

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DES SCIENCES BIOLOGIQUES ET DES SCIENCES AGRONOMIQUES

DÉPARTEMENT DE BIOCHIMIE ET DE MICROBIOLOGIE

Mémoire de Fin d'Études de Master

En vue de l'obtention du diplôme de Master II en sciences biologiques Spécialité :

Microbiologie Appliquée

SOUS LE THÈME

**Effet d'une bactérie tolérante aux métaux lourds
sur la croissance du blé en milieu contaminé**

Réalisé par : CHETTIR Imane

Devant le jury composé de :

Mme.Aiche-Iratni.G	MCA	Présidente	UMMTO
Mr. HOUALI. K	Professeur	Promoteur	UMMTO
Mme. OULD OUALI.K	Docteur	Co-promotrice	UMMTO
M. MOUALEK.I	MCA	Examineur	UMMTO

Année universitaire : 2024 /2025

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu, le Tout-Puissant, pour m'avoir donné la force, la patience et la volonté nécessaires à la réalisation de ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à mon promoteur, Monsieur HOUALI K., Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour sa confiance, ses conseils pertinents et son accompagnement rigoureux.

Je remercie sincèrement ma co-promotrice, Docteur OULD OUALI K., pour son soutien scientifique, son aide précieuse, ses encouragements constants et sa disponibilité tout au long de ce travail.

Mes remerciements vont également à Monsieur HOUALI K., Directeur du laboratoire LABAB, pour m'avoir accueillie au sein de son équipe et pour les moyens ainsi que les conditions favorables mis à ma disposition.

J'adresse aussi mes remerciements aux membres du jury : Madame IRATNI G., MCA, Présidente du jury, et Monsieur MOUALEK I., MCA, examinateur, pour le temps consacré à l'évaluation de ce travail. Leurs remarques constructives et leurs conseils avisés contribueront grandement à l'enrichissement de ce mémoire.

Dédicaces

À ceux qui m'ont portée quand je n'en avais plus la force.

À toute ma famille : mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur patience, et leurs prières. Votre présence est mon refuge.

À mon frère Malek mon repère. À ma belle-sœur pour sa douceur. Merci d'avoir été là,

À ma sœur et mon neveu Syphax ce petit bout de vie innocent.

À Khwali et mes cousins, pour l'humour, l'énergie, et les souvenirs partagés qui ont gardé mon cœur vivant.

À ma nièce Aline, petite lumière d'innocence et de joie, qui m'a rappelé que la vie est aussi faite de magie.

À mes amies, vous vous reconnâtes. Merci pour les appels, les mots justes, les épaules offertes sans condition.

À la mémoire de ceux qui nous ont quittés, mais dont l'amour continue de vibrer en nous. Ce travail leur est aussi dédié.

Table des matières

Introduction	1
Partie bibliographique	
1. Les bactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR)	5
1.1. Historique	5
1.2. Définition.....	6
1.3. Modes d'action des PGPR.....	6
1.3.1. Mécanismes directs	7
1.3.2. Mécanismes indirects	11
2. Pollution du sol :	12
2.1. Sources de pollution du sol.....	13
2.1.1. Pollution agricole	13
2.1.2. Pollution industrielle	13
2.1.3. Pollution urbaine	13
3. Pollution aux métaux lourds.....	13
3.1. Sources de contamination aux métaux lourds	14
3.1.1. Sources naturelles.....	14
3.1.2. Sources anthropiques.....	14
3.2. Contamination du sol par les métaux lourds et leurs effets sur les plantes	15
3.2.1. Changements morphologiques	15
3.2.2. Stress oxydatif	17
3.3. Impact des métaux lourds sur la santé humaine	18
4. Méthodes de dépollution	19
4.1. Méthodes physico-chimiques	19
4.1.1. Lavage des sols.....	19
4.1.2. Désorption thermique	19
4.1.3. Bêchage des sols.....	19

4.1.4.	Substitution du sol.....	19
5.	Bioremédiation	20
5.1.	Bioremédiation in situ	20
5.2.	Bioremédiation ex situ.....	20
5.3.	Bioremédiation microbienne	20
5.3.1.	Biosorption	20
5.3.2.	Bioaccumulation.....	21
5.3.3.	Biolixiviation.....	21
5.3.4.	Biotransformation.....	21

Matériel et méthode

1.	Matériel	24
1.1.	Isolats bactériens.....	24
1.2.	Graines de blé	24
1.3.	Le Sol.....	24
1.4.	Solvants et sels métalliques utilisés.....	25
1.5.	Matériel de laboratoire.....	25
2.	Méthode.....	25
2.1.	Test de tolérance des bactéries aux métaux lourds	25
2.1.1.	Préparation de solutions de métaux lourds.....	25
2.1.2.	Préparation des suspensions bactériennes	26
2.1.3.	Sur gélose	26
2.1.4.	Sur milieu liquide	26
2.2.	Test de tolérance du blé aux métaux lourds	26
2.2.1.	Stérilisation des graines de blé	26
2.2.2.	Test de germination.....	27
2.3.	Effet de la souche sélectionnée sur la croissance du blé	27
2.3.1.	Préparation de la suspension bactérienne.....	27

2.3.2.	Bactérisations des graines	27
2.3.3.	L'essai en pot	28
2.4.	Récolte des plants	28
3.	Analyse statistique.....	29
1.	Tolérance des bactéries aux métaux lourds.....	31
1.1.	Sur gélose	31
1.2.	Sur milieu liquide	33
2.	Test de tolérance du blé dur	38
3.	Effet des métaux lourds sur la croissance du blé.....	40
4.	Effet de l'inoculation bactérienne sur la croissance du blé.....	41
5.	Changements morphologiques observés	44

Conclusion

Références bibliographiques

Annexes

Résumé

La contamination des sols par les métaux lourds constitue un problème environnemental majeur qui affecte la fertilité des terres et limite la production agricole. Dans ce contexte, l'utilisation de rhizobactéries promotrices de croissance des plantes (PGPR) offre une alternative biologique et durable pour réduire l'impact toxique de ces polluants et améliorer la croissance des cultures.

Trois isolats bactériens, ont été soumis à des tests de tolérance vis-à-vis du plomb (Pb), du cobalt (Co), du chrome (Cr) et du mercure (Hg) en conditions in vitro.

Les résultats ont révélé une variabilité de tolérance selon les souches et les métaux testés. Une sensibilité élevée au mercure a été observée pour l'ensemble des isolats. En revanche, une souche s'est distinguée par une meilleure capacité de croissance en présence de Pb, Co et Cr à des concentrations modérées, ce qui a conduit à sa sélection pour les essais en conditions in vivo. L'inoculation des graines de blé avec cette souche a entraîné une amélioration significative des paramètres de croissance, notamment l'allongement racinaire et la croissance aérienne, comparativement aux témoins non inoculés exposés aux mêmes concentrations métalliques.

Ces résultats suggèrent que l'utilisation de PGPR tolérantes aux métaux lourds constitue une stratégie biotechnologique pertinente pour soutenir la croissance du blé en sols contaminés et contribue à une agriculture durable ainsi qu'à la restauration écologique des environnements pollués.

Mots clés : Blé dur, métaux lourds, PGPR, tolérance bactérienne, bioremédiation.

Summary

Soil contamination by heavy metals constitutes a major environmental problem that affects land fertility and limits agricultural production. In this context, the use of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) offers a biological and sustainable alternative to reduce the toxic impact of these pollutants and improve crop growth.

Three bacterial isolates, were subjected to in vitro tolerance tests against lead (Pb), cobalt (Co), chromium (Cr), and mercury (Hg).

The results revealed variability in tolerance depending on both the bacterial strains and the metals tested. A high sensitivity to mercury was observed for all isolates. In contrast, one strain exhibited a greater capacity for growth in the presence of Pb, Co, and Cr at moderate concentrations, which led to its selection for in vivo assays. Inoculation of wheat seeds with this strain resulted in a significant improvement in growth parameters, particularly root elongation and shoot growth, compared to non-inoculated controls exposed to the same metal concentrations.

These findings suggest that the use of heavy metal-tolerant PGPR represents a relevant biotechnological strategy to support wheat growth in contaminated soils and contributes to sustainable agriculture and ecological restoration of polluted environments.

Keywords: Durum wheat, heavy metals, PGPR, bacterial tolerance, bioremediation.

Liste des figures

Figure 1 : Mécanismes directs et indirects des PGPR pour l'amélioration du développement des plantes.

Figure 2 : Changements morphologiques, anatomiques et physiologiques induits par la toxicité des métaux lourds dans les plantes.

Figure 3 : Mécanismes de production des espèces réactives de l'oxygène (ROS) induite par les métaux lourds et dommages oxydatifs associés dans les cultures oléagineuses.

Figure 4 : Graines de blé

Figure 5 : Suivi du blé.

Figure 6 : Lavage du blé.

Figure 7 : Effet du $PbCl_2$ sur les trois souches bactériennes à deux concentrations différentes

Figure 8 : Effet du $CoSO_4$ sur les trois souches bactériennes à plusieurs concentrations

Figure 9 : Effet du $K_2Cr_2O_7$ sur les trois souches bactériennes à différentes concentrations

Figure 10 : Effet du $PbCl_2$ sur la croissance des trois souches en milieu liquide.

Figure 11 : Effet du $K_2Cr_2O_7$ sur la croissance des trois souches en milieu liquide.

Figure 12 : Effet du $CoSO_4$ sur la croissance des trois souches en milieu liquide

Figure 13 : Effet des métaux lourds sur le taux de germination du blé.

Figure 14 : Impact des métaux lourds sur la croissance aérienne et racinaire du blé.

Figure 15 : Effet de l'inoculation bactérienne sur la croissance du blé dans un sol pollué.

Liste des abréviations

ABA : Acide abscissique

ACC : Acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique

ACCD : ACC désaminase

AHL : N-acyl-homosérine lactone (molécule de signalisation bactérienne)

AIA : Acide indole-3-acétique

APX : Ascorbate peroxydase

CAT : Catalase

DO : Densité optique

EPS : Exopolysaccharides

FTIR : Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (Fourier Transform InfraRed)

HM : Milieu de culture Halophilic medium

ISSR : Inter Simple Sequence Repeat

MDA : Malondialdéhyde (marqueur de stress oxydatif)

NADH : Nicotinamide adénine dinucléotide (forme réduite)

NH₃ : Ammoniac

OH⁻ : Ion hydroxyde

PBS : Phosphate Buffer Saline (tampon phosphate salin)

PGPR : Plant Growth Promoting Rhizobacteria (Rhizobactéries promotrices de croissance des plantes)

PR : Pathogenesis-Related (protéines liées à la défense des plantes)

PSI : Photosystème I

QQ : Quorum quenching

QS : Quorum sensing

RIA : Résistance intrinsèque aux antibiotiques

ERO : Espèces réactives de l'oxygène

RPM : Rotation par minute.

RSI : Résistance systémique induite

SOD : Superoxyde dismutase

Liste des tableaux

Tableau 1. Solvants et sels métalliques utilisés dans l'étude.

Tableau 2. Appareillages de laboratoire utilisés.

Tableau 3. Préparation de solution mère à 24 mmol/l pour 200ml de solution.

INTRODUCTION

Nourrir une population en croissance exponentielle à l'ère du changement climatique mondial constitue un défi majeur. Parmi les multiples pressions environnementales, la pollution apparaît comme l'un des facteurs les plus préoccupants. L'industrialisation rapide et la croissance démographique des dernières décennies ont considérablement accru l'accumulation de composés xénobiotiques dans l'environnement, entraînant une dégradation des sols, une contamination des ressources en eau et des risques graves pour la santé humaine et écologique (Qin et *al.*, 2020).

Au sein de cette pollution, les métaux lourds représentent une menace particulièrement alarmante. Caractérisés par une densité relativement élevée, ces éléments sont toxiques même à de très faibles concentrations. Persistants et difficilement éliminables, ils perturbent la croissance des plantes, réduisent le rendement agricole et s'accumulent dans la chaîne alimentaire, compromettant ainsi les moyens de subsistance de l'humanité et la sécurité alimentaire mondiale (Ak & Nagan, 2015 ; Elizabeth Rani et *al.*, 2021 ; Riyazuddin, Nisha, Singh, et *al.*, 2021 ; Yadav et *al.*, 2019).

En Algérie, plusieurs études confirment l'ampleur du problème. Sellami et *al.* (2022) ont montré que les niveaux de zinc (Zn) et de plomb (Pb) dans les sols urbains et périurbains de Sétif dépassaient largement les valeurs de référence, notamment près des zones industrielles et des décharges non contrôlées. De même, Aksouh et *al.* (2024) ont mis en évidence une contamination des sols, de l'eau d'irrigation et des produits agricoles dans la région de Boumerdès par divers métaux tels que le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le fer (Fe), le nickel (Ni), le plomb (Pb) et le zinc (Zn), exposant ainsi la population à des risques sanitaires significatifs.

