

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



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

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Microbiologie

كلية علوم الطبيعة والحياة
قسم الميكروبيولوجيا

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

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Microbiologie Appliquée

Intitulé :

**Étude de l'effet des bactéries sur la croissance de
*Lens culinaris***

Présenté par : MERMOUL Boutheyna
BELIHAM Souad

Jury d'évaluation :

Présidente du jury:	BENHIZIA Yacine	(Professeur - UFM Constantine 1).
Encadreur:	OULMI Lamia	(Docteur - UFM Constantine 1).
Examineur :	KITOUNI Mahmoud	(Professeur - UFM Constantine 1).

Année universitaire
2023 – 2024

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre gratitude envers Dieu pour son soutien dans l'accomplissement de ce projet.

Nous remercions chaleureusement le professeur BENCHIZIA Yacine à l'université Constantine Frères Mentouri, pour avoir présidé le jury avec bienveillance.

Nos sincères remerciements vont également au professeur KITOUNI Mahmoud à l'université Constantine Frères Mentouri, pour avoir pris le temps d'examiner notre travail avec attention.

Un remerciement spécial au docteur OULMI Lamia à la faculté des sciences de la nature et de la vie à l'université Constantine Frères Mentouri, pour son précieux encadrement, ses encouragements constants et ses conseils avisés qui ont grandement contribué à ce travail.

À tous les professeurs qui nous ont accompagnés tout au long de notre parcours universitaire.

Nous sommes reconnaissantes envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont apporté leur pierre à l'édifice de ce projet. Leur aide n'a pas été moindre et mérite toute notre gratitude.

Dédicaces

Après le "**Al Hamdoullah**" pour ce succès,

Je dédie ce travail

À **mes chers parents**, ma mère et mon père, qui ont toujours été à mes côtés et m'ont soutenu tout au long de ces longues années d'études.

À mes chères sœurs, mes refuges sûrs : **Radjaa, Nehla, Ilham et Sahar**, pour vos encouragements constants, vos conseils et votre confiance en moi.

À ma soulmate et mon chère binôme, **Souad**, tu as été mon soutien dans tous les moments et détails du chemin.

À ma chère amie et sœur, **Wafaa**, pour tes nombreuses attentions et ta motivation continue à chaque instant.

Et aussi à mes distinguées collègues **Takoua et Maisaa**.

À chaque personne, proche ou lointaine, grande ou petite, qui a joué un rôle dans mon parcours et m'a aidé, ne serait-ce qu'un peu, je vous remercie du fond du cœur.

À **mes frères et sœurs en Palestine** dont les rêves innocents ont été entravés par la guerre. Que Allah les fortifie, les affermisse et leur accorde une victoire proche.

Enfin, une dédicace à mon âme persévérante et ambitieuse : ne baisse jamais les bras.

Boutheyna

Dédicaces

Toute d'abord, je tiens à remercier Dieu source de toute connaissance, de m'avoir donné la force et le courage de mener ce modeste travail.

Je dédie ce travail à mes chers parents,

Ma mère, c'est toi qui m'as donné la force de vivre, qui a toujours eu foi en moi. Tu m'as soutenu dans la poursuite de mes rêves, même face aux défis. Grâce à toi, j'ai la force et la ténacité pour réussir. Ton amour guide toujours mes pas.

Mon père, tu es le modèle du respect, de l'honnêteté et du soin. Avec toi, j'ai compris ce que travailler dur et être responsable veut dire. Les mots me manquent pour te dire combien je t'aime et te respecte. Ce travail est le résultat de tous tes sacrifices pour mon éducation.

À mon chère binôme Boutheyna,

Pour le courage et la force que tu as apporté. Pour chaque moment de travail partagé.

Merci d'avoir été à mes côtés, Ensemble, nous avons tout surmonté.

À mes amis qui ont été présents à chaque étape de mon parcours.

À tous ceux qui ont partagé avec moi les rires et les joies, ainsi que les peines et les moments difficiles.

À mes enseignants qui ont enrichi ma vie de leur savoir et de leurs conseils.

