (III) et du Cr (IV) varient considérablement.

Alors que le Cr (III) se trouve généralement dans la nature sous forme de minerai tel que la ferrochromite, le Cr (VI) est principalement généré par des activités anthropiques et est hautement toxique pour les organismes vivants (Jiang et al; 2021).

Le Cr (III) existe sous la forme d'un cation hydroxyde insoluble alors que le Cr (VI) est une espèce d'oxyanion se présentant sous la forme de chromate divalent, dichromate ou chromate monovalent selon le pH de la solution (Kazakis et al; 2015).

Le Cr (VI) est la forme du Cr la plus mobile dans le milieu aquatique en raison de sa solubilité dans l'eau relativement plus élevée.

Le chrome est un élément polyvalent et a été utilisé dans de nombreuses applications industrielles depuis sa découverte en 1797.

Les composés de chrome sont souvent utilisés dans le chromage, la fabrication de teintures, l'industrie textile, l'industrie aéronautique, le tannage du cuir, la

préservation du bois et le forage de boue.

Les chromates, les dichromates, l'acide chromique, le sulfate chromique et les oxydes chromiques sont des exemples de composés de chrome pertinents sur le plan industriel.

Ces composés de chrome sont généralement produits à partir de l'extraction et du traitement du minerai de chromite

La mobilité et la distribution des métaux dans l'environnement sont liées non seulement à leur concentration mais aussi à leur disponibilité dans l'environnement. La plupart du chrome (Cr) existe dans des états d'oxydation allant de 0 à VI dans les sols, mais les formes les plus stables et les plus courantes sont les espèces Cr(0), Cr(III) et Cr(VI). Le chrome peut avoir des effets positifs et négatifs sur la santé, selon la dose, le temps d'exposition et son état d'oxydation. Le dernier est très soluble ; portable; et toxique pour les humains, les animaux et les plantes.

Au contraire, le Cr(III) a une toxicité et une mobilité relativement faibles et c'est l'un des micronutriments nécessaires à l'homme. De plus, le Cr(III) peut être absorbé à la surface des minéraux argileux sous forme de précipités ou de complexes. Ainsi, les approches convertissant le Cr(VI) en Cr(III) dans les sols et les eaux ont reçu une attention considérable. Les composés Cr(III) sont peu solubles dans l'eau et peuvent être trouvés dans les masses d'eau sous forme de complexes Cr(III) solubles, tandis que les composés Cr(VI) sont facilement solubles dans l'eau.

Le chrome est absorbé par l'intermédiaire de transporteurs d'ions essentiels tels que le sulfate.

L'absorption, l'accumulation et la translocation du chrome dépendent de sa spéciation. Les symptômes de la toxicité du Cr chez les plantes comprennent une diminution de la germination, une réduction de la croissance, une inhibition des activités enzymatiques, une altération de la photosynthèse et des déséquilibres oxydatifs (Andrea et al, 2017)

Parmi les méthodes les plus utilisées dans le traitement de la pollution des sols par le chrome, la phytoremédiation a gagné une attention particulière, cela est due à son efficacité et son coût réduit, dans ce travail on s'intéresse à la remédiation des sols contaminés par le chrome hexavalent en utilisant l'orge (*Hordeum vulgare*) en effet, il est considéré comme l'une des plantes qui absorbent ou réduisent la toxicité de divers polluants organiques ou minéraux et éléments radioactifs dans le sol.

Cette étude vise à atteindre les objectifs suivants :

Estimation de la concentration en chrome hexagonal dans différentes parties de la plante (racines, tiges, feuilles) pour les types suivants : orge locale et orge importée.

Purifier le sol du chrome hexavalent et déterminer le type d'orge le plus apte à l'absorber

Ce manuscrit est divisé en quatre chapitres :

Nous présentons dans le premier chapitre une étude bibliographique exhaustive sur la pollution des sols par le chrome et la dynamique du chrome dans les sols. Ensuite, nous décrivons les effets du chrome hexavalent (Cr (VI)) sur la flore et la faune.

Le deuxième chapitre est consacré aux traitements des sols contaminés par le chrome et le rôle de la phytoremédiation dans l'élimination du chrome hexavalent

Le troisième chapitre est consacré à la présentation du matériel utilisé et à la description des méthodes expérimentales d'analyse et de caractérisation exploitées dans ce travail.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats de l'expérience étudiée et de ses détails

Ce mémoire est clôturé par une conclusion générale et perspectives.

PARTIE
BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I
POLLUTION DU SOL
PAR LE CHROME
HEXAVALENT

1. INTRODUCTION

Les métaux lourds sont souvent des composés chimiques dangereux (Liu et al; 2020), les polluants de métaux lourds s'accumulant dans l'environnement et présentant une menace potentielle pour les organismes (Mehmood et al; 2019 ; Wang et al; 2020).

Le chrome (Cr) est un métal lourd qui figure sur la liste des 20 principales substances dangereuses de l'Agency for Toxic Substances and Disease Registry (Oh et al; 2007).

La contamination de l'environnement par le Cr est principalement due aux activités anthropiques telles que la métallurgie, la tannerie, la teinture textile et les industries de chromage, ainsi qu'à l'élimination des déchets solides (Molnar et al; 1989 ; Mishra et Doble; 2008 ; Ilias et al; 2011 ; Ahmad et al; 2016 ; Kabir et al; 2018).

Les eaux usées générées par ces procédés industriels contiennent généralement de fortes concentrations de Cr (Lytras et al; 2017).

De graves niveaux de pollution des sols ont été détectés à l'échelle mondiale en raison de la contamination généralisée de l'environnement par des substances dangereuses telles que le Cr et du manque d'installations appropriées de traitement et d'élimination des déchets (Tripathi et al; 2011). Par conséquent, le Cr s'accumule dans les cultures cultivées dans des sols contaminés, présentant un risque grave pour la santé humaine via la chaîne alimentaire (Broadway et al; 2010 ; Ahmad et al; 2016).

2. GENERALITE SUR LE CHROME

Le chrome (Cr) est le 17^{ème} élément le plus abondant du manteau terrestre (Avudainayagam et al; 2003) .

Le Cr est largement utilisé dans l'industrie pour le placage, l'alliage, le tannage des peaux d'animaux, l'inhibition de la corrosion par l'eau, les colorants et mordants textiles, les pigments, les émaux céramiques, les briques réfractaires et le bois traité sous pression (Avudainayagam et al; 2003) .

En raison de cette large utilisation anthropique du Cr, la contamination environnementale qui en résulte a augmenté et est devenue une préoccupation croissante ces dernières années (Zayed et Terry; 2003) .

Le chrome existe dans plusieurs états d'oxydation, mais les formes les plus stables et les plus courantes sont le Cr(0), le Cr(III) trivalent et l'espèce Cr(VI) hexavalente. Cr(0) est la forme métallique, produite dans l'industrie et est un solide à haut point de fusion généralement utilisé pour la fabrication d'acier et d'autres alliages (Becqueret et al; 2003; Peralta-Videa et al; 2009).

Comme le Cr(VI) et le Cr(III) présentent des caractéristiques chimiques, toxicologiques et épidémiologiques différentes, ils sont régulés différemment par l'EPA, ce qui constitue une caractéristique unique du Cr parmi les métaux toxiques (Kimbrough et al; 1999).

Le Cr(VI) est un puissant irritant épithélial et est également considéré comme cancérigène pour l'homme (IARC; 1990).

Le Cr(VI) est également toxique pour de nombreuses plantes (Shanker et al; 2005), des animaux aquatiques (Velma et al; 1977). Contrairement au Cr(VI), le Cr(III) est considéré comme un micronutriment chez l'homme, étant nécessaire au métabolisme des sucres et des lipides (ATSDR; TPC; HAP; 2000) et n'est généralement pas nocif. Dans les plantes, en particulier les cultures, le Cr à de faibles concentrations (0,05-1mg L⁻¹) s'est avéré favoriser la croissance et augmenter le rendement, mais il n'est pas considéré comme essentiel pour les plantes (Peralta-Videa et al; 2009; Paiva et al; 2009).

Dans ce contexte, l'accumulation de chrome dans les plantes comestibles peut représenter un danger potentiel pour les animaux et les humains.

La source commerciale de chrome la plus importante et la seule est le minerai de chromite, dans lequel la teneur en oxyde chromique se situe généralement entre 15 et 65 %.

Les principaux gisements se situent en Afrique australe avec 96% des réserves connues (Sperling; 2005)

2.1. Le chrome trivalent, Cr(III)

Le chrome trivalent est la forme la plus stable mais ayant des propriétés chimiques plus complexes que le chrome hexavalent. Le chrome trivalent a peu d'affinité pour l'oxygène, c'est pour cette raison qu'il a tendance à former de nombreux complexes avec des ligands organiques ou non. Parmi les ligands suivants OH^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} et NO_3^- , seul l'anion hydroxyde OH^- se complexe de façon significative avec le Cr(III) aux concentrations retrouvées dans l'environnement (Rai et al; 1986).

2.2. Le chrome hexavalent Cr(VI)

Le Cr(VI) est un oxy-anion ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, HCrO_4^- et CrO_4^{2-}), fortement toxique: c'est un puissant oxydant qui présente des toxicités à l'inhalation, l'ingestion et l'exposition cutanée, et est cancérigène (WHO). Dans les sols, des effets létaux vis-à-vis des vers de terre ont été observés à des concentrations de Cr total de $6,2 \text{ mg kg}^{-1}$ (Bourrelie et Berthelin; 1998).

Toutes ses formes étant anioniques, le chromate est fortement retenu par les phases minérales chargées positivement au sein des sols, comme les oxydes de Fe présentant une charge de surface positive dans une grande gamme de pH dans les sols tropicaux.

3. CHROME DANS L'ENVIRONNEMENT

Le chrome est présent dans tous les compartiments environnementaux, y compris l'eau, l'air et le sol, à différentes concentrations. (Kimbrough et al; 1999)

3.1. Chrome dans l'eau:

Le chrome peut pénétrer dans les eaux naturelles par altération des roches contenant du Cr, rejet direct des opérations industrielles, lessivage des sols, entre autres. Dans le milieu aquatique, le Cr peut subir une réduction, une oxydation, une sorption, une désorption, une dissolution et une précipitation (Kimbrough et al; 1999).

La solubilité aqueuse du Cr(III) est fonction du pH de l'eau. A pH neutre à basique, le Cr(III) précipitera et inversement à pH acide il aura tendance à se solubiliser. Les formes de chromate et de bichromate de Cr(VI) sont extrêmement solubles dans toutes les conditions de pH, mais elles peuvent précipiter avec des cations divalents (Kimbrough et al; 1999).

Les limites recommandées pour la concentration de Cr dans l'eau sont de $8 \mu\text{g L}^{-1}$ pour le Cr(III) et de $1 \mu\text{g L}^{-1}$ pour le Cr(VI). Dans les effluents à proximité des industries de Cr, les teneurs en Cr varient de 2 à 5g L^{-1} (Chandra et al; 1997).

3.2. Chrome dans le sol:

La concentration de Cr dans les sols peut varier considérablement selon la composition naturelle des roches et des sédiments qui les composent. Les niveaux de chrome dans le sol peuvent augmenter principalement par les dépôts anthropiques, comme par exemple les dépôts atmosphériques (Rosas et al; 1989), ainsi que le déversement de liquides contenant du chrome et de déchets solides sous forme de sous-produits du chrome, de scories de ferrochrome ou de bains de chromage. Généralement, le Cr dans le sol représente une combinaison de Cr(III) et de (VI). Comme dans le milieu aquatique, une fois dans le sol ou les sédiments, le Cr subit diverses transformations, telles que l'oxydation, la réduction, la sorption, la précipitation et la dissolution.

3.3. Chrome dans les plantes

La voie d'absorption du Cr dans les plantes n'est pas encore clairement élucidée. Cependant, étant un élément non essentiel, le Cr n'a pas de mécanisme spécifique pour son absorption et dépend également de la spéciation du Cr. L'absorption du Cr(III) par la plante est un processus passif, c'est-à-dire qu'aucune dépense d'énergie n'est requise par la plante (Skeffington et al; 1976.). On pense que l'absorption de Cr(VI) est un mécanisme actif effectué par des transporteurs pour l'absorption d'éléments essentiels tels que le sulfate (Kim et al; 2001).

Le Cr(VI) a une solubilité plus élevée et donc la biodisponibilité est plus toxique à des concentrations plus faibles que le Cr(III), qui a tendance à former des complexes stables dans le sol. Il existe des résultats contradictoires concernant l'absorption et la translocation du Cr(VI). Alors que certains auteurs soutiennent que le Cr(VI) est réduit en Cr(III) à la surface des racines (Ramachandran et al; 1980; Zayed et al;

1998), d'autres suggèrent que le Cr(VI) dissous est absorbé par les plantes sans réduction (Mishra et al; 1995).

4. DYNAMIQUE DU CHROME DANS LES SOLS

La dynamique des éléments au sein du sol fait largement intervenir la notion d'ions facilement "échangeables" ou labiles, i.e. aux ions qui peuvent être aisément lixiviés par une solution d'électrolytes. Il s'agit d'un concept empirique (Sposito; 1992).

Le Cr(III) est considéré comme peu mobile au sein des sols étant donné sa faible solubilité ($K_s(\text{Cr}(\text{OH})_3) = 6,7 \times 10^{-31}$). Il a tendance à être retenu à la surface des solides et, en présence de MO à $\text{pH} > 4$, il est fortement adsorbé (Rai et Zachara; 1988; Rai et al; 1989; Fendorf; 1995; Oze et al; 2004).

L'adsorption du Cr(III) sur les oxyhydroxydes de Fe est fonction du pH et maximale à $\text{pH} = 4$ (Leckie et al; 1984; Stumm; 1992). Le Cr(III) est sorbé à la surface des oxydes de Fe par la formation de complexes de sphère internes (Manceau et Charlet; 1992). De plus le Cr(III) présente une forte énergie de stabilisation lorsqu'il est intégré dans un réseau cristallin, rendant les phases porteuses substituées en Cr plus stables. Ainsi, le Cr(III) associé à ces oxydes est considéré comme non disponible dans les environnements de surface. En revanche, en présence de ligands organiques, le Cr(III) peut former des complexes organiques solubles, pouvant augmenter sa disponibilité et mobilité au sein des sols (James et Bartlett; 1983; Fendorf; 1995). Le Cr(VI) est connu pour être mobile dans certaines conditions. L'isotherme d'adsorption montre que le maximum d'adsorption des chromates sur les oxyhydroxydes de Fe se situe à environ $\text{pH} = 5$ (Leckie et al; 1984; Stumm; 1992). Au sein des sols, il est faiblement adsorbé à la surface des phases secondaires formant des complexes très labiles (Zacharra et al; 1989).

Le Cr ainsi adsorbé est facilement déplacé par des anions comme les phosphates et les sulfates (Rai et Zachara; 1988; Fendorf; 1995; Ball et Norstrom; 1998; Becquer et al; 2003), le Cr(VI) est par conséquent considéré comme disponible au sein des sols. Cependant, Oze (2004) note qu'au sein de certains profils d'altération, une fois oxydé, le Cr devenu hexavalent est préférentiellement transporté par l'eau de percolation et évacué du système, limitant ainsi sa disponibilité. L'adsorption du Cr(VI) au sein des sols est fonction du type de phases porteuses, qui contrôlent donc

en partie sa mobilité (Zachara et al; 1987).

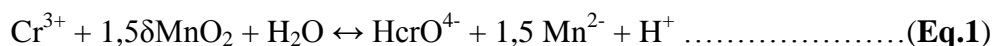
La disponibilité du Cr au sein des sols et sa mobilité sont donc fortement dépendantes de son état d'oxydation. Les réactions d'oxydoréduction ont donc une grande importance dans la dynamique du Cr.

4.1. Oxydation du chrome trivalent

L'oxydation de Cr(III) par l'oxygène dissous est trop lente pour être considérée comme significative (Schroeder et Lee; 1975; Eary et Rai; 1987).