Face à ces défis, la bioremédiation par les rhizobactéries promotrices de croissance des plantes (PGPR) apparaît comme une alternative écologique et durable. Ces micro-organismes améliorent la tolérance des plantes aux stress métalliques et contribuent à la dépollution des sols grâce à divers mécanismes, tels que la biosorption, la bioaccumulation, la production de sidérophores et la biotransformation des métaux lourds (R. Gupta et *al.*, 2023)

Dans ce contexte, il est essentiel de s'intéresser à une culture stratégique : le blé. Aliment de base incontournable, il occupe une place centrale dans l'alimentation des Algériens, avec une consommation annuelle moyenne d'environ 230 kg par personne, soit près de deux fois et demie la moyenne mondiale (95 kg/personne/an) (Selt, 2025).

Ce mémoire vise ainsi à répondre à la question suivante : dans quelle mesure une bactérie tolérante aux métaux lourds peut-elle favoriser la croissance du blé en sol contaminé ?

Afin d'y répondre, ce travail est structuré en trois parties :

1. Partie bibliographique
2. Matériel et méthodes
3. Résultats et discussion

BIBLIOGRAPHIE

1. Les bactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR)

1.1. Historique

Bien que l'existence des bactéries n'ait été révélée qu'après la découverte des micro-organismes par Anton von Leeuwenhoek en 1683, leur utilisation pour stimuler la croissance des plantes remonte à l'Antiquité. Théophraste (372-287 av. J.-C.) recommandait déjà le mélange de différents types de sols afin de corriger leurs défauts et d'enrichir leur fertilité (Tisdale & Nelson, 1975). Virgile a également rapporté l'implantation de légumineuses sur les terres cultivées, mettant en évidence leurs effets bénéfiques sur l'amélioration de la fertilité des sols (Chew, 2002).

Hellriegel & Wilfarth, (1888) ont étudié la colonisation de la rhizosphère par les bactéries chez les graminées et les légumineuses et ont mis en avant la capacité des bactéries du sol à convertir l'azote atmosphérique (N₂) en formes assimilables par les plantes.

À partir de leurs expériences sur les radis, Kloepper & Schroth, (1978) ont introduit le terme « rhizobactéries » pour désigner les communautés bactériennes du sol colonisant les racines des plantes de manière compétitive, favorisant ainsi leur croissance et réduisant l'incidence des maladies. Plus tard, ces chercheurs ont défini ces bactéries bénéfiques comme des « rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes » (PGPR : Plant Growth Promoting Rhizobacteria) (Kloepper, 1981).

Depuis, de nombreuses études ont approfondi la compréhension des interactions entre PGPR et plantes, révélant leur impact sur plusieurs niveaux biologiques : le transcriptome (Drogue et al., 2014) le protéome (Kwon et al., 2016) et le métabolome (Walker et al., 2011). Ces bactéries peuvent influencer la physiologie végétale en stimulant la croissance racinaire, en améliorant l'absorption des nutriments et en aidant les plantes à tolérer divers stress abiotiques comme la salinité et la sécheresse (Gamalero & Glick, 2022).

En raison de ces propriétés, les PGPR suscitent un intérêt croissant en agriculture durable, où elles sont utilisées comme biofertilisants, biopesticides et agents de bioremédiation (Combes-Meynet et al., 2011). Leur capacité à améliorer la productivité végétale tout en réduisant l'usage des engrais chimiques et des pesticides en fait des alliées prometteuses pour une agriculture plus respectueuse de l'environnement.

1.2. Définition

Les rhizobactéries promotrices de croissance des plantes (PGPR) sont des bactéries bénéfiques vivant dans la rhizosphère et qui améliorent la croissance des plantes par divers mécanismes. Elles peuvent stimuler directement la croissance en améliorant la disponibilité des nutriments (fixation de l'azote, solubilisation du phosphate, production de sidérophores, etc.) et en produisant des phytohormones (auxines, gibbérellines, cytokinines, etc.). Indirectement, elles renforcent la résistance des plantes contre les pathogènes grâce à la production de composés antimicrobiens et à l'induction de la résistance systémique. Ces bactéries jouent un rôle essentiel dans l'agriculture durable et la bioremédiation, en aidant les plantes à mieux tolérer les stress abiotiques et en participant à la dépollution des sols (Merdia *et al.*, 2020).

1.3. Modes d'action des PGPR

Étant la communauté microbienne dominante de la rhizosphère, les PGPR sont activement ou passivement impliquées dans la promotion de la croissance des plantes. Les modes d'action par lesquels elles favorisent la croissance des plantes ont été traditionnellement classés en mécanismes directs et indirects se produisant respectivement à l'intérieur et à l'extérieur de la plante. Elles favorisent directement leur croissance en améliorant l'absorption des nutriments et en augmentant la croissance par la régulation des niveaux de phytohormones. Les effets indirects des PGPR comprennent la suppression des phytopathogènes et l'induction d'une résistance systémique des plantes contre un large éventail de microbes pathogènes (Dutta *et al.*, 2022).

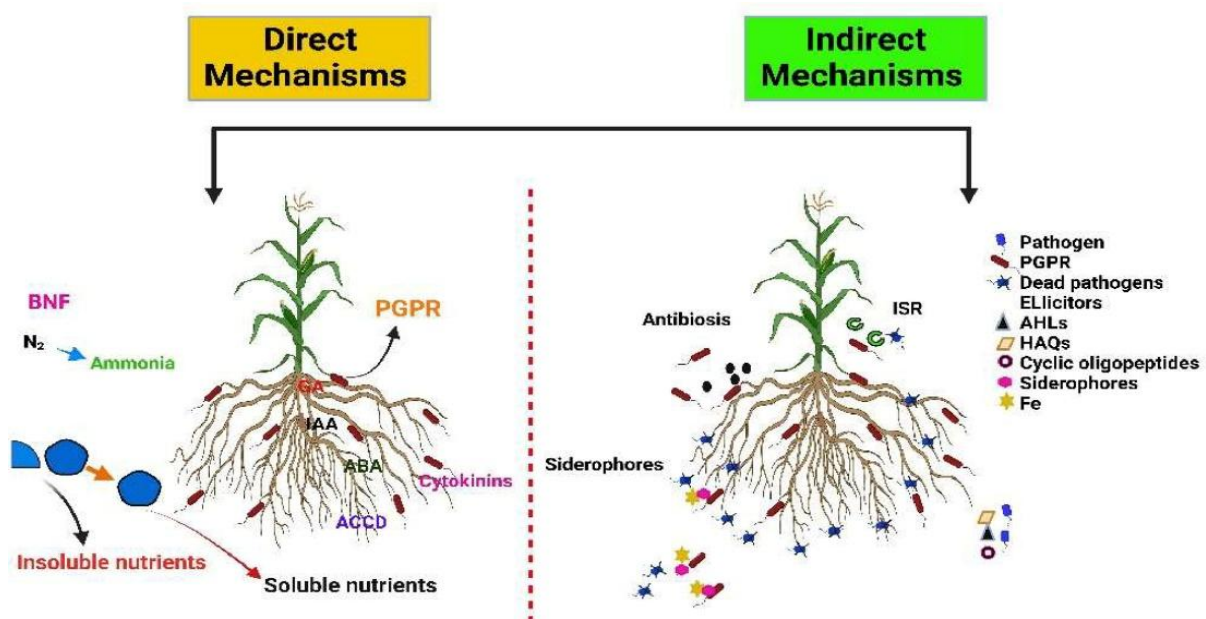


Figure n° 1 : Mécanismes directs et indirects des PGPR pour l'amélioration du développement des plantes. (Khosro *et al.*, 2024)

1.3.1. Mécanismes directs

1.3.1.1. Fixation de l'azote atmosphérique

L'azote atmosphérique (N₂) est un élément fondamental pour la croissance des plantes car c'est un composé des nucléotides, lipides membranaires et acides aminés (Altaf, 2021).

La fixation se fait par le biais d'une enzyme « la nitrogénase » hautement sophistiquée et sensible à l'oxygène, présente chez les diazotrophes symbiotiques ou libres, responsable de la fixation biologique de l'azote. Ce processus consiste à convertir l'azote atmosphérique (N₂) en ammoniac (NH₃), une forme assimilable par les plantes (Nag & Das, 2022).

En examinant les deux formes distinctes de fixation de l'azote, à savoir la symbiotique et le non symbiotique, qui varient selon les espèces végétales et leurs groupes d'organismes associés. Il est généralement admis que les bactéries non symbiotiques présentent une capacité de fixation de l'azote inférieure à celle des bactéries présentes dans les nodules racinaires appelées rhizobies (Bellés-Sancho et al., 2023).

La majorité des PGPR se sont révélés particulièrement efficaces pour accélérer ce processus, rendant l'azote, un nutriment rare, accessible aux plantes malgré leur faible capacité de fixation. De plus, les capacités de promotion de croissance de chaque isolat dépendent de la disponibilité de l'azote, ce qui influence à son tour la hauteur des plantes et la longueur des racines (Khumairah et al., 2018).

En outre, les bactéries fixatrices d'azote comme *Azospirillum lipoferum* et *Azotobacter chroococcum* améliorent la production d'ammoniaque nécessaire à la synthèse des acides aminés dans les plantes. À côté de ces espèces libres, d'autres genres fixateurs comme *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* (Sharma et al., 2020), *Sinorhizobium* (Han et al., 2024) et *Frankia* (Pujic et al., 2023) établissent des symbioses particulièrement efficaces avec les légumineuses ou les plantes actinorhiziennes, améliorant la nutrition azotée et la productivité. La co-inoculation avec des PGPR (*Bacillus subtilis* et *Pseudomonas fluorescens*) a encore augmenté le contenu protéique et le rendement des grains d'orge (Renoud et al., 2022).

1.3.1.2. Solubilisation du phosphate

Le phosphore (P) joue un rôle essentiel dans l'approvisionnement, le transfert et le stockage de l'énergie pour tous les processus biochimiques au sein des plantes. Bien que les sols puissent contenir des quantités totales élevées de phosphore, la fraction réellement disponible pour les plantes demeure extrêmement limitée : à peine 0,1 % du phosphore total est présent sous une forme soluble et assimilable. Cette faible biodisponibilité résulte principalement des

phénomènes de fixation du phosphate et de la faible solubilité intrinsèque de ce dernier dans la matrice du sol (Pereira & Castro, 2014). En effet, seul le phosphate ionique soluble (Pi) est efficace comme source de nutrition minérale pour les plantes. La gestion microbienne du phosphore joue un rôle crucial dans divers processus biologiques, notamment la transformation des nutriments du sol indisponibles et insolubles (Babalola & Glick, 2012).

Les rhizobactéries solubilisatrices de phosphate présentent, un intérêt particulier, car elles sont capables de convertir les formes insolubles de phosphore en orthophosphate, directement assimilable par les racines. La solubilisation du phosphate par les bactéries repose sur plusieurs mécanismes biochimiques, parmi lesquels la libération d'acides organiques, la chélation et l'échange d'ions, qui participent à l'amélioration de la disponibilité du phosphore et, plus largement, de la fertilité du sol. De nombreuses souches bactériennes possédant cette aptitude appartiennent à des genres variés, notamment : *Mesorhizobium*, *Arthrobacter*, *Chryseobacterium*, *Bacillus*, *Gordonia*, *Delftia*, *Enterobacter*, *Mycobacterium*, *Pantoea*, *Klebsiella*, *Micrococcus*, etc. (Gupta et al., 2024).

1.3.1.3. Production de sidérophores

Les sidérophores sont des métabolites secondaires des chélateurs de fer synthétisés et sécrétés par les micro-organismes, principalement les bactéries, pour acquérir le fer essentiel à leur croissance et leur développement. C'est des molécules de faible poids moléculaire avec une forte affinité pour l'ion ferrique (Fe^{3+}) (Kraemer, 2011). Elles sont dotées d'une large gamme d'activités biologiques : antivirales (Jakubiec-Krzesniak et al., 2018) antimicrobiennes (Chakraborty et al., 2022 ; Zhanel et al., 2019) et biodégradantes (David et al., 2021). Les Sidérophores jouent un rôle crucial dans l'absorption du fer par les plantes en présence d'autres métaux tels que le nickel et le cadmium. Ces métaux entrent en compétition avec le fer pour les transporteurs membranaires racinaires et peuvent former avec lui des complexes insolubles, réduisant ainsi sa disponibilité. Grâce à leur forte affinité pour l'ion ferrique (Fe^{3+}), les sidérophores produits par certaines bactéries de la rhizosphère complexent le fer sous une forme plus facilement assimilable par la plante, « fer ferreux » ce qui améliore sa nutrition en fer même en conditions de stress métallique (Gu et al., 2020).

1.3.1.4. Production de phytohormones

Les PGPR ont la capacité de produire des phytohormones qui jouent un rôle crucial dans l'amélioration de la croissance et du développement des plantes. : auxines, cytokinines, gibbérellines. Les auxines sont les substances les plus étudiées notamment l'AIA (P. Yang et al., 2023, 2024).

