

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 الإخوة منتوري قسنطينة I
Frères Mentouri Constantine I University
Université Frères Mentouri Constantine I

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département de Microbiologie

كلية علوم الطبيعة والحياة

قسم الميكروبيولوجيا

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

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Biologie moléculaire des microorganismes

N° d'ordre :

N° de série :

Intitulé :

Mécanismes de tolérance des bactéries aux métaux lourds

Présenté par : BOUGHABA AMDJED

Le 24/06/2023

Jury d'évaluation :

Président : MEZIANI MERIEM (MCB- Université Frères Mentouri, Constantine 1).

Encadreur : MEGHNOUS OUISSEM (MCB- Université Frères Mentouri, Constantine 1).

Examineur : ABDELAZIZ OUIDED (MCB- Université Frères Mentouri, Constantine 1).

Année universitaire

2022 - 2023

Remerciements

Je remercie, tout d'abord, Dieu tout puissant, qui ma a donné la force et la volonté pour terminer ce travail.

L'encadrement scientifique de ce travail a été assuré par Dr. Meghnous Ouissem, Je tiens vivement à lui exprimer ma profonde reconnaissance et gratitude pour sa prise en charge, sa disponibilité, sa patience, sa compréhension, merci pour tout ce que vous avez apporté à mes connaissances.

Mes remerciements vont au président du jury Dr. Meziani Meriem d'avoir accepté de présider et de juger ce travail.

Mes remerciements vont également à Dr Abdelaziz Ouided d'avoir accepté d'examiner ce travail et pour sa participation à ce jury.

Enfin un grand remerciement à toutes les personnes qui ont bien voulu m'apporter leur soutien moral et matériel dans l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

À ma sœur, merci pour votre soutien.

À mes chers parents,

Je dédie ce mémoire à vous, mes plus grands soutiens et sources d'inspiration. Votre amour inconditionnel, votre dévouement et votre encouragement constant ont été les fondements de ma réussite.

Depuis mes premiers pas dans l'éducation jusqu'à ce moment crucial de ma vie, vous avez été mes guides, mes mentors et mes piliers. Votre foi en moi, vos encouragements chaleureux et votre confiance indéfectible ont nourri ma confiance en moi et m'ont donné la force de surmonter les obstacles.

Vos sacrifices personnels et votre volonté de tout faire pour m'offrir les meilleures opportunités d'apprentissage ont été des témoignages éloquentes de votre amour incommensurable. Vous avez toujours cru en mes capacités, même lorsque je doutais de moi-même, et vous m'avez montré qu'aucun rêve n'est trop grand à atteindre.

Vous m'avez enseigné les valeurs de l'effort, de la persévérance et de l'intégrité, des qualités qui m'ont guidé tout au long de mes études. Votre exemple d'humilité, de travail acharné et de dévouement m'a inspiré à donner le meilleur de moi-même et à poursuivre mes objectifs avec passion.

Ce travail est donc le fruit de votre amour et de vos sacrifices. Votre présence aimante, vos encouragements constants et votre soutien financier ont rendu possible cette réalisation.

C'est avec une immense gratitude que je vous dédie ce travail.

Je suis profondément reconnaissant d'avoir été béni par des parents aussi aimants, attentionnés et dévoués que vous. Votre soutien inconditionnel a été le moteur de ma réussite et je ne pourrais jamais assez-vous remercier pour tout ce que vous avez fait pour moi

Résumé

La pollution des écosystèmes par les métaux lourds, notamment le plomb. C'est une préoccupation croissante résultant de diverses sources naturelles ou anthropiques. Cette contamination présente des risques importants pour l'écosystème, tandis que les bactéries du sol possèdent des capacités génétiques inhérentes et des mécanismes de résistance palliatifs des effets toxiques des métaux lourds. En exploitant ces microorganismes, la bioremédiation se présente comme une technique durable pour dépolluer les sols contaminés par ces toxiques. De plus, en prenant en compte les mécanismes de résistance des bactéries au plomb et leur rôle dans la bioremédiation, il est possible de développer des approches efficaces pour remédier cette contamination. Ces approches optimisent les techniques de bioremédiation et favorisent la restauration écologique et durable des sols contaminés par le plomb, en préservant l'environnement et protégeant ainsi la santé publique.

Mots clés : Plomb, métaux lourds, bactéries, mécanismes de résistance, bioremédiation

Abstract

The pollution of ecosystems by heavy metals, especially lead, is a growing concern resulting from various natural or anthropogenic sources. This contamination poses significant risks to the ecosystem, while soil bacteria possess inherent genetic capabilities and palliative resistance mechanisms against the toxic effects of heavy metals. By harnessing these microorganisms, bioremediation emerges as a sustainable technique to detoxify soils contaminated with these toxins. Furthermore, by considering bacteria's lead resistance mechanisms and their role in bioremediation, it is possible to develop effective approaches to address this contamination. These approaches optimize bioremediation techniques and promote the ecological and sustainable restoration of lead-contaminated soils, thereby preserving the environment and protecting public health.

Keywords: Lead, heavy metals, bacteria, resistance mechanisms, bioremediation.

ملخص

يشكل تلوث الأنظمة البيئية بسبب المعادن الثقيلة وخاصة الرصاص، مصدر قلق متزايد ناتج عن مصادر طبيعية أو بشرية مختلفة. ويشكل هذا التلوث مخاطر كبيرة على النظام البيئي، في حين تمتلك بكتيريا التربة قدرات وراثية متأصلة وآليات مقاومة ضد الآثار السامة للمعادن الثقيلة. ومن خلال تسخير هذه الكائنات الحية الدقيقة، يظهر العلاج الحيوي كتقنية مستدامة لإزالة السموم من التربة الملوثة بهذه السموم. علاوة على ذلك، من خلال النظر في آليات مقاومة الرصاص في البكتيريا ودورها في المعالجة الحيوية، من الممكن تطوير نهج فعالة لمعالجة هذا التلوث. وتعمل هذه النهج على تحسين تقنيات المعالجة الحيوية وتعزيز الترميم البيئي والمستدام للتربة الملوثة بالرصاص، وبالتالي الحفاظ على البيئة وحماية الصحة العامة.

الكلمات المفتاحية: الرصاص، المعادن الثقيلة، البكتيريا، آليات المقاومة، المعالجة الحيوية

Liste des figures et tableau

Figure 1: Types de polluants des sols.....	5
Figure 2: Tableau périodique des éléments chimiques, mettant en évidence les éléments considérés comme des métaux lourds	7
Figure 3: Les propriétés de plomb.....	10
Figure 4: Equilibre entre la production de ROS et la défense subséquente présentée par les antioxydants en présence de métaux lourds	12
Tableau 1: Types et effets de toxicité du plomb sur la santé.....	10

Tables des matières

Remerciements

Dédicaces

Résumés

Liste des figures et tableau

Introduction-----1

Chapitre 1 Pollution des écosystèmes et métaux lourds

1. Pollution environnementale	2
2. Types de pollution environnementale	2
2.1. Pollution d'eau	2
2.2. Pollution d'air	3
2.3. Pollution de sols	4
2.3.1. Types des polluants des sols	4
2.3.2. Sources des polluants des sols	5

Chapitre 2 Métaux lourds

1. Définition des métaux lourds	7
2. Classification des métaux lourds	7
2.1. Métaux lourds essentiels	7
2.2. Métaux lourds toxiques	8
2.2.1. Cadmium	8
2.2.2. Arsenic	8
2.2.3. Chrome	8
2.2.4. Plomb	9
2.2.4.1. Propriétés physiques et chimiques de plomb	9
2.2.4.2. Biodisponibilité du plomb	10
2.2.4.3. Toxicité du plomb	10
2.2.4.4. Mécanisme de toxicité de plomb	11
2.3. Dépollution des sols	12

Chapitre 3 Bioremédiation des sols

1. Bioremédiation	13
1.1. Bioremédiation <i>in situ</i>	13
1.1.1. Bioremédiation intrinsèque	13
1.1.2. Bioremédiation <i>in-situ</i> assistée	14
1.1.2.1. Biostimulation	14
1.1.2.2. <i>Bio-sparging</i>	14
1.1.2.3. <i>Bio-venting</i>	15
1.1.2.4. Bio-augmentation	15
1.2. Bioremédiation <i>ex-situ</i>	16
1.2.1. <i>Land farming</i>	16
1.2.2. Compostage	17
1.2.3. Bio-piles de sols	17
1.2.4. Bioréacteurs	17
1.3. Remédiation bactérienne	17
2. Interaction des microorganismes et les métaux lourds	18
2.1. Interaction bactérie et plomb	18
2.2. Exemples des bactéries résistantes au plomb	18
2.2.1. <i>Bacillus cereus</i>	18
2.2.2. <i>Bacillus subtilis</i>	19
2.2.3. <i>Arthrobacter</i>	19
2.2.4. <i>Cupriavidus metallidurans</i>	20
2.3. Mécanismes de résistance des bactéries au plomb	20
2.3.1. Barrières extracellulaires	20
2.3.2. Transport actif des ions métalliques	21
2.3.3. Séquestration	21
2.3.3.1. Liaison aux métallothionéines	21
2.3.3.2. Liaison aux sidérophores	21
3. Avantages de la bioremédiation	22
4. Inconvénients de bioremédiation	22
Conclusion	24
Références bibliographiques	25

Introduction

Le sol, en tant que ressource naturelle vitale, jouent un rôle essentiel dans le maintien de la biodiversité, de la productivité agricole et de l'équilibre écologique. Cependant, ce précieux écosystème est de plus en plus menacé par la pollution, en particulier la contamination par les métaux lourds tels que le plomb. Cette situation a des implications néfastes pour la santé humaine et la durabilité environnementale.

La bioremédiation apparaît comme une approche prometteuse. Elle consiste à utiliser divers microorganismes bactéries et/ou champignons résistants afin de neutraliser ou d'éliminer les substances polluantes en raison de leurs différentes capacités métaboliques (Kumar *et al.*, 2011; Yadav et Hassanizadeh, 2011).

Les bactéries résistantes au plomb peuvent être utilisées dans cette stratégie pour restaurer les sols contaminés par ce métal, par le biais de la bio-augmentation ou la biostimulation. Ces bactéries possèdent des mécanismes de résistance qui leur permettent de survivre et de se développer dans des environnements contaminés. La connaissance de ces mécanismes de résistance permet d'optimiser les techniques de la bioremédiation et de favoriser la diminution de la présence de plomb dans les sols contaminés, contribuant ainsi à la préservation de l'environnement et à la protection de la santé publique. Plusieurs d'espèces bactériennes sont connus pour la décontamination du plomb telles que *Pseudomonas spp.*, *Staphylococcus spp.* et *Cupriavidus metallidurans* (Dave *et al.*, 2020).