Les oxydes de manganèse (MnO₂) sont les seules espèces assez puissantes pour oxyder le Cr(III) en Cr(VI) (Barlett et James; 1979;; Eary et Rai; 1987; Jardine et al; 1999; Murray et Tebo; 2007)

La réaction est dépendante du type d'oxydes de Mn : plus l'oxyde est riche en Mn(IV) plus l'oxydation semble efficace (Kim et al; 2002), et la capacité de sorption est fonction de la surface spécifique de l'oxyde (Weaver et Hochella; 2003). La réaction est également dépendante du pH de la suspension. Elle est maximale à pH=5 et diminue lorsque le pH augmente. Enfin comme attendu, la concentration en Cr(III) disponible est un paramètre clé (Fendorf et Zasoski; 1992; Oze et al; 2007). La production de Cr(VI) par oxydation de la chromite en présence de birnessite a été étudié par: quelles que soient les conditions expérimentales, les vitesses de production sont très lentes (0.5 – 4.1 nM h⁻¹) (Oze et al;2007)



La cinétique de la réaction d'oxydation par le Mn a été étudiée en détail par Manceau et Charlet (1992). La première étape implique l'adsorption du Cr(III) à la surface du site réactif ou dans des lacunes cristallographiques de l'oxyde de Mn. Puis, l'oxydation de Cr(III) par transferts d'électrons a lieu avec la formation d'espèces intermédiaires comme le Mn(III), Cr(IV) et le Cr(V). La dernière étape correspondant à la désorption des produits de réaction Mn(II) et Cr(VI) a une cinétique lente. Ainsi, Manceau et Charlet (1992) notent que la réaction est fortement dépendante de la structure du sorbant et plus spécialement de la densité des sites octaédriques vacants. En outre, Manceau et Charlet (1992) montrent que la réaction entre le Mn(IV) et le Cr(III) n'est effective que lorsque la solution du sol a été enlevée, mettant en évidence une dépendance vis-à-vis de l'activité de l'eau, ce qui pourrait expliquer la

faible cinétique mesurée en laboratoire par l'ensemble des auteurs (Eary et Rai; 1987; Fendorf et Zasoski; 1992; Oze et al; 2007).

La réaction d'oxydation est accélérée (catalysée) en présence de bactéries Mn(II)-oxydantes car productrices d'oxydes de Mn (Murray et Tebo; 2007).

La vitesse de réaction s'est révélée 7 fois plus rapide en présence d'oxydes de Mn biogéniques et 25 fois plus rapide en présence de Mn(II) et de spores bactériennes. Enfin, l'oxydation du Cr(III) est limitée voire nulle en présence d'acide carboxylique (citrique et salicylique) (Johnson et Xyla; 1991; Nakayama et al; 1981). En effet, en présence de substances organiques, le Cr(III) étant rapidement complexé par ces derniers, l'oxydation n'est pas possible (Kozuh et al.; 2000; Puzon et al; 2005).

En général, en présence d'oxydes de Mn, même si on se place dans les conditions d'humidité et de pH optimales, une large proportion de Cr(III) ne sera pas oxydé car ce dernier n'est pas disponible (Barlett; 1991).

En effet, la compétition entre les oxydes de Mn et les autres phases porteuses est un processus clé dans l'oxydation du Cr(III), ce dernier formant des complexes très stables avec de nombreux constituants des sols: smectites (Corker et al; 1991), goethite (Manceau et Charlet; 1992) et Si-colloïdes (Fendorf et al; 1994; Stepniewska et al; 2004) démontrent que la quasi-totalité (97-99%) du Cr(III) introduit au sein d'une suspension sol/solution est adsorbée après 2h de mélange. La formation de précipités d'hydroxydes de Cr(III) mais aussi d'Al sur les surfaces actives des oxydes de Mn limite fortement la capacité d'oxydation de ces derniers.

En revanche, la compétition d'ions comme Al et Mn(II) pour l'adsorption ne semble pas avoir d'effets significatifs (Fendorf et Zasoski; 1992; Fendorf et al; 1993; Fendorf; 1995).

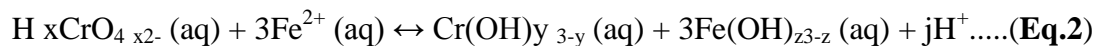
4.2. Réduction du chrome hexavalent

Le Cr(VI) peut être réduit en présence de nombreux constituants du sol: matière organique notamment les acides fulviques, sulfures et les minéraux contenant du Fe(II) (Eary et Rai; 1987; Fendorf et Zasoski; 1992; Wittbrodt et Palmer; 1995; Fendorf et Li; 1996; Loyaux-Lawniczak et al; 1999; Mullet et al; 2007), mais aussi par l'activité bactérienne (Ishibashi et al; 1990; Pattanapitpaisal et al; 2001; Desjardin et al; 2002; Cummings et al; 2007).

Dans le cas du fer ferreux, la réaction possible lorsque le pH est inférieur à 10

conduit à la production de Cr(III) et de Fe(III) (Eq-2). Les deux espèces peuvent alors coprécipiter en oxyhydroxy des Fe-Cr ce qui diminue le potentiel de retransformation en Cr(VI) toxique (Eary et Rai; 1988; Ilton et al; 2000), ainsi que indiquent que certains phyllosilicates peuvent fournir des sites pour la réduction du Cr(VI).

Le Cr(VI) est sorbé puis réduit en Cr(III) par les argiles contenant du Fe(II). Les résultats de ont montré que la réaction est fortement dépendante du type d'argile, i.e. de la quantité de Fe(II), et plus dépendante du pH que de la température. ont mis en évidence la capacité d'adsorption et de réduction du Cr(VI) par la Fe(II)-saponite. Après un traitement de Etat de l'art 10 l'échantillon de saponite avec une solution de dichromate de potassium, le Cr(VI) n'est pas seulement immobilisé par sorption, mais plus de 60% du Cr(VI) initialement présent a été réduit en Cr(III). ont également mis en évidence la forte capacité d'adsorption de Cr(III) par les saponites. Le Cr(III) est fortement retenu et son relarguage s'est avéré difficile même en condition acide (Brigatti et al; 2000; Parthasarathy et al; 2003)



Plus généralement, au sein des sols, les chromates sont réduits par les phases porteuses de Fe(II) comme certaines argiles et la pyrite. Cette réaction est dépendante du pH, de la disponibilité du Fe(II), de sa réactivité donc du type de phases porteuses de Fe(II) et enfin de la présence de matières organiques, de ligands organiques solubles ou insolubles (Barlett et Kimble; 1976; James et Barlett; 1983; Fendorf et Li; 1996; Buerge et al; 1997; Sedlak et al; 1997; Loyaux-Lawniczak et al; 1999). Le pH est le facteur le plus important, la réduction étant plus efficace à pH acide, puisque la disponibilité en Fe(II) est plus importante (Zayed et Terry; 2003). La réduction par les hydroxydes de Fe(II) rend d'autant plus immobile le Cr au sein des sols que le Fe(III), produit de la réaction, précipite et peut incorporer de grandes quantités du Cr(III) (Loyaux-Lawniczak et al; 1999).

La réduction par la MO est également plus rapide et plus importante à pH acide (Eary et Rai; 1989; 1991). Les ligands organiques stabilisant le Fe(III) augmentent la vitesse de réduction du Cr(III). Le carbone organique dissous, fournissant une source d'énergie pour les micro-organismes hétérotrophes, facilite la réduction du Cr(VI) dans les sols (Bolan et al; 2003). La texture des sols joue aussi un rôle important pour la réduction du Cr(VI).

A l'échelle de l'agrégat, observent que la faible diffusion de l'O₂ combinée à la respiration microbienne peut engendrer une élévation de la concentration en Fe(II) aqueux et ainsi la réduction du Cr(VI) (Tokunaga et al; 2001). La texture joue ainsi un rôle important car celle-ci contrôle la diffusion d'oxygène .

Enfin en évidence une diminution de la réduction du Cr(VI) lorsque les échantillons ont été stérilisés par irradiation γ , suggérant une contribution microbienne importante dans la réduction de Cr(VI) (Banks et al; 2007).

La réduction du Cr(VI) étant fortement accélérée en présence de matières organiques, suggèrent que la dépendance envers la voie microbienne est dominante (Tokunaga et al; 2003). Confortent cette hypothèse et confirment même une réduction bactérienne (Desjardin et al; 2002)

5. UTILISATION DE CHROME (VI)

Les composés de chrome (VI) sont largement utilisés dans des applications telles que :

les pigments pour les colorants textiles (par exemple, le dichromate d'ammonium, le chromate de potassium, le chromate de sodium), ainsi que pour les peintures, les encres et les plastiques (par exemple, le chromate de plomb, le chromate de zinc, le chromate de baryum, chromate de calcium, dichromate de potassium, chromate de sodium); inhibiteurs de corrosion (trioxyde chromique, chromate de zinc, chromate de baryum, chromate de calcium, chromate de sodium, chromate de strontium); produits de préservation du bois (trioxyde de chrome); finition des métaux et chromage (trioxyde de chrome, chromate de strontium) et tannage du cuir (dichromate d'ammonium). Le chrome (VI) peut être présent en tant qu'impureté dans le ciment Portland, et il peut être généré et dégagé lors des opérations de coulée, de soudage et de découpe (par exemple, de l'acier inoxydable), même s'il n'était pas présent à l'origine dans son état hexavalent (NTP; 2005; OHCOW; 2005; OSHA; 2006).

6. APPLICATIONS INDUSTRIELLES

La présence de Cr(VI) est naturellement rare. La plupart des composés de Cr(VI) sont d'origine humaine (produits ou sous-produits) et la contamination par le Cr(VI) d'origine humaine est le résultat d'importantes émissions industrielles (principalement des industries métallurgiques, chimiques et des briques réfractaires) (Blade et al;

2007). Une des premières utilisations des composés du chrome était comme pigments, en particulier le jaune de chrome. Le sulfate chromique basique était utilisé dans le tannage des peaux, car la réaction du chrome avec le collagène augmente la stabilité hydrothermique du cuir et le rend résistant aux attaques bactériennes. L'utilisation la plus importante du chrome, à savoir comme élément d'alliage, s'est développée progressivement au cours du XIXe siècle et a conduit à l'introduction des aciers au chrome (Westbrook et al; 1979).

Le chrome est actuellement utilisé dans des produits aussi diversifiés que les aciers inoxydables, à outils et alliés, les matériaux résistants à la chaleur et à la corrosion, les alliages spéciaux, la fonte alliée, les pigments, le placage métallique, le tannage du cuir, les produits chimiques et les matériaux réfractaires pour les fours métallurgiques. Il est utilisé dans l'industrie métallurgique pour améliorer des propriétés telles que la trempabilité (réponse à la trempe), le fluage (contrainte unitaire qui produira une déformation plastique à une vitesse et à une température spécifiées), la résistance et la résistance aux chocs et la résistance à la corrosion, à l'oxydation, à l'usure et au grippage. ; son utilisation principale est dans la production d'acier inoxydable. Les pigments de chrome représentent la plus grande utilisation de chrome dans l'industrie chimique (PAPP;1983).

7. TOXICITE DU CHROME

Les formes trivalente (Cr(III)) et hexavalente (Cr(VI)) n'ont pas la même toxicité et agissent différemment sur les organismes. Le chrome (III) est un nutriment essentiel pour l'homme, par contre le chrome (VI) est très toxique et présente divers conséquences sur la santé, sur la faune et la flore (Shanker et al; 2005)

Les effets néfastes connus du chrome hexavalent sur la santé sont la nécrose du foie, les allergies cutanées et le cancer des poumons (Leonard et Lauwerys; 1980; Otabbong; 1990)

Ces maladies résultent souvent de l'ingestion des sels de chrome par voie orale, d'une simple dose de chrome hexavalent à 10mg/kg de poids corporel. Les composés hexavalent du chrome sont absorbés plus facilement que les composés trivalents. Les données chez l'animal suggèrent une absorption pulmonaire de 53 à 85% et de 5 à 30 % pour les particules inhalables de chrome(VI) et de chrome(III) respectivement (Barceloux; 1999)

7.1. Sur la santé humaine

La contamination par les métaux lourds est devenue un grave danger environnemental dans le monde au cours des dernières décennies (Sharma et al; 2021). Le chrome hexavalent [Cr (VI)] est un polluant environnemental mondial qui augmente le risque de plusieurs types de cancers et est de plus en plus reconnu comme un neurotoxique (Wise et al; 2022)

Le Cr (VI) et ses métabolites, en particulier les chromates, empruntent une voie distincte dans le corps humain. Les principales voies d'exposition au Cr(VI) comprennent l'inhalation, l'ingestion et le contact avec la peau (Yang et al; 2020; Shekhawat et al; 2015).

Le Cr (VI) provoque une toxicité de diverses manières. Il peut réduire l'activité ou l'efficacité du système immunitaire, entrer en compétition avec les sites de fixation des cofacteurs d'activité enzymatique, supprimer des enzymes importantes telles que la phosphorylation oxydative et provoquer des modifications de l'architecture cellulaire, notamment dans la région lipoprotéique de la membrane. L'irritation et l'ulcération nasales, les réactions d'hypersensibilité et la dermatite de contact, la bronchite aiguë et l'emphysème, les maladies du foie et des reins, le cancer du poumon et de la peau, les saignements internes et les dommages à l'ADN sont tous causés par l'interaction du Cr (VI) avec l'enzyme ADN-polymérase (Vendruscolo et al; 2017).

Le Cr (VI) pénètre rapidement dans les cellules, mais il doit passer par plusieurs étapes dans le sang avant de devenir Cr (III) dans les organes internes. L'ion Cr (VI) est excrété par le corps, tandis que l'ion chromate est transporté vers la cellule via une voie de transport qui implique également les ions sulfate et phosphate. De tels ions peuvent induire un stress oxydatif dans les cellules, qui a été associé à une variété de maladies chroniques, cardiovasculaires et neurodégénératives. Le Cr (VI) endommage les cellules de diverses manières, telles que l'augmentation du stress oxydatif, la création d'adduits à l'ADN et la rupture des chromosomes (DesMarias et al; 2019). Le Centre international de données sur le cancer (CIRC) de l'Organisation mondiale de la santé a classé les composés du Cr (VI) dans la catégorie des cancérogènes humains du groupe 1 avec plusieurs modes d'action complexes basés sur des recherches épidémiologiques liant le Cr (VI) au cancer du poumon (Junaid et

al; 2016; Seidler et al; 2013). La perforation du tympan, les irritations, les allergies, l'eczéma, les problèmes des voies respiratoires, les irritations cutanées, l'ulcération et le cancer du poumon ont tous été liés à l'exposition humaine au Cr (VI) (Focardi et al; 2013). À différentes phases, le rayonnement Cr (VI) peut produire des mutations cytotoxiques, mutagènes et de l'ADN, ainsi que des effets cancérigènes des composés contenant du Cr (VI), des lésions chromosomiques et des modifications oxydatives des protéines (Al Osman et al; 2019). Les ulcères de la muqueuse nasale, l'irritation, l'anémie et les ulcères de l'intestin grêle et de l'estomac, ainsi que d'autres problèmes respiratoires tels que l'obstruction nasale, la toux, la respiration sifflante et l'érythème du visage, peuvent tous être causés par l'inhalation d'une grande quantité de chrome hexavalent

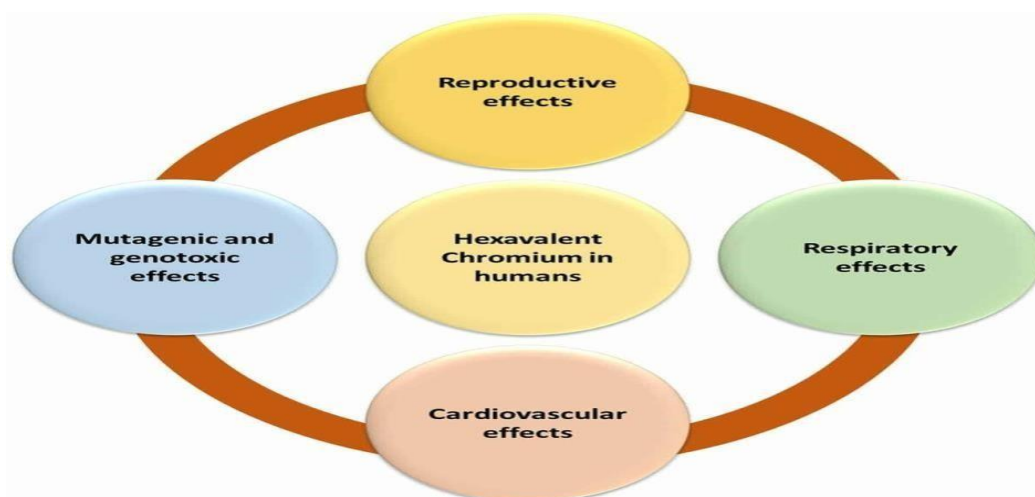
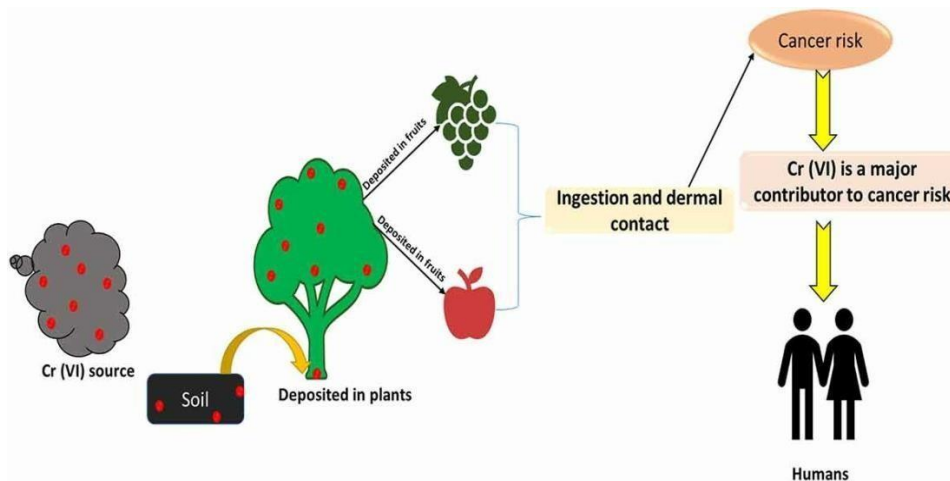


Figure 1: Effets toxicologiques du chrome hexavalent sur l'homme

L'exposition au chrome hexavalent au travail peut entraîner les conséquences suivantes sur la santé :

Si le chrome hexavalent est inhalé en grandes quantités, il peut provoquer une irritation ou des blessures aux narines, à la gorge et aux poumons (voies respiratoires).