Merci à tous ceux qui m'ont tendu la main pour m'aider à poursuivre ce chemin.

Merci à moi-même de ne jamais abandonner.

Ce travail est la preuve vivante de ma ténacité et de mon engagement sans faille envers mes ambitions. Il incarne non seulement les étapes franchies durant mon parcours universitaire, mais il est aussi le reflet de ma volonté inébranlable de persévérer, quelles que soient les épreuves.

À vous cher lecteur,

J'espère que vous trouverez dans ce travail ce que vous cherchez. Que ce travail soit une source d'inspiration ou de nouvelles connaissances. Continuons à partager nos expériences et nos rêves.

Souad

المخلص

البكتيريا التي تعزز نمو النباتات من خلال إنتاج الأوكسينات، هي بكتيريا ال Rhizosphere تستخدم في الزراعة العضوية كبديل بيئي لمنتجات الصحة النباتية. في هذه الدراسة، إختبرنا قدرة سلالتين بكتيريتين على النمو في بيئة تتكون أساسا من منتج معروف بتلويث النظم البيئية الطبيعية. في البداية، أجريت دراسة مورفولوجية مفصلة، أكدت أن كلا السلالتين تنتمي إلى مجموعة بكتيرية مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بالتكنولوجيا الحيوية الخضراء. بعد ذلك، أجريت أبحاث حول تأثير السلالات على إنبات بذور البقول *Lens culinaris* ونمو شتلاتها. تم تجربة ثلاثة بيئات تخمير مختلفة، استناداً إلى المنتج المختبر، في وجود وغياب التريتوفان. تشير النتائج إلى أن السلالتين البكتيريتين لهما تأثير مفيد على تسريع إنبات البذور ونسبة نمو الشتلات، مع نمو جيد لأجزاء الهوائية والجذرية. تم تسجيل أفضل النتائج مع السلالة 1، التي أظهرت تأثيراً على تسريع إنبات البذور، ومع السلالة 2، التي كشفت عن تأثير ملحوظ على نمو شتلات *Lens culinaris*.

الكلمات المفتاحية : الأوكسينات، منتجات الصحة النباتية، PGPR, *Lens culinaris*.

Résumé

Les bactéries favorisant la croissance des plantes par la production des auxines, sont des bactéries rhizosphériques utilisées en agriculture biologique comme une alternative écologique aux produits phytosanitaires. Dans ce travail nous avons testé le pouvoir de deux souches bactériennes à croître dans un substrat constitué majoritairement d'un produit réputé polluant des écosystèmes naturel. Dans un premier temps, une étude morphologique détaillée a été réalisée confirmant l'appartenance des deux souches à un groupe bactérien très liée à la biotechnologie verte. Dans un deuxième temps, une recherche a été menée sur l'effet des souches sur la germination des graines de la légumineuse *Lens culinaris*, et sur la croissance de leurs plantules. Trois substrats de culture différents, à base du produit testé, ont été expérimentés en présence et en absence de tryptophane. Les résultats suggèrent que les deux souches bactériennes exercent un effet bénéfique sur l'accélération de la germination des graines et le pourcentage de croissance des plantules avec une bonne croissance des parties aériennes et racinaires. Les meilleurs résultats ont été enregistrés avec la souche 1 qui a montré un effet sur l'accélération de la germination des graines, et avec la souche 2 qui a dévoilé un effet significative sur la croissance des plantules de lentille *Lens culinaris*.

Mots clés : Auxines, produits phytosanitaires, PGPR, *Lens culinaris*.

Abstract

Bacteria promoting plant growth through the production of auxins are rhizospheric bacteria used in organic farming as an ecological alternative to phytosanitary products. In this study, we tested the ability of two bacterial strains to grow in a substrate primarily composed of a product known to pollute natural ecosystems. Initially, a detailed morphological study was conducted, confirming that both strains belong to a bacterial group closely related to green biotechnology. Subsequently, research was carried out on the effect of the strains on the germination of *Lens culinaris* legume seeds and the growth of their seedlings. Three different cultures substrates, based on the tested product, were experimented with in the presence and absence of tryptophan. The results suggest that the two bacterial strains have a beneficial effect on accelerating seed germination and the percentage of seedling growth, with good growth of aerial and root parts. The best results were recorded with strain 1, which showed an effect on accelerating seed germination, and with strain 2, which revealed a significant effect on the growth of *Lens culinaris* seedlings.