Dans cet optique, s'inscrit l'objectif de ce travail qui se focalise sur une étude théorique de bioremédiation des sols contaminés par les métaux lourds, particulièrement le plomb. Le premier chapitre de ce travail aborde la pollution des écosystèmes par les métaux lourds. Tandis que le deuxième chapitre présente des généralités sur les propriétés physicochimiques et la toxicité des métaux lourds, notamment le plomb. Le troisième chapitre se concentre sur les mécanismes de résistance des bactéries au plomb, ainsi que sur la bioremédiation et l'utilisation des bactéries pour la dépollution des sols.

Chapitre 1

1. Pollution environnementale

La pollution environnementale désigne l'introduction de substances polluantes dans les écosystèmes, entraînant ainsi des effets néfastes sur les organismes vivants. Ces polluants peuvent être d'origine anthropique ou naturelle. Ils peuvent se présenter sous différentes formes : solides, liquides ou gazeuses (Cachada *et al.*, 2018).

La présence de métaux lourds en tant que polluants dans l'environnement pose des risques significatifs. Ils peuvent contaminer les sources d'eau, en affectant la vie aquatique et potentiellement en entrant dans la chaîne alimentaire, et posant ainsi des risques pour la santé humaine. De plus, les métaux lourds présents dans l'air peuvent être inhalés, entraînant des problèmes respiratoires et d'autres problèmes de santé chez l'homme et les animaux. De même, la contamination des sols par les métaux lourds peut avoir des impacts à long terme, sur la croissance des plantes et la productivité agricole (Havugimana *et al.*, 2017 ; Cachada *et al.*, 2018).

2. Types de pollution environnementale

2.1. Pollution d'eau

Lorsque la qualité ou la composition de l'eau sont altérées naturellement ou par des activités humaines, l'eau peut être considérée comme polluée. La pollution de l'eau se produit lorsque la présence d'une substance dangereuse (physique, chimique ou biologique) dépasse les quantités admissibles, ce qui rend l'eau impropre à la consommation, à la baignade, à la cuisine ou à d'autres utilisations similaires (Owa, 2013).

Les polluants de l'eau peuvent être classés en deux catégories les polluants organiques (insecticides, herbicides, bactéries, composés organiques volatils) et inorganiques (métaux lourds, limon, engrais, déchets chimiques). Ces polluants résultent stations d'épuration des eaux usées, et les déchets, les mauvaises pratiques agricole et les centrales thermiques à combustions fossiles par l'intermédiaire de l'air (Singh et Gupta, 2016).

Les métaux lourds, tels que le plomb, sont libérés dans l'atmosphère en raison des activités industrielles, ces rejets déposent ensuite dans les eaux environnantes, ce qui entraîne la contamination de l'eau (Chowdhury *et al.*, 2016).

Selon Zamora-Ledezma *et al.* (2021) environ 40% des lacs et rivières de la planète sont pollués par des métaux lourds, ce qui peut avoir de graves conséquences écologiques.

La concentration métallique dans les eaux est une préoccupation majeure en raison de ses effets nuisibles sur l'environnement et la santé humaine. Différentes méthodes de traitement, telles que l'adsorption, la précipitation, l'échange d'ions et la filtration membranaire, permettent de les éliminer des eaux (Qasem *et al.*, 2021 ; Singh *et al.*, 2023).

2.2. Pollution d'air

L'air est principalement constitué de gaz tels que l'oxygène, l'azote, l'argon, le dioxyde de carbone, l'hydrogène, le néon, l'hélium, le krypton et le xénon. Néanmoins, d'autres gaz existent sous formes de traces tels que le méthane, l'ammoniac, le monoxyde de carbone, l'oxyde d'azote et de l'ozone (Baumbach, 2012).

La pollution atmosphérique est une notion complexe, qui a débuté avec l'utilisation de combustibles, car toutes les émissions d'origine humaine dans l'air modifient la composition chimique de l'atmosphère naturelle (Daly et Zannetti, 2007).

Les substances qui altèrent la composition naturelle de l'air sont désignées sous le terme de polluants atmosphériques. Ces polluants peuvent provenir de diverses sources, telles que les émissions industrielles et les activités agricoles (Baumbach, 2012).

La contamination de l'air par les matières particulaires (PM) est un défi environnemental majeur. La taille fine de ces particules joue un rôle essentiel dans l'accumulation des métaux lourds et l'absorption des autres composés solides et liquides présents dans le sol (Daly et Zannetti, 2007 ; Kumari *et al.*, 2021).

Les métaux lourds jouent un rôle essentiel en tant que composants majeurs des matières particulaires dans l'environnement atmosphériques. Cependant ils exhibent des caractéristiques complexes en matière de pollution (Li *et al.*, 2013).

La pollution de l'air causée par les métaux lourds a des effets néfastes sur la santé humaine, notamment sur le système respiratoire. Les métaux lourds issus des activités humaines sont diffusés largement dans l'air ambiant, ils sont associés à l'induction et à l'exacerbation de maladies respiratoires telles que l'asthme, la maladie pulmonaire obstructive chronique et le cancer du poumon (Honda *et al.*, 2015).

2.3. Pollution de sols

Le sol est formé par l'altération des matériaux rocheux. Il est également le résultat de l'accumulation de matières minérales transportées par l'eau ou le vent (Nortcliff *et al.*, 2006).

La biodiversité des sols désigne la gamme d'organismes vivants présents dans le sol. Ils se caractérisent par une variété de traits fonctionnels et de modes de vie, et dont leurs tailles varient de quelques micromètres pour les bactéries à plusieurs centimètres pour les vers de terre (Turbé *et al.*, 2010 ; Nielsen *et al.*, 2015). Les organismes du sol sont classés en quatre groupes principaux selon leurs tailles : la macrofaune, la mésofaune, la microfaune et la microflore (Barot, 2017).

La pollution du sol, connue également sous le terme de contamination ou de dégradation des sols, désigne la présence de substances nocives ou de contaminants dans le sol à des concentrations pouvant avoir des effets néfastes sur l'environnement, la santé humaine et l'équilibre des écosystèmes (Havugimana *et al.*, 2017 ; Cachada *et al.*, 2018).

2.3.1. Types des polluants des sols

Les polluants du sol sont divisés en deux catégories : les polluants organiques et les polluants inorganiques (figure 1).

- Les polluants organiques sont considérés comme un enjeu environnemental mondial en raison de leur persistance, de leur potentiel de bioaccumulation, de leur toxicité, de leur potentiel carcinogène ou mutagène, de leur utilisation massive ou d'émissions continues et de leur mobilité dans l'environnement. Ils comprennent divers groupes tels que les pesticides, les hydrocarbures, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs), les polychlorobiphényles (PCBs), les dioxines polychlorées dibenzo-p-dioxines (PCDD), les dibenzofuranes polychlorés, les biphényles polybromés, les éthers diphenyl polybromés, les tensioactifs et les produits pharmaceutiques (Cachada *et al.*, 2018).

- Les polluants inorganiques comprennent les métaux, les métalloïdes, les non-métaux, les actinides et les halogènes. Certains de ces éléments ont tendance à former des composés organométalliques qui sont lipophiles et hautement toxiques. Ils sont ubiquitaires et la plupart d'entre eux se trouvent à l'état de trace avec des concentrations inférieures à 100 mg Kg⁻¹. Un autre groupe important de contaminants inorganiques sont les radionucléides. Ce sont des isotopes instables qui peuvent subir une désintégration radioactive ce qui le rend

nocifs, Les radionucléides qui se produisent naturellement, ils émettent une faible radiation qui est inoffensive, tandis que les radionucléides artificiels sont très dangereux (Cachada *et al.*, 2018).

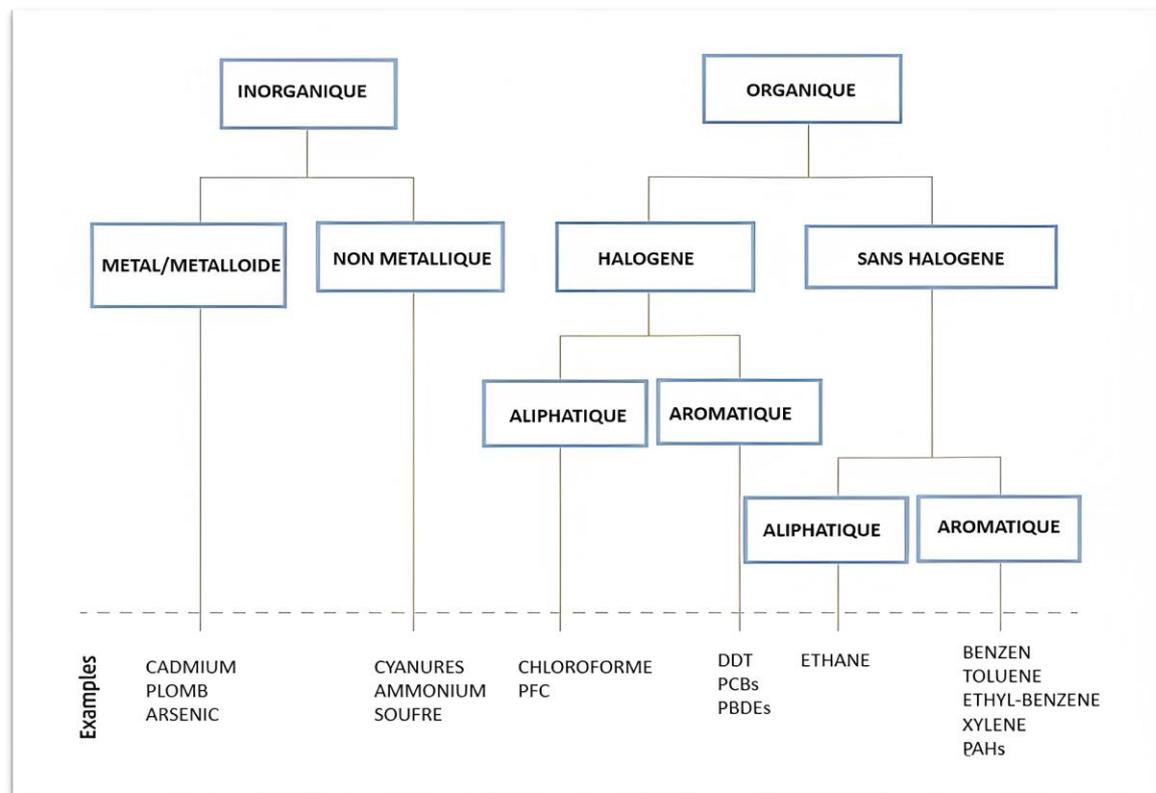


Figure 1 : Types de polluants des sols (FAO et UNEP, 2021)

2.3.2. Sources des polluants des sols

Les sources naturelles responsables de la pollution des sols incluent les séismes, les éruptions volcaniques, les altérations des schémas de précipitations et les changements géographiques (Koul et Taak, 2018). Toutefois, les sols peuvent être contaminés par des activités anthropiques telles que la gestion inadéquate et les traitements défectueux des déchets, les pratiques agricoles, les systèmes de drainage inadéquats et les écoulements contaminés, l'accumulation excessive de déchets peut augmenter la charge bactérienne du sol, entraînant par la suite la production du méthane et la génération d'odeurs désagréables (Mishra *et al.*, 2016).