Une exposition sévère et répétée au chrome et aux composés apparentés, en particulier ceux contenant des ions hexavalents, peut entraîner des problèmes de santé. Les effets toxiques du (Cr (VI)) sur la santé humaine sont présentés dans les



figures 1 et 2

Figure2: Effets du chrome hexavalent (Cr (VI)) sur l'écosystème et le santé humaine

7.2. Sur les plantes

Les plantes montrent des signes de toxicité du Cr(VI), notamment une germination retardée des graines, des racines endommagées, une réduction de la croissance des racines, de la biomasse et de la hauteur des plantes, une altération de la photosynthèse, des dommages aux membranes, une chlorose foliaire, une nécrose, une mauvaise production de grains et éventuellement la mort des plantes. Les composés de chrome les plus répandus dans le sol sont HCrO_4 et CrO_4^{2-} , qui sont facilement absorbés par les plantes et contaminent le sol (Elahi et al; 2020)

En raison de sa solubilité extrêmement forte, le Cr (VI) s'est avéré causer des dommages importants aux tissus vivants (Cervantes et al;2001)

La longueur et la biomasse des pousses des plantes sont affectées par l'exposition au Cr (VI).

Le chrome affecte la croissance des feuilles, qui font partie de l'organe de photosynthèse des plantes. L'augmentation de la concentration de chrome entraîne une diminution considérable de la surface foliaire et de la biomasse, ainsi qu'une diminution de la photosynthèse et de la production de teneur en chlorophylle et de nécrose des feuilles. Sous exposition au Cr (VI), de nombreux processus destructeurs ont lieu dans les feuilles. La synthèse de la chlorophylle est supprimée, l'ultrastructure du chloroplaste est perturbée, le transport photosynthétique des électrons est inhibé et les ions magnésium sont libérés de la molécule de chlorophylle

CHAPITRE II
TRAITEMENT DES SOLS
CONTAMINES PAR LE
CHROME

1. INTRODUCTION

De multiples activités humaines sont à l'origine de la pollution des sites, des sols et des eaux souterraines. La décision de dépolluer et le choix des techniques à mettre en œuvre reposent sur différents critères, incluant le risque sanitaire, la localisation du site, l'usage ultérieur envisagé ainsi que le coût et les délais. Parmi ces techniques, certaines immobilisent la pollution, d'autres l'extraient ou la détruisent.

Ces sites pollués peuvent alors présenter des risques de transfert de polluants vers des cibles sensibles, comme la ressource en eau, les écosystèmes et la santé humaine. Ils peuvent également avec le temps se disperser dans l'environnement, augmentant ainsi la taille des surfaces polluées.

Nous assistons depuis deux décennies à l'évolution des techniques de dépollution avec le passage progressif des techniques dites traditionnelles aux techniques de biodégradation. Il s'agit de deux types de traitements appliqués aux sites et sols pollués qui cohabitent de plus en plus et dont l'usage est fortement corrélé aux caractéristiques des sites à traiter telles que la durée d'exploitation, le niveau de pollution, l'impact environnemental, les capacités financières du responsable et l'usage auquel on destine le site après traitement. Car ces paramètres induisent le processus de réhabilitation et fixent les objectifs à atteindre

2. TRAITEMENTS DES SOLS CONTAMINÉS PAR LE CHROME

la remédiation des sites contaminés par le chrome présente un certain nombre de défis uniques. Plusieurs techniques sont actuellement utilisées pour nettoyer les sols contaminés par des métaux lourds. Les plus courants sont l'enlèvement et l'enfouissement des sols, la stabilisation/durcissement, l'extraction physique et chimique, le lavage des sols, le rinçage et la phytoremédiation. Aucune de ces techniques n'a été entièrement acceptée comme la meilleure option de traitement parce qu'elles fournissent une solution temporaire, ou simplement inhibent les contaminants ou sont coûteuses lorsqu'elles sont appliquées à de grandes surfaces.

La remédiation des sols a pour objectif de remettre les sites dans un état aussi proche que possible de l'état de contamination antérieur. De plus, la ou les technologies de traitement des sols ne doivent pas être plus polluantes que le résultat de la décontamination.

La liste des critères auxquels doivent répondre les techniques de dépollution:

- Enlever ou neutraliser les matières incriminées.
- Ne pas provoquer d'émissions secondaires (eau et air du processus) contenant des polluants.
- Obtenir un taux important de recyclage du matériau traité.
- Minimiser la quantité et le danger potentiel des matières résiduelles.
- Ne pas produire de nouvelles substances toxiques par l'enlèvement ou le transfert de celles déjà existantes.

3. CLASSEMENT EN FONCTION DU LIEU DE TRAITEMENT

Les techniques de dépollution peuvent aussi être classées en fonction du lieu de traitement. On distingue les traitements suivants :

3.1. Traitements hors site (ou ex situ) ils supposent l'excavation/extraction du milieu pollué (déchets, terre, eau) et son évacuation vers un centre de traitement adapté (incinérateur, centre d'enfouissement technique, etc.).

3.2. Traitements sur site (ou on site) ils consistent à excaver les terres polluées et à les traiter sur le site même.

3.3. Traitements in situ (ou en place) ils correspondent à un traitement sans excavation : le sol et les eaux souterraines sont laissés en place. Il s'agit alors soit d'extraire le polluant seul, soit de le dégrader ou de le fixer dans le sol.

3.4. Confinement il consiste à empêcher / limiter la migration des polluants.

4. CLASSEMENT EN FONCTION DE LA NATURE DES PROCÉDÉS EMPLOYÉS

Les différentes techniques de dépollution peuvent être classées en fonction de la nature des procédés employés, à savoir :

4.1. Les procédés biologiques : ils consistent à utiliser des micro-organismes, le plus souvent des bactéries (mais aussi des champignons et des végétaux), pour favoriser la dégradation totale ou partielle des polluants. Certains bioprocédés permettent aussi de fixer ou de solubiliser certains polluants.

4.2. Les procédés thermiques : ils utilisent la chaleur pour détruire le polluant (ex : incinération), l'isoler (ex : désorption thermique, thermolyse, etc.), ou le rendre inerte (ex : vitrification, etc)

4.3 .Les procédés chimiques : ils utilisent les propriétés chimiques des polluants pour, à l'aide de réactions appropriées, les inactiver (précipitation, etc.), les détruire (oxydation, etc.) ou les séparer du milieu pollué (surfactants, etc.).

4.4 . Les procédés physiques : le principe consiste à utiliser des fluides (eau ou gaz), présents dans le sol ou injectés, comme vecteur pour transporter la pollution vers des points d'extraction ou pour l'immobiliser

- Il existe un **traitement physico-chimique** est de permettant la séparation de phases : réduction de Cr(VI) en Cr(III), souvent en pH acide avec du bisulfite de sodium, puis neutralisation et précipitation des sels trivalents (hydroxydes). Le traitement est complété par une floculation et une séparation solide/liquide

5.1 Avantages traitement physico-chimique

- Traitement de base pour la phase particulaire et les métaux, largement répandu.
- Bonne reproductibilité des essais laboratoire à l'échelle industrielle.
- Simplicité du principe de fonctionnement
- Coûts d'investissements modérés.
- Possibilité d'améliorer les performances en utilisant des agents insolubilisant.

5.2. Inconvénients du traitement physico-chimique :

- En général inopérant sur les polluants à l'état dissous, sauf cas d'adsorption sur les floes formés ou sur du charbon actif en poudre.
- Conditions de pH pouvant nécessiter une correction des eaux traitées avant rejet ou avant un traitement de finition complémentaire.
- Risques de transfert dépollution (COV) vers l'atmosphère avec l'aéro-flottation.
- Utilisation de réactifs dangereux (acides, bases), Difficile à maîtriser lorsque la qualité des effluents varie.

6. LA PHYTOREMEDIATION DU CHROME HEXA VALENT

Les recherches des dernières décennies ont identifié des plantes tolérantes et hyper accumulatrices pour étudier leur mécanisme et leur utilisation pour le processus de phytoremédiation. A ce jour, près de 500 espèces végétales appartenant à plus de 45 familles ont été recensées. La plupart des plantes hyper-accumulatrices tolérantes ont transformé les métaux toxiques en formes moins toxiques et immobiles (Cervantes et al; 2001)

6.1. Définition de la phytoremédiation

La phytoremédiation est un processus de bioremédiation qui utilise des variétés de plantes pour éliminer, transférer, maintenir, extraire ou dégrader les contaminants dans le sol et les eaux souterraines.

6.2. Avantages et inconvénients de la phytoremédiation

Tableau N°01: Avantages et inconvénients de la phytoremédiation (Ghosh et Singh; 2005)

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -Faible coût -Utilisation de l'énergie soleil -Le travail in situ réduit les risques -Améliorer de la qualité des sols. -La croissance du système racinaire permet une aération des sols ce qui stimule l'activité microbiologique -Les végétaux participent également à la diminution de l'érosion. -Les plantes diminuent l'infiltration des eaux de surface polluées vers les nappes phréatiques. -L'avantage principal des techniques biologiques réside dans leur mise en œuvre sur le site 	<ul style="list-style-type: none"> -Plus lent par rapport aux autres techniques et dépendant des saisons. -Pas capable de réduction de 100 % ; - Une concentration élevée de contaminants peut être toxique pour les plantes. - La phytoremédiation des sols ne s'applique qu'aux sols superficiels. - Limité aux sites à faibles concentrations de contaminants -Risque de contamination de la chaîne alimentaire en cas de mauvaise gestion et de manque de soins appropriés

6.3. Les différents mécanismes de phytoremédiation :

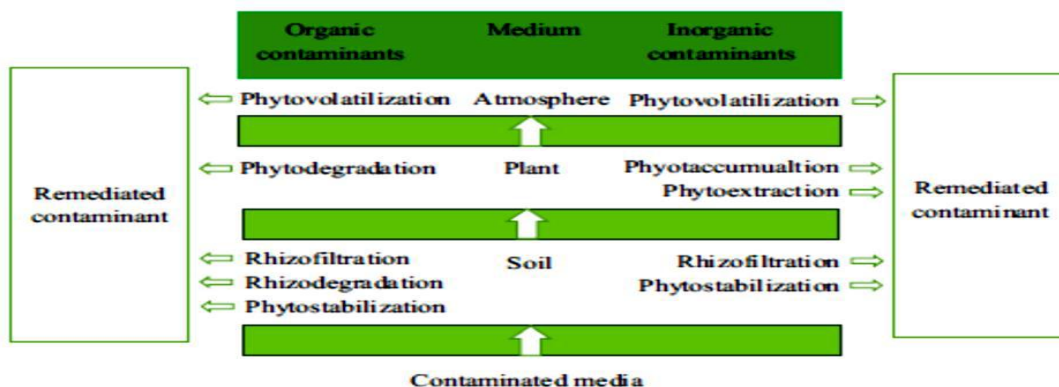


Figure03 . Les principales techniques de phytoremédiation (Mahar et al; 2016)

Tableau N°02: Définition et principales caractéristiques des procédés de phytoremédiation et les avantages et inconvénients de chaque procédé (Subhashini et Swamy; 2013)

Processus	Définition	Objectif du processus	avantages	Inconvénients
Phytoextraction	Absorption d'un contaminant par les racines des plantes à partir de l'environnement et sa translocation dans la biomasse végétale récoltable	Extraction et capture de contaminants	Le coût de la phytoextraction est assez peu coûteux ; - Le contaminant est définitivement éliminé du sol ; - La quantité de déchets à éliminer est considérablement réduite (jusqu'à 95%)	Les hyperaccumulateurs de métaux ont généralement une croissance lente avec une petite biomasse et des systèmes racinaires peu profonds. - Les métaux peuvent avoir un effet phytotoxique
Phytostabilization	Réduction de la mobilité et de la biodisponibilité des polluants dans l'environnement par des effets physiques ou chimiques	Contaminant	- Très efficace lorsqu'une immobilisation rapide est nécessaire pour préserver les eaux souterraines et de surface . - La présence de plantes réduit également l'érosion des sols et diminue la quantité d'eau disponible dans le système .	Les contaminants restent en place ; - La végétation et le sol peuvent nécessiter un entretien à long terme pour empêcher la relibération des contaminants et le lessivage futur ; -La phytostabilisation pourrait être considérée comme une simple mesure provisoire.
Phytovolatilization	Le processus d'absorption des polluants par les plantes et de volatilisation dans l'atmosphère par le système foliaire	Extraction des contaminants des milieux et rejet dans l'air	- Les contaminants pourraient être transformés en substances moins toxiques - Les contaminants ou les métabolites rejetés dans l'atmosphère peuvent être soumis à des processus de dégradation naturelle plus efficaces ou plus rapides tels que la photodégradation.	-Le contaminant ou un métabolite dangereux peut être libéré dans l'atmosphère ; - Le contaminant ou un métabolite dangereux peut s'accumuler dans la végétation et être transmis à des produits ultérieurs tels que des fruits ou du bois.
Rhizofiltration	L'utilisation des racines des plantes pour absorber ou adsorber les contaminants qui sont en solution autour de la zone racinaire	Extraction et capture de contaminants	-La possibilité d'utiliser à la fois des plantes terrestres et aquatiques pour des applications in situ ou ex situ - Des espèces autres que les	- Les plantes peuvent d'abord avoir besoin d'être cultivées dans une serre ou une pépinière ; - La récolte périodique et

			hyperaccumultrices peuvent être utilisées - Un système ex situ peut être placé n'importe où parce que le traitement n'a pas besoin d'être à l'emplacement d'origine de la contamination	l'élimination des plantes sont nécessaires. - La conception du réservoir doit être bien conçue. - Une bonne compréhension de la spéciation/interactions chimiques est nécessaire ;
--	--	--	--	--

7. PRÉSENTATION DES ESPÈCES UTILISÉES

7.1. L'orge

L'orge (*Hordeum vulgare*) est cultivée sur environ 47,4 millions d'hectares dans le monde avec une production d'environ 140 millions de tonnes (USDA ; 2020). Les pays en développement représentent environ 18 % (26 millions de tonnes) de la production totale d'orge et 25 % (18,5 millions d'hectares) de la superficie totale récoltée dans le monde (FAO; 2004). Le grain d'orge est principalement utilisé comme aliment pour animaux, comme malt et comme aliment pour la consommation humaine (FAO; 2004). En raison du fait que la récolte d'orge est utilisée pour l'alimentation animale et la nutrition humaine, une mauvaise production et tout type de perte après la récolte affectent négativement la production animale des agriculteurs et, par conséquent, les conditions socio-économiques (Zhou; 2010)

7.2. Origine

L'origine géographique de l'orge (*Hordeum vulgare*) remonte à plusieurs millénaires avant JC dans la région nommée le croissant fertile. Le territoire comprend, la Vallée du Jourdain et les zones adjacentes de Palestine, de la Jordanie et de l'Irak, jusqu'au l'Ouest de l'Iran (Feldman; 1976).

La plus part des recherches archéologiques ont confirmé que les origines du blé et de l'orge se situent dans les zones du croissant fertile (Harlan; 1976 ; Badr et al., 2000 ; Bonjean; 2001).