◆ **Acide indole-3-acétique (AIA)**

L'AIA est principalement produit par les plantes et les microorganismes dans la rhizosphère et joue un rôle déterminant dans l'élongation des racines, la formation de poils racinaires et le développement de racines latérales, qui améliorent collectivement la capacité de la plante à absorber l'eau et les nutriments (Poveda & González-Andrés, 2021). Cette hormone est produite par diverses espèces de PGPR, notamment *Azospirillum*, *Pseudomonas* et *Agrobacterium*. La production d'AIA est également considérée comme un mécanisme clé par lequel les PGPR facilitent la croissance des plantes (Grobela et *al.*, 2015).

◆ **Les gibbérellines (GA)**

Les gibbérellines sont un autre groupe de phytohormones produites par les PGPR qui influencent considérablement la croissance des plantes. Ces hormones sont impliquées dans la promotion de la germination des graines, de l'élongation des tiges et de la floraison. Les genres tels que : *Bacillus* et *Pseudomonas* ont été identifiées comme productrices des gibbérellines, qui peuvent améliorer la croissance des plantes même dans des conditions de stress. (Nett et *al.*, 2017 ; Rizza & Jones, 2019). L'application de PGPR produisant des gibbérellines peut être particulièrement bénéfique pour améliorer le rendement des cultures et la résistance aux stress abiotique (Adeleke & Babalola, 2021).

◆ **Les cytokinines**

Les cytokinines sont une autre classe de phytohormones produites par les PGPR qui jouent un rôle essentiel dans la division cellulaire, l'initiation des pousses et l'expansion des feuilles. Ces phytohormones interagissent avec les auxines pour réguler divers aspects de la croissance et du développement des plantes, notamment en retardant la sénescence des feuilles et en augmentant la production de chlorophylle (Guo et *al.*, 2021 ; Hönig et *al.*, 2018). La production de cytokinines par les PGPR peut améliorer la productivité des plantes, comme l'ont démontré des études impliquant *Bacillus megaterium* et d'autres rhizobactéries productrices de cytokinine (Mekureyaw et *al.*, 2022).

◆ **Aminocyclopropane-1-Carboxylate (ACC) Désaminase**

L'éthylène est une hormone végétale gazeuse qui joue un rôle clé dans la régulation de la croissance et du développement des plantes. À faible concentration, il participe à la régulation de la croissance des bourgeons et des racines, favorise la floraison, la maturation et l'abscission

des fruits, etc. Sous stress causé, la production d'éthylène tend à augmenter fortement, ce qui nuit à leur croissance des plantes (Oleńska et al., 2020a).

Le précurseur direct de l'éthylène, l'acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique (ACC), est dégradé par l'enzyme ACC désaminase (ACCD) en α -cétobutyrate et ammoniac, réduisant ainsi la synthèse d'éthylène. De nombreuses bactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR) possèdent cette enzyme, leur permettant d'atténuer les effets négatifs du stress induit par les métaux lourds et de favoriser la croissance végétale (Oleńska et al., 2020b).

◆ Acide abscissique (ABA)

L'acide abscissique est principalement synthétisé par les plantes supérieures et intervient dans divers processus physiologiques, notamment la dormance des graines, la tolérance à la sécheresse et la régulation stomatique. Cependant, quelques souches de PGPR ont également été signalées comme produisant de l'ABA. Par exemple Des espèces du genre *Arthrobacter* ont été signalées comme productrices d'ABA, contribuant à améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau et l'adaptation des plantes aux stress environnementaux (Vanissa et al., 2020).

1.3.1.5. Quorum sensing (QS)

Le quorum sensing est un système de communication intercellulaire utilisé par de nombreuses bactéries pour coordonner l'expression de gènes en fonction de la densité cellulaire. Ce mécanisme repose sur la production et la détection de molécules signal, telles que les N-acylhomosérine lactones (AHL), qui permettent d'activer collectivement des fonctions spécifiques, y compris la pathogénicité. Par exemple, chez *Pseudomonas syringae* et *Pectobacterium atrosepticum*, le QS déclenche la production de facteurs de virulence lorsque la population bactérienne atteint un seuil critique (Hartmann et al., 2021). Cependant, certaines PGPR ont développé la capacité de perturber ce processus via un mécanisme appelé quorum quenching (QQ). Ce dernier consiste à dégrader les AHL, empêchant ainsi les bactéries pathogènes de synchroniser leurs attaques. Les PGPR mettent en œuvre ce mécanisme grâce à des enzymes telles que les lactonases et les acylases, qui hydrolysent les molécules signal (Rosier et al., 2020).

Le gène *aiiA* de *Bacillus* sp est un exemple de QQ, réduisant la virulence des pathogènes en hydrolysant les AHL (Dong et al., 2000). L'introduction de ce gène dans des plantes transgéniques a montré une réduction des maladies (Altaf et al., 2017). Le traitement

des graines de tomate avec *Pseudomonas segetis* a également protégé contre *P. syringae* en utilisant des acylases pour dégrader les AHL (Rodríguez et al., 2020).

1.3.2. Mécanismes indirects

1.3.2.1. Production d'antibiotiques

Un sol oligotrophe est caractérisé par une faible disponibilité en nutriments essentiels. Dans cet environnement, les micro-organismes entrent en compétition pour ces ressources limitées et, pour s'adapter, produisent des antibiotiques, qui possèdent diverses propriétés, notamment des effets antimicrobiens et antitumoraux (Kim et al., 2012).

En outre, les antibiotiques jouent un rôle de modulateurs en tant que molécules signal, influençant les comportements collectifs des populations microbiennes (Zhang et al., 2020). Le développement d'une résistance intrinsèque aux antibiotiques (RIA) est également crucial pour la survie des micro-organismes (Nesme & Simonet, 2015).

Les PGPR utilisent les antibiotiques pour contrôler les phytopathogènes (Bakker et al., 2007 ; Glick et al., 2007). Ils produisent divers antibiotiques, tels que les phénazines et la pyolutéorine (Haas & Défago, 2005). Ces composés jouent un rôle vital dans la gestion des maladies des plantes et la résistance systémique induite (RSI) chez les plantes (Kenawy et al., 2019)

Les composés identifiés comme la surfactine, la fengycine, la bacillibactine, la pétrobactine, la lichenysine et la bacillaène ont montré une forte activité antagoniste contre les pathogènes bactériens fongiques et oomycètes affectant les tomates. Ces composés sont produits par des souches de PGPR telles que *Bacillus* et *Paenibacillus*, isolées de la rhizosphère des plants de tomate (Zhou et al., 2021). Selon Wang et al., (2021) les consortiums de PGPR, plutôt que des souches individuelles, offrent une meilleure protection contre diverses maladies des cultures.

1.3.2.2. Production d'enzymes lytiques

L'activité enzymatique est parmi les mécanismes de biocontrôle qui ont été étudiés. Les PGPR produisent de enzymes telles que :

- ◆ La phénylalanine ammoniac-lyase est une enzyme clé du métabolisme de la lignine, jouant un rôle déterminant dans les mécanismes de défense des plantes face aux infections fongiques pathogènes (Li et al., 2025).

- ◆ La β -glucanase est une enzyme qui hydrolyse les β -1,3-glucanes, composants majeurs de la paroi fongique, entraînant la lyse des agents pathogènes et la libération d'éliciteurs activant les défenses des plantes (Kaur et *al.*, 2022).
- ◆ La chitinase, la lipase la protéase, : Ces enzymes hydrolytiques dégradent respectivement la chitine (paroi fongique ou cuticule des nématodes), les protéines et les lipides des pathogènes, affaiblissant leur structure ou provoquant leur lyse (Egamberdieva et *al.*, 2023).
- ◆ Les phosphatases, jouent un rôle clé dans l'amélioration de la croissance végétale (Won et *al.*, 2021).

1.3.2.3. Induction de résistance systémique

C'est une réponse immunitaire généralisée des plantes, principalement déclenchée par la colonisation des racines par les PGPR (Zhu et *al.*, 2022). Cette colonisation induit un état de prédisposition (priming) chez les plantes hôtes qui peuvent répondre de manière plus forte et plus rapide aux attaques pathogènes ou au stress abiotique. Ce phénomène implique l'activation de réseaux de signalisation complexes et la modulation de l'expression de gènes de défense, y compris des gènes PR (pathogenesis-related). Ces gènes codent pour de nombreuses protéines PR qui possèdent des propriétés antifongiques, antibactériennes, antivirales et antinématodes (Kaur et *al.*, 2022). Par ailleurs, la colonisation des racines par les PGPR induit l'accumulation modérée de composés de défense comme les espèces réactives de l'oxygène (ERO). Les ERO jouent un double rôle dans les cellules végétales, agissant comme molécules de signalisation essentielles à de faibles concentrations tout en devenant des oxydants toxiques qui peuvent endommager les cellules à des niveaux élevés (Haghpanah et *al.*, 2025 ; Zehra et *al.*, 2021).

2. Pollution du sol :

La pollution des sols est la contamination des sols par des polluants, des produits chimiques toxiques ou d'autres contaminants en quantités suffisantes pour altérer leur qualité et les rendre inhabitables non seulement pour les organismes comme les insectes et micro-organismes, mais aussi pour les plantes. Cette contamination est principalement due aux activités humaines telles que l'exploitation minière, les pratiques agricoles modernes, la déforestation, le déversement inconsidéré d'excréments humains et l'élimination incontrôlée de déchets non traités provenant de diverses industries. La pollution des sols peut prendre diverses formes, notamment par l'utilisation de pesticides, d'herbicides et de fumigeant, d'engrais, de polluants atmosphériques lessivés par les pluies, la surexploitation des terres, l'urbanisation sauvage et la construction de routes et de maisons, etc. (Hassan Al-Taai, 2021 ; Pierzynski et *al.*, 2002).

2.1. Sources de pollution du sol

2.1.1. Pollution agricole

Les pratiques agricoles contribuent à la pollution des sols, notamment par l'usage intensif d'engrais et de pesticides. Si les engrais visent à améliorer le rendement des cultures, ils altèrent aussi la qualité des sols. Quant aux pesticides, ils contaminent non seulement le sol mais aussi les écosystèmes environnants, affectant plantes et animaux. Ces substances chimiques peuvent s'infiltrer en profondeur, polluant les nappes phréatiques, ou être entraînées par le ruissellement, ce qui favorise l'eutrophisation des eaux douces.

2.1.2. Pollution industrielle

La plupart des pollutions sont causées par les déchets industriels et l'élimination inappropriée des déchets contamine le sol avec des produits chimiques nocifs. Ces polluants affectent les végétaux et les animaux, ainsi que les réserves d'eau locales et l'eau potable.

D'autre part, les fumées toxiques provenant des décharges réglementées contiennent des produits chimiques qui peuvent retomber sur la terre sous forme de pluies acides et endommager la structure du sol. Les activités industrielles entraînent une acidification des sols et une contamination due à l'élimination des déchets industriels (métaux lourds, produits chimiques toxiques, huiles et carburants, etc. (Verma et *al.*, 2021).

2.1.3. Pollution urbaine

La pollution des sols peut être causée directement ou indirectement par les activités humaines. Par exemple, un mauvais système de drainage et l'augmentation des eaux de ruissellement contaminent les zones terrestres ou les cours d'eau avoisinants. L'élimination anarchique cause la décomposition des déchets dans le sol et y dépose un certain nombre de produits chimiques et de polluants. Ceux-ci peuvent à nouveau s'infiltrer dans les eaux souterraines ou être emportés par le réseau hydrographique local. Le dépôt excessif de déchets augmente la présence de bactéries dans le sol, ce qui entraîne la production de méthane résultant de leur activité de décomposition (Mishra et *al.*, 2016).

3. Pollution aux métaux lourds

L'industrialisation, l'urbanisation et l'intensification des techniques agronomiques ont entraîné une pollution croissante de l'environnement. L'émission excessive d'engrais chimiques et de pesticides a contribué à la contamination des sols, en particulier par les métaux lourds (Hasanuzzaman et *al.*, 2020 ; Raza et *al.*, 2020). Ces éléments toxiques, présents dans

l'air, l'eau et les sols, sont persistants et affectent gravement la santé humaine, la biodiversité et les écosystèmes.

Les métaux lourds présents dans les sols agricoles sont absorbés par les cultures et transférés à travers la chaîne alimentaire, mettant en danger la santé des organismes vivants. Cette bioaccumulation rend nécessaire la mise en place de stratégies efficaces pour la dépollution des sols.

Plusieurs métaux lourds, tels que le cuivre (Cu), le fer (Fe), le cobalt (Co), le molybdène (Mo), le manganèse (Mn), le zinc (Zn) et le vanadium (V), sont nécessaires en faibles quantités aux organismes vivants. En revanche, les métaux lourds les plus courants, tels que le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le mercure (Hg) et l'arsenic (As), sont plus toxiques, n'ont aucun rôle biologique dans le métabolisme microbien et sont considérés comme des agents cancérigènes et mutagènes (Rehman et *al.*, 2018).