La qualité du sol peut être altérée par d'autres contaminants notamment les métaux lourds, ce qui le rend inapproprié pour la culture des aliments. L'utilisation de tel sol contaminé pour cultiver des aliments entraînant généralement des rendements plus faibles,

ce qui peut causer d'avantages problèmes de santé publiques à court et à long terme, tels que des maladies congénitales et chroniques, ce qui répercute sur le patrimoine génétique de l'organisme (Mishra *et al.*, 2016). Ces polluants altèrent la composition du sol et les types de micro-organismes qui y vivent, ce qui peut changer l'écosystème dans son ensemble (Soriano, 2014).

Chapitre 2

1. Définition des métaux lourds

Les métaux lourds sont des éléments qui présentent des caractéristiques métalliques incluant la capacité de se déformer sans se rompre, la malléabilité, la capacité à conduire la chaleur et l'électricité, ainsi que la spécificité aux ligands et la stabilité des cations. Ils ont une densité supérieure à 5.0 g/cm³ et un numéro atomique supérieur à 20, ce qui les distingue des autres éléments (Raskin *et al.*, 1994) (figure 2).

Figure 2 : Tableau périodique des éléments chimiques, mettant en évidence les éléments considérés comme des métaux lourds (Pourret et Hursthouse, 2019). Les éléments en rouge sont : Al, Si, P, S, Cl, Ar, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Xe, Cs, Ba, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn, Rf, Db, Sg, Bh, Hs, Mt, Ds, Rg, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr.

Figure 2 : Tableau périodique des éléments chimiques, mettant en évidence les éléments considérés comme des métaux lourds (Pourret et Hursthouse, 2019)

2. Classification des métaux lourds

2.1. Métaux lourds essentiels

Les métaux lourds essentiels ou oligoéléments sont des éléments métalliques tels que le cobalt, le cuivre, le fer, le manganèse, le molybdène, le nickel, le vanadium et le zinc. Ils sont nécessaires aux organismes vivants en très faibles quantités. Cependant, une exposition excessive à ces métaux peut causer des dommages aux organismes et entraîner des conséquences néfastes pour leur santé (Chibuike et Obiora, 2014).

2.2. Métaux lourds toxiques

Les métaux lourds toxiques ont un caractère polluant avec des effets nocifs pour les organismes vivants, car ils ont des effets néfastes sur la santé même à de faibles concentrations, tels que le plomb, le mercure, le cadmium, l'arsenic et le chrome (Behanzin *et al.*, 2014).

2.2.1. Cadmium

C'est un métal blanc argenté avec une teinte bleue, le cadmium (Cd) est mou, malléable, ductile, brillant et lustré. Il est insoluble dans les alcalis mais se ternit lorsqu'il est exposé à l'air, et soluble dans les acides. Il a un poids moléculaire de 112,41 g/mol, un point de fusion de 321 °C ou 568 °C, un point d'ébullition de 765 °C ou 960 °C, et une densité de 8,65 g/cm³ à 20 °C ou 4,047 g/cm³ à 25 °C et il n'a pas d'odeur (Genchi *et al.*, 2020).

Le cadmium présent sous forme de fumées (CdO) ou de composés utilisés dans diverses industries. C'est un élément cancérigène car il affecte négativement les systèmes corporels, en particulier les poumons, les os et les reins. (Ellen et Costa, 2010).

2.2.2. Arsenic

Les propriétés physico-chimiques de l'arsenic (As) comprennent une masse atomique de 33 g/mol, une densité de 2,03 g/cm³ à 18 °C pour la forme jaune ou 5,7 g/cm³ à 14 °C pour la forme grise. Son point de fusion est de 814 °C, et son point d'ébullition est de 615 °C. L'arsenic est un solide cassant de couleur gris acier et présente une faible conductivité thermique et électrique à l'état élémentaire. Étant donné que l'arsenic est un métalloïde, il possède à la fois des caractéristiques métalliques et non métalliques (Site internet, 2023).

L'arsenic (As) est un solide blanc à gris qui se trouve naturellement dans l'eau et le sol. Il peut causer des dommages à plusieurs organes du corps, voire les yeux, la peau, le foie, les reins, les poumons et le système lymphatique, peut également augmenter le risque du cancer (Fowler *et al.*, 2015).

2.2.3. Chrome

Le chrome (Cr) de couleur gris argenté, c'est un métal solide et cassant qui peut être finement poli. En présence de l'air, il ne ternit pas, mais lorsqu'il est chauffé, il brûle et devient vert. Le chrome possède un numéro atomique de 24, une masse moléculaire de 52, un point de fusion de 1 907 °C, un point d'ébullition de 2 671 °C et une gravité spécifique de

7,20 (à 28 °C). Bien que le chrome soit très répandu dans la croûte terrestre, il ne se trouve jamais sous forme libre dans la nature (Wilbur *et al.*, 2012).

Les composés du chrome et des chromates peuvent causer des dommages au niveau de la peau, les yeux, le sang et le système respiratoire. L'exposition au chrome provient de diverses industries, telles que la fabrication d'acier inoxydable, la peinture pigmentée et le tannage du cuir. Le niveau des dommages dépend de la dose et de la durée d'exposition (Langård et Costa, 2015).

2.2.4. Plomb

Le plomb (Pb) est un métal brillant argenté, légèrement bleuâtre dans une atmosphère sèche. Il commence à ternir au contact de l'air, formant ainsi un mélange complexe (Jaishankar *et al.*, 2014).

2.2.4.1. Propriétés physiques et chimiques de plomb

Le plomb est un métal lourd, malléable et doux. Il a une densité plus élevée que la plupart des matériaux courants. Sa masse atomique est de 207,2 g/mol, son point de fusion est de 327°C. Tandis que son point d'ébullition est de 1755°C. La densité du plomb est de 11340 en unités SI à 20°C (figure 3). Le plomb naturel se compose de quatre isotopes stables: le plomb-204, le plomb-206, le plomb-207 et le plomb-208 (Organisation Mondiale de la Santé, 1995).

La plupart des sels de plomb (II), sauf le nitrate de plomb et le chlorate de plomb ont une faible solubilité, tels que le sulfure de plomb et les oxydes de plomb. De plus, certains sels organiques de plomb sont insolubles, tels que l'oxalate de plomb (Skerfving et Bergdahl, 2015).

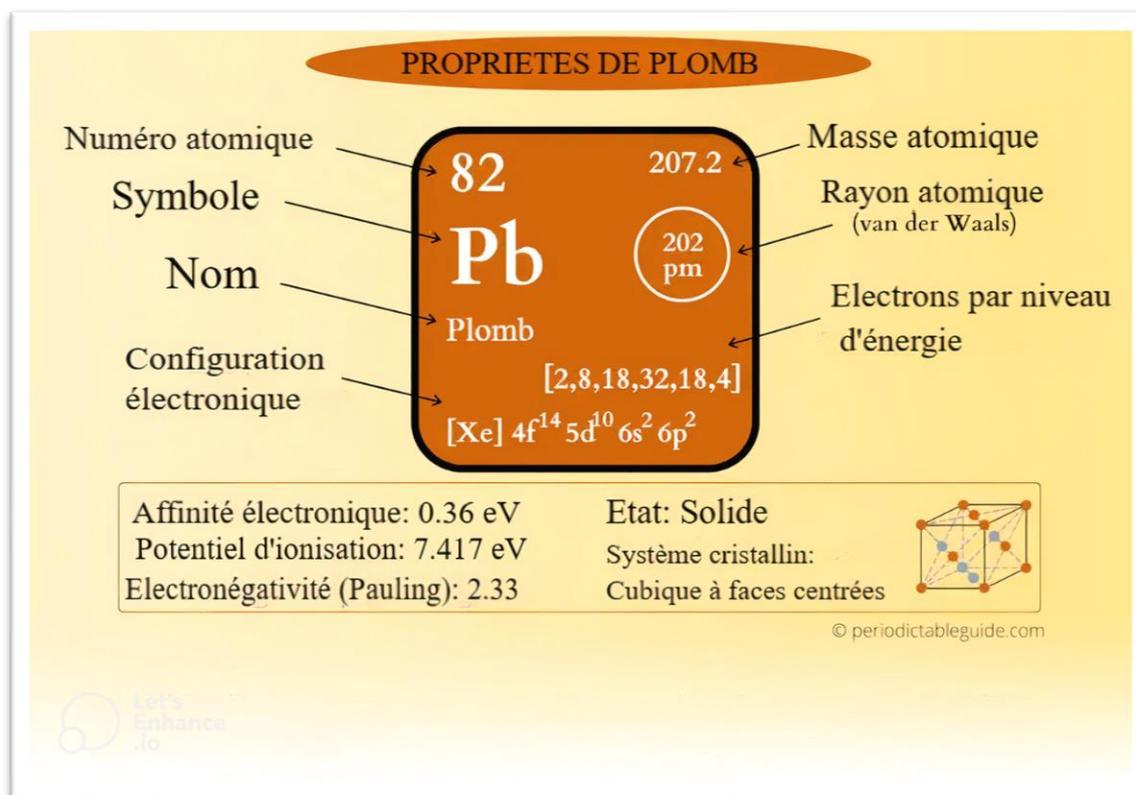


Figure 3: Les propriétés de plomb (Site internet, 2021)

2.2.4.2. Biodisponibilité du plomb

Les principaux facteurs qui contrôlent la biodisponibilité du plomb dans le sol sont, le pH, le potentiel de rédox et la texture du sol. Les minéraux du sol comme le Mn et le Fe affectent également la solubilité du Pb. De plus, les nutriments, le carbone organique et l'O₂ qui sont des éléments essentiels pour la croissance et le métabolisme microbien qui peuvent influencer la biodisponibilité (Kumar *et al.*, 2020).

2.2.4.3. Toxicité du plomb

Le plomb est un métal lourd très toxique. Cependant, il est largement utilisé dans l'industrie, l'agriculture et les produits de consommation. L'exposition au plomb peut se produire par inhalation, ingestion et absorption cutanée (Garnier, 2005).

Les effets de l'exposition au plomb peuvent être aigus ou chroniques, en fonction de la durée et de la fréquence d'exposition (Garnier, 2005 ; Organisation Mondiale de la Santé, 1995).

Tableau 1: Types et effets de toxicité du plomb sur la santé (Amara *et al.*, 2016).