L'orge est une des premières céréales cultivées par les hommes 8000 ans avant J-C. L'orge servait à fabriquer des galettes et autres bouillies.

7.3. Morphologie du grain d'orge

Le grain d'orge présente une nervure médiane et deux nervures latérales dorsales. Il est prolongé par une barbe. Alors, que la glumelle supérieure correspond à la face

ventrale du grain. Celui-ci présente une dépression ou sillon à la base duquel est insérée une baguette (Figure 04). Il comporte plusieurs parties distinctes :

- L'embryon : siège des activités vitales de la graine ;
- L'albumen amylicé : tissu de réserve de l'orge contenant des granules d'amidon et des protéines de réserve
- Les assises successives limitant l'embryon et l'albumen : le péricarpe et la testa soudés et des enveloppes appelées glumelles (Jeantet et al; 2007)



Figure 04 : Vue ventrale et dorsale du grain d'orge (Souillah, 2009)

7.4. Description de la plante

Les caractères morphologiques et anatomiques sont à la base de la distinction des différentes espèces du genre *Hordeum* et peuvent être associés à la productivité agricole de nombreuses façons.

Avec ses caractères morphologiques et physiologiques, l'orge se distingue très bien des autres espèces de céréales (Boufenar- Zaghouane; 2006).

Par exemple, la longueur de la paille et de la résistance à la verse, les composantes du rendement, la réponse à diverses maladies, la photosynthèse, le temps et la quantité

des besoins en eau, les engrais et les pesticides appliqués et les effets des stress environnementaux tels que la sécheresse, les carences du sol et la toxicité sont tous liés en partie à l'anatomie végétale et la morphologie de la plante (Soltner; 2005). La plante d'orge cultivée est constituée de racines, de tiges (chaume) cylindriques avec 5 à 7 nœuds, et de feuilles alternées. L'épi au sommet de la tige est constitué de fleurs disposées en épillets simples (portant chacun deux glumes et la fleur).

Trois épillets sont attachés à chaque nœud sur un rachis en zigzag plat. Ils sont tous fertiles dans les cultivars à six rangs. Dans les cultivars à deux rangs, les deux épillets latéraux sont stériles. Comme dans les autres céréales, le grain est un caryopse (Gallais et Bannerot; 1992).

7.5. l'orge pour l'alimentation animale

L'Alimentation animale est le premier débouché des cultures d'orges. Les orges fourragères sont bien adaptées à l'alimentation des porcins et des bovins. L'importance de l'orge est prouvée dans son utilisation comme aliment pour le bétail. Elle joue un rôle important en période hivernale lorsque le déficit fourrager est grand et le prix du fourrage est élevé. Elle offre l'avantage de pouvoir être menée en double exploitation (Khaldoun; 1989).

7.6. L'orge alimentaire

Le regain d'intérêt pour le grain d'orge est principalement dû à sa fibre soluble unique en bêta-glucane et à ses composés phytochimiques antioxydants .

L'efficacité du bêta-glucane d'orge dans les produits alimentaires à base d'orge pour réduire le cholestérol sanguin et l'indice glycémique a été rapportée dans de nombreuses études. Par conséquent, les aliments contenant des niveaux substantiels de bêta-glucane d'orge sont considérés comme des aliments fonctionnels, l'orge contient des composés phytochimiques à des concentrations variables, lorsqu'ils existent sous des formes libres, conjuguées ou liées, classés en plusieurs grandes classes, y compris les acides phénoliques, les flavonoïdes, les lignanes, les tocots, phyto stérols et folates .

7.7. la consommation d'orge dans le monde

L'orge est aussi utilisée en cuisine comme un épaississant naturel. On le consomme sous différentes formes et appellations à travers le monde :

Le café d'orge, tisane d'orge grillé, boisson populaire en Italie sous le nom cd'orzo.

Au Japon on consomme le jus d'herbe d'orge, à titre de complément alimentaire, dont les vertus furent révélées par un pharmacien dans les années 1960 (Simon sohn; 2003).

Aliment de base au Tibet au même titre que le riz en Chine, la farine d'orge grillée porte le nom de Tsampa.

En Asie, en Afrique du Nord et au Moyen-Orient, on utilise l'orge sous de farine ou de grains. Pour les Magrébines on consomme l'orge sous forme de galettes ou de couscous.

7.8. La consommation d'orge en Algérie :

En Algérie le pain complet (khobz Ezraa) et certaines dérivées d'orge (semoule en bouillie soupe d'orge : la Hrira et couscous d'orge ; Tchicha) sont de plus en plus demandés. Les ecteur industriel entrevoit de grandes opportunités et commence à élaborer des offres adaptés.

La valorisation industrielle de l'orge est utilisée actuellement comme un ingrédient potentiel pour la fabrication des produits alimentaires dits fonctionnels.

***PARTIE
EXPERIMENTALE***

***CHAPITRE III
MATERIEL ET
METHODES***

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre on présente la zone d'étude, puis on explique le travail expérimental qui a été divisé en trois étapes principales, l'échantillonnage, la préparation des échantillons et l'analyse du chrome hexavalent dans les trois compartiments, racine, feuilles et sols.

2. MATERIEL**2.1. Objectif**

Le but de ce travail est de connaître la capacité de la plante lorge a toléré et/ou accumuler le chrome hexavalent (sol, feuille et racine)

2.2. Verrerie :

- Erlenmeyers 250 ml.
- Béchers de volume : 500 ml, 250 ml, 100 ml, 50 ml, 5 ml.
- Pissettes.
- Tubes en verre pour l'ébullition à reflux.
- Verre de montre.
- Pipettes graduées 5 ml, 2 ml et 0.5 ml avec poire.
- Éprouvettes 50 ml, 10 ml et 5 ml.
- Fioles de jauge de différents volumes (50,100,500 et 1000mL)
- Flacons de prélèvement
- Verre de montre
- Tubes à essai en verre

2.3. Appareillage :

- Micropipettes 200 µl. 100 µl.
- Balance de précision de marque Oahu, modèle Pioneer PA 64.
- Agitateur magnétique de marque Stuart, modèle SB1
- Spectrophotomètre de marque Biochrom WPA lightwave n.
- Étuve de marque WISD (modèle WON-50)
- Four de marque NÜVE de référence FN4

2.4. Petit matériel et consommables :

- Papier hygiénique.
- Sacs en plastique.
- Papier aluminium.
- Cotton.
- Seringue en plastique médical 5 ml.
- Mortier et pilon en bois.
- Lunettes et gants de protection

2.5. Produits

- Eau distillée.
- 1.5 Diphenylcarbazine de Sigma-Aldrich.
- Carbonate de sodium de Sigma-Aldrich.
- Bichromate de potassium (Riedel de Haen).
- Hydroxyde de sodium (Riedel de Haen).
- Acide nitrique (Sigma Aldrich).
- Acide chlorhydrique (37%) de Riedel de Haen.
- Acide sulfurique à 95-97% de Riedel de Haen

2.6. Précautions de sécurité

Des consignes de sécurité en laboratoire et d'environnement doivent être respectées. Cela implique la manipulation des solutions sous la hotte et avec le port du matériel de sécurité adéquat (blouse, gants et masques).

3. METHODES**3.1. Prélèvement de Sol**

Le sol (terrestre) a été prélevés dans une zone située Dar Chioukh exactement dans la zone de Sidi El Hajj près de Sidi Beyzid

3.1.1 Composition de sol

Dans cette expérience, nous avons utilisé trois types de sol en quantité égale afin d'obtenir un mélange de sol adapté à la culture de l'orge dans des conditions favorables :

- Sol sableux.
- Sol noir : C'est un sol argileux caractérisé par sa texture cohésive et fertile et riche

en de nombreuses matières telles que le carbonate de calcium, le magnésium, la potasse, la chaux...

- Sol tourbeux : Ce sol contient un pourcentage très élevé de matière organique (principalement de la tourbe qui est un tissu végétal semi-calciné formé par la décomposition partielle des végétaux).



Figure 05: Forme du sol après mélange

3.2. Prélèvement de grains d'orge

Dans cette expérience, nous avons utilisé de l'orge (*Hordeum vulgare*) de deux types, l'orge local (*Hordeum vulgare L*) à été prélevés dans une zone située Dar Chioukh exactement dans la zone de Sidi El Hajj près de Sidi Beyzid (figure 06) et l'orge importé (Canada) (figure 07)

3.2.1. L'orge (*Hordeum vulgare L*) (local)

Est une graminée annuelle, la quatrième céréale la plus cultivée au monde, environ les 2/3 de la culture se faisant dans les pays européens. La plupart de l'orge est de l'orge « enrobée » parce qu'elle a une coque dure et non comestible autour du grain. Après enlèvement, on l'appelle (dé) décortiqué orge, contenant toujours la couche externe de son.



Figure 06: (Hordeum vulgare) L(local) (Canada)



Figure 07: l'orge importé

4. PRÉPARATION DES SOLUTIONS RÉACTIVES

4.1. Solution de carbonate de sodium

On pèse une masse de 14,8 g de carbonate de sodium, puis on l'ajoute dans une fiole jaugée de 500 ml et on la remplit d'eau distillée jusqu'à atteindre 500 ml, et on agite jusqu'à dissolution complète de la substance solide (Na_2CO_3).

4.2. Solution d'hydroxyde de sodium

Dans une fiole jaugée de 500 ml, nous ajoutons 10 grammes d'hydroxyde de sodium et ajoutons de l'eau distillée jusqu'à ce qu'elle atteigne 500 ml, puis agitons jusqu'à homogénéité, la solution a été stockée dans une bouteille

4.3. Préparation d'une solution acide de 1,5-Diphénylcarbazine

Tout d'abord, 0,2 g de 1,5-diphénylcarbazine est pesé par une cuillère en papier d'aluminium à l'aide d'une balance analytique. Puis, à l'aide d'une pipette graduée, prélever 400 ml de solution d'acide sulfurique à 176 g/L et les mettre dans une fiole jaugée de 500 ml, puis compléter la solution avec 100 ml d'alcool éthylique sous bouchon extracteur en agitant. Enfin, après dissolution totale du 1,5-Diphénylcarbazine, le volume est ajusté à 500 mL avec de l'éthanol (pour compenser la quantité d'alcool évaporée lors de la préparation). Cette solution a été conservée dans un flacon.

4.4. Préparation de la solution d'acide sulfurique

Dans une fiole jaugée de 500 ml, mettre 50 ml d'eau distillée pour éviter les projections d'acide, puis ajouter 50 ml d'acide sulfurique, puis remplir le bécher avec de l'eau distillée jusqu'à un volume de 500 ml

4.5. Solution mère du chrome hexavalent à 1g/L

Pour la préparation de la solution mère du chrome hexavalent, on pèse 2,828 g de dichromate de potassium, on fait dissoudre cette quantité dans 100 ml de l'eau distillé à l'aide d'une fiole jaugée, puis on conserve cette solution dans un flacon

4.6. Solution fille étalon de chrome à 5 mg/L

A l'aide d'un micro pipette de 0,1 ml on ajoute 0.5 ml de la solution mère de chrome dans une fiole jaugée de 100 ml qui contient le volume de 100 ml de l'eau distillé, puis on remplit cette solution dans des flacon.

5. IMPLANTATION ET ARROSAGE AVEC LE CHROME HEXAVALENT**5.1. Méthode hydroponique de l'orge**

La culture hydroponique est une méthode moderne de culture de plantes hors sol en présence des composants minéraux nécessaires à leur croissance.

Nous avons eu recours à cette méthode car l'orge ne poussait pas dans des conditions normales, car il était trop tard pour la saison de plantation.

Tout d'abord, nous avons stérilisé les grains d'orge en les trempant dans de l'eau minérale pendant 10 heures maximum pour ramollir leurs enveloppes.

Après cela, les grains d'orge sont filtrés de l'eau et exposés à l'air pendant une période ne dépassant pas une heure, jusqu'à ce que la teneur en humidité à l'intérieur diminue.

Après cela, les graines d'orge tendre sont placées à l'intérieur d'un pot avec des trous recouverts de papier hygiénique, de sorte que l'excès d'eau s'écoule à travers elles afin de ne pas être exposées à la moisissure à une température de 25 degrés Celsius.

L'orge est recouverte d'un morceau humide, en tenant compte du fait que le morceau est toujours humide, et nous l'arrosons avec de l'eau minérale toutes les 4 heures.

Un éclairage adéquat est fourni dans la pièce pour compenser la lumière du soleil afin de faciliter la germination de l'orge ; Après 24 heures, les graines commencent à germer, comme nous le notons dans les figures 08 et 09



Figure08: Début de la germination de l'orge locale après 24h

figure09: Début de la germination de l'orge importé après 24h

Après environ 3 jours, les germes produisent un système racinaire dense comme on le voit dans la figure



figure10: formation du système racinaire des germes d'orge local (3jours)

figure11: formation du système racinaire des germes d'orge importé (3jours)

Au bout de 7 jours, les pousses auront parfaitement poussé, nous les transférons

dans des contenants en plastique contenant de la sol mélangée (sol argileux, sable et tourbe) pour continuer leur croissance jusqu'à ce qu'elles soient prêtes pour l'expérience



Figure12: la forme d'orge local après 7 jours



Figure13: la forme d'orge importé après 7 jours

5.2. Arrosage avec le chrome hexavalent

Nous avons planté le cultivar d'orge dans 50 pots (25 pots d'orge importé et 25 pots d'orge locale) et l'avons percé par le bas pour éviter la pourriture et laissez-le pousser pendant 7 jours

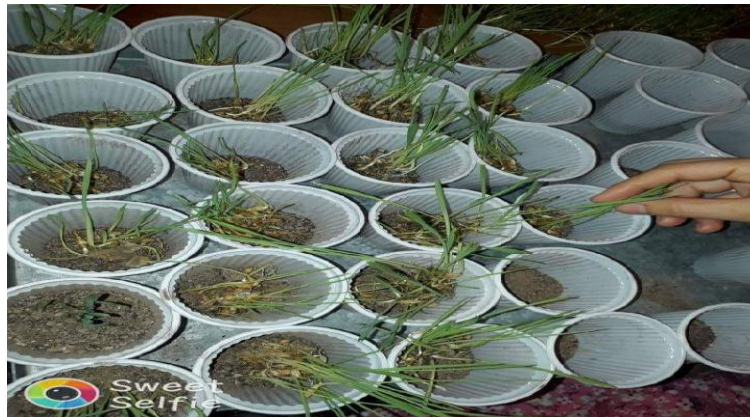


Figure 14: Cultiver de l'orge en pot

Après 7 jours nous ajoutons du chrome hexavalent de différentes volumes de la manière suivante:

25 pots d'orge local (variété v1):

- ✓ 5 pots nous n'avons pas ajouté de chrome hexavalent
- ✓ 5 pots, auxquels nous avons ajouté 5 ml de chrome hexavalent
- ✓ 5 pots, auxquels nous avons ajouté 10 ml de chrome hexavalent
- ✓ 5 pots nous avons ajouté 15 ml de chrome hexavalent
- ✓ 5 pots nous avons ajouté 20 ml de chrome hexavalent

Nous avons ajouté les mêmes volumes de chrome hexavalent pour 25 pots d'orge importé (variété 2)



Figure 15 : L'orge ressemble à 7 jours après l'ajout de chrome hexavalent

5.3. Séchage, extraction et analyse du chrome :

Après 7 jours d'ajout de chrome hexavalent, nous retirons la plante du sol, séparons les feuilles des racines et les lavons avec de l'eau distillée pour enlever le sol et les laisser sécher, puis pesons les feuilles et les racines avec une balance analytique.



Figure 16 : Séparation des feuilles, des racines et du sol

5.3.1. Séchage du sol

Nous avons pris une quantité de chaque échantillon de sol, ces quantités ont été mises dans l'étuve avec une température de 75°C pendant 24 heures

5.3.2. Séchage des feuilles et des racines

De la même manière, les échantillons de feuilles et de racines ont été misés dans l'étuve avec une température de 75°C pendant mais 24 heures, par la suite

les échantillons de racines et de feuilles ont été pesés avec une balance analytique, puis nous les avons passés au four pendant trois heures à 500 °C pour leur minéralisation.