Key words : Auxins, phytosanitary products, PGPR, *Lens culinaris*.

Liste des abréviations

FAO : Food and Agriculture Organization

NPK : Azote (N), Phosphore (P) et Potassium (K)

DBCP : Dibromochloropropane

PGPR : Plant Growth-Promoting Rhizosphère

AIA : Acide indole-3-acétique

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification des pesticides selon l'organisme nuisible ciblés (modifié d'après Fishel et Ferrell, 2013).	5
Tableau 2 : Exemples de rhizobactéries favorisant la croissance des plantes et leurs effets.	25
Tableau 3 : Suivi de la germination des graines de <i>Lens culinaris</i> après inoculation par la souche S1.	35
Tableau 4 : Suivi de la germination des graines de <i>Lens culinaris</i> après inoculation par la souche S2.	35
Tableau 5 : Le pourcentage de croissance des plantules issues des graines inoculées avec la souche 1 après 12 jours.	42
Tableau 6 : Le pourcentage de croissance des plantules issues des graines inoculées avec la souche 2 après 12 jours.	43
Tableau 7 : L'effet de l'inoculation et l'arrosage avec la souche 1 sur la croissance et les paramètres morphologiques des graines de lentilles.	44
Tableau 8 : L'effet de l'inoculation avec la souche 1 et de l'arrosage avec de l'eau normale sur la croissance et les paramètres morphologiques des graines de lentilles.	45
Tableau 9 : L'effet de l'inoculation et l'arrosage avec la souche 1 en présence de tryptophane sur la croissance et les paramètres morphologiques des graines de lentilles.	45
Tableau 10 : L'effet de l'inoculation avec la souche 1 et de l'arrosage avec de l'eau normale en présence de tryptophane sur la croissance et les paramètres morphologiques des graines de lentilles.	46
Tableau 11 : L'effet de l'inoculation et l'arrosage avec la souche 2 sur la croissance et les paramètres morphologiques des graines de lentilles.	47
Tableau 12 : L'effet de l'inoculation avec la souche 2 et de l'arrosage avec de l'eau normale sur la croissance et les paramètres morphologiques des graines de lentilles.	47
Tableau 13 : L'effet de l'inoculation et l'arrosage avec la souche 2 en présence de tryptophane sur la croissance et les paramètres morphologiques des graines de lentilles.	48
Tableau 14 : L'effet de l'inoculation avec la souche 1 et de l'arrosage avec de l'eau normale en présence de tryptophane sur la croissance et les paramètres morphologiques des graines de lentilles.	49