Types de toxicité du plomb	Effets sur la santé de la toxicité du plomb.
Toxicité aiguë	Des problèmes digestifs. Des atteintes rénales et hépatiques. Des perturbations du système nerveux central. Des altérations de la synthèse de l'hème.
Toxicité chronique	Des lésions du système nerveux central et périphérique. Une anémie microcytaire hypochrome. Des atteintes rénales. Une croissance osseuse altérée chez les enfants.

2.2.4.4. Mécanisme de toxicité de plomb

Le processus de toxicité du plomb est principalement dû à son caractère ionique, où les ions de plomb peuvent remplacer d'autres cations bivalents tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} et des cations monovalents comme Na^+ . Cette toxicité ionique entraîne des changements significatifs dans divers processus biologiques tels que le métabolisme, l'adhérence cellulaire, la signalisation intra- et intercellulaire, le repliement et la maturation des protéines, l'apoptose, le transport ionique, la régulation enzymatique et la libération de neurotransmetteurs. Le plomb peut remplacer le calcium même à des concentrations de picomolaires, ce qui affecte la protéine kinase C, le régulateur de l'excitation neuronale et du stockage de la mémoire (Flora *et al.*, 2008).

Le plomb métallique provoque une toxicité dans les cellules vivantes en augmentant le niveau des espèces réactives de l'oxygène (ROS) et en diminuant le niveau d'antioxydants, comme la glutathion (Jaishankar *et al.*, 2014) (figure 4).

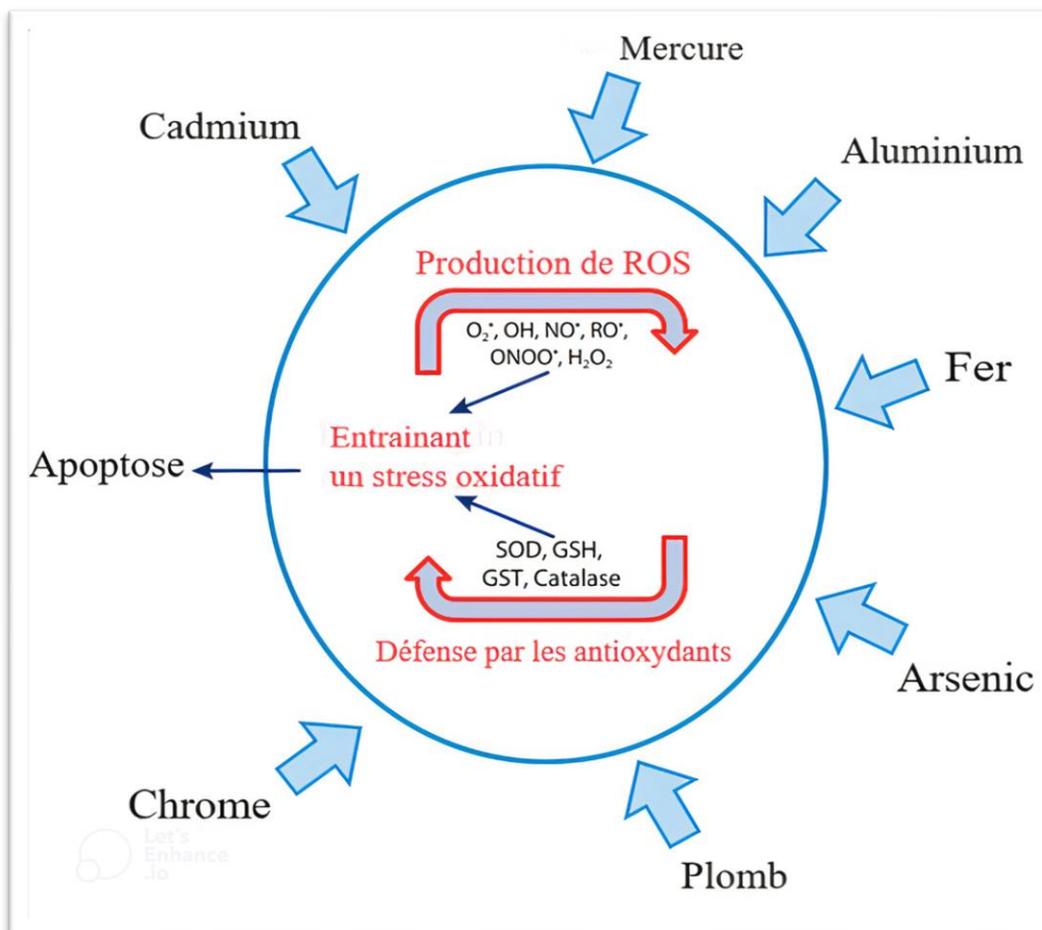


Figure 4: Équilibre entre la production de ROS et la défense subséquente présentée par les antioxydants en présence de métaux lourds (Jaishankar et al., 2014)

2.3. Dépollution des sols

La décontamination des sols représente une étape cruciale pour réhabiliter les sols pollués. Les méthodes de décontamination utilisées dépendent du type et du niveau de contamination des sols. Elles comprennent généralement des techniques de remédiation physique, chimique et biologique (Nouri et Haddioui, 2016).

Les méthodes physiques de dépollution des sols comprennent l'excavation et le retrait des sols contaminés, la culture en place et lavage des sols. Les méthodes chimiques impliquent l'utilisation d'agents chimiques pour éliminer ou neutraliser les contaminants, tels que l'utilisation d'agents oxydants pour décomposer les contaminants organiques ou d'agents chélatants pour se lier aux métaux lourds. Les méthodes biologiques, quant à elles, utilisent des microorganismes et des plantes pour dégrader ou absorber les contaminants. Celles-ci incluent la bioremédiation et la phytoremédiation, qui peuvent être utilisées pour

le traitement soit des contaminants organiques soit des métaux lourds (Dhaliwal *et al.*, 2020 ; Lombi et Hamon, 2005)

Chapitre 3

1. Bioremédiation

La bioremédiation est une technique qui utilise les microorganismes pour éliminer ou piéger les contaminants, tels que les métaux lourds, les produits agrochimiques et d'autres substances toxiques organiques. Cependant, la réussite de la bioremédiation des métaux lourds dépend des capacités métaboliques spécifiques des microorganismes utilisés (Dixit *et al.*, 2015).

Les facteurs environnementaux jouent un rôle crucial dans le succès des processus de bioremédiation. Ils comprennent la disponibilité des nutriments pour les microorganismes, le pH optimal et la température qui peuvent influencer l'activité des microorganismes, ainsi que la disponibilité des accepteurs d'électrons (Alori *et al.*, 2022).

La bioremédiation peut être classée en deux catégories, bioremédiation *in-situ* et bioremédiation *ex-situ* (Vidali, 2001).

1.1. Bioremédiation *in situ*

La bioremédiation *in situ* est le traitement biologique des sols contaminés sur le site de contamination, sans le déplacement des matériaux pollués. Selon la disponibilité des nutriments, des donneurs et des accepteurs d'électrons, les microorganismes ont le potentiel de convertir les polluants en formes non toxiques ou moins dangereuses. Pour la croissance microbienne, l'azote et le phosphore sont des nutriments fréquemment nécessaires, alors que l'oxygène agit comme le principale accepteur d'électrons dans les processus de bioremédiation (Megharaj *et al.*, 2011).

On peut distinguer deux catégories de la bioremédiation *in-situ* : la bioremédiation intrinsèque et la bioremédiation *in-situ* assistée (Sayqal et Ahmed, 2021).

1.1.1. Bioremédiation intrinsèque

Dans ce processus, les sols contaminés sont dépollués sans l'aide de facteurs externes. Par conséquent, cela est moins coûteux et implique la stimulation des populations microbiennes locales ou naturellement présentes dans le site contaminé (Riseh *et al.*, 2022).

Pour que la bioremédiation intrinsèque soit réussie, certaines conditions et facteurs doivent être présents. Le pH et la quantité de divers minéraux présents dans le sol ont un impact sur l'activité des microorganismes. De plus, leur croissance est affectée par la présence de métaux lourds (Dar et Naseer, 2022).

1.1.2. Bioremédiation *in-situ* assistée

La bioremédiation *in-situ* assistée est une approche qui implique l'introduction de microorganismes spécifiques sur le site de contamination. Des microorganismes génétiquement modifiés sont utilisés pour accélérer le processus de dégradation en améliorant les conditions physico-chimiques, favorisant ainsi la croissance des microorganismes impliqués dans la dégradation (Sharma, 2020).

1.1.2.1. Biostimulation

La biostimulation consiste à ajouter des nutriments pour stimuler la croissance et l'activité métabolique des microorganismes indigènes ce qui augmente l'activité des microorganismes capables de réduire ou d'éliminer la pollution. (Sayqal et Ahmed, 2021). L'utilisation de cette technique peut contribuer à la bioremédiation de certains métaux lourds, notamment le plomb (Pb) (Antizar-Ladislao, 2010).

Le type de métal lourd, les espèces bactériennes et les facteurs environnementaux ont tous un impact sur l'efficacité de la biostimulation. La température, le pH et l'oxygène affectant également l'activité microbienne ce qui répercute sur l'efficacité de ce processus (Antizar-Ladislao, 2010).

D'après l'étude réalisée par Oziegbe *et al.* (2021), l'ajout d'une source de carbone et une augmentation du pH peuvent améliorer l'efficacité des bactéries indigènes, telles que *Klebsiella edwardsii*, dans le processus de bioremédiation.

1.1.2.2. *Bio-sparging*

Une technique de bioremédiation sur site, vise à traiter la pollution par des métaux lourds. Elle consiste à injecter de l'air ou de l'oxygène dans le sol, à un débit élevé, directement dans la zone saturée pour accélérer la dégradation des polluants par des microorganismes aérobies. En créant des canaux d'air dans la couche phréatique pour atteindre les zones non peuplées du sol. Le *bio-sparging* permet également de réduire la consommation d'énergie. Pour créer les canaux nécessaires dans le sol, des impulsions d'air sont nécessaires (Sayqal et Ahmed, 2021 ; Williams, 2006).

L'efficacité du *bio-sparging* dépend de plusieurs facteurs, notamment le type de contaminant, les caractéristiques du sol, la présence de la nappe phréatique et la concentration et la répartition des contaminants dans le sol (Volarić *et al.*, 2021).

1.1.2.3. *Bio-venting*

L'approche du *bio-venting* est de favoriser la dégradation aérobie des polluants par les microorganismes indigènes en injectant de l'air ou de l'oxygène dans le sol. Le *bio-venting* utilise des débits d'air faibles pour juste fournir assez d'oxygène pour soutenir l'activité microbienne dans la zone non saturée. La présence d'oxygène stimule le développement et l'activité des microorganismes aérobies qui utilisent les polluants organiques comme source de carbone, ce qui conduit à la dégradation de ces polluants en composés moins toxiques (Kensa, 1970).