Figure 17 : placer les échantillons de feuilles et de racines et le sol à une température de 75°C

5.4. Extractions 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, et 4 ml de solution d'hydroxyde de sodium. On a placé le mélange dans une plaque chauffante pendant 60 min à une température de 100 °C avec une agitation continue (figure 18)



Figure 18 :Extraction du chrome hexavalent à partir des échantillons de sol

5.4.1. La Filtration du sol

Après refroidissement, les échantillons ont été filtrés avec une seringue jetable couteau, centrifugés pendant 10 minutes à 1500 tours/min et le contenu en chrome hexavalent a été déterminé par spectrophotométrie UV-Visible à 540 nm

5.4.2. Extraction du chrome à partir des échantillons (les feuilles et les racines)

Cette étape a été réalisée par extraction acide, pour cela 5 ml d'acide chlorhydrique à 20% a été mélangé avec les cendres des échantillons de feuilles et/ou de racines, le mélange a été mis en tube en plastique et conservé jusqu'à l'analyse par UV-Visible.

5.5. Dosage du chrome par spectrophotomètre UV visible

Pour le dosage du chrome hexavalent, nous avons utilisé la méthode décrite par Rodier J; 2009. Dans une solution légèrement acide, le chrome hexavalent réagit avec le 1,5-Diphénylcarbazine pour donner une coloration rouge-violet. Aux doses, les ions Cr (IV) 1,5-diphénylcarbazine sont oxydés. Ainsi, le diphénylcarbazine est réduit en chrome trivalent. La forme énol de la carbazine réagit avec les ions chrome trivalent pour former un complexe rouge-violet, et ce complexe peut être analysé par UV-Visible à 540 nm (Rodier J., 1997).

5.5.1. Établissement de la courbe d'étalonnage

La détermination des concentrations en chrome a été réalisée par extrapolation dans la courbe d'étalonnage, en se basant sur la loi de Beer-Lambert décrite dans l'équation suivante : $ABS=L \cdot \epsilon \cdot C$ Où :

A : Absorption

L : Longueur de cellule 1cm

ϵ : Coefficient d'absorption moléculaire

Dans des séries de fioles jaugées de 50ml numérotées, nous avons dilué la solution mère (5mg/l) pour obtenir les concentrations (0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 et 0,5 mg/L) avec précision en utilisant la loi de dilution : $C \cdot V = C' \cdot V'$

Les données : $C = 5$, $C' = 0,05 \text{ mg/l}$, $V' = 50 \text{ ml}$, et $V = ?$

Donc : $C \cdot V = C' \cdot V' \implies V = C' \cdot V' / C$

$$5 \cdot V = 0,05 \cdot 50 \implies V = 0,05 \cdot 50 / 5 \quad V = 0,5 \text{ ml.}$$

CHAPITRE III

MATERIEL ET METHODES

Cela signifie: nous mettons 0,5 de la solution concentrée (5 ml) dans un Fiole jaugée de 50 ml, et continuons par l'eau distillée jusqu'à le volume 50 ml, est donné une

CHAPITRE III MATERIEL ET METHODES

solution à une concentration de 0,05 mg/litre, même façon, Nous obtenons le reste des concentrations et en agitant après chaque addition. Ces solutions filles ont été conservées dans des flacons en plastique.

Dans des béchers on introduit 5mL de chaque solution et on a ajouté 0,3 ml de l'acide 1,5-Diphénylcarbazine, nous avons mélangé puis laissé au repos pendant 10 minutes pour permettre un développement complet de la coloration rouge-violette. Par la suite on procède à l'analyse par spectrophotométrie UV-Visible à 540 nm. Dans le cas où l'absorbance de l'échantillon dépasse la limite de la courbe d'étalonnage, on procède à une dilution de l'échantillon avec de l'eau distillée



Figure 19 : Solutions standard de chrome hexavalent après contact avec 1.5 Diphénylcarbazine



Figure 20 : Analyse de solution par UV-Visible.

5.6. Dosage du chrome hexavalent dans les échantillons de sol et de plantes

Pour l'analyse des échantillons, les mêmes démarches comme pour l'élaboration de la courbe d'étalonnage ont été suivies, à savoir 5 ml d'échantillon avec 0.3 ml de solution acide de 1,5-Diphénylcarbazide après 10 min de repos, on procède à l'analyse par spectrophotométrie UV-Visible à 540 nm. Les concentrations en chrome hexavalent ont été déterminées par extrapolation dans la courbe d'étalonnage en utilisant l'équation de la régression linéaire.

5.7. Détermination des concentrations et des taux en chrome hexavalent dans les échantillons

5.7.1. Calcul des concentrations

La détermination des concentrations en chrome hexavalent a été réalisée par extrapolation dans la courbe d'étalonnage, nous avons calculé les concentrations du chrome hexavalent dans les échantillons de sol et de plante en utilisant l'équation suivante :

$$Abs = 0,545 * C - 0,01 \implies C = (ABS + 0.01) / 0.545 \dots \dots \dots \text{eq (03)}.$$

5.7.1.1. Calcul des taux

Pour déterminer le taux d'adsorption du chrome hexavalent (en mg/kg) par le sol et la plante, nous avons calculé :

$$T = m_{Cr} / m_{écha}$$

$$m_{Cr} = C * V \implies m_{Cr} = C * 8_{(sol)} * 10^{-3} \text{ (mg)} \dots \dots \dots \text{eq (04)}.$$

$$\implies m_{Cr} = C * 10_{(plante)} * 10^{-3} \text{ (mg)} \dots \dots \dots \text{eq (05)}.$$

5.7.2. Détermination des facteurs caractérisant la phytoremédiation

5.7.2.1. Facteur de bioaccumulation (FB)

Le FB peut être calculé en utilisant l'équation N°04 (Xu. J et al., 2020)

$$FB = \frac{[Cr(VI)]_{racine}}{[Cr(VI)]_{sol}} \dots \dots \dots \text{eq (06)}.$$

✓ Lorsque $FB > 1$, 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 et al., 2020).

✓ **5.7.2.2. Facteur De Translocation (FT)**

FT est calculé en appliquant l'équation N°05 (Nouri et al; 2009) sur expérimentales

$$FT = \frac{[Cr(VI)]_{\text{feuille}}}{[Cr(VI)]_{\text{racine}}} \dots \dots \dots \text{eq (07)}.$$

- ✓ Lorsque $FT > 1$, cela indique que la plante peut transférer efficacement le chrome de la racine à la pousse et peut être plus adaptée à la phytoremédiation (Xu et al; 2020).

5.7.2.3. Facteur d'enrichissement (FE)

FE est déterminé à l'aide de l'équation N°06 (Lorestani et al; 2011)

$$EF = \frac{[Cr(VI)]_{\text{feuille}}}{[Cr(VI)]_{\text{sol}}} \dots \dots \dots \text{eq (08)}.$$

Où :

- ✓ Lorsque $FE < 1$, l'espèce végétale est considérée comme stabilisant du chrome, tandis que la valeur $FE > 1$, c'est un accumulateur.

CHAPITRE IV
RESULTATS ET
DISCUSSIONS

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présenterons les résultats expérimentaux de projet, avec les interprétations possibles et discussions.

2. Morphologie des deux types d'orge avant et après contact avec le chrome hexavalent

La figure 21 montre que les deux types d'orge (l'orge local et l'orge importé) sont affectés par le chrome hexavalent, cela se manifeste en un stress appréciable, mais qu'ils survivent malgré la présence de chrome à un taux élevé, et cette observation confirme la bonne sélection de l'espèce végétale



Figure 21 : Morphologie des avant (à gauche) et après (à droite) contact avec le chrome hexavalent

Remarque:

On symbolise l'orge locale par la variable 1 (**v1**)

On symbolise l'orge importé par la variable 2 (**v2**)

3. RESULTATS DE L'ANALYSE DU CHROME HEXVALENT DANS LES ECHANTILLONS DE SOL ET DE PLANTES

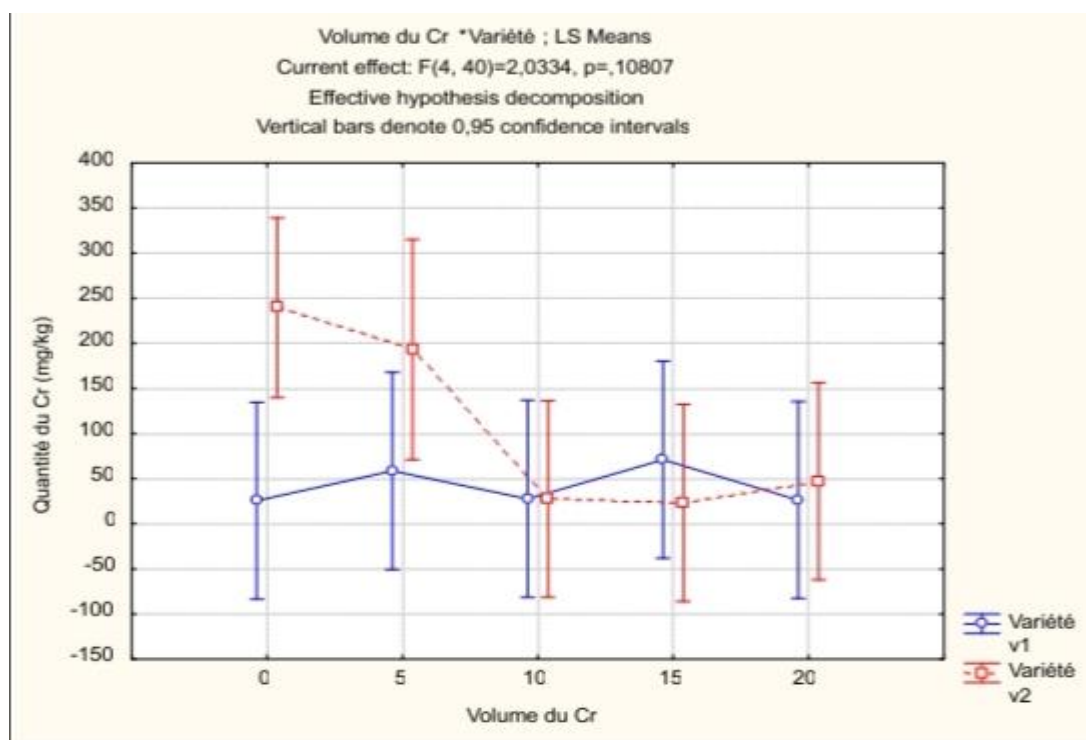


Figure22 : Evolution de la quantité du Cr(VI) dans le sol en fonction du volume ajouté

D'après la figure22, on observe que le chrome hexavalent est présent dans le sol même avant l'ajout du chrome, cela est probablement dû à une faible contamination préalable du sol utilisé. Après addition du chrome, on constate une certaine stabilité du teneur en chrome dans le sol, cela est probablement dû à l'absorption du chrome par l'orge.

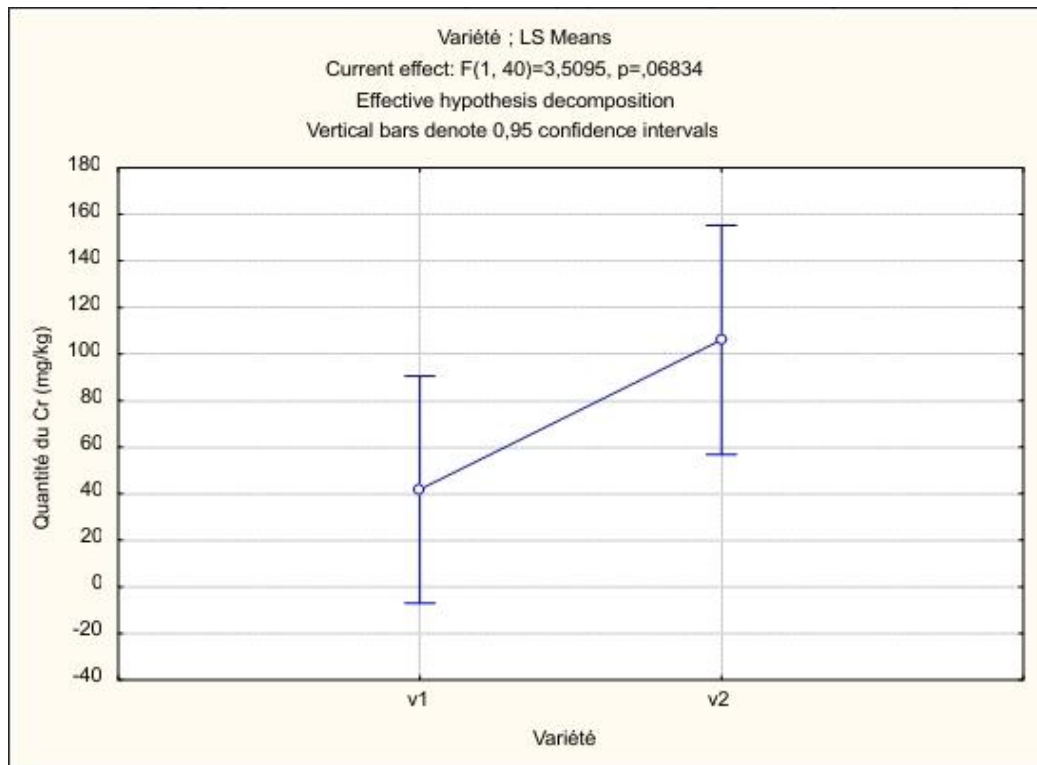


Figure23 : Comparaison de la quantité de chrome dans deux types d'orge dans le sol

3.1. Présence du chrome dans les échantillons du Les racines :

Dans les racines, nous remarquons que l'absorption du chrome est initialement élevée, puis commence à diminuer pour atteindre une valeur presque constante.

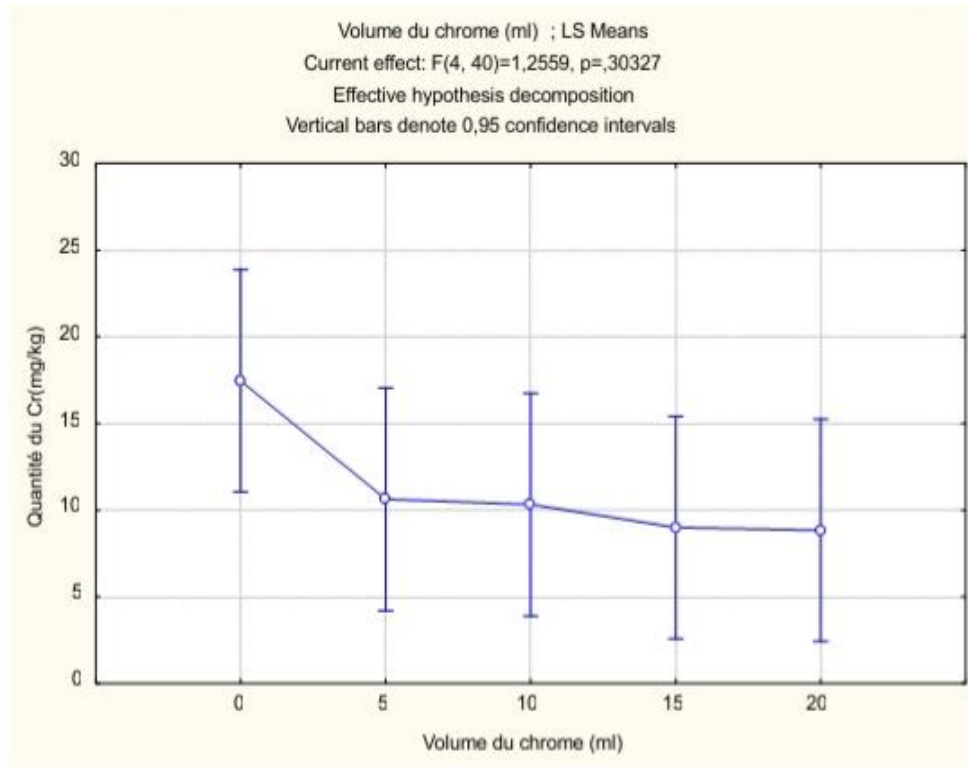


Figure24 : Evolution de la quantité du Cr(VI) dans les racines

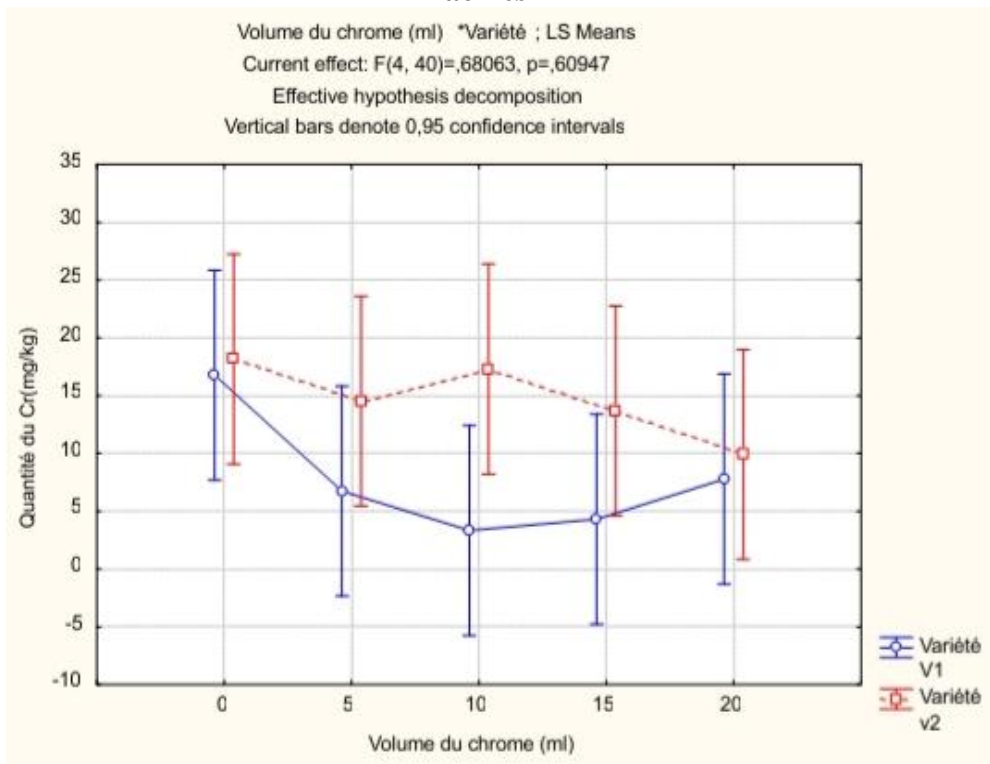


Figure25 : Evolution de la quantité du Cr dans les racines pour les deux variétés v1et v2

En comparant les deux variétés de l'orge, on remarque que le taux d'absorption dans le second type d'orge v2 est meilleur que le premier type v1.