En plus des dangers pour l'homme, les métaux lourds exercent une influence toxique significative sur les plantes. L'accumulation de métaux lourds tels que le Pb, le Co, le Zn, le cadmium (Cd), le chrome (Cr) et le nickel (Ni) dans le sol provoque des altérations morphologiques, une chlorose, un déséquilibre dans les processus métaboliques, ainsi qu'une diminution de la croissance et du rendement des plantes (Taamalli et *al.*, 2014).

3.1. Sources de contamination aux métaux lourds

3.1.1. Sources naturelles

Dans les sols contaminés, les métaux lourds peuvent être issus d'une source lithogénique. De nombreux métaux lourds ne se présentent pas sous forme élémentaire isolée, mais sous forme de structures synthétiques, facilement et directement assimilables par les cellules et tissus vivants (Derakhshan Nejad et *al.*, 2017).

Divers phénomènes naturels comme les émissions volcaniques, les embruns marins, les particules de sol transportées par le vent, les incendies de forêts ou l'altération des roches peuvent contribuer à l'enrichissement des sols en métaux lourds. Les sources biogéniques, telles que la décomposition de la matière organique, participent également à la libération de ces éléments dans le sol (Yan et *al.*, 2020).

3.1.2. Sources anthropiques

Les métaux lourds présents dans l'environnement proviennent en grande partie d'activités humaines telles que l'industrie, l'agriculture, l'exploitation minière et le rejet des eaux usées.

Ces sources anthropiques sont à l'origine d'une augmentation significative des concentrations en métaux lourds dans les écosystèmes. À titre d'exemple, les opérations de fusion des minerais libèrent du cuivre (Cu), du zinc (Zn) et de l'arsenic (As) ; l'utilisation d'insecticides est une source importante d'arsenic ; la combustion des énergies fossiles émet du mercure (Hg), tandis que les gaz d'échappement automobiles sont une source majeure de plomb (Pb) (Masindi *et al.*, 2018).

En outre, les activités humaines quotidiennes telles que les pratiques agricoles, les procédés industriels et les activités manufacturières contribuent à perturber l'équilibre écologique de la biosphère (Alengebawy *et al.*, 2021).

3.2. Contamination du sol par les métaux lourds et leurs effets sur les plantes

3.2.1. Changements morphologiques

L'effet de la toxicité des métaux lourds peut être observé sur presque tous les tissus végétaux et à tous les stades du cycle de vie des plantes de la germination des graines à la sénescence (Riyazuddin, Nisha, Ejaz, *et al.*, 2021).

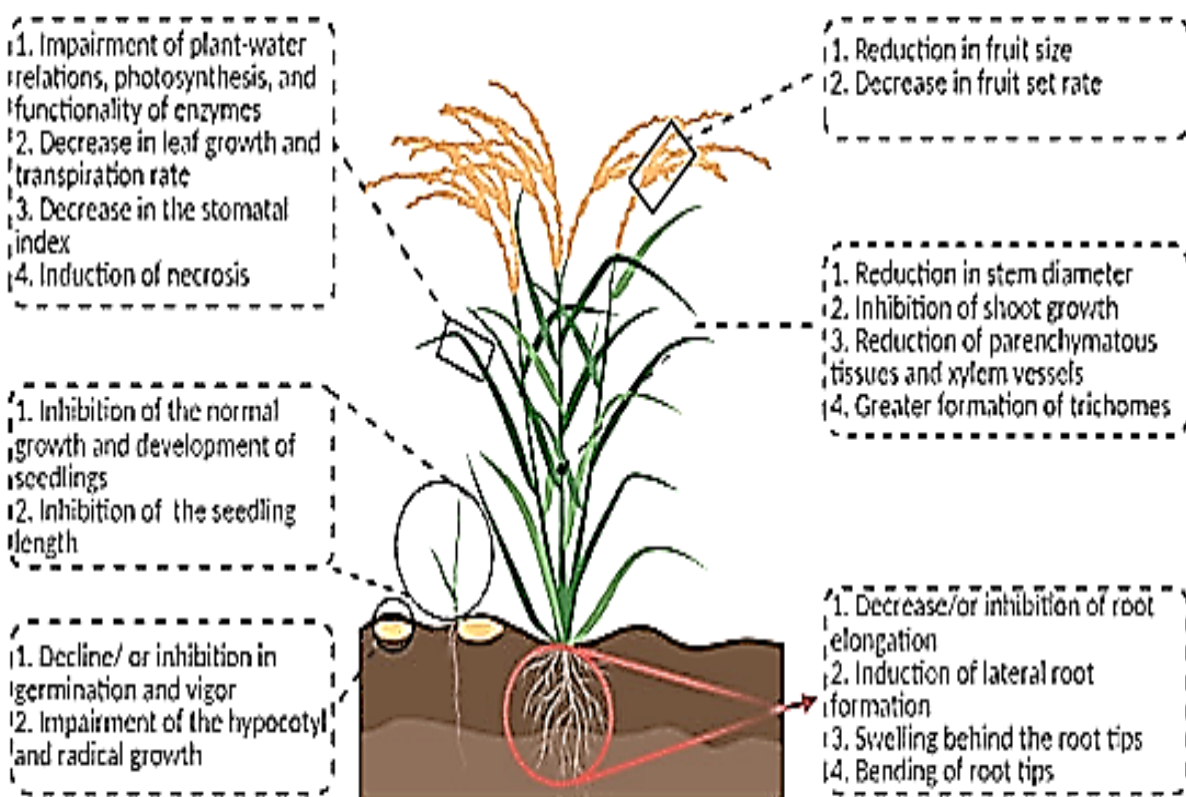


Figure n°2 : Changements morphologiques, anatomiques et physiologiques induits par la toxicité des (HM) dans les plantes.(Riyazuddin, Nisha, Ejaz, *et al.*, 2021).

3.2.1.1. Germination

La germination des graines est sensible aux conditions physico-chimiques de la rhizosphère, une diminution de la germination et de la vigueur des graines, ainsi que de la croissance ultérieure des plantules, a été signalée sous toxicité des métaux lourds dans la plupart des cas étudiés. Par exemple, un traitement combiné de Cu et de Cd sur la plante d'aubergine (*Solanum melongena*) a considérablement réduit la germination des graines, la croissance des plantules et le nombre de racines latérales (Neelima & Reddy, 2003).

3.2.1.2. Changement dans l'architecture racinaire

Une diminution de l'allongement des racines et une augmentation de la formation de racines latérales ont été signalées en présence de divers métaux lourds chez plusieurs plantes, notamment : le blé tendre (*Triticum aestivum*) (Sofa et al., 2017) et les légumineuses *Sesbania rostrat* et *Sesbania cannabina*. (Yang et al., 2004). Cette formation de racines latérales sous toxicité HM est le symptôme initial de la toxicité métaux lourds, qui altère ensuite l'absorption et la conduction de l'eau, ce qui, à son tour, entraîne un transport plus faible des photosynthétats vers les racines. Comme les racines reçoivent des quantités moindres de photosynthétats pendant la toxicité métaux lourds, la croissance des racines primaires et secondaires est inhibée, ce qui entraîne une longueur spécifique des racines plus faible (Rucin'ska & Rucin'ska-Sobkowiak, 2016). Ces modifications sont souvent dues à une dysrégulation des gradients d'auxine dans la racine, résultant d'une altération du transport polaire, ce qui contribue à stimuler la ramification racinaire malgré l'inhibition de la croissance de la racine principale (Hu et al., 2013).

3.2.1.3. Feuilles

La toxicité des métaux lourds entraîne une diminution du nombre, de la surface et de la biomasse des feuilles, ainsi qu'un changement de leur pigmentation et de leur épaisseur, altérant ainsi les relations plante-eau, ce qui affecte à son tour divers processus physiologiques tels que la transpiration et la photosynthèse. Ceci a été signalé chez un bon nombre de plantes : les épinards (*Spinacea oleracea*) (Zaheer et al., 2019). Chez certaines plantes telles que le tournesol (*Helianthus annuus*) et le haricot mungo (*Vigna radiata*), un nombre accru de stomates a été signalé en présence de Pb et d'As aux premiers stades de la toxicité des métaux lourds, qui s'est accompagné du développement de stomates arrêtés, fusionnés et anormaux chez *Vigna radiata* (P. Gupta & Bhatnagar, 2015).

3.2.1.4. Photosynthèse

L'accumulation de métaux lourds dans les plantes provoque des modifications défavorables des feuilles, qui sont les organes photosynthétiques primaires, entraînant une diminution du taux de photosynthèse. L'impact des métaux lourds sur la machinerie photosynthétique affecte la capture de lumière, le transport d'électrons et l'activité des enzymes photosynthétiques. Selon Yotsova *et al.* (2020), la toxicité au (Cd) chez le blé se manifeste par une inhibition de l'évolution de l'oxygène, une diminution de l'activité du photosystème I (PSI) et une réduction de la fluorescence de la chlorophylle, ce qui perturbe la photosynthèse et affecte négativement la croissance de la plante. De plus un gonflement des thylakoïdes, une dégradation des membranes chloroplastiques internes et une perte d'intégrité de la membrane chloroplastique ont été observés lors d'une toxicité Pb/Cd chez l'orge (Wang *et al.*, 2017).

3.2.1.5. Génotoxicité

La pollution par les métaux lourds induit des effets génotoxiques chez les plantes, en provoquant des dommages à l'ADN et des anomalies chromosomiques. L'étude de Sorrentino *et al.* (2022) sur trois cultivars de cardon a montré que le plomb induit une génotoxicité plus marquée que le cadmium, avec des dommages génétiques particulièrement importants. En effet, une réduction de la stabilité génomique importante a été observée, mesurée par l'analyse des marqueurs ISSR (Inter Simple Sequence Repeat), accompagnée d'une augmentation des bandes polymorphes dans les profils moléculaires ISSR, signe de mutations ou de réarrangements génomiques.

3.2.2. Stress oxydatif

Le stress induit par les métaux lourds chez les plantes entraîne une production excessive d'espèces réactives de l'oxygène (ERO), laquelle engendre des dommages cellulaires et moléculaires significatifs (Zhu *et al.*, 2021). Les métaux toxiques se divisent en deux catégories : les métaux redox-actifs (comme Fe, Cu, Cr) et les métaux redox-inactifs (tels que Cd, Pb, Zn, Ni, Al). Les métaux redox-actifs, du fait de leur potentiel redox supérieur à celui des molécules biologiques (par exemple Fe²⁺ et Cu²⁺), participent directement aux réactions redox biologiques, induisant la formation de ERO via les réactions de Haber-Weiss et de Fenton impliquant le fer dans la production de radicaux hydroxyles (OH⁻), des ERO très puissantes. En revanche, les métaux redox-inactifs ne génèrent pas directement de ERO par ces mécanismes, mais augmentent leur production en perturbant les systèmes antioxydants (Al Mahmud *et al.*, 2019).

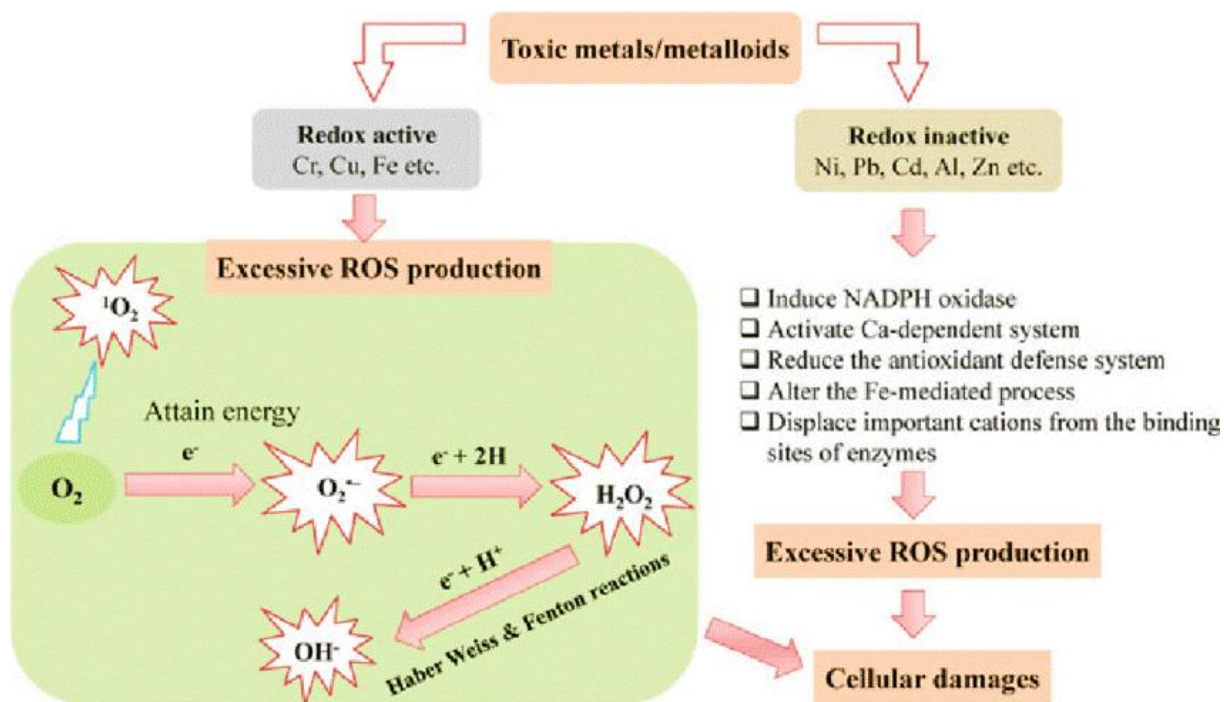


Figure n°3 : Mécanismes de production des espèces réactives de l'oxygène (ROS) induite par les HM et dommages oxydatifs associés dans les cultures oléagineuses.(Nazir et *al.*, 2020).