L'efficacité du *bio-venting* en tant que méthode de remédiation des métaux lourds, dépend de plusieurs facteurs, tels que le type et l'étendue de la contamination, les caractéristiques du sol et la communauté microbienne présente sur le site contaminé (Kapahi et Sachdeva, 2019).

Le *bio-venting* peut être combiné à d'autres techniques de bioremédiation telles que la biostimulation. Cela consiste à favoriser la croissance et l'activité des microorganismes indigènes capables de réduire la mobilité et la biodisponibilité des métaux lourds dans le sol (Sayqal et Ahmed, 2021).

1.1.2.4. *Bio-augmentation*

La bio-augmentation est une méthode de bioremédiation qui implique l'introduction de microorganismes pour accélérer la dégradation des polluants dans un environnement contaminé, en particulier les métaux lourds. Ces dernières années, cette approche innovante a suscité l'attention de nombreux chercheurs en raison de leur potentiel élevé à remédier les sols contaminés de manière écologique, sans recourir à des méthodes coûteuses et potentiellement nuisibles pour l'environnement (Zanganeh *et al.*, 2022).

L'efficacité de la bio-augmentation dépend de divers facteurs, notamment du type de microorganisme utilisé, de la concentration des polluants et des conditions environnementales. Plusieurs études ont rapporté des applications réussies de la bio-augmentation pour la remédiation, de sols contaminés par les métaux lourds (Hassan *et al.*, 2022 ; Zanganeh *et al.*, 2022).

La bio-augmentation peut également être combinée avec d'autres techniques de bioremédiation telles que la biostimulation et la phytoremédiation pour améliorer l'efficacité de la remédiation (Tufail *et al.*, 2022).

Selon l'étude réalisée par Nath *et al.* (2018), les bactéries *Pseudomonas aeruginosa* SN4 et SN5 se sont révélées efficaces pour réduire l'impact négatif de la contamination par le plomb et le cadmium dans le sol.

D'après l'étude de Yahaghi *et al.* (2018), les deux bactéries, *Brevibacterium frigoritolerans* YSP40 et *Bacillus paralicheniformis* YSP151, inoculées à *Brassica juncea* (plante de moutarde couramment utilisé en phytoremédiation), ont présenté une capacité de solubilisation du Pb et par conséquent une accumulation élevée de Pb ce qui a favorisé la croissance de la plante hôte en augmentant la longueur de ces racines, ce qui suggère que ces bactéries améliorent l'efficacité de la phytoremédiation dans les sols contaminés par des métaux lourds.

1.2. Bioremédiation *ex-situ*

L'objectif de la bioremédiation *ex-situ* est d'éliminer les polluants des zones contaminées et de les transporter vers un autre lieu pour leur traitement. Les microorganismes indigènes du sol agissent en tant qu'agents de bioremédiation. Cette méthode peut être modifiée en modifiant les conditions de décomposition et en déterminant les conditions idéales nécessaires à la croissance des microorganismes (Azubuiké *et al.*, 2016 ; Dar et Naseer, 2022).

1.2.1. *Land farming*

Le *land farming* est une méthode de bioremédiation *ex situ* utilisée pour traiter les sols contaminés par des métaux lourds. Cette technique consiste à étaler le sol contaminé sur une zone de traitement, où les microorganismes du sol dégradent les contaminants (Sivakumar *et al.*, 2014).

Les microorganismes impliqués dans le *land farming* peuvent être soit indigènes du sol, soit introduits par biostimulation ou bio-augmentation. Le succès de cette technique dépend de la disponibilité de nutriments, la teneur en oxygène, la température, le pH du sol, ainsi que la concentration et la distribution des contaminants dans le sol (Choudhury et Chatterjee, 2022 ; Paul *et al.*, 2021).

L'efficacité de *land farming* dépend fortement de différents facteurs tels que le type de contaminant, la composition du sol, le climat et l'activité microbienne (Koul et Taak, 2018).

1.2.2. Compostage

L'objectif de cette méthode est de favoriser la croissance des populations bactériennes capables de décomposer les polluants présents dans le sol. Elle consiste à mélanger le sol contaminé avec des amendements organiques non dangereux, généralement d'autres déchets solides adaptés aux applications de compostage (Tomei et Daugulis, 2013).

1.2.3. Bio-piles de sols

Les bio-piles sont une méthode de remédiation qui utilise un système de traitement *ex-situ*. Elle repose sur la dégradation microbienne des contaminants, notamment les composants pétroliers ou les métaux lourds tels que le Pb. Elle est facilitée par l'aération et l'ajout de nutriments. Le système de bio-piles de sol implique l'empilement de sols excavés dans une zone de traitement équipée d'un système de collecte de lixiviat pour récupérer les eaux de percolation et d'un système d'aération pour favoriser l'activité microbienne aérobie (Madhav *et al.*, 2023 ; Azubuiké *et al.*, 2016).

1.2.4. Bioréacteurs

Dans le système de bioréacteur, le sol contaminé est placé dans un récipient avec un environnement contrôlé, où des microorganismes spécifiques sont ajoutés pour faciliter la dégradation des contaminants (Paul *et al.*, 2021).

L'utilisation de cette technologie dans la bioremédiation *ex-situ* est particulièrement efficace pour les métaux lourds, car les microorganismes peuvent réduire la toxicité des métaux en les immobilisant ou en les convertissant en formes moins toxiques (Kumar *et al.*, 2020 ; Sayqal et Ahmed., 2021). De plus, les espèces bactériennes sont efficaces dans la bioremédiation des métaux lourds en utilisant la technologie du bioréacteur (Kapahi et Sachdeva, 2019).

1.3. Remédiation bactérienne

La remédiation microbienne, également appelée micro-remédiation, est une méthode qui utilise des micro-organismes pour éliminer ou immobiliser les contaminants des sites pollués. Cette technique vise à rendre les polluants moins disponibles pour les systèmes vivants en dégradant les contaminants organiques ou en liant les métaux lourds sous des formes moins biodisponibles. La remédiation microbienne implique l'utilisation de bactéries aérobies et anaérobies (Banerjee *et al.*, 2018).

C'est une méthode très efficace pour la décontamination des sites pollués par des métaux lourds. Elle implique principalement l'adsorption des métaux lourds en solution sur la surface des cellules bactériennes. Les groupes carboxyle, amine, phosphoryle et sulfo présents sur la paroi cellulaire bactérienne peuvent interagir avec les métaux lourds et former des complexes pour réduire leur toxicité (Sreedevi *et al.*, 2022).

2. Interaction des microorganismes et les métaux lourds

La capacité des micro-organismes à tolérer les effets néfastes métaux lourds est appelée résistance microbienne (Sinha *et al.*, 2009). Ils déploient diverses stratégies pour résister aux métaux toxiques, tels que les barrières extracellulaires, le transports actif des ions métalliques (efflux) et la séquestration (González Henao et Ghneim-Herrera, 2021).

2.1. Interaction bactérie et plomb

Le plomb est un métal ubiquitaire dans l'environnement, exerçant un effet néfaste sur tous les organismes vivants, y compris les bactéries (Tiquia-Arashiro, 2018).

L'interaction entre le plomb et les bactéries est influencée par plusieurs facteurs : tels que les espèces bactériennes et le pH du milieu. A un pH très acide, le plomb présente une solubilité élevée, ce qui facilite ainsi sa pénétration à travers les parois cellulaires et son inhibition des réactions métaboliques bactériennes. Il peut désactiver des enzymes essentielles, endommager l'ADN, provoquer un stress oxydatif et altérer les fonctions membranaires. Cependant, les bactéries peuvent développer des mécanismes de résistance spécifiques pour contrer les effets du plomb (Sevak *et al.*, 2021; Chang *et al.*, 1997).

2.2. Exemples des bactéries résistantes au plomb

2.2.1. *Bacillus cereus*

Bacillus cereus est une bactérie à Gram positif, anaérobie facultative, caractérisée par de grandes cellules en forme de bâtonnets, elle a une capacité de former des endospores résistantes à la chaleur. Elle a démontré son potentiel en tant que bactérie résistante au plomb (Schneider *et al.*, 2017).

Selon l'étude réalisée par Codero *et al.* (2018), la bactérie endophyte *Bacillus cereus* isolée des racines de *Paspalum arundinaceum*, poussant sur un sol contaminé au mercure a montré une résistance remarquable à la contamination au plomb. Elle a présenté une phase d'adaptation pouvant aller jusqu'à quatre heures lorsqu'elle était exposée à différentes

concentrations de plomb sous forme de $Pb(NO_3)_2$. La production de sidérophores par *Bacillus cereus* 1DH1LIM suggère son rôle dans la réduction de la toxicité de ce métal lourd. Ces résultats mettent en évidence le potentiel de cette bactérie dans la remédiation des sols contaminés par le plomb.

2.2.2. *Bacillus subtilis*

Bacillus subtilis est une bactérie à Gram positif en forme de bâtonnet, couramment présente dans le sol. C'est une bactérie aérobie à croissance rapide dont les cellules mesurent généralement entre 2 et 6 μm de longueur et moins de 1 μm de diamètre. Elle est résistante au plomb et d'autres métaux lourds, elle est utilisée dans la remédiation des sols contaminés par le plomb (Gupta *et al.*, 2020).

Les résultats de la recherche de Gupta *et al.* (2020) mettent en évidence la capacité de *Bacillus subtilis* à résister à la contamination par le plomb. L'étude révèle que cette bactérie peut supporter des concentrations allant jusqu'à 1000 ppm et que ses parois cellulaires ont la capacité d'adsorber ce métal. Cette résistance est attribuée à la présence de groupes carboxyle et phosphate dans la structure de sa paroi cellulaire. Ces résultats soulignent le potentiel de *Bacillus subtilis* en tant qu'agent puissant pour réduire les niveaux élevés de plomb et son adéquation pour les applications de bioremédiation dans les environnements contaminés.

2.2.3. *Arthrobacter sp*

Les bactéries du genre *Arthrobacter* sont des bactéries à Gram positif, comprenant plusieurs espèces résistantes au plomb. Ces bactéries sont souvent présentes dans le sol, qui ont montré une capacité remarquable à tolérer des niveaux élevés de contamination au plomb (Wang *et al.*, 2018).

Selon la recherche de Wang *et al.* (2018), la bactérie *Arthrobacter* GQ-9 est une bactérie résistante au plomb, isolée d'un sol contaminé par des métaux lourds. Elle présente également une résistance au cadmium, au zinc et au cuivre. De plus, cette bactérie a une capacité d'adsorption élevée, pouvant séquestrer une partie significative des ions plomb sur leur paroi cellulaire. L'implication de différents groupes fonctionnels tels que les groupes hydroxyle, carboxyle, amino, nitrile et sulfhydryle dans la liaison des ions plomb sur la paroi cellulaire. Les résultats de cette recherche soulignent le potentiel d'*Arthrobacter* pour la bioremédiation des métaux lourds, ses mécanismes de résistance peuvent contribuer au développement de stratégies efficaces de dépollution de plomb.