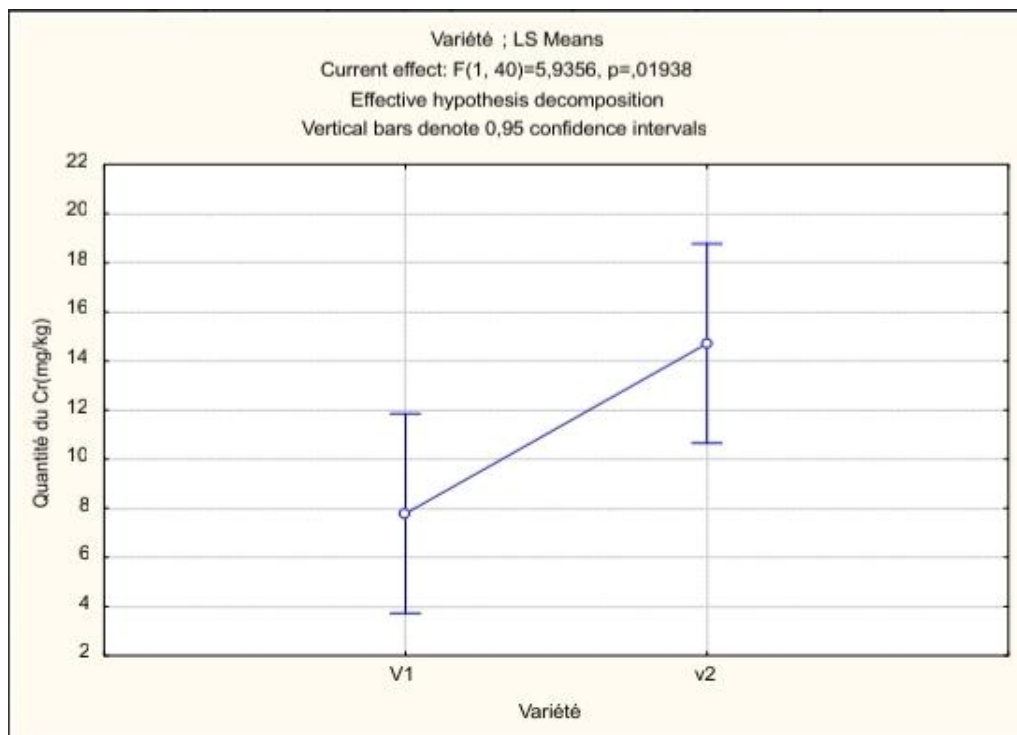


Figure26 : Comparaison de la quantité du Cr dans les feullues pour les deux variétés v1 et v2

3.2. Présence du chrome dans les feuilles :

D'après la figure 18 on observe que la capacité des feuilles à absorber le chrome atteint 170 mg/kg pour un volume de 5 ml de Cr(VI) ajouté, puis elle commence à diminuer jusqu'à moins de 50 mg/kg pour un volume de 20 ml.

On note que la capacité des feuilles à absorber le chrome dans le deuxième type d'orge v2 au début était un peu faible par rapport au premier

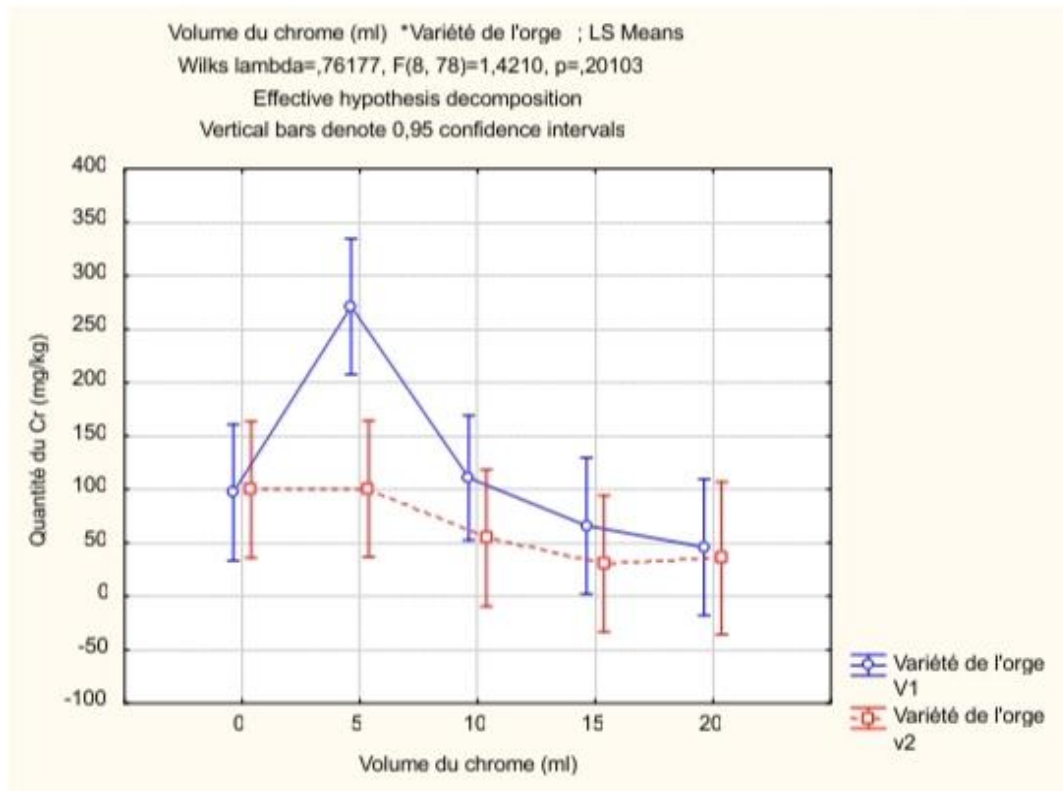


Figure27 : Evolution de la présence de Cr(VI) dans les feuilles des deux variétés en fonction du chrome ajouté

En comparant v1 à v2 dans le cas des feuilles, on trouve que v1 est meilleur que v2 en adsorption du chrome hexavalent.

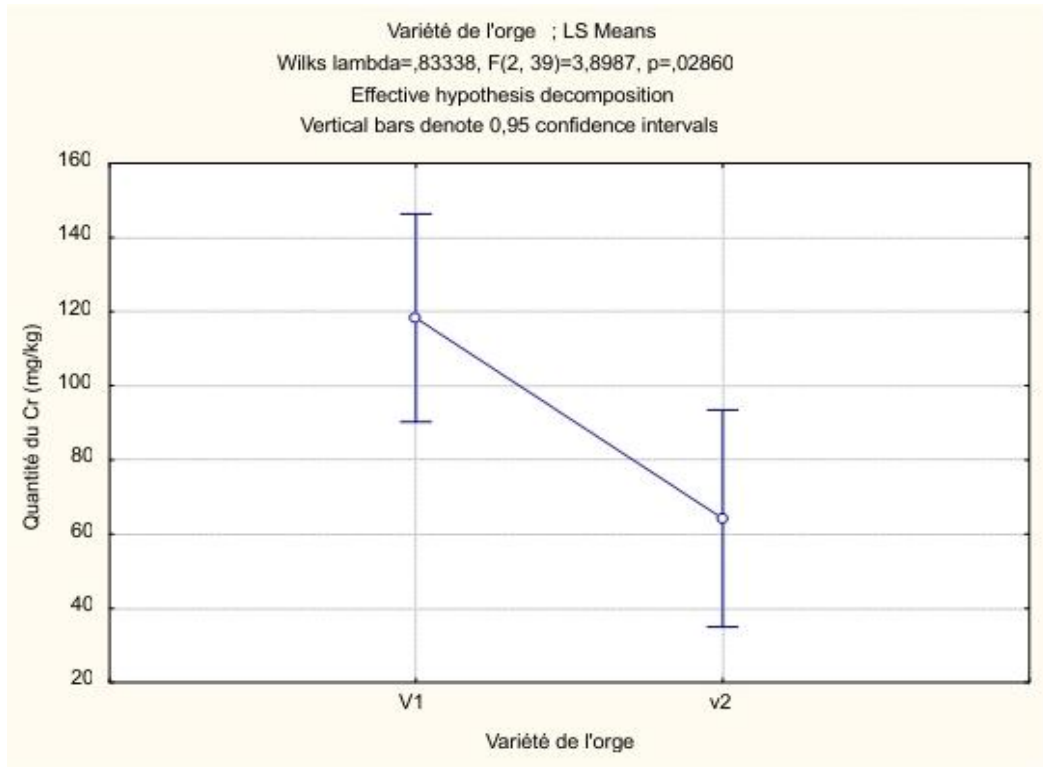


Figure28 : Longueur des feuilles pour les deux variétés

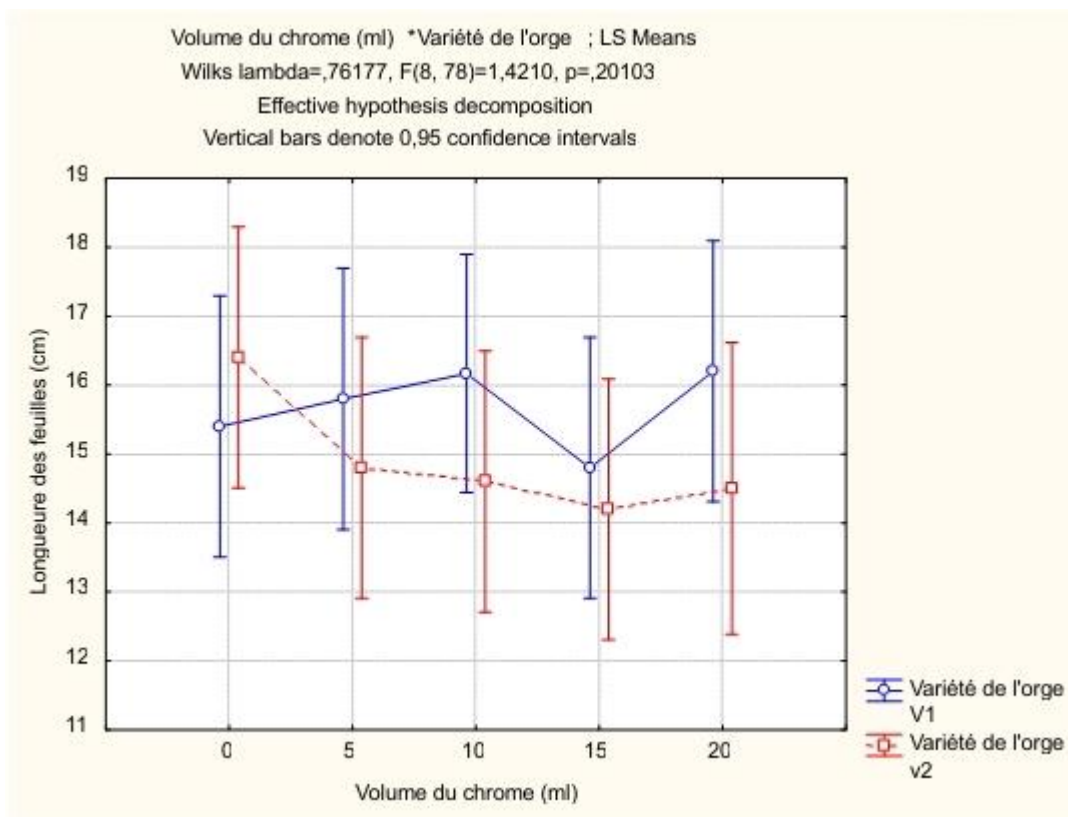


Figure29 : Développement de la longueur des feuilles avec la présence de chrome pour les deux variétés v1 et v2

En ce qui concerne la longueur des feuilles, On observe qu'il y a une légère diminution en augmentant le volume du chrome ajouté, ce qui est expliqué par un stress croissant qui influence la longueur des feuilles.

En comparant les deux variétés de l'orge, la variété V2 est moins influencée par l'augmentation du taux du chrome dans le sol.

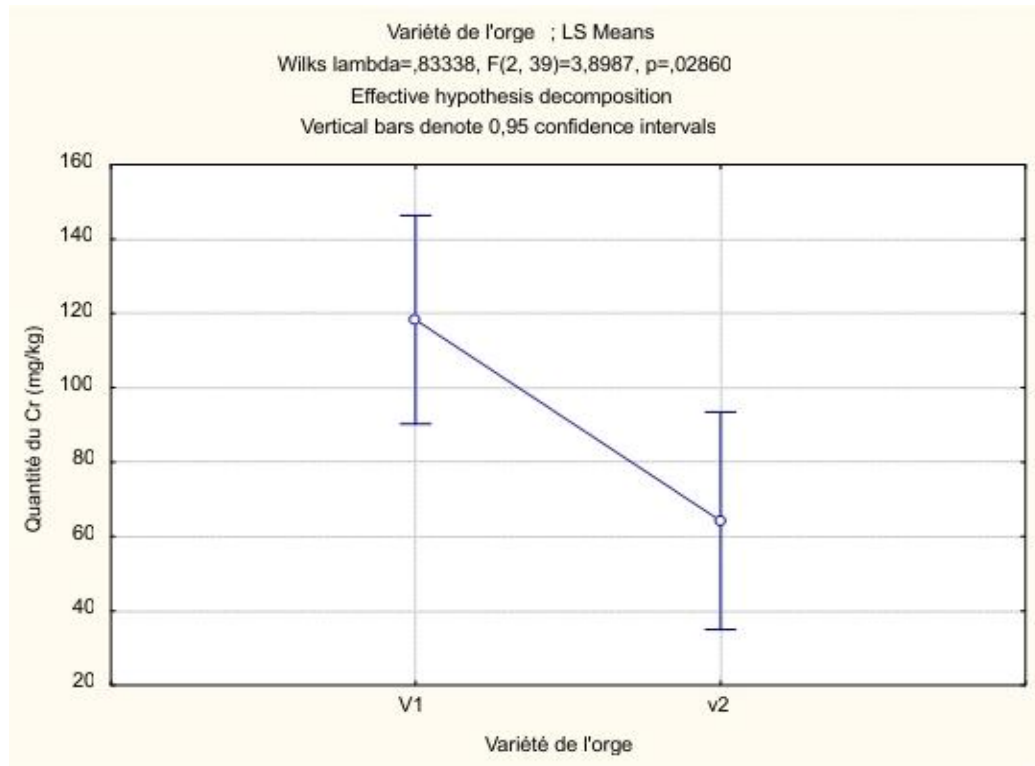


Figure30: Comparaison de la longueur des feuilles d'orge entre les deux cas variétés de l'orge

A travers cette étude, on note que la variété v1 est meilleure que la variété v2.