3.3. Impact des métaux lourds sur la santé humaine

Les métaux lourds représentent un enjeu majeur de santé publique en raison de leur toxicité multi organique. Leur accumulation dans les tissus végétaux constitue une source préoccupante de contamination pour l'homme par la consommation de plantes cultivées sur des sols pollués. Une fois ingérés, ces éléments affectent le système nerveux (troubles cognitifs, maladies neurodégénératives), rénal et hépatique (néphropathies, insuffisances, hépatotoxicité), ainsi que les systèmes immunitaire et cardiovasculaire (immunodépression, auto-immunité, hypertension, athérosclérose). Ils présentent également un potentiel cancérigène et génotoxique avéré, et engendrent des effets cutanés (dermatites, hyperkératose) ainsi que des impacts sur la reproduction et le développement (infertilité, perturbations embryonnaires et fœtales). Ces effets reposent principalement sur le stress oxydatif, l'induction de l'apoptose et les altérations de l'ADN, faisant des métaux lourds des agents toxiques particulièrement préoccupants pour la santé humaine (Mitra et *al.*, 2022).

4. Méthodes de dépollution

4.1. Méthodes physico-chimiques

4.1.1. Lavage des sols

Cette technique repose sur une agitation mécanique associée à l'utilisation d'eau ou de solutions contenant des agents chélateurs et tensioactifs, qui favorisent la solubilisation des polluants tels que métaux lourds, pesticides et hydrocarbures. Ce procédé génère un lixiviat chargé en contaminants, lequel est ensuite traité par des méthodes chimiques ou biologiques afin d'éliminer ou d'immobiliser les polluants avant leur rejet dans l'environnement (Oladoye et *al.*, 2022)

4.1.2. Désorption thermique

Est une technique de dépollution des sols visant à volatiliser les métaux lourds et métalloïdes, tels que le mercure et l'arsenic, présents dans les sols contaminés. Ce procédé consiste à chauffer le sol par conduction thermique in situ. Des puits chauffants (électriques ou alimentés au gaz avec des températures allant jusqu'à 900°C (Sun et *al.*, 2024), ou ex-situ dans fours rotatifs, convoyeurs afin de libérer les contaminants. Une fois les métaux lourds volatilisés, ils sont extraits du sol par application d'une dépression (vide) ou par l'utilisation d'un gaz vecteur. Deux types de désorption thermique sont distingués : la désorption à haute température, réalisée entre 320 et 560 °C, adaptée aux sols fortement contaminés, et la désorption à basse température, opérant entre 90 et 320 °C, destinée aux sols faiblement contaminés tandis que des températures supérieures ne sont appliquées que dans des conditions particulières (Paz-Ferreiro et *al.*, 2018).

4.1.3. Bêchage des sols

Également appelé retournement ou labour, consiste à creuser et mélanger le sol contaminé avec du sol propre afin de diluer la concentration des polluants. Cette méthode est particulièrement adaptée aux grandes surfaces où l'excavation complète et le remplacement du sol contaminé sont impraticables. Le bêchage favorise l'aération du sol et stimule l'activité microbienne, ce qui accélère la dégradation naturelle des contaminants (Priya et *al.*, 2023).

4.1.4. Substitution du sol

Appelé aussi excavation-remplacement, consiste à l'enlèvement du sol pollué suivi de son remplacement par un sol sain. Cette technique est généralement employée pour des zones contaminées localisées, telles que les abords de réservoirs souterrains ou de sites industriels.

Elle permet de réduire efficacement les risques d'exposition aux polluants et de restaurer la qualité du sol (Priya et *al.*, 2023).

5. Bioremédiation

La bioremédiation est l'utilisation d'organismes (micro-organismes et/ou plantes) pour le traitement des sols pollués. C'est une méthode largement acceptée de réhabilitation des sols car elle est perçue comme un processus naturel. Elle constitue également une méthode de réhabilitation des sols rentable (Blaylock et *al.*, 1997)

5.1. Bioremédiation in situ

Consiste à traiter les substances polluées directement sur le site de contamination. Cette méthode n'implique aucune excavation, ce qui entraîne peu ou pas de perturbation du sol. Étant donné qu'il n'est pas nécessaire de creuser, cette technique est peu coûteuse. Elle a efficacement traité les métaux lourds, les solvants chlorés, les colorants et les hydrocarbures dans des sites pollués (Folch et *al.*, 2013).

5.2. Bioremédiation ex situ

Implique l'excavation des sols contaminés, leur transport vers un site de traitement où les conditions physico-chimiques (aération, nutriments, température, pH) sont contrôlées pour optimiser la dégradation des polluants. Cette méthode est généralement plus coûteuse, mais plus rapide et plus efficace, avec un meilleur contrôle expérimental (Paul et *al.*, 2021).

5.3. Bioremédiation microbienne

Une méthode efficace et écologique pour réduire la pollution, en substituant les méthodes chimiques industrielles traditionnelles. Elle repose principalement sur l'utilisation de microorganismes tels que des bactéries, notamment les bactéries promotrices de croissance des plantes (PGPR), et les champignons, capables d'immobiliser, transformer ou éliminer les métaux lourds dans les sols contaminés. Les PGPR interviennent en stimulant la croissance végétale et en améliorant la tolérance des plantes aux métaux lourds grâce à divers mécanismes (Etesami & Maheshwari, 2018).

5.3.1. Biosorption

Défini comme le processus d'adsorption d'ions de métaux lourds par la biomasse telles que des bactéries, des champignons, des plantes ou certains animaux, est considéré comme une adsorption de métaux lourds métaboliquement indépendante. (Gunjyal et *al.*, 2023). La biosorption des métaux lourds repose sur des mécanismes physico-chimiques combinant adsorption physique et chimique. Les principaux mécanismes impliquent des interactions

électrostatiques, l'échange cationique, la complexation et la chélation entre les ions métalliques et les groupes fonctionnels acides (carboxyles, hydroxyles, phosphoryles) présents dans la paroi cellulaire ou les exopolysaccharides (EPS) extracellulaires. Ces processus sont indépendants du métabolisme cellulaire et permettent une fixation rapide et efficace des métaux en solution. (Zhou et *al.*, 2023a).

5.3.2. Bioaccumulation

La bioaccumulation est un phénomène biologique complexe impliquant l'accumulation d'ions métalliques lourds à l'intérieur des cellules microbiennes. Ce processus, plus lent que la biosorption, nécessite la participation active de multiples voies métaboliques. Il se déroule en deux étapes : d'abord, les ions métalliques se fixent à la surface cellulaire lors d'une phase métaboliquement inactive ; ensuite, ils sont transportés à l'intérieur de la cellule, ce qui requiert une activité métabolique (Nnaji et *al.*, 2023). Une fois à l'intérieur de l'espace intracellulaire, les métaux lourds peuvent être séquestrés par des protéines et des ligands peptidiques (c'est-à-dire le système de stockage). Sharma et Shukla. (2021) ont démontré dans leur étude que *Bacillus cereus* BPS-9 a montré un fort potentiel de bioaccumulation du (Pb) avec un taux d'accumulation de 79,26 %.

5.3.3. Biolixiviation

Processus complexe et multifactoriel impliquant les micro-organismes acidophiles chimiolithotrophes, capables d'oxyder le fer ferreux (Fe^{2+}) en fer ferrique (Fe^{3+}) et/ou de réduire le soufre en acide sulfurique (Zhou et *al.*, 2023b). Tran et *al.* (2020) ont mené une expérience à l'échelle laboratoire pour étudier l'impact d'un consortium microbien indigène sur l'élimination de l'arsenic (As) dans un sol agricole contaminé. Ils ont utilisé *Shewanella putrefaciens*, une bactérie capable de réduire le fer. Leur étude a montré que l'association de *S. putrefaciens* avec le consortium bactérien indigène permettait d'atteindre la meilleure efficacité d'élimination de l'arsenic, avec 57,5 % d'arsenic retiré du sol. En comparaison, *S. putrefaciens* seul a éliminé 30,1 % de l'arsenic, tandis que le consortium indigène seul a retiré 16,4 %.

5.3.4. Biotransformation

Un processus crucial, qui désigne la modification de la structure chimique d'une molécule, conduisant finalement à la formation d'une molécule relativement plus polaire (Shanu-Wilson et *al.*, 2020). L'interaction entre les métaux et les micro-organismes induit une modification des métaux toxiques et des composés organiques, les convertissant en une forme moins dangereuse. Ce mécanisme joue un rôle important en facilitant l'adaptation des métaux lourds par les micro-organismes. Selon les résultats de l'étude menée par Thatoi et *al.* (2014) a

rapporté que la souche *Bacillus*.sp SFC 500-1E, tolérante au chrome hexavalent (Cr VI), réduit ce dernier en chrome trivalent (Cr III) moins toxique grâce à une chromate réductase dépendante du NADH.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

RÉSULTATS ET DISCUSSION

CONCLUSION

Bien que le blé occupe une place centrale dans le régime alimentaire algérien, sa productivité est affectée ces dernières années par la contamination croissante des sols par les métaux lourds. Ces polluants perturbent la croissance des plantes et réduisent les rendements agricoles, ce qui représente un enjeu majeur pour la sécurité alimentaire et la santé humaine.

Pour faire face à ce problème, différentes stratégies ont été développées afin d'améliorer la croissance et la productivité des cultures. Parmi celles-ci, les méthodes biologiques basées sur l'utilisation de rhizobactéries promotrices de croissance des plantes (PGPR) suscitent un intérêt croissant. Ces micro-organismes favorisent la croissance des plantes tout en renforçant leur résistance aux stress abiotiques, notamment la toxicité des métaux lourds.

Ce travail s'est attaché à étudier des souches bactériennes tolérantes aux métaux lourds. L'inoculation des graines de blé dur variété Simeto avec la souche la plus performante a conduit à une amélioration significative des paramètres de croissance, notamment, la hauteur des plantules, la longueur des racines, en particulier en présence de plomb et de cobalt.

Ces résultats confirment le rôle majeur des PGPR comme agents biostimulants et bioprotecteurs dans des environnements pollués. Ils ouvrent des perspectives pour la phytoremédiation durable et l'amélioration des rendements agricoles en zones contaminées. Les travaux futurs devront se concentrer sur la caractérisation moléculaire des isolats et l'évaluation de leur efficacité sur le terrain.

Les limites de cette étude concernent la caractérisation moléculaire approfondie des isolats, ainsi que l'évaluation de leur efficacité en conditions de terrain, qui restent à explorer. Parmi les perspectives, il conviendra d'étudier plus finement les mécanismes d'interaction plante-bactérie et d'élargir les essais à d'autres contaminants et variétés de blé afin de valoriser pleinement ces bioagents.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adeleke, B. S., & Babalola, O. O.** (2021). Biotechnological overview of agriculturally important endophytic fungi. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 62(4), 507–520. <https://doi.org/10.1007/S13580-021-00334-1/METRICS>
- Ak, P., & Nagan, S.** (2015). Bioremediation of Dye Effluent and Metal. Contaminated Soil: Low-Cost Method for Environmental Clean-up by Microbes. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 57, 109–119.
- Aksouh, M. Y., Boudieb, N., Benosmane, N., Moussaoui, Y., Michalski, R., Klyta, J., & Kończyk, J.** (2024). Presence of Heavy Metals in Irrigation Water, Soils, Fruits, and Vegetables: Health Risk Assessment in Peri-Urban Boumerdes City, Algeria. *Molecules*, 29(17), 4187. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES29174187/S1>
- Al Mahmud, J., Bhuyan, M. H. M. B., Anee, T. I., Nahar, K., Fujita, M., & Hasanuzzaman, M.** (2019). Reactive oxygen species metabolism and antioxidant defense in plants under metal/metalloid stress. *Plant Abiotic Stress Tolerance: Agronomic, Molecular and Biotechnological Approaches*, 221–257. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0_10
- Alengebawy, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R., & Wang, M. Q.** (2021). Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health implications. *Toxics*, 9(3), 1–34. <https://doi.org/10.3390/TOXICS9030042>
- Alhaj Hamoud, Y., Shaghaleh, H., Saleem, M. H., Alshaharni, M. O., Alqurashi, M., Alhelaify, S. S., Alharthy, O. M., Fayad, E., & Rastogi, A.** (2025). Eco-friendly role of *serratia marcescens* and *pseudomonas fluorescens* in enhancing rice growth and mitigating cadmium toxicity via uptake modulation and antioxidant regulation. *BMC Plant Biology*, 25(1), 718. <https://doi.org/10.1186/S12870-025-06693-6>
- Altaf, M. M., Imran, M., Abulreesh, H. H., Khan, M. S. A., & Ahmad, I.** (2017). Diversity and applications of *penicillium* spp. in plant-growth promotion. *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering: Penicillium System Properties and Applications*, 261–276. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63501-3.00015-6>
- Altaf, Mohd. M.** (2021). *Functional Diversity of Nitrogen-Fixing Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: The Story So Far*. 327–348. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71206-8_16
- Babalola, O. O., & Glick, B. R.** (2012). Indigenous African agriculture and plant associated microbes: Current practice and future transgenic prospects. *Scientific Research and Essays*, 7(28), 2431–2439. <https://doi.org/10.5897/SRE11.1714>