2.2.4. *Cupriavidus metallidurans*

Cupriavidus metallidurans est une bactérie Gram négatif connue pour sa résistance aux métaux lourds, à savoir le plomb. Cette bactérie possède des mécanismes spécifiques qui lui permettent de tolérer et de détoxifier les ions de plomb (Pb) (Von Rozycki et Nies, 2009).

Selon l'étude de Taghavi *et al.* (2009), la bactérie *Cupriavidus metallidurans* CH34 possède des éléments génétiques spécifiques qui lui confèrent une résistance au plomb comme le plasmide pMOL30, qui porte l'opéron pbrUTRABCD. Cet opéron code les gènes pbrT, pbrA, pbrB, pbrC et pbrD structurels qui jouent un rôle majeur dans la résistance aux métaux lourds, en particulier dans la tolérance et la détoxification des ions Pb.

Le gène PbrT agit comme un régulateur en détectant les ions du plomb et en régulant l'expression de l'opéron pbr. PbrA est une ATPase qui expulse activement les ions du plomb hors de la cellule. PbrB est une protéine qui lie les ions du Pb et facilite leur transfert vers le cytoplasme. PbrC transporte les ions plomb à travers la membrane interne, et PbrD est une enzyme qui détoxifie les ions plomb à l'intérieur de la cellule. Ensemble, ces gènes contribuent à la résistance de *Cupriavidus metallidurans* au plomb.

2.3. Mécanismes de résistance des bactéries au plomb

2.3.1. Barrières extracellulaires

Les structures cellulaires telles que la paroi cellulaire, la membranes plasmique et d'autres composants de surface exercent une fonction de protection et limitent la perméabilité des métaux lourds et empêchent leur intrusion à l'intérieure des cellules bactériennes (Tayang et Songachan, 2021).

Les bactéries résistent à la toxicité du plomb grâce aux exo-polysaccharides (EPS). Ces polymères sont composés de polysaccharides, de protéines et de lipides. Ils forment une matrice au tour la cellule bactérienne, créant ainsi une barrière physique entre celle-ci et leur environnement (Sheng *et al.*, 2010).

Les exo-polysaccharides joue un rôle clé dans la formation de biofilm bactérien. C'est un réseau de cohésion pour les cellules bactériennes. Il offre aux bactéries la capacité de faire face à des conditions adverses et de se prémunir contre les conditions difficiles, tels que l'exposition aux métaux lourds (Nwodo *et al.*, 2012 ; Nong *et al.*, 2019).

Les bactéries à Gram-positif, telles que *Cellulosimicrobium*, ont également démontré une résistance notable à divers métaux lourds, notamment le plomb (Bhati *et al.*, 2019).

2.3.2. Transport actif des ions métalliques

Les bactéries mettent en œuvre une variété de mécanismes d'efflux pour expulser les ions de métaux lourds toxiques, comme le plomb, hors du cytoplasme. Ces mécanismes comprennent différentes classes de transporteurs qui travaillent en collaboration pour fournir une résistance multiple contre les métaux lourds (Nies, 2003).

Les ATPases de type P_{1B} ont un rôle crucial dans la résistance bactérienne au plomb. Elles sont responsables de l'élimination d'ions toxiques de plomb (Pb²⁺). Ces ATPases agissent comme des pompes d'efflux de métaux primaires qui maintiennent l'homéostasie des métaux en évitant leur toxicité (Kühlbrandt, 2004).

Cupriavidus metallidurans est un exemple de bactérie qui exploite les ATPases de type P_{1B} spécifiquement l'ATPase de translocation Pb est connue sous le nom de PbrA, en synergie avec d'autres protéines pour développer sa résistance au plomb (Hynninen, 2010).

2.3.3. Séquestration

2.3.3.1. Liaison aux métallothionéines

Les métallothionéines (MTs) sont des protéines de petite taille riche en cystéine. Elles favorisent la fixation des métaux et leur accumulation à l'intérieure de la cellule, ce qui la protège de leur toxicité. En raison de leur forte concentration en thiol, les MTs se lient à une variété de métaux, tels que le plomb (Wong *et al.*, 2017 ; Tiquia-Arashiro, 2018 ;).

Selon les travaux de Roanne (1999), *Bacillus megaterium* peut résister au plomb en accumulant le plomb à l'intérieur de la cellule grâce aux métallothionéine.

2.3.3.2. Liaison aux sidérophores

Les sidérophores sont des chélateurs organiques de faible poids moléculaire. Ils sont sécrétés par des microorganismes notamment les bactéries (Kraemer, 2011). Ils ont pour rôle principale de se lier au fer ferrique par chélation. Cependant, ils peuvent aussi jouer un rôle important dans la détoxification des échantillons contaminés par les métaux lourds en formant des liaisons avec divers métaux toxiques (Saha *et al.*, 2016). Les sidérophores sont une solution idéale pour la remédiation du plomb, car ils ont la capacité de diminuer la

mobilité du plomb dans l'environnement en formant des complexes métal-ligand stables (Tiquia-Arashiro, 2018).

La pyoverdine, un type de sidérophore produit par des *pseudomonas* fluorescentes telles que *Pseudomonas aeruginosa*. Elle est connue pour sa capacité à chélater divers métaux toxiques tels que le plomb, ce qui confère aux bactéries une résistance contre à ce métal (Braud *et al.*, 2010).

3. Avantages de la bioremédiation

Les méthodes de la bioremédiation offrent une approche respectueuse pour la dépollution de l'environnement des métaux lourds. Elles utilisent des microorganismes pour dégrader ou modifier ces polluants et réduisent considérablement l'utilisation des produits chimiques agressifs pour l'environnement (Sreekumar *et al.*, 2020).

Les avantages des techniques de bioremédiation par rapport aux autres méthodes sont nombreux. Elles permettent l'élimination des métaux lourds en dépendance des microorganismes naturellement présents. De plus, elles traitent les matériaux contaminés sur place, ce qui réduit considérablement le besoin d'infrastructures coûteuses et de transport de matériaux contaminés (Sreekumar *et al.*, 2020).

En choisissant des microorganismes présentant une affinité particulière pour les contaminants, la bioremédiation a le potentiel d'être adaptée et optimisée pour les métaux lourds qui leur sont spécifiques. Cette approche spécialisée permet une dépollution ciblée, permettant le traitement simultané de plusieurs métaux lourds ou se concentrant sur des contaminants nuisibles (Sreekumar *et al.*, 2020).

4. Inconvénients de bioremédiation

Les microorganismes utilisés en bioremédiation ont besoin de nutriments (l'azote, le phosphore, le soufre, le fer et les sources de carbone) pour leur métabolisme. Cependant, l'approvisionnement en quantités adéquates de ces nutriments peut être coûteux (Arora *et al.*, 2022 ; Sayqal et Ahmed, 2021).

La bioremédiation peut ne pas être appropriée pour tous les contaminants métalliques certains métaux lourds tels que le mercure et l'argent ne sont pas efficacement éliminés par les microorganismes, ce qui limite l'utilisation de la bioremédiation dans ces cas (Arora *et al.*, 2022).

Pour obtenir des résultats optimaux, des évaluations spécifiques du site et des optimisations sont nécessaires. Des facteurs tels que le pH, la température, le taux d'humidité et la présence d'autres polluants peuvent influencer l'efficacité de la biorestauration (Sayqal et Ahmed, 2021).

Conclusion

La pollution du sol au plomb est une préoccupation environnementale majeure en raison de sa persistance et des risques à long terme pour les écosystèmes et la santé humaine. Le plomb est caractérisé par sa non-biodégradabilité c'est-à-dire, qu'il ne se dégrade pas naturellement par des processus biologiques.

Les techniques traditionnelles ont une certaine efficacité pour réduire partiellement les concentrations de plomb, mais elles sont souvent limitées dans leur capacité à éliminer complètement ce contaminant du sol. C'est pourquoi certaines espèces bactériennes résistantes au plomb sont utilisées dans la dépollution des sols contaminés. Ces bactéries sont capables de prospérer dans des environnements présentant de fortes concentrations de ce polluant, ce qui leur confère le potentiel d'assurer la bioremédiation. En effet, cette stratégie consiste à utiliser des agents biologiques capables d'accumuler et de transformer ce métal, réduisant ainsi sa toxicité dans le sol. Ce processus permet non seulement de limiter les effets néfastes de la pollution par le plomb, mais offre également une approche plus durable et respectueuse de l'environnement pour la remédiation des sols.

Il existe des perspectives prometteuses dans le domaine de la bioremédiation par des bactéries résistantes au plomb. Les recherches dans le domaine du génie génétique offrent le potentiel d'améliorer les capacités des bactéries résistantes et de remédier des sols contenant des concentrations encore plus élevées en ce contaminant. De plus, l'exploration des effets synergiques entre différentes souches bactériennes et la combinaison de la bioremédiation avec d'autres techniques peut conduire à des approches plus efficaces pour la remédiation des sites pollués par le plomb.

Par ailleurs, l'intégration des pratiques de bioremédiation dans les politiques et les réglementations environnementales peut favoriser l'adoption généralisée de ces techniques. L'effort collaboratif entre le gouvernement, les industries et les communautés, pour encourager l'utilisation de la bioremédiation, peut permettre la restauration à grande échelle des sols pollués par le plomb et contribuer à l'amélioration globale de la qualité de l'environnement.