4. DISCUSSION DES RESULTATS :

A travers cette étude, nous avons découvert que l'orge est un bon candidat pour l'élimination du chrome hexavalent, car nous avons remarqué qu'avant l'ajout de chrome, la capacité atteignait 250 mg/kg. Puis il a commencé à décliner, ce qui indique que l'orge absorbe le chrome. En comparant nos résultats avec les travaux de (zerrouki et al; 2013) . Nous avons constaté que le taux de contamination du sol est très élevé. Dans notre expérience, nous avons constaté que le pourcentage du chrome est très élevé dans le sol, atteignant 350 (mg/kg) avant l'injection de chrome hexavalent v1 et v2. Mais le taux d'absorption de v2 est supérieur que celui de v1.

En ce qui concerne les racines, le pourcentage de chrome au début était élevé, mais il a commencé à diminuer, ce qui signifie que notre plante d'orge dans les deux cas a transféré le chrome hexavalent vers les feuilles, mais toujours v2 est meilleur que v1. Aux niveaux des feuilles, nous remarquons le pourcentage de chrome absorbé a augmenté puis diminuer, c'est une preuve que les feuilles d'orge ont un mécanisme d'élimination du Cr(VI) de type réduction et/ou complexation.

4.1. Facteur caractérisant la phytoremédiation :

Le tableau N°03 regroupe les facteurs de bioaccumulation, d'enrichissement et de translocation pour les différentes conditions

Tableau N°03: Résultat des facteurs caractérisant le phénomène de phytoremédiation

Quantité racines	Quantité sol	FB=Qr/Qsol	Quantité Feuilles	Quantité sol	FE=Qf/Qsol	Quantité feuilles	Quantité racines	FT=f/Qr
1.248733	16.97793	0.07355	17.29968	16.97793	1.018951	17.29968	1.248733	13.8537
18.38632	20.37351	1.884129	37.43079	20.37351	1.837228	37.43079	18.38632	0.97510
3.906222	32.824	0.119005	34.84936	32.824	1.061704	34.84936	3.906222	8.92150
37.26412	30.56027	1.219365	353.3666	30.56027	11.56294	353.3666	37.26412	9.48275
3.032187	27.16469	0.111622	43.45181	27.16469	1.59957	43.45181	3.032187	14.3301
6.770843	63.38427	0.106822	258.1987	63.38427	4.073545	258.1987	6.770843	38.1339
5.092886	84.88964	0.059994	249.9155	84.88964	2.944004	249.9155	5.092886	49.0714
17.51675	26.03282	0.672872	333.2747	26.03282	12.80209	333.2747	17.51675	19.0260
1.412848	28.29655	0.04993	383.7866	28.29655	13.56302	383.7866	1.412848	271.640
2.890581	90.54895	0.031923	130.8683	90.54895	1.445277	130.8683	2.890581	45.2740
1.676459	7.923033	0.211593	197.7164	7.923033	24.95464	197.7164	1.676459	117.937
3.412219	23.7691	0.143557	17.94327	23.7691	0.754899	17.94327	3.412219	5.25853

2.631505	30.56027	0.086109	29.54527	30.56027	0.966787	29.54527	2.631505	11.2275
5.787249	38.48331	0.150383	21.79187	38.48331	0.566268	21.79187	5.787249	3.76549
3.191026	37.35144	0.085432	256.9059	37.35144	6.878071	256.9059	3.191026	80.5088
2.730259	83.75778	0.032597	141.2677	83.75778	1.686621	141.2677	2.730259	51.7414
2.087816	76.96661	0.027126	97.10338	76.96661	1.26163	97.10338	2.087816	46.5095
4.396472	30.56027	0.143862	60.49838	30.56027	1.979642	60.49838	4.396472	13.7606

7.796369	74.70289	0.104365	51.03864	74.70289	0.683222	51.03864	7.796369	6.54646
4.543745	89.41709	0.050815	53.31132	89.41709	0.596209	53.31132	4.543745	11.7329
3.706845	3.395586	2.564166	68.03136	3.395586	20.03523	68.03136	8.706845	7.81354
3.828275	5.65931	1.559956	77.71254	5.65931	13.73181	77.71254	8.828275	8.80268
3.863011	24.90096	0.155135	27.85068	24.90096	1.118458	27.85068	3.863011	7.20957
3.586063	29.42841	0.121857	20.09646	29.42841	0.682893	20.09646	3.586063	5.60404
3.89021	67.91171	0.204533	34.87058	67.91171	0.513469	34.87058	13.89021	2.51044
10.03291	91.68081	0.109433	69.29815	91.68081	0.755863	69.29815	10.03291	6.90708
4.81576	88.28523	0.167817	97.23183	88.28523	1.101337	97.23183	14.81576	6.56273
20.9588	71.3073	0.293922	101.8715	71.3073	1.428626	101.8715	20.9588	4.86055
29.43707	622.5241	0.047287	70.11135	622.5241	0.112624	70.11135	29.43707	2.38173
15.51013	21.50538	0.721221	48.4351	21.50538	2.252232	48.4351	15.51013	3.12280
7.151524	543.2937	0.013163	180.9452	543.2937	0.333052	180.9452	7.151524	25.3016
1.98559	90.54895	0.132366	143.5462	90.54895	1.585288	143.5462	11.98559	11.9765
29.07553	588.5682	0.0494	91.37951	588.5682	0.155257	91.37951	29.07553	3.14283
8.59756	14.7142	1.263919	139.6603	14.7142	9.491527	139.6603	18.59756	7.5096
5.74216	78.09847	0.073525	78.03168	78.09847	0.999145	78.03168	5.74216	13.5892
7.134741	41.87889	0.170366	50.33103	41.87889	1.201823	50.33103	7.134741	7.05436

0.929211	30.56027	0.324906	52.57101	30.56027	1.72024	52.57101	9.929211	5.29458
0.096745	23.7691	0.172356	60.34974	23.7691	2.539	60.34974	4.096745	14.7311
0.899524	21.50538	2.278279	94.43977	21.50538	4.391449	94.43977	48.99524	1.92753
0.635306	19.24165	0.849878	31.84299	19.24165	1.654899	31.84299	16.35306	1.94721
0.5718606	31.69213	0.180442	32.50728	31.69213	1.025721	32.50728	5.718606	5.68447
0.444743	9.054895	0.601304	11.51247	9.054895	1.271409	11.51247	5.444743	2.11442
0.823023	13.58234	1.342201	18.56486	13.58234	1.366838	18.56486	18.23023	1.01835
0.788879	30.56027	0.912583	24.03732	30.56027	0.786554	24.03732	27.88879	0.86189
0.111392	31.69213	0.350684	45.08822	31.69213	1.422694	45.08822	11.11392	4.05691
0.131942	23.7691	0.384194	53.59057	23.7691	2.254632	53.59057	9.131942	5.86847
0.513903	33.95586	0.280184	3.69081	33.95586	0.108694	3.69081	9.513903	0.38793
0.189348	62.25241	0.191053	32.08101	62.25241	0.515338	32.08101	11.89348	2.69736
0.146102	78.09847	0.104306	70.26735	78.09847	0.899728	70.26735	8.146102	8.62588
0.083208	37.35144	0.290004	37.02521	37.35144	0.991266	37.02521	10.83208	3.41810

4.2. Facteurs de translocation

Nous remarquons dans le tableau que le facteur de transfert pour l'orge de type I (v1) atteint une valeur élevée de 271. Cela indique que la plante a une bonne capacité de transport et cela indique également que la plante peut transférer efficacement le chrome des racines vers les feuilles et peut convenir à la phytoremédiation.

Contrairement au deuxième type, (v2), les valeurs vont de 0 à 25. Cela indique que la plante a un pourcentage inférieur de chrome hexavalent par rapport au premier type.

4.3. Facteur d'enrichissement

Les résultats expérimentaux ont montré que le facteur d'enrichissement dans la majorité.

Les échantillons F1 sont supérieurs à 1 et peuvent atteindre 24 mg/kg dans certains cas. Cela confirme que cette espèce tolère bien le chrome hexavalent.

Pour le second type, les valeurs vont de 0 à 9 mg/kg, indiquant une bonne puissance de transmission mais plus faible que pour le premier type.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

A travers cette étude, on trouve que l'absorption de Chrome est initialement élevée dans le niveau des racines, et on observe que la capacité des feuilles à absorber le chrome atteint 170 mg/kg pour un volume de 5 ml de Cr(VI) ajouté, puis elle commence à diminuer jusqu'à moins de 50 mg/kg) pour un volume de 20 ml.

En ce qui concerne la longueur des feuilles, On observe qu'il y a une légère diminution en augmentant le volume du chrome ajouté, ce qui expliqué par un stress croissant qu'influe la longueur des feuilles.

Les deux variétés d'orge ont des capacités de translocation importantes, mais leurs pouvoirs d'accumulation du Cr(VI) sont trop limités.

Finalement, après faire la comparaison entre notre travail et (zerrouki et al ; 2013) Nous avons constaté que notre espèce est une bonne candidate pour le traitement des sols contaminés par le chrome. Cela nous encourage à continuer dans ce sens pour trouver des applications dans les zones agricoles ou urbaines contaminées par le chrome hexavalent.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

- **Al Osman M, Yang F, Massey IY.** Exposure routes and health effects of heavy metals on children. *Biometals*. 2019;32(4):563–573.
- **Andrea Ertani, Anna Mietto, Maurizio Borin & Serenella Nardi** Water, Air, & Soil Pollution volume 228, Article number: 190 (2017).
- **Avudainayagam, M. Megharaj, G. Owens, R. S. Kookana, D. Chittleborough, and R. Naidu,** “Chemistry of chromium in soils with emphasis on tannery waste sites,” *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 178, pp. 53–91, 2003.

B

- **Badr A., Muller K., Schafer-Pregl R., El-Rabey H., Effgen S., Ibrahim H. H., Pozzi C; Rohdi W., Salamani F.,** 2000. On the origin and domestication history of barley (*Hordeum vulgare*). *Mol. Biol. Evol.* 17(4) : 499-510.
- **Ball, J.W; Nordstrom, D.K;** 1998. Critical evaluation and selection of standard state thermodynamic properties for chromium metal and its aqueous ions, hydrolysis species, oxides, and hydroxides; *Journal of Chemical and Engineering Data* , 43, 6,895-918.
- **Banks, T.L.; Jardine, P.M.; Ginder-Vogel, M.; Fendorf, S.E.; Baldwin, M.E.;** 2007. Elucidating biogeochemical reduction of chromate via carbon amendments and soil sterilization. *Geomicrobiology J.*, 24, 2, 125-132.
- **Barceloux,** *Clinical Toxicology*, 37(2) (1999)173-194.
- **Bartlett, J.R.; James, B.R.;** 1976. Chromium. In: *Methods of Soil Analysis part. 3 Chemical Methods*, Soil Sci. Soc. Of Amer. Series, 25, 683-701.
- **Becquer, T.; Quantin, C.; Sicot, M.; Boudot, J.P.;** 2003. Chromium availability in ultramafic soils from New-Caledonia. *The Science of the Total*

Environment, 301, 251- 261.

- Biochimie- Microbiologie-Procédés-Produits. V2.Technologie des produits
- biodiversité des plantes. Dossier de l'environnement de l'INRA, β1, β9-37.
- **Bolan, N.S.; Adriano, D.C., Natesan, R.; Koo, B.-J.**; 2003. Effects of organic amendments on the reduction and phytoavailability of chromate in mineral soil. J. Environ. Qual.; 32, 120-128.
- **Bonjean A.**, 2001. Histoire de la culture des céréales et en particulier de celle du blé
- **Bourrelier P. H.; Berthelin J.**; 1998-*Contamination des sols par les éléments en*
- **Brigatti, M.F.; Franchini, G.;Lugli, C.; Medici, L.; Poppi, L.; Turci, E.**; 2000. Interaction between aqueous chromium solutions and layer silicates. Applied Geochem.,15, 1307-1316.

C

- **Cervantes C, Campos-García J, Devars S, et al.** Interactions of chromium with microorganisms and plants. *FEMS Microbiol Rev.* 2001;25(3):335–347).
- **Cervantes, J. C. García, S. Devars et al.**, “Interactions of chromium with microorganisms and plants,” *FEMS Microbiology Reviews*, vol. 25, no. 3, pp. 335–347, 2001.).
- **Chandra P., Sinha S., and Rai U. N.**, “Bioremediation of Cr from water and soil by vascular aquatic plants,” in *Phytoremediation of Soil and Water Contaminants*, **Kruger E. L., Anderson T. A., and Coats J. R.**, Eds., vol. 664 of *ACS Symposium*, pp. 274–282, DC7 American Chemical Society, Washington, DC, USA, 1997).
- **Cummings, D.E.; Fendorf, S.E., Singh, N.**; 2007. Reduction of Cr(VI) under acidic conditions by the facultative Fe(III)-reducing bacterium *Acidiphilium cryptum*. Environ. Sci. Technol., 41, 146-152.

D

- **Desjardin, V.; Bayard, R.; Huck, N.; Manceau, A.; Gourdon, R.**; 2002. Effect of microbial activity on the mobility of chromium in soils. Waste

Management, 195-200.

E

- **Eary, L.E.; Rai, D.;** 1987. Kinetics of chromium(III) oxidation to chromium(VI) by reaction with manganese dioxide; *Environ. Sci. Technol.*, 21, 1187-1193.

F

- **FAO.** Barley: post-harvest operations. Edited by AGST/FAO: Danilo Mejía, PhD, FAO (Technical) Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of United Nations; 2004, p. 64.
- **Fendorf, S.E.; Li, G.;** 1996. Kinetic of Chromate Reduction by Ferrous Iron. *Environ. Sci. Technol.*, 30, 1614-1617.
- **Fendorf, S.E.;** 1995. Surface reactions of chromium in soils and waters. *Geoderma*, 67, 55-71.
- **Focardi S, Pepi M, Focardi SE.** Microbial reduction of hexavalent chromium as a mechanism of detoxification and possible bioremediation applications. *Biodegrad Life Sci.* 2013;321–347. *Fourrages* , 117, 77-88.

G

- **Ghosh, M. and Singh, S.P.** (2005) *A Review on Phytoremediation of Heavy Metals and Utilization of Its Byproducts. Applied Ecology and Environmental Research*, 3, 1-18.

H

- **Harlan J.R., Zohary D.,** 1966 - Distribution of wild wheat and barley. *Science*

I

- **IARC.** Chromium, nickel and welding. *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum.* 1990;49:1–648.
- **Ilton, E.S.; Moses, C.O.; Vebeln, D.R.;** 2000. Using X-ray photoelectron spectroscopy to discriminate among different sorption sites of Micas: With implications for heterogeneous reduction of chromate at the mica-water interface. *Geochim. Et Cosmochim. Acta*, 64, 8, 1437-1450.

- **Ishibashi, Y.; Cervantes, C.; Silver, S.;** 1990. Chromium reduction in *Pseudomonas putida*. *Appl. Environ. Microbiol.*, 56, 2268-2270.

J

- **James, B.R.; Barlett, R.J.;** 1983b. Behavior of chromium in soils: VI. Interactions between oxidation-reduction and organic complexation. *J. Environ. Qual.*, 12, 173-176.
- **Jardine, P.M.; Fendorf, S.E.; Mayes, M.A; Larsen, I.L.; Brooks, S.C; Bailey, W.B.;** 1999. Fate and transport of hexavalent chromium in undisturbed heterogeneous soil. *Environ. Sci. Technol.*, 33, 2939-2944.
- **Jeantet R., Croguennec T., Schuck P., Brulé G.,** 2007. *Science des aliments*.
- **Jiang B, Liu Y, Zheng J, et al.** Synergetic transformations of multiple pollutants driven by Cr (VI)–sulfite reactions. *Environ Sci Technol.* 2015;49(20):12363–12371.
- **Johnson, A.; Xyla, A.G.;** 1991. The oxidation of chromium(III) to chromium(VI).
- **Junaid M, Hashmi MZ, Malik RN, et al.** Toxicity and oxidative stress induced by chromium in workers exposed from different occupational settings around the globe: a review. *Environ Sci Pollut Res.* 2016;23(20):20151–20167.

K

- **Kazakis N, Kougiass I, Patsialis T.** Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and analytical hierarchy process: application in Rhodope–Evros region, Greece. *SciTotal Environ.* 2015;538:555–563.
- **Khaldoun A.,** 1989. Etude du comportement de l'orge exploitée à double fin.
- **Kim, J. H. Kim, C. E. Lee et al.,** “Expression of yeast transcriptional activator MSN1 promotes accumulation of chromium and sulfur by enhancing sulfate transporter level in plants,” *FEBS Letters*, vol. 580, no. 1, pp. 206–210, 2006, 20 C.