- Bakker, P. A. H. M., Pieterse, C. M. J., & Van Loon, L. C.** (2007). Induced systemic resistance by fluorescent *Pseudomonas* spp. *Phytopathology*, *97*(2), 239–243. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-97-2-0239>;JOURNAL:JOURNAL:PHYTO;WGROUPE:STRING:PUBLICATION
- Bellés-Sancho, P., Beukes, C., James, E. K., & Pessi, G.** (2023). Nitrogen-Fixing Symbiotic Paraburkholderia Species: Current Knowledge and Future Perspectives. *Nitrogen 2023, Vol. 4, Pages 135-158*, *4*(1), 135–158. <https://doi.org/10.3390/NITROGEN4010010>
- Blaylock, M. J., Salt, D. E., Dushenkov, S., Zakharova, O., Gussman, C., Kapulnik, Y., Ensley, B. D., & Raskin, I.** (1997). Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents. *ACS Publications* MJ Blaylock, DE Salt, S Dushenkov, O Zakharova, C Gussman, Y Kapulnik, BD Ensley *Environmental Science & Technology*, *1997*•ACS Publications, *31*(3), 860–865. <https://doi.org/10.1021/ES960552A>
- Chakraborty, K., Kizhakkekalam, V. K., Joy, M., & Chakraborty, R. D.** (2022). Bacillibactin class of siderophore antibiotics from a marine symbiotic *Bacillus* as promising antibacterial agents. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *106*(1), 329–340. <https://doi.org/10.1007/S00253-021-11632-0>
- Chew, S. C.** (2002). *World Ecological Degradation: Accumulation, Urbanization, and Deforestation, 3000 B.C.–A.D. 2000*. AltaMira Press.
- Codou-David, G.** (2018). Blés anciens et modernes : une histoire de plus de 10 000 ans. *Revue Scientifique Bourgogne-Franche-Comté Nature*, *27*, 1–39.
- Combes-Meynet, E., Pothier, J. F., Moëgne-Loccoz, Y., & Prigent-Combaret, C.** (2011). The pseudomonas secondary metabolite 2,4-diacetylphloroglucinol is a signal inducing rhizoplane expression of azospirillum genes involved in plant-growth promotion. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, *24*(2), 271–284. <https://doi.org/10.1094/MPMI-07-10-0148>
- Danish, S., Hareem, M., Imran, M., Tahir, N., Gholizadeh, F., Datta, R., Alharbi, S. A., Ansari, M. J., & Alahmadi, T. A.** (2024). Effect of caffeic acid and cobalt sulfate on potato (*Solanum tuberosum* L.) plants in the presence and absence of nanoparticles-coated urea. *Scientific Reports*, *14*(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/S41598-024-70998-Z>;SUBJMETA=2661,2665,449,631;KWRD=ABIOTIC,PLANT+SCIENCES,PLANT+STRESS+RESPONSES

- David, S. R., Jaouen, A., Ihiwakrim, D., & Geoffroy, V. A.** (2021). Biodeterioration of asbestos cement by siderophore-producing *Pseudomonas*. *Journal of Hazardous Materials*, *403*, 123699. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.123699>
- Derakhshan Nejad, Z., Jung, M. C., & Kim, K. H.** (2017). Remediation of soils contaminated with heavy metals with an emphasis on immobilization technology. *Environmental Geochemistry and Health* *2017 40:3*, *40(3)*, 927–953. <https://doi.org/10.1007/S10653-017-9964-Z>
- Díaz, A., Marrero, J., Cabrera, G., Coto, O., & Gómez, J. M.** (2021). Biosorption of nickel, cobalt, zinc and copper ions by *Serratia marcescens* strain 16 in mono and multimetallic systems. *Biodegradation*, *33(1)*, 33. <https://doi.org/10.1007/S10532-021-09964-9>
- Díaz, A., Marrero, J., Cabrera, G., Coto, O., & Gómez, J. M.** (2022). Biosorption of nickel, cobalt, zinc and copper ions by *Serratia marcescens* strain 16 in mono and multimetallic systems. *Biodegradation*, *33(1)*, 33–43. <https://doi.org/10.1007/S10532-021-09964-9/FIGURES/6>
- Dong, Y. H., Xu, J. L., Li, X. Z., & Zhang, L. H.** (2000). AiiA, an enzyme that inactivates the acylhomoserine lactone quorum-sensing signal and attenuates the virulence of *Erwinia carotovora*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *97(7)*, 3526–3531. <https://doi.org/10.1073/PNAS.97.7.3526>,
- dos Reis Ferreira, G. M., Pires, J. F., Ribeiro, L. S., Carlier, J. D., Costa, M. C., Schwan, R. F., & Silva, C. F.** (2023). Impact of lead (Pb²⁺) on the growth and biological activity of *Serratia marcescens* selected for wastewater treatment and identification of its *zntR* gene—a metal efflux regulator. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *39(4)*. <https://doi.org/10.1007/S11274-023-03535-1>,
- Drogue, B., Sanguin, H., Chamam, A., Mozar, M., Llauro, C., Panaud, O., Prigent-Combaret, C., Picault, N., & Wisniewski-Dyé, F.** (2014). Plant root transcriptome profiling reveals a strain-dependent response during *Azospirillum*-rice cooperation. *Frontiers in Plant Science*, *5*, 120055. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2014.00607/BIBTEX>
- Dutta, P., Muthukrishnan, G., Gopalasubramaiaam, S. K., Dharmaraj, R., Karuppaiah, A., Loganathan, K., Periyasamy, K., Pillai, M. A., Upamanya, G. K., Boruah, S., Deb, L., Kumari, A., Mahanta, M., Heisnam, P., & Mishra, A. K.** (2022). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and its mechanisms against plant diseases for sustainable agriculture and

better productivity *Biocell*, 46(8), 1843–1859. <https://doi.org/10.32604/BIOCELL.2022.019291>

Egamberdieva, D., Eshboev, F., Shukurov, O., Alaylar, B., & Arora, N. K. (2023). Bacterial Bioprotectants: Biocontrol Traits and Induced Resistance to Phytopathogens. *Microbiology Research* 2023, Vol. 14, Pages 689-703, 14(2), 689–703. <https://doi.org/10.3390/MICROBIOLRES14020049>

Elizabeth Rani, C., Balaji Ayyadurai, V., & Kavitha, K. K. (2021). Bioremediation of Heavy Metals and Toxic Chemicals from Muttukadu Lake, Chennai by Biosurfactant and Biomass Treatment Strategies. *Environmental Science and Engineering*, 67–85. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64122-1_6

Etesami, H., & Maheshwari, D. K. (2018). Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 156, 225–246. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2018.03.013>

Folch, A., Vilaplana, M., Amado, L., Vicent, T., & Caminal, G. (2013). Fungal permeable reactive barrier to remediate groundwater in an artificial aquifer. *Journal of Hazardous Materials*, 262, 554–560. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2013.09.004>

Gamalero, E., & Glick, B. R. (2022). Recent Advances in Bacterial Amelioration of Plant Drought and Salt Stress. *Biology*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/BIOLOGY11030437>

Glick, B. R., Todorovic, B., Czarny, J., Cheng, Z., Duan, J., & McConkey, B. (2007). Promotion of plant growth by bacterial ACC deaminase. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 26(5–6), 227–242. <https://doi.org/10.1080/07352680701572966>

González, D., Robas, M., Probanza, A., & Jiménez, P. A. (2021). Selection of Mercury-Resistant PGPR Strains Using the BMRSI for Bioremediation Purposes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18), 9867. <https://doi.org/10.3390/IJERPH18189867>

Grobelak, A., Napora, A., & Kacprzak, M. (2015). Using plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) to improve plant growth. *Ecological Engineering*, 84, 22–28. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2015.07.019>

Gu, S., Wei, Z., Shao, Z., Friman, V. P., Cao, K., Yang, T., Kramer, J., Wang, X., Li, M., Mei, X., Xu, Y., Shen, Q., Kümmerli, R., & Jousset, A. (2020). Competition for iron drives

phytopathogen control by natural rhizosphere microbiomes. *Nature Microbiology* 2020 5:8, 5(8), 1002–1010. <https://doi.org/10.1038/s41564-020-0719-8>

Gunjyal, N., Rani, S., Asgari Lajayer, B., Senapathi, V., & Astatkie, T. (2023). A review of the effects of environmental hazards on humans, their remediation for sustainable development, and risk assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6), 1–16. <https://doi.org/10.1007/S10661-023-11353-Z/METRICS>

Guo, Y., Ren, G., Zhang, K., Li, Z., Miao, Y., & Guo, H. (2021). Leaf senescence: progression, regulation, and application. *Molecular Horticulture* 2021 1:1, 1(1), 1–25. <https://doi.org/10.1186/S43897-021-00006-9>

Gupta, P., & Bhatnagar, A. K. (2015). Spatial distribution of arsenic in different leaf tissues and its effect on structure and development of stomata and trichomes in mung bean, *Vigna radiata* (L.) Wilczek. *Environmental and Experimental Botany*, 109, 12–22. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2014.08.001>

Gupta, R., Khan, F., Alqahtani, F. M., Hashem, M., & Ahmad, F. (2023). Plant Growth–Promoting Rhizobacteria (PGPR) Assisted Bioremediation of Heavy Metal Toxicity. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 2023 196:5, 196(5), 2928–2956. <https://doi.org/10.1007/S12010-023-04545-3>

Gupta, R., Kumar, R., Al-Qahtani, W. H., & Abdel-Maksoud, M. A. (2024). Exploring the uncharted: Zinc and phosphate solubilization in Zn-P isolates from wheat rhizosphere inceptisols. *Journal of King Saud University - Science*, 36(11), 103509. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUS.2024.103509>

Haas, D., & Défago, G. (2005). Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads. *Nature Reviews Microbiology* 2005 3:4, 3(4), 307–319. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1129>

Haghpanah, M., Namdari, A., Kaleji, M. K., Nikbakht-dehkordi, A., Arzani, A., & Araniti, F. (2025). Interplay Between ROS and Hormones in Plant Defense Against Pathogens. *Plants*, 14(9), 1297. <https://doi.org/10.3390/PLANTS14091297>

Han, Y., Kang, W., Shi, S., Guan, J., Du, Y., He, F., Lu, B., & Wang, M. (2024). Investigation of Nitrogen Fixation Efficiency in Diverse Alfalfa Varieties Utilizing *Sinorhizobium meliloti* LL2. *Agronomy* 2024, Vol. 14, Page 2732, 14(11), 2732. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY14112732>

- Hartmann, A., Klink, S., & Rothballer, M.** (2021). Importance of n-acyl-homoserine lactone-based quorum sensing and quorum quenching in pathogen control and plant growth promotion. *Pathogens*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/PATHOGENS10121561>
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S. M., Al Mahmud, J., Fujita, M., & Fotopoulos, V.** (2020). Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense in Plants under Abiotic Stress: Revisiting the Crucial Role of a Universal Defense Regulator. *Antioxidants* 2020, Vol. 9, Page 681, 9(8), 681. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX9080681>
- Hassan Al-Taai, S. H.** (2021). Soil Pollution - Causes and Effects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 790(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/790/1/012009>
- Hellriegel, H. 1831-1895, & Wilfarth, H. 1853-1904. (1888). Untersuchungen über die Stickstoffnahrung der Gramineen und Leguminosen. *Untersuchungen Über Die Stickstoffnahrung Der Gramineen Und Leguminosen, von H. Hellriegel Und H. Wilfarth Unter Mitwirkung von H. Roemer, R. Günther, H. Moeller Und G. Wimmer. (Referent: H. Hellriegel.)*. <https://doi.org/10.5962/BHL.TITLE.27102>
- Hönig, M., Plíhalová, L., Husičková, A., Nisler, J., & Doležal, K.** (2018). Role of Cytokinins in Senescence, Antioxidant Defence and Photosynthesis. *International Journal of Molecular Sciences* 2018, Vol. 19, Page 4045, 19(12), 4045. <https://doi.org/10.3390/IJMS19124045>
- Hu, Y. F., Zhou, G., Na, X. F., Yang, L., Nan, W. Bin, Liu, X., Zhang, Y. Q., Li, J. L., & Bi, Y. R.** (2013). Cadmium interferes with maintenance of auxin homeostasis in Arabidopsis seedlings. *Journal of Plant Physiology*, 170(11), 965–975. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.02.008>
- Jakubiec-Krzysiak, K., Rajnisz-Mateusiak, A., Guspiel, A., Ziemska, J., & Solecka, J.** (2018). Secondary metabolites of actinomycetes and their antibacterial, antifungal and antiviral properties. *Polish Journal of Microbiology*, 67(3), 259–272. <https://doi.org/10.21307/PJM-2018-048>,
- Kaur, A., Kaur, S., Kaur, A., Sarao, N. K., Sharma, D., Kaur, A., Kaur, S., Kaur, A., Sarao, N. K., & Sharma, D.** (2022). Pathogenesis-Related Proteins and Their Transgenic Expression for Developing Disease-Resistant Crops: Strategies Progress and Challenges. *Case Studies of Breeding Strategies in Major Plant Species*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.106774>
- Kaur, S., Samota, M. K., Choudhary, M., Choudhary, M., Pandey, A. K., Sharma, A., & Thakur, J.** (2022). How do plants defend themselves against pathogens-Biochemical

mechanisms and genetic interventions *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 28(2), 485.
<https://doi.org/10.1007/S12298-022-01146-Y>