Références

Bibliographiques

- Alori, E. T., Gabasawa, A. I., Elenwo, C. E., et Agbeyegbe, O. O. (2022). Bioremediation techniques as affected by limiting factors in soil environment. *Frontiers in Soil Science*, 2, 1–11.
- Amara, A., Bisson, M., Hulot, C., et Marescaux, N. (2016). Plomb et ses dérivés inorganiques. Ineris-Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques.
- Arora, P., Paliwal, R., Rani, N., et Chaudhry, S. (2022) Recent trends in bioremediation of heavy metals: challenges and perspectives dans: Kuma. V; Thakur. I. S. *Omics insights in environmental bioremediation*. Springer Nature. Singapore. p: 103-131.
- Azubuike, C. C., Chikere, C. B., et Okpokwasili, G. C. (2016). Bioremediation techniques, classification based on site of application: principles, advantages, limitations, and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32. (180), 1–18.
- Banerjee, A., Jhariya, M. K., Yadav, D. K., et Raj, A. (2018). Micro-remediation of metals dans: Hussain. C. M. *Handbook of environmental materials management: A New Frontier in Bioremediation*. Springer. Cham. p: 1- 36
- Barot, S. La biodiversité des sols nous protège, protégeons-la aussi [en ligne] (page consultée le 15/04/2023). <http://theconversation.com/la-biodiversite-des-sols-nous-protege-protegeons-la-aussi-88538>
- Baumbach, G. (2012). *Air Quality Control: Formation and sources, dispersion, characteristics, and impact of air Pollutants, measuring methods, techniques for reduction of emissions and regulations for air quality control*. Springer Science et Business Media. 490p
- Behanzin, G. J., Adjou, E. S., Yessoufou, A. G., Ahoussi, E. D., et Sezan, A. (2014). Effet des sels de métaux lourds (chlorure de Cobalt et chlorure de Mercure) sur l'activité des hépatocytes. *Journal of Applied Biosciences*, 83, 7499-7505
- Bhati, T., Gupta, R., Yadav, N., Singh, R., Fuloria, A., Waziri, A., Chatterjee, S., et Purty, R. S. (2019). Assessment of bioremediation potential of *Cellulosimicrobium sp.* For treatment of multiple heavy metals. *Microbiology and Biotechnology Letters*, 47. (2), 269–277.

- Braud, A., Geoffroy, V., Hoegy, F., Mislin, G. L. A., et Schalk, I. J. (2010). Presence of the siderophores pyoverdine and pyochelin in the extracellular medium reduces toxic metal accumulation in *Pseudomonas aeruginosa* and increases bacterial metal tolerance. *Environmental Microbiology Reports*, 2. (3), 419–425.
- Cachada, A., Rocha-Santos, T., et Duarte, A. C. (2018). Soil and pollution: An introduction to the Main issues dans: Duarte. A. C.; Cachada.; Rocha-Santos. T. *Soil Pollution: From Monitoring to Remediation*. Academic press. p: 1-28
- Chang, J.-S., Law, R., et Chang, C.-C. (1997). Biosorption of lead, copper, and cadmium by biomass of *Pseudomonas aeruginosa* PU21. *Water Research*, 31. (7), 1651-1658.
- Chen, Z., Pan, X., Chen, H., Lin, Z., et Guan, X. (2015). Investigation of lead (II) uptake by *Bacillus thuringiensis* 016. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31. (11), 1729–1736
- Choudhury, S., et Chatterjee, A. (2022). Microbial application in remediation of heavy metals: An overview. *Archives of Microbiology*, 204. (5), 204-268
- Chowdhury, S., Mazumder, M. A. J., Al-Attas, O., et Husain, T. (2016). Heavy metals in drinking water: occurrences, implications, and future needs in developing countries. *Science of The Total Environment*, 569–570, 476–488.
- Daly, A., et Zannetti, P. (2007). An Introduction to Air pollution – Definitions, classifications, and History. 1-14
- Dar, A., et Naseer, A. (2022). Hazardous waste management: Recent applications of bioremediation and its impact. dans: Jeyakumar. R. B.; Sankarapandian. K.; Ravi. Y. K. *IntechOpen*. london. p: 49-61
- Dave, D., Sarma, S., Parmar, P., Shukla, A., Goswami, D., Shukla, A., et Saraf, M. (2020). Microbes as a boon for the bane of heavy metals. *Environmental Sustainability*, 3. (3), 233-255.

- Dhaliwal, S. S., Singh, J., Taneja, P. K., et Mandal, A. (2020). Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27. (2), 1319–1333.
- Dixit, R., Malaviya, D., Pandiyan, K., Singh, U. B., Sahu, A., Shukla, R., Singh, B. P., Rai, J. P., Sharma, P. K., et Lade, H. (2015). Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes. *Sustainability*, 7. (2), 2189–2212.
- Du, D., Wang-Kan, X., Neuberger, A., van Veen, H. W., Pos, K. M., Piddock, L. J. V., et Luisi, B. F. (2018). Multidrug efflux pumps: Structure, function, and regulation. *Nature Reviews. Microbiology*, 16. (9), 523–539.
- Ellen, T. P., et Costa, M. (2010). Carcinogenic Inorganic Chemicals dans: McQueen. C. *Comprehensive toxicology (Second edition)*. Elsevier. Oxford. p:139–160
- Flora, S. J. S., Mittal, M., et Mehta, A. (2008). Heavy metal induced oxidative stress and its possible reversal by chelation therapy. *Indian Journal of Medical Research*, 128. (4), 501-523
- Fowler, B. A., Selene, C.-H., Chou, R., J., Jones, D., L., Sullivan Jr, W., et Chen, C.-J. (2015). Arsenic dans : Fowler B.A. ; Nordberg F. G. ; Nordberg. M. *Handbook on the toxicology of metals (Fourth edition)*.: Academic Press. San Diego. p: 581–624.
- Garnier, R. (2005). Toxicité du plomb et de ses dérivés. *EMC - Toxicologie-Pathologie*, 2. (2), 67–88
- Genchi, G., Sinicropi, M., Lauria, G., Carocci, A., et Catalano, A. (2020). The effects of cadmium toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17. (11), 1-24
- González Henao, S., et Ghneim-Herrera, T. (2021). Heavy metals in soils and the remediation potential of bacteria Associated with the plant microbiome. *Frontiers in Environmental Science*, 9. 1-17

- Gupta, S., Surendran, A., et JosephThatheyus, A. (2020). Biosorption of lead using the bacterial strain, *Bacillus subtilis* (MTCC 2423). *Journal of Biotechnology and Biomedical Science*, 2. (3), 1-14.
- Hassan, A., Pariatamby, A., Ossai, I. C., Ahmed, A., Muda, M. A., Wen, T. Z., et Hamid, F. S. (2022). Bioaugmentation-assisted bioremediation and kinetics modelling of heavy metal-polluted landfill soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19. (7), 6729–6754.
- Havugimana, E., Bhople, B., Kumar, A., Byiringiro, E., et Kumar, A. (2017). Soil pollution-major sources and types of soil pollutants. *Environmental science and engineering. India*.p: 54-83
- Honda, A., Tsuji, K., Matsuda, Y., Hayashi, T., Fukushima, W., Sawahara, T., Kudo, H., Murayama, R., et Takano, H. (2015). Effects of air pollution-related heavy metals on the viability and inflammatory responses of human airway epithelial cells. *International Journal of Toxicology*, 34. (2), 195–203.
- Hynninen, A. (2010). Zinc, cadmium and lead resistance mechanisms in bacteria and their contribution to biosensing. Thèse de doctorat : Sciences alimentaires et environnementales. Finland : University of Helsinki, 50p
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., et Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism, and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7. (2), 60–72
- Jarosławiecka, A., et Piotrowska-Seget, Z. (2014). Lead resistance in micro-organisms. *Microbiology*, 160. (1), 12–25
- Kapahi, M., et Sachdeva, S. (2019). Bioremediation options for heavy metal pollution. *Journal of Health and Pollution*, 9. (24), 1-11
- Kensa, V. M. (1970). Bioremediation - an overview. *I Control Pollution*, 27. (2), 161–168.

- Koul, B., et Taak, P. (2018). *Ex situ* Soil Remediation Strategies dans : Koul. B; Taak. P. Biotechnological strategies for effective remediation of polluted soils. Springer. Singapore. p: 39- 57.
- Kraemer, S. M. (2011). Siderophores dans: Reitner. J.; Thiel. V. Encyclopedia of geobiology. Springer. Netherlands. p: 793-796.
- Kühlbrandt, W. (2004). Biology, structure, and mechanism of P-type ATPases. Nature Reviews Molecular Cell Biology, 5(4). 282-295
- Kumar, A., Bisht, B. S., Joshi, V. D., et Dhewa, T. (2011). Review on bioremediation of polluted environment: a management tool. International journal of environmental sciences, 1. (6), 1079-1093.
- Kumar, A., Kumar, A., M.M.S., C.-P., Chaturvedi, A. K., Shabnam, A. A., Subrahmanyam, G., Mondal, R., Gupta, D. K., Malyan, S. K., Kumar, S. S., A. Khan, S., et Yadav, K. K. (2020). Lead Toxicity: health hazards, influence on food chain, and sustainable remediation approaches. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17. (7), 1-33
- Kumari, S., Jain, M. K., et Elumalai, S. P. (2021). Assessment of pollution and health risks of heavy metals in particulate matter and road dust along the road network of Dhanbad, India. Journal of Health and Pollution, 11. (29), 1-14
- Langård, S., et Costa, M. (2015). Chromium dans: Nordberg F. G.; Fowler A. B. Nordberg. M. Handbook on the toxicology of metals (Fourth Edition). Academic Press. San Diego: p: 717-742
- Li, H., Qian, X., et Wang, Q. (2013). Heavy metals in atmospheric particulate matter: A comprehensive understanding is needed for monitoring and risk mitigation. Environmental Science & Technology, 47. (23), 13210–13211
- Lombi, E., et Hamon, R. E. (2005). Remediation of polluted soils. Encyclopedia of Soils in the Environment, 4, 379–385
- Madhav, S., Mishra, R., Kumari, A., Srivastav, A. L., Ahamad, A., Singh, P., Ahmed, S., Mishra, P. K., et Sillanpää, M. (2023). A review on sources identification of heavy metals in soil and remediation measures by phytoremediation-induced methods. International Journal of Environmental Science and Technology. 1-22

- Megharaj, M., Ramakrishnan, B., Venkateswarlu, K., Sethunathan, N., et Naidu, R. (2011). Bioremediation approaches for organic pollutants : a critical perspective. *Environment International*, 37. (8), 1362–1375
- Mishra, R., Mohammad, N., et Roychoudhury, N. (2016). Soil pollution : causes, effects, and control. *Van Sangyan*, 3, 1–14
- Nath, S., Deb, B., et Sharma, I. (2018). Isolation of toxic metal-tolerant bacteria from soil and examination of their bio-augmentation potentiality by pot studies in cadmium- and lead-contaminated soil. *International Microbiology*, 21. (1-2), 35-45.
- National Center for Biotechnology Information. (2023). PubChem compound summary for CID 5359596, Arsenic [en ligne] (page consultée le 25/05/2023) from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Arsenic>.
- Nielsen, U. N., Wall, D. H., et Six, J. (2015). Soil biodiversity and the environment. *Annual Review of Environment and Resources*, 40. (1), 63–90.
- Nies, D. H. (2003). Efflux-mediated heavy metal resistance in prokaryotes. *FEMS Microbiology Reviews*, 27. (2–3), 313–339
- Nong, Q., Yuan, K., Li, Z., Chen, P., Huang, Y., Hu, L., Jiang, J., Luan, T., et Chen, B. (2019). Bacterial resistance to lead: chemical basis and environmental relevance. *Journal of Environmental Sciences*, 85, 46–55
- Nortcliff, S., Hulpke, H., Bannick, C., Terytze, K., Knoop, G., Bredemeier, M., Schulte-Bisping, H., Auerswald, K., Litz, N., Mayer, R., Stoy, A., Alef, K., Kerndorff, H., Crössmann, G., Eikmann, T., Franzius, V., Grimsky, D., Möhlenbruch, N., Storm, P., et Dworshak, U. (2006). Soil, definition, function, and utilization of soil. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. (319-419)
- Nouri, M., et Haddioui, A. (2016). Les techniques de dépollution des sols contaminés par les métaux lourds : une revue (The remediation techniques of heavy metals contaminated soils : a review). 2, 47–58.
- Nwodo, U. U., Green, E., et Okoh, A. I. (2012). Bacterial exopolysaccharides: functionality and prospects. *International Journal of Molecular Sciences*, 13. (11), 14002–14015.