- **Kim, J.G.; Dixon, J.B.; Chusuei, C.C.; Deng, Y.;** 2002. Oxidation of chromium(III) to (VI) by manganese oxides. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, 306-315.
- **Kimbrough, Y. Cohen, A. M. Winer, L. Creelman, and C. Mabuni,** “A critical assessment of chromium in the environment,” *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 29, no. 1, pp. 1–46, 1999.).
- **Kozuh, N.; Stupar, J.; Gorenc, B.;** 2000. Reduction and oxidation processes of chromium in soils. *Environ. Sci. Technol.*, 34, 112-119.

L

- **Leckie, J.O.; Appleton, A.R.; Ball, W.B; Hayes, K.F.; Honeyman, B.O.;** 1984. Report 910.1. Electric Power Research Institute .
- **Leonard, R. R. Lauwerys,** Hazard Assessment of Chemicals, Volume 7(1980) 1990-
- **Lorestani B., Cheraghi M., Yousefi N.,** 2011. Phytoremediation potential of native
- **Loyaux-Lawniczak, S.; Refait, Ph.; Lecomte, P.; Ehrhardt, J.-J.; Génin, J.-M.;**1999. The reduction of chromate ions by Fe(II) layered hydroxides. *Hydrology and earth system sciences*, 3, 4, 593-599.
- **Lytras** A novel two-phase bioreactor for microbial hexavalent chromium removal from wastewater *J. Hazard Mater.*(2017).

M

- **Mahar, P. Wang, A. Ali, M.K. Awasthi, A.H. Lahori, Q. Wang, R. Li, Z. Zhang.** *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 126, 111–121 (2016) .
- **Mehmood** Spatial distribution of heavy metals in crops in a wastewater irrigated zone and health risk assessment *Environ. Res.* (2019).
- **Mishra et al.** Novel chromium tolerant microorganisms: Isolation, characterization and their biosorption capacity *Ecotoxicol. Environ. Saf.*(2008).
- **Mishra, V. Singh, S. Srivastava et al.,** “Studies on uptake of trivalent and

hexavalent chromium by maize (*Zeamays*),” *Food and Chemical Toxicology*, vol. 33, no. 5, pp. 393–397, 1995).

- **Murray, K.J.; Tebo, B.M.**; 2007. Cr(III) is indirectly oxidized by the Mn(II)-oxidizing bacterium *Bacillus* sp. strain SG-1. *Environ. Sci. Technol.*, 41, 528-533.

N

- **Nakayama, E.; Kawamoto, T., Tsurubo, T., Fuginaga, T.**; 1981. Chemical speciation of chromium in sea water : Part 2. Effects of Manganese Oxides and Reducible Organic Materials on the Redox Processes of Chromium. *Anal. Chim. Acta*, 130, 2, 401-404.
- **Nouri J., Khorasani N., Lorestani B., Karami M., Hassani A.H., Yousefi N.**, 2009. Accumulation of heavy metals in soil and uptake by plant species with
- **NTP** 11th Report on Carcinogens. *Rep Carcinog.* 2005;11:1–A32.

O

- **Oh *et al.*** Effect of amorphous silica and silica sand on removal of chromium(VI) by zero-valent iron *Chemosphere*(2007).
- **OHCOW** (2005). *Hexavalent Chromium*. Ontario, Canada: Occupational Health Clinics for Ontario Workers Inc. on the surface of manganite (δ MnOOH). *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55, 2861-2866. Organo-chromium(III) complexes after chromate reduction in the presence of cellular organics. *Environ. Sci. Technol.*, 39, 2811-2817.
- **Oliveira Of, CanevariNt, Guerra Mbb, Perrira-FilhoEr** (2013) proposition of simple method for chromium hexavalent determination in soils from remote places applying *digital images: A case study from Brazilian Antarctic*, *Microchem.J.*109:165-169.
- **OSHA**. Occupational Safety and Health Administration. Department of Labor 2006 Occupational exposure to hexavalent chromium. Final rule. Fed Regist 7110099–10385.
- **Otabbong**, *Plant and Soil*, 123(1990)89-93.

- **Oze C, Bird DK, Fendorf S.** Genesis of hexavalent chromium from natural sources in soil and groundwater. *Proc Nat Acad Sci.* 2007;104(16):6544–6549.
- **Oze, C.; Fendorf, S.; Bird, D.K.; Coleman, R.G.;** 2004. Chromium geochemistry of serpentine soils. *International Geology Review*, 46, 97-126.

P

- **Paiva, J. G. de Oliveira, R. A. Azevedo, D. R. Ribeiro, M. G. da Silva, and A. P. Vitória,** “Ecophysiological responses of water hyacinth exposed to Cr^{3+} and Cr^{6+} ,” *Environmental and Experimental Botany*, vol. 65, no. 2-3, pp. 403–409, 2009.].
- **Papp, J.F.** (1983) Chromium. In: *Mineral Commodity Profiles 1983*, Washington DC, Bureau of Mines, US Department of the Interior, pp. 1–21.
- **Parthasarathy, G.; Choudary, B.M.; Sreedhar, B.;** 2003. Ferrous saponite from the Deccan Trap, India, and its application in adsorption and reduction of hexavalent chromium. *American Mineralogist*, 88, 11-12, 1983-1988.
- **Peralta-Videa, M. L. Lopez, M. Narayan, G. Saupe, and J. Gardea Torresdey,** “The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: implications for the food chain,” *International Journal of Biochemistry and Cell Biology*, vol. 41, no. 8-9, pp. 1665–1677, 2009.].
phytoremediation potential. *Environ. Earth Sci.* 59, 315–323, plants growing on a heavy metals contaminated soil of copper mine in Iran.
- **Puzon, G.J.; Roberts, A.G.; Kramer, D.M.; Xun, L.;** 2005. Formation of soluble

R

- **Rai, D.; Zachara, J.M.;** 1988. Chromium reactions in geologic materials; Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute.
Rai, D.; Eary, L.E.; Zachara, J.M.; 1989. Environmental chemistry of chromium. *Sci. Tot. Environ.*, 86, 15-23.
- **Ramachandran, T. J. D'Souza, and K. B. Mistry,** “Uptake and transport of chromium in plants,” *Journal of Nuclear Agriculture and Biology*, vol. 9, no. 4, pp. 126–128, 1980., A. Zayed, C. M. Lytle, J. H. Qian, and N. Terry,

“Chromium accumulation, translocation and chemical speciation in vegetable crops,” *Planta*, vol. 206, no. 2, pp. 293–299, 1998.).

- **Rodier J.**; 2009-l’analyse de l’eau. *Ed Dunod*, Paris, 262-263P.
- **Rosas, R. Belmont, A. Baez, and R. Villalobos-Pietrini**, “Some aspects of the environmental exposure to chromium residues in Mexico,” *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 48, no. 3-4, pp. 463–475, 1989.).

S

- **Schroeder, D.C.; Lee, G.F.**; 1975. Potential transformations of chromium in natural waters. *Water, Air, Soil Pollution*, 4, 355-365.
- **Sedlak, D.; Chan, P.G.**; 1997. Reduction of hexavalent chromium by ferrous iron. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 11, 2185-2192.
- **Shanker AK, Cervantes C, Lozatavera H, et al.** Chromium toxicity in plants. *Environ Int.* 2005;31(5):739–753).
- **Shanker, C. Cervantes, H. Loza-Tavera, and S. Avudainayagam**, “Chromium toxicity in plants,” *Environment International*, vol. 31, no. 5, pp. 739–753, 2005.] Shanker, in *Encyclopedia of Environmental Health (Second Edition)*, 2019.
- **Sharma P, Purchase D, Chandra R.** Residual pollutants in treated pulp paper mill wastewater and their phytotoxicity and cytotoxicity in *Allium cepa*. *Environ Geochem Health.* 2021a;43(5):2143–2164.
- **Sharma P, Tripathi S, Vadakedath N, et al.** In-situ toxicity assessment of pulp and paper industry wastewater on *Trigonella foenum-graecum L*: potential source of cytotoxicity and chromosomal damage. *Environ Technol Innovation.*
- **Sharma A, Kapoor D, Wang J, et al.** Chromium bioaccumulation and its impacts on plants: an overview. *Plants.* 2020a;9(1):100.
- **Shekhawat K, Chatterjee S, Joshi B.** Chromium toxicity and its health hazards. *Int J Adv Res.* 2015;3(7):167–172.
- **Simonsohn Barbara**, 2003. "Le jus d'herbe d'orge", Ed. Chariot d'Or. 264pages.

- **Skeffington, P. R.** Shewry, and P. J. Peterson, “Chromium uptake and transport in barley seedlings (*Hordeum vulgare* L.),” *Planta*, vol. 132, no. 3, pp. 209–214, 1976
- **Soltner D.**, 2005. Les grandes productions végétales. 20ème Edition. Collection science et
- **Sperling**, in Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition), 2005
- **Sposito, G.**; 1984. The surface chemistry of soils, Oxford University Press, NewYork, 234p.
- **Stepniewska, Z.; Bucior, K.; Bennicelli, R.P.**; 2004. The effects of MnO₂ on sorption and oxidation of Cr(III) by soils. *Geoderma*, 122, 291-296.
- **Stumm, W.**; 1992. Chemistry of the solid-water interface: Process at the mineral-water and particle-water interface in natural systems. New York, NY, JohnWiley&Sons, 428p .
- **Subhashini, V. and Swamy, A.V.V.S.** (2013) Phytoremediation of Pb and Ni Contaminated Soils Using *Catharanthus roseus* (L.). *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, 3, 465-472.

T

- **Tebo, M.B.; Johnson, H.A.; McCarthy, J.; Templeton, A.S.**; 2005. Geomicrobiology of manganese(II) oxidation. *Trends in microbiology*, 13, 9, 421-428, techniques agricole, 472p tendre (*Triticum aestivum* L.).
- **Tokunaga, T.K.; Wan, J.; Firestone, M.K.; Hazen, T.C.; Olson, K.R.; Herman, D.J.; Sutton, S.R.; Lanzirotti, A.**; 2003. In situ reduction of chromium(VI) in heavily contaminated soils through organic carbon amendment. *J. Environ. Qual.*, 32, 1641-1649.
Tokunaga, T.K.; Wan, J.; Lanzirotti, A.; Sutton, S.R.; Newville, M.; Rao, W.; 2007. Long-term stability of organic carbon-stimulated chromate reduction in contaminated soils and its relation to manganese redox status. *Environ. Sic. Technol.*, 41, 4326-4331. Tripathi et al; 2011 , *traces : les risques et leur gestion*. In: Tec Doc Lavoisier, Paris, 440p.

U

- **USDA World Agriculture Production.** Circular series 2020. WAP 4-20; 2020 Apri, Statista. Barley production worldwide 2008/2009–2018/2019; 2020.

V

- **Velma, S. S. Vutukuru, and P. B. Tchounwou,** “Ecotoxicology of hexavalent chromium in freshwaterfish: acriticalreview,” *Reviews on EnvironmentalHealth*, vol.
- **Vendruscolo F, da Rocha Ferreira GL, Antoniosi Filho NR.** Biosorption of hexavalent chromium by microorganisms. *Int Biodeterior Biodegrad.* 2017;119:87–95.

W

- **Wang J, et al.** Chromium bioaccumulation and its impacts on plants: an overview. *Plants.* 2020a;9(1):100.
- **Weaver, R.M; Hochella, Jr. M.F.;** 2003. The reactivity of seven Mn-oxides with Cr(3+)aq: A comparative analysis of a complex environmentally important redox reaction. *Am. Mineral*, 88, 2016-2027.
- **Westbrook, J.H.** (1979) Chromium and chromium alloys. In: Mark, H.F, Othmer, D.F., Overberger, C.G., Seaborg, G.T. & Grayson, M., eds, *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 3rd ed., Vol. 6, New York, John Wiley & Sons, pp. 54–82.
- **Wise JP Jr, Young JL, Cai J, et al.** Current understanding of hexavalent chromium [Cr(VI)] neurotoxicity and new perspectives. *Environ Int.* 2022;158:106877.
- **Wittbrodt, P.R.; Palmer, C.D.;** 1995. Reduction of Cr(VI) in the presence.

X

- **Xu T., Nan F., Jiang, X., Tang Y., Zeng Y., Zhang W., Shi B.,** 2020. Effect of soil pH on the transport, fractionation, and oxidation of chromium(III). *Ecotoxicol Env. Saf* 195, 110459.

Y

- **Yang W, Song W, Li J, et al.** Bioleaching of heavy metals from wastewater sludge with the aim of land application. *Chemosphere.* 2020;249:126134.

Z

- **Zachara, J.M.; Ainsworth, C.C.; Cowan, C.E., Resch, C.T.;** 1989.
Adsorption of chromate by subsurface soil horizons. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 418-428.
- **Zayed and N. Terry,** “Chromium in the environment: factor affecting biological remediation,” *Plant and Soil*, vol. 249, no. 1, pp. 139–156, 2003.
- **Zhou M.** Barley production and **consumption**. *Adv Top Sci Technol China*. 2010;7:1–17/ Vaezi BP, Aboughadareh PA, Mohammadi R, Armion M, Mehraban A, Hossein PT, et al. GGE biplot and AMMI analysis of barley yield performance in Iran. *Cereal Res Commun*. 2017;45(3):500–11.

RESUME

Les activités industrielles intensives ont entraîné une augmentation de la contamination par le chrome (Cr) dans l'environnement. La toxicité du Cr affecte gravement la croissance et le développement des plantes. Le Cr est également reconnu comme un cancérigène humain qui pénètre dans le corps humain par inhalation ou par la consommation de produits alimentaires contaminés au Cr.

Le but de ce travail est d'étudier et d'évaluer la réponse du lorge au chrome hexavalent dans le sol. Ce polluant métallique a été choisi à cause de sa forte toxicité et sa présence dans les eaux usées de différentes industries, telle que les tanneries, cette dernière étant la principale source de cette pollution.

Dans cette expérience, nous avons utilisé de l'orge (*Hordeum vulgare*) de deux types, l'orge local (*Hordeum vulgare L*) a été prélevés dans une zone située Dar Chioukh exactement dans la zone de Sidi El Hajj près de Sidi Beyzid et l'orge importé (Canada)

Les résultats de cette étude ont montrés que l'orge a une résistance au chrome hexavalent. Une augmentation des concentrations de chrome est observée dans différentes parties de la plante, sans affecter sa croissance et son développement végétatif. Les résultats des facteurs de transfert du Cr(VI) ont également indiqué que ce dernier était principalement accumulé dans les feuilles. Ceci prouve que le mécanisme de phytoremédiation est de type volatilisation ou transformation ou extraction. Ce résultat montre la possibilité de remédier cette pollution par l'orge pour protéger l'environnement à proximité.

Mots clés :

chrome, orge (*Hordeum vulgare L*) , pollution des sols; Traitement

ملخص

أدت الأنشطة الصناعية المكثفة إلى زيادة تلوث الكروم (Cr) في البيئة. تؤثر سمية الكروم بشدة على نمو النبات وتطوره. يُعرف Cr أيضاً بأنه مادة مسرطنة للإنسان تدخل جسم الإنسان عن طريق الاستنشاق أو عن طريق استهلاك المنتجات الغذائية الملوثة بالكروم

الهدف من هذا العمل هو دراسة وتقييم استجابة الشعير للكروم سداسي التكافؤ في التربة. تم اختيار هذا الملوث المعدني بسبب سميته العالية ووجوده في مياه الصرف الصحي من مختلف الصناعات ، مثل المدابع ، وهذا الأخير هو المصدر الرئيسي لهذا التلوث.

في هذه التجربة ، استخدمنا نوعين من الشعير ، الشعير المحلي (*Hordeum vulgare L*) مأخوذ من منطقة تقع في دار الشيوخ بالضبط في منطقة سيدي الحاج بالقرب من سيدي بيزيد (الشكل 06) والشعير المستورد (كندا)

أظهرت نتائج هذه الدراسة أن الشعير لديه مقاومة للكروم سداسي التكافؤ. لوحظ زيادة في تركيزات الكروم في أجزاء مختلفة من النبات ، دون التأثير على نموه وتطوره الخضري. كما أشارت نتائج معامل نقل Cr ((VI)) إلى تراكم ((Cr (VI)) بشكل أساسي في الأوراق. هذا يثبت أن آلية المعالجة النباتية هي من نوع التطاير أو التحويل أو الاستخراج. تظهر هذه النتيجة إمكانية معالجة هذا التلوث بالشعير لحماية البيئة المجاورة.

كلمات مفتاحية :

الشعير ، الكروم ، تلوث التربة ، معالجة