Kenawy, A., Dailin, D. J., Abo-Zaid, G. A., Malek, R. A., Ambehabati, K. K., Zakaria, K. H. N., Sayyed, R. Z., & El Enshasy, H. A. (2019). Biosynthesis of Antibiotics by PGPR and Their Roles in Biocontrol of Plant Diseases. *Microorganisms for Sustainability*, 13, 1–35.
https://doi.org/10.1007/978-981-13-6986-5_1

Khoso, M. A., Wagan, S., Alam, I., Hussain, A., Ali, Q., Saha, S., Poudel, T. R., Manghwar, H., & Liu, F. (2024). Impact of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on plant nutrition and root characteristics: Current perspective. *Plant Stress*, 11.
<https://doi.org/10.1016/J.STRESS.2023.100341>

Khumairah, F. H., Nurbaity, A., Fitriatin, B. N., Jingga, A., & Simarmata, T. (2018). In vitro test and bioassay of selected Phosphate Solubilizing Bacteria (PSB) by using maize seedlings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 205(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/205/1/012019>

Kim, K. R., Owens, G., Ok, Y. S., Park, W. K., Lee, D. B., & Kwon, S. I. (2012). Decline in extractable antibiotics in manure-based composts during composting. *Waste Management*, 32(1), 110–116. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2011.07.026>

Kloepper, J. W. (1981). Relationship of in vitro Antibiosis of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria to Plant Growth and the Displacement of Root Microflora. *Phytopathology*, 71(10), 1020. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-71-1020>.

Kloepper, J. W., & Schroth, M. N. (1978). Plant growth-promoting rhizobacteria on radishes. *Proceedings of the 4th International Conference on Plant Pathogenic Bacteria*, 879–882.

Kraemer, S. M. (2011). Siderophores. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, 9781402092114, 793–796. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9212-1_186

Kulkova, I., Wróbel, B., & Dobrzyński, J. (2024). *Serratia* spp. as plant growth-promoting bacteria alleviating salinity, drought, and nutrient imbalance stresses. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1342331. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2024.1342331/BIBTEX>

Kwon, Y. S., Lee, D. Y., Rakwal, R., Baek, S. B., Lee, J. H., Kwak, Y. S., Seo, J. S., Chung, W. S., Bae, D. W., & Kim, S. G. (2016). Proteomic analyses of the interaction between the plant-growth promoting rhizobacterium *Paenibacillus polymyxa* E681 and *Arabidopsis*

thaliana. *Proteomics*, 16(1), 122–135.
<https://doi.org/10.1002/PMIC.201500196;WGROUPE:STRING:PUBLICATION>

Li, C., Zhang, G., Cheng, G., & Wang, Q. (2025). Phenylalanine Ammonia-Lyase GhPAL9 Confers Resistance to Verticillium Wilt in Cotton. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(11), 4983. <https://doi.org/10.3390/IJMS26114983/S1>

Mariano-da-Silva, S., Radünz, A. L., Ducatti, R. D. B., Tironi, S. P., Smaniotto, V., & Toniolo, D. H. P. (2025). Assessment of Lead Concentrations on Germination and Seedling Growth of *Triticum aestivum* var ORS Senna. *Revista de Gestão - RGSA*, 19(5), e12138. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n5-021>

Masindi, V., Muedi, K. L., Masindi, V., & Muedi, K. L. (2018). Environmental Contamination by Heavy Metals. *Heavy Metals*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.76082>

Mekureyaw, M. F., Pandey, C., Hennessy, R. C., Nicolaisen, M. H., Liu, F., Nybroe, O., & Roitsch, T. (2022). The cytokinin-producing plant beneficial bacterium *Pseudomonas fluorescens* G20-18 primes tomato (*Solanum lycopersicum*) for enhanced drought stress responses. *Journal of Plant Physiology*, 270. <https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2022.153629>,

Merdia, B., Malek Rokaia, B., Kheira, F., & Asmaa, B. (2020). Biological control by Plant Growth Promoting Rhizobacteria. *Algerian Journal of Biosciences*, 1(2), 030-036–030–036. <https://doi.org/10.57056/AJB.V1I2.31>

Mishra, R., Mohammad, N., & Roychoudhury, N. (2016). Soil pollution: Causes, effects and control. *Van Sangyan*, 3, 1–14.

Mitra, S., Chakraborty, A. J., Tareq, A. M., Emran, T. Bin, Nainu, F., Khusro, A., Idris, A. M., Khandaker, M. U., Osman, H., Alhumaydhi, F. A., & Simal-Gandara, J. (2022). Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *Journal of King Saud University - Science*, 34(3), 101865. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUS.2022.101865>

Mohamed, H. E., & Hassan, A. M. (2019). Role of Salicylic Acid in Alleviating Cobalt Toxicity in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Seedlings. *Journal of Agricultural Science*, 11(10), p112. <https://doi.org/10.5539/JAS.V11N10P112>

- Nag, P., & Das, S.** (2022). Microbiome to the Rescue: Nitrogen Cycling and Fixation in Non-legumes. *Microorganisms for Sustainability*, *36*, 195–214. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4906-7_9
- Nageswaran, N., Ramteke, P. W., Verma, O. P., P, A., & ey.** (2012). Antibiotic Susceptibility and Heavy Metal Tolerance Pattern of *Serratia Marcescens* Isolated From Soil and Water. *Journal of Bioremediation & Biodegradation* 2012 3:7, 3(7), 1–5. <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000158>
- Nazir, M. M., Ulhassan, Z., Zeeshan, M., Ali, S., & Gill, M. B.** (2020). Toxic Metals/Metalloids Accumulation, Tolerance, and Homeostasis in Brassica Oilseed Species. *Toxic Metals/Metalloids Accumulation, Tolerance, and Homeostasis in Brassica Oilseed Species*, 379–408. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6345-4_13
- Neelima, P., & Reddy, K. J.** (2003). Differential effect of cadmium and mercury on growth and metabolism of *Solanum melongena* L. seedlings. *Journal of Environmental Biology*, *24*(4), 453–460. <https://europepmc.org/article/med/15248662>
- Nesme, J., & Simonet, P.** (2015). The soil resistome: A critical review on antibiotic resistance origins, ecology and dissemination potential in telluric bacteria. *Environmental Microbiology*, *17*(4), 913–930. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12631>,
- Nett, R. S., Montanares, M., Marcassa, A., Lu, X., Nagel, R., Charles, T. C., Hedden, P., Rojas, M. C., & Peters, R. J.** (2017). Elucidation of gibberellin biosynthesis in bacteria reveals convergent evolution. *Nature Chemical Biology*, *13*(1), 69–74. <https://doi.org/10.1038/NCHEMBIO.2232;SUBJMETA=326,41,60,607,631,92;KWRD=BACTERIA,BIOSYNTHESIS,ENZYMES>
- Ngoma, L., & Ahmad, F.** (2012). Ecophysiology of plant growth promoting bacteria. *Scientific Research and Essays*, *7*, 4003–4013. <https://doi.org/10.5897/SRE12.646>
- Nnaji, N. D., Onyeaka, H., Miri, T., & Ugwa, C.** (2023). Bioaccumulation for heavy metal removal: a review. *SN Applied Sciences*, *5*(5), 1–12. <https://doi.org/10.1007/S42452-023-05351-6/METRICS>
- Oladoye, P. O., Olowe, O. M., & Asemoloye, M. D.** (2022). Phytoremediation technology and food security impacts of heavy metal contaminated soils: A review of literature. *Chemosphere*, *288*, 132555. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132555>

- Oleńska, E., Malek, W., Wójcik, M., Swiecicka, I., Thijs, S., & Vangronsveld, J.** (2020a). Beneficial features of plant growth-promoting rhizobacteria for improving plant growth and health in challenging conditions: A methodical review. *Science of the Total Environment*, 743. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140682>
- Oleńska, E., Malek, W., Wójcik, M., Swiecicka, I., Thijs, S., & Vangronsveld, J.** (2020b). Beneficial features of plant growth-promoting rhizobacteria for improving plant growth and health in challenging conditions: A methodical review. *Science of The Total Environment*, 743, 140682. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.140682>
- Orhan, F.** (2016). Alleviation of salt stress by halotolerant and halophilic plant growth-promoting bacteria in wheat (*Triticum aestivum*). *Brazilian Journal of Microbiology*, 47(3), 621–627. <https://doi.org/10.1016/J.BJM.2016.04.001>
- Paul, O., Jasu, A., Lahiri, D., Nag, M., & 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. <https://doi.org/10.3846/JEELM.2021.15447>
- Paz-Ferreiro, J., Gascó, G., Méndez, A., & Reichman, S. M.** (2018). Soil Pollution and Remediation. *International Journal of Environmental Research and Public Health 2018, Vol. 15, Page 1657, 15(8)*, 1657. <https://doi.org/10.3390/IJERPH15081657>
- Pereira, S. I. A., & Castro, P. M. L.** (2014). Phosphate-solubilizing rhizobacteria enhance Zea mays growth in agricultural P-deficient soils. *Ecological Engineering*, 73, 526–535. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2014.09.060>
- Pierzynski, G. M., Lambert, M., Hetrick, B. A. D., Sweeney, D. W., & Erickson, L. E.** (2002). Phytostabilization Of Metal Mine Tailings Using Tall Fescue. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 6(4), 212. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-025X\(2002\)6:4\(212\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-025X(2002)6:4(212))
- Poveda, J., & González-Andrés, F.** (2021). Bacillus as a source of phytohormones for use in agriculture. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(23), 8629–8645. <https://doi.org/10.1007/S00253-021-11492-8/METRICS>
- Priya, A. K., Muruganandam, M., Ali, S. S., & Kornaros, M.** (2023). Clean-Up of Heavy Metals from Contaminated Soil by Phytoremediation: A Multidisciplinary and Eco-Friendly Approach. *Toxics*, 11(5), 422. <https://doi.org/10.3390/TOXICS11050422>

Pujic, P., Carro, L., Fournier, P., Armengaud, J., Miotello, G., Dumont, N., Bourgeois, C., Saupin, X., Jame, P., Selak, G. V., Alloisio, N., & Normand, P. (2023). Frankia alni Carbonic Anhydrase Regulates Cytoplasmic pH of Nitrogen-Fixing Vesicles. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(11), 9162. <https://doi.org/10.3390/IJMS24119162/S1>

Qin, H., Hu, T., Zhai, Y., Lu, N., & Aliyeva, J. (2020). The improved methods of heavy metals removal by biosorbents: A review. *Environmental Pollution*, 258, 113777. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2019.113777>

Raza, A., Habib, M., Kakavand, S. N., Zahid, Z., Zahra, N., Sharif, R., & Hasanuzzaman, M. (2020). Phytoremediation of cadmium: Physiological, biochemical, and molecular mechanisms. *Biology*, 9(7), 1–46. <https://doi.org/10.3390/BIOLOGY9070177>,

Rehman, K., Fatima, F., Waheed, I., & Akash, M. S. H. (2018). Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. *Journal of Cellular Biochemistry*, 119(1), 157–184. <https://doi.org/10.1002/JCB.26234>,

Renoud, S., Abrouk, D., Prigent-Combaret, C., Wisniewski-Dyé, F., Legendre, L., Moëgne-Loccoz, Y., & Muller, D. (2022). Effect of Inoculation Level on the Impact of the PGPR *Azospirillum lipoferum* CRT1 on Selected Microbial Functional Groups in the Rhizosphere of Field Maize. *Microorganisms*, 10(2), 325. <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS10020325/S1>

Riyazuddin, R., Nisha, N., Ejaz, B., Khan, M. I. R., Kumar, M., Ramteke, P. W., & Gupta, R. (2021). A Comprehensive Review on the Heavy Metal Toxicity and Sequestration in Plants. *Biomolecules* 2022, Vol. 12, Page 43, 12(1), 43. <https://doi.org/10.3390/BIOM12010043>

Riyazuddin, R., Nisha, N., Singh, K., Verma, R., & Gupta, R. (2021). Involvement of dehydrin proteins in mitigating the negative effects of drought stress in plants. *Plant Cell Reports* 2021 41:3, 41(3), 519–533. <https://doi.org/10.1007/S00299-021-02720-6>

Rizza, A., & Jones, A. M. (2019). The makings of a gradient: spatiotemporal distribution of gibberellins in plant development. *Current Opinion in Plant Biology*, 47, 9–15. <https://doi.org/10.1016/J.PBI.2018.08.001>

Rodríguez, M., Torres, M., Blanco, L., Béjar, V., Sampedro, I., & Llamas, I. (2020). Plant growth-promoting activity and quorum quenching-mediated biocontrol of bacterial phytopathogens by *Pseudomonas segetis* strain P6. *Scientific Reports*, 10(1), 1–12.