- Owa, F. D. (2013). Water Pollution: Sources, Effects, Control and Management. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, 4. (8), 65-68
- Organisation mondiale de la santé. (1995). Inorganic lead. World Health Organization (Consulté le 1/05/2023) (<https://apps.who.int/iris/handle/10665/3724>)
- Oziegbe, O., Oluduro, A. O., Oziegbe, E. J., Ahuekwe, E. F., et Olorunsola, S. J. (2021). Assessment of heavy metal bioremediation potential of bacterial isolates from landfill soils. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28. (7), 3948-3956.
- Paul, O., Jasu, A., Lahiri, D., Nag, M., et Ray, R. R. (2021). In situ and ex situ bioremediation of heavy metals: the present scenario. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 29. (4), 454-469
- plomb. (2021). Plomb periodic table (element information and more). page (consulté le 16/04/2023) <https://periodictableguide.com/lead-pb-element-periodic-table/>
- Pourret, O., et Hursthouse, A. (2019). It's Time to Replace the Term "Heavy metals" with "potentially toxic elements" when reporting environmental research. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16. (22), 454-469
- Qasem, N. A. A., Mohammed, R. H., et Lawal, D. U. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: A comprehensive and critical review. *Npj Clean Water*, 4. (1), 1-15
- Raskin, I., Kumar, P. N., Dushenkov, S., et Salt, D. E. (1994). Bioconcentration of heavy metals by plants. *Current Opinion in Biotechnology*, 5. (3), 285–290.
- Riseh, R. S., Vazvani, M. G., Hajabdollahi, N., et Thakur, V. K. (2022). Bioremediation of Heavy metals by *Rhizobacteria*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 1-23
- Roane, T. M. (1999). Lead resistance in two bacterial isolates from heavy metal–contaminated soils. *Microbial Ecology*, 37. (3), 218–224.
- Saha, M., Sarkar, S., Sarkar, B., Sharma, B. K., Bhattacharjee, S., et Tribedi, P. (2016). Microbial siderophores and their potential applications: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23. (5), 3984–3999.

- Saier Jr, M. H., Tam, R., Reizer, A., et Reizer, J. (1994). Two novel families of bacterial membrane proteins concerned with nodulation, cell division and transport. *Molecular Microbiology*, 11. (5), 841–847.
- Sayqal, A., et Ahmed, O. B. (2021). Advances in heavy metal bioremediation: an overview. *Applied Bionics and Biomechanics*,
- Sevak, P. I., Pushkar, B. K., et Kapadne, P. N. (2021). Lead pollution and bacterial bioremediation: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19. (6), 4463– 4488
- Sharma, I. (2020). Bioremediation techniques for polluted environment: concept, advantages, limitations, and prospects, IntechOpen. 284p
- Sheng, G.-P., Yu, H.-Q., et Li, X.-Y. (2010). Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: A review. *Biotechnology Advances*, 28. (6), 882–894.
- Singh, M. R., et Gupta, A. (2016). Water pollution-sources, effects and control. Pointer Publishers Jaipur.
- Singh, S., Paswan, S. K., Kumar, P., Singh, R. K., et Kumar, L. (2023). Metals in water: heavy metal water pollution: an overview about remediation, removal, and recovery of metals from contaminated water. (263–284). Elsevier.
- Sinha, R. K., Valani, D., Sinha, S., Singh, S., et Herat, S. (2009). Bioremediation of contaminated sites: a low-cost nature's biotechnology for environmental clean-up by versatile microbes, plants, and earthworms. *Solid Waste Management and Environmental Remediation*,1-78
- Sivakumar, D., Kandaswamy, A. N., Gomathi, V., Rajeshwaran, R., et Murugan, N. (2014). Bioremediation studies on reduction of heavy metals toxicity. *Pollution Research*, 33. (3), 553–558.
- Skerfving, S., et Bergdahl, I. A. (2015). Lead dans: Nordberg G. F.; Fowler B. A.; Nordberg. M. Handbook on the toxicology of metals (Fourth edition). Academic Press. San Diego. p: 911–967

- Schneider, K. R., Silverberg, R. G. S. R., Kurdmongkoltham, P., et Bertoldi, B. (2017). Preventing foodborne illness: *Bacillus cereus*. *Inst. Food Agric. Sci*, 14, 1-5.
- Soriano, M. C. H. (2014). Environmental risk assessment of soil contamination. *BoD – Books on Demand*. 922p
- Sreedevi, P. R., Suresh, K., et Jiang, G. (2022). Bacterial bioremediation of heavy metals in wastewater: a review of processes and applications. *Journal of Water Process Engineering*, 1-48
- Sreekumar, N., Udayan, A., et Srinivasan, S. (2020). Algal bioremediation of heavy metals dans: Shah M. P. *Removal of Toxic Pollutants Through Microbiological and Tertiary Treatment*. Elsevier. India. p: 279–307
- Tayang, A., et Songachan, L. S. (2021). Microbial bioremediation of heavy metals. *Current Science*, 120. (6),1013-1025
- Tiquia-Arashiro, S. M. (2018). Lead absorption mechanisms in bacteria as strategies for lead bioremediation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102. (13), 5437–5444.
- Tomei, M. C., et Daugulis, A. J. (2013). Ex-situ Bioremediation of contaminated soils: an Overview of conventional and innovative technologies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 43. (20), 2107–2139
- Tufail, M. A., Iltaf, J., Zaheer, T., Tariq, L., Amir, M. B., Fatima, R., Asbat, A., Kabeer, T., Fahad, M., Naeem, H., Shoukat, U., Noor, H., Awais, M., Umar, W., et Ayyub, M. (2022). Recent advances in bioremediation of heavy metals and persistent organic pollutants: A review. *Science of The Total Environment*, 850, 157961.
- Turbé, A., Toni, A. de, Benito, P., Lavelle, P., Lavelle, P., Camacho, N. R., Putten, W. H. van D., Labouze, E., et Mudgal, S. (2010). Soil biodiversity : Functions, threats, and tools for policy makers.
- Vidali, M. (2001). Bioremediation. An overview. *Pure and Applied Chemistry*, 73. (7), 1163–1172.
- Volarić, A., Svirčev, Z., Tamindžija, D., et Radnovic, D. (2021). Microbial bioremediation of heavy metals. *Hemijaska Industrija*, 75, 103–115.

- von Rozycki, T., et Nies, D. H. (2009). *Cupriavidus metallidurans*: Evolution of a metal-resistant bacterium. *Antonie van Leeuwenhoek*, 96. (2), 115-139.
- Wang, T., Yao, J., Yuan, Z., Zhao, Y., Wang, F., et Chen, H. (2018). Isolation of lead-resistant *Arthrobacter* strain GQ-9 and its biosorption mechanism. *Environmental Science and Pollution Research*, 25. (4), 3527-3538.
- Wilbur, S., Abadin, H., Fay, M., Yu, D., Tencza, B., Ingerman, L., Klotzbach, J., et James, S. (2012). Chemical and physical information dans: Toxicological profile for chromium. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (US). Atlanta, Georgia. p: 333-351
- Williams, J. (2006). Bioremediation of contaminated soils: a comparison of in-situ and ex-situ techniques.
- Wong, D. L., Merrifield-MacRae, M. E., et Stillman, M. J. (2017). Lead (II) binding in metallothioneins. *Metal Ions in Life Sciences*, 17, 241-270
- Yadav, B. K., et Hassanizadeh, S. M. (2011). An overview of biodegradation of LNAPLs in coastal (semi)-arid environment. *Water, Air, and Soil Pollution*, 220, 225-239.
- Yahaghi, Z., Shirvani, M., Nourbakhsh, F., Peña, T. C. de la, Pueyo, J. J., et Talebi, M. (2018). Isolation and characterization of Pb-solubilizing bacteria and their effects on Pb uptake by *Brassica juncea*: implications for microbe-assisted phytoremediation. 28.(7), 1156-1167.
- Zamora-Ledezma, C., Negrete-Bolagay, D., Figueroa, F., Zamora-Ledezma, E., Ni, M., Alexis, F., et Guerrero, V. H. (2021). Heavy metal water pollution: a fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods. *Environmental Technology and Innovation*, 22, 1-26.
- Zanganeh, F., Heidari, A., Sepehr, A., et Rohani, A. (2022). Bio-augmentation and bio-augmentation–assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soil by a synergistic effect of cyanobacteria inoculation, biochar, and purslane (*Portulaca oleracea* L.). *Environmental Science and Pollution Research*, 29. (4), 6040–6059.

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Science biologique

Spécialité : Biologie moléculaire des microorganismes

Titre

Mécanismes de tolérance des bactéries aux métaux lourds

Résumé

La pollution des écosystèmes par les métaux lourds, notamment le plomb. C'est une préoccupation croissante résultant de diverses sources naturelles ou anthropiques. Cette contamination présente des risques importants pour l'écosystème, tandis que les bactéries du sol possèdent des capacités génétiques inhérentes et des mécanismes de résistance des bactéries palliatifs des effets toxiques des métaux lourds. En exploitant ces microorganismes, la bioremédiation se présente comme une technique durable pour dépolluer les sols contaminés par ces toxiques. De plus, en prenant compte des mécanismes de résistance des bactéries au plomb et leur rôle dans la bioremédiation, il est possible de développer des approches efficaces pour remédier cette contamination. Ces approches optimisent les techniques de bioremédiation et favorisent la restauration écologique et durable des sols contaminés par le plomb, en préservant l'environnement et protégeant ainsi la santé publique.

Mot clés : Plomb, Métaux lourds, bactéries, mécanismes de résistance, bioremédiation

Membre du jury :

Président : MEZIANI MERIEM (MCB- Université Frères Mentouri, Constantine 1)

Encadreur : MEGHNOUS OUISSEM (MCB- Université Frères Mentouri, Constantine 1)

Examineur : ABDELAZIZ OUIDED (MCB- Université Frères Mentouri, Constantine 1)

Présenté par : BOUGHABA AMDJED

Année universitaire : 2022 -2023