[https://doi.org/10.1038/S41598-020-61084-](https://doi.org/10.1038/S41598-020-61084-1)

1;SUBJMETA=2522,326,631;KWRD=APPLIED+MICROBIOLOGY,MICROBIOLOGY

Rosier, B. T., Moya-Gonzalvez, E. M., Corell-Escuin, P., & Mira, A. (2020). Isolation and Characterization of Nitrate-Reducing Bacteria as Potential Probiotics for Oral and Systemic Health. *Frontiers in Microbiology*, *11*. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2020.555465>,

Rucin'ska, R., & Rucin'ska-Sobkowiak, R. (2016). Water relations in plants subjected to heavy metal stresses. *Acta Physiologiae Plantarum* *2016 38 :11*, *38(11)*, 1–13. <https://doi.org/10.1007/S11738-016-2277-5>

Sahoo, H., Kumari, S., & Naik, U. C. (2021). Characterization of multi-metal-resistant *Serratia* sp. GP01 for treatment of effluent from fertilizer industries. *Archives of Microbiology*, *203(9)*, 5425–5435. <https://doi.org/10.1007/S00203-021-02523-Z>,

Saud, S., Wang, D., Fahad, S., Javed, T., Jaremko, M., Abdelsalam, N. R., & Ghareeb, R. Y. (2022). The impact of chromium ion stress on plant growth, developmental physiology, and molecular regulation. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 994785. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2022.994785>

Sellami, S., Zeghouan, O., Dhahri, F., Mechi, L., Moussaoui, Y., & Kebabi, B. (2022). Assessment of heavy metal pollution in urban and peri-urban soil of Setif city (High Plains, eastern Algeria). *Environmental Monitoring and Assessment*, *194(2)*. <https://doi.org/10.1007/S10661-022-09781-4>

Selt, M. M. (2025). The wheat sector in Algeria facing the challenges of food security. *مجلة إضافات إقتصادية*, *9(1)*, 677–694. <https://asjp.cerist.dz/en/article/265200>

Shanu-Wilson, J., Evans, L., Wrigley, S., Steele, J., Atherton, J., & Boer, J. (2020). Biotransformation: Impact and Application of Metabolism in Drug Discovery. *ACS Medicinal Chemistry Letters*, *11(11)*, 2087–2107. https://doi.org/10.1021/ACSMEDCHEMLETT.0C00202/ASSET/IMAGES/MEDIUM/MLOC00202_0023.GIF

Sharma, B., & Shukla, P. (2021). Lead bioaccumulation mediated by *Bacillus cereus* BPS-9 from an industrial waste contaminated site encoding heavy metal resistant genes and their transporters. *Journal of Hazardous Materials*, *401*, 123285. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.123285>

Sharma, V., Bhattacharyya, S., Kumar, R., Kumar, A., Ibañez, F., Wang, J., Guo, B., Sudini, H. K., Gopalakrishnan, S., Dasgupta, M., Varshney, R. K., & Pandey, M. K. (2020). Molecular Basis of Root Nodule Symbiosis between Bradyrhizobium and ‘Crack-Entry’ Legume Groundnut (*Arachis hypogaea* L.). *Plants* 2020, Vol. 9, Page 276, 9(2), 276. <https://doi.org/10.3390/PLANTS9020276>

Sofa, A., Bochicchio, R., Amato, M., Rendina, N., Vitti, A., Nuzzaci, M., Altamura, M. M., Falasca, G., Della Rovere, F., & Scopa, A. (2017). Plant architecture, auxin homeostasis and phenol content in *Arabidopsis thaliana* grown in cadmium- and zinc-enriched media. *Journal of Plant Physiology*, 216, 174–180. <https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2017.06.008>

Sorrentino, M. C., Giordano, S., Capozzi, F., & Spagnuolo, V. (2022). Metals Induce Genotoxicity in Three Cardoon Cultivars: Relation to Metal Uptake and Distribution in Extra- and Intracellular Fractions. *Plants*, 11(4), 475. <https://doi.org/10.3390/PLANTS11040475/S1>

Sun, X., Zhao, L., Huang, M., Hai, J., Liang, X., Chen, D., & Liu, J. (2024). In-situ thermal conductive heating (TCH) for soil remediation: A review. *Journal of Environmental Management*, 351. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119602>

Thatoi, H., Das, S., Mishra, J., Rath, B. P., & Das, N. (2014). Bacterial chromate reductase, a potential enzyme for bioremediation of hexavalent chromium: A review. *Journal of Environmental Management*, 146, 383–399. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2014.07.014>

Timofeeva, A. M., Galyamova, M. R., & Sedykh, S. E. (2022). Bacterial Siderophores: Classification, Biosynthesis, Perspectives of Use in Agriculture. *Plants*, 11(22), 3065. <https://doi.org/10.3390/PLANTS11223065>

Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. (1975). *Soil fertility and fertilizers [by] Samuel L. Tisdale [and] Werner L. Nelson.* 694.

Tran, T. M., Han, H. J., Ko, J. I., & Lee, J. U. (2020). Effect of Indigenous Microbial Consortium on Bioremediation of Arsenic from Contaminated Soil by *Shewanella putrefaciens*. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 3286, 12(8), 3286. <https://doi.org/10.3390/SU12083286>

Vanissa, T. T. G., Berger, B., Patz, S., Becker, M., Turečková, V., Novák, O., Tarkowská, D., Henri, F., & Ruppel, S. (2020). The Response of Maize to Inoculation with *Arthrobacter* sp. and *Bacillus* sp. in Phosphorus-Deficient, Salinity-Affected Soil. *Microorganisms* 2020, Vol. 8, Page 1005, 8(7), 1005. <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS8071005>

- Verma, F., Singh, S., Dhaliwal, S. S., Kumar, V., Kumar, R., Singh, J., & Parkash, C.** (2021). Appraisal of pollution of potentially toxic elements in different soils collected around the industrial area. *Heliyon*, 7(10), e08122. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E08122>
- Walker, V., Bertrand, C., Bellvert, F., Moëgne-Loccoz, Y., Bally, R., & Comte, G.** (2011). Host plant secondary metabolite profiling shows a complex, strain-dependent response of maize to plant growth-promoting rhizobacteria of the genus *Azospirillum*. *New Phytologist*, 189(2), 494–506. <https://doi.org/10.1111/J.1469-8137.2010.03484.X>,
- Wang, H., Liu, R., You, M. P., Barbetti, M. J., & Chen, Y.** (2021). Pathogen Biocontrol Using Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPR): Role of Bacterial Diversity. *Microorganisms*, 9(9), 1988. <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS9091988>
- Wang, X., Ma, R., Cui, D., Cao, Q., Shan, Z., & Jiao, Z.** (2017). Physio-biochemical and molecular mechanism underlying the enhanced heavy metal tolerance in highland barley seedlings pre-treated with low-dose gamma irradiation. *Scientific Reports*, 7(1), 1–14. [https://doi.org/10.1038/S41598-017-14601-](https://doi.org/10.1038/S41598-017-14601-8)
8;SUBJMETA=1736,2661,2665,449,631;KWRD=ABIOTIC,PLANT+PHYSIOLOGY
- Yadav, M., Gupta, R., & Sharma, R. K.** (2019). Green and Sustainable Pathways for Wastewater Purification. *Advances in Water Purification Techniques: Meeting the Needs of Developed and Developing Countries*, 355–383. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814790-0.00014-4>
- Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M. L., Ghosh, S., & Chen, Z.** (2020). Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Frontiers in Plant Science*, 11, 513099. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2020.00359/XML/NLM>
- Yang, P., Condric, A., Scranton, S., Hebner, C., Lu, L., & Ali, M. A.** (2024). Utilizing Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) to Advance Sustainable Agriculture. *Bacteria 2024*, Vol. 3, Pages 434-451, 3(4), 434–451. <https://doi.org/10.3390/BACTERIA3040030>
- Yang, P., Liu, W., Yuan, P., Zhao, Z., Zhang, C., Opiyo, S. O., Adhikari, A., Zhao, L., Harsh, G., & Xia, Y.** (2023). Plant Growth Promotion and Stress Tolerance Enhancement through Inoculation with *Bacillus proteolyticus* OSUB18. *Biology*, 12(12), 1495. <https://doi.org/10.3390/BIOLOGY12121495/S1>

Yang, Z. Y., Chen, F. H., Yuan, J. G., Zheng, Z. W., & Wong, M. H. (2004). Responses of *Sesbania rostrata* and *S. cannabina* to Pb, Zn, Cu and Cd toxicities. *Journal of Environmental Sciences (China)*, *16*(4), 670–673. <https://europepmc.org/article/med/15495978>

Yotsova, E., Dobrikova, A., Stefanov, M., Misheva, S., Bardáčová, M., Matušíková, I., Žideková, L., Blehová, A., & Apostolova, E. (2020). Effects of cadmium on two wheat cultivars depending on different nitrogen supply. *Plant Physiology and Biochemistry*, *155*, 789–799. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2020.06.042>

Zaheer, I. E., Ali, S., Rizwan, M., Baren, F. e., Abbas, Z., Bukhari, S. A. H., Wijaya, L., Alyemeni, M. N., & Ahmad, P. (2019). Zinc-lysine prevents chromium-induced morphological, photosynthetic, and oxidative alterations in spinach irrigated with tannery wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*(28), 28951–28961. <https://doi.org/10.1007/S11356-019-06084-Z/METRICS>

Zehra, A., Raytekar, N. A., Meena, M., & Swapnil, P. (2021). Efficiency of microbial bio-agents as elicitors in plant defense mechanism under biotic stress: A review. *Current Research in Microbial Sciences*, *2*, 100054. <https://doi.org/10.1016/J.CRMICR.2021.100054>

Zhanel, G. G., Golden, A. R., Zelenitsky, S., Wiebe, K., Lawrence, C. K., Adam, H. J., Idowu, T., Domalaon, R., Schweizer, F., Zhanel, M. A., Lagacé-Wiens, P. R. S., Walkty, A. J., Noreddin, A., Lynch, J. P., & Karlowsky, J. A. (2019). Cefiderocol: A Siderophore Cephalosporin with Activity Against Carbapenem-Resistant and Multidrug-Resistant Gram-Negative Bacilli. *Drugs*, *79*(3), 271–289. <https://doi.org/10.1007/S40265-019-1055-2>,

Zhang, Z. Y., Ali, M. W., Saqib, H. S. A., Liu, S. X., Yang, X., Li, Q., & Zhang, H. (2020). A Shift Pattern of Bacterial Communities Across the Life Stages of the Citrus Red Mite, *Panonychus citri*. *Frontiers in Microbiology*, *11*, 569680. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2020.01620/BIBTEX>

Zhou, B., Zhang, T., & Wang, F. (2023a). Microbial-Based Heavy Metal Bioremediation: Toxicity and Eco-Friendly Approaches to Heavy Metal Decontamination. *Applied Sciences* *2023*, Vol. *13*, Page 8439, *13*(14), 8439. <https://doi.org/10.3390/APP13148439>

Zhou, B., Zhang, T., & Wang, F. (2023b). Microbial-Based Heavy Metal Bioremediation: Toxicity and Eco-Friendly Approaches to Heavy Metal Decontamination. *Applied Sciences* *2023*, Vol. *13*, Page 8439, *13*(14), 8439. <https://doi.org/10.3390/APP13148439>

Zhu, L., Huang, J., Lu, X., & Zhou, C. (2022). Development of plant systemic resistance by beneficial rhizobacteria: Recognition, initiation, elicitation and regulation. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 952397. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2022.952397/XML/NLM>

Zhu, T., Li, L., Duan, Q., Liu, X., & Chen, M. (2021). Progress in our understanding of plant responses to the stress of heavy metal cadmium. *Plant Signaling and Behavior*, *16*(1). <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1836884>;WEBSITE:WEBSITE:TFOPB;PAGEGROUP:STRING:PUBLICATION

ANNEXES

Annexes

Annexe n°1 : Composition d'un litre de PBS (Phosphate Buffered Saline)

NaCl 8g

KCl 0,2g

KH₂PO₄ 0,24g

Na₂HPO₄ 1,44g

Eau distillée 1000 ml

PH = 7,00 ± 0,2