Liste des figures

Figure 1 : Exemples d'engrais chimiques simples et composés (catalogue produits Asfertrade).	3
Figure 2 : Effets cutanés des produits phytosanitaires (CDC, 2022).....	7
Figure 3 : Impact des produits phytosanitaires sur la santé humaine (Rai <i>et al.</i> , 2023).....	8
Figure 4 : Impact des produits phytosanitaires sur l'environnement (Bhardwaj <i>et al.</i> , 2022).....	12
Figure 5 : Impact des produits phytosanitaires sur les ressources en eau selon le rapport de la FAO et de l'institut de gestion internationale.	15
Figure 6 : Schéma illustrant la structure de la rhizosphère dans une section de racine (McNear Jr, 2013).....	17
Figure 7 : Mécanismes d'action directs et indirects des PGPR (Hakim <i>et al.</i> , 2021).	18
Figure 8 : Les fonctions des rhizobactéries pour la survie des plantes (Masson et Simonin, 2022).	19
Figure 9 : Rôle des biofertilisants pour le maintien de la productivité des cultures et de la santé des sols (Sreethu <i>et al.</i> , 2023).	26
Figure 10 : Différentes méthodes d'inoculation des biofertilisants (Gautam <i>et al.</i> , 2021).	27
Figure 11 : Les graines de lentilles, variété Syrie 229 de la catégorie ordinaire.....	31
Figure 12 : L'inoculation des graines.....	31
Figure 13 : La plantation des graines de lentilles dans les pots.	31
Figure 14 : Les milieux de fermentation incubation.....	34
Figure 15 : L'effet de la souche 1 sur le taux de germination des graines (S1 cultivée sur les milieux sans tryptophane).....	35
Figure 16 : L'effet de la souche 1 sur le taux de germination des graines (S1 cultivée sur les milieux additionnés de tryptophane).	36
Figure 17 : L'effet de la souche 2 sur le taux de germination des graines (S2 cultivée sur les milieux sans le tryptophane).	37
Figure 18 : L'effet de la souche 2 sur le taux de germination des graines (S2 cultivée sur les milieux additionnés de tryptophane).	38
Figure 19 : Les variations des longueurs des germes issus des graines inoculées avec la souche 1 en fonction du milieu (présence et absence de tryptophane).....	39
Figure 20 : Les variations des longueurs des germes issus des graines inoculées avec la souche 2 en fonction du milieu (présence et absence de tryptophane).....	39

Figure 21 : Effet de l'arrosage avec de l'eau normale et du filtrat de fermentation de la souche 1 sur la croissance des plantules de lentilles traitées dans différents milieux après 12 jours 41

Figure 22 : Effet de l'arrosage avec de l'eau normale et du filtrat de fermentation de la souche 2 sur la croissance des plantules de lentilles traitées dans différents milieux après 12 jours 41

Figure 23 : Comparaison des plantules de lentilles dans trois milieux différents en présence de tryptophane et absence de tryptophane, arrosés avec de l'eau normale et avec du filtrat de fermentation de souche 1, par rapport au témoin après 15 jours..... 46

Figure 24 : Comparaison des plantules de lentilles dans trois milieux différents en présence de tryptophane et absence de tryptophane, arrosés avec de l'eau normale et avec du filtrat de fermentation de souche 2, par rapport au témoin après 15 jours..... 49

Table des matières

Remerciement	
Dédicaces	
Résumé.....	i
Liste des abréviations	ii
Liste des tableaux	iii
Liste des figures.....	iii
Table des matières	iiii
Introduction.....	1

Revue bibliographiques

Chapitre 1

1	Les engrais chimiques	3
1.1	Les engrais simples	3
1.2	Les engrais composés.....	4
1.3	Les macronutriments.....	4
1.4	Les micronutriments	4
2	Les pesticides	4
3	Les effets néfastes de l'agriculture moderne.....	6
3.1	Impact des produits phytosanitaires sur la santé humaine	6
3.1.1	Voies d'exposition de l'homme aux produits phytosanitaires	6
3.1.2	Impact d'exposition de l'homme aux produits phytosanitaires	8
3.2	Impacts des produits phytosanitaires sur l'environnement.....	11
3.2.1	Impact sur la biodiversité.....	12
3.2.2	Impact sur les espèces non ciblés	13
3.2.3	Impact sur la microflore du sol	13
3.2.4	Impact sur la biodiversité aquatique.....	14
3.3	Impact des produits phytosanitaires sur les ressources en eau.....	14
3.4	Impact des produits phytosanitaires sur l'atmosphère.....	15

Chapitre 2

1	Les communautés microbiennes du sol	16
2	La rhizosphère.....	17
3	Les rhizobactéries.....	18
4	Les mécanismes d'action des PGPR	19
4.1	La biofertilisation	19

4.1.1	La fixation de l'azote.....	19
4.1.2	La solubilisation des phosphates.....	20
4.1.3	La production de sidérophores.....	20
4.2	La biostimulation.....	21
4.2.1	L'auxine.....	21
4.2.2	Les cytokinines.....	22
4.2.3	L'éthylène.....	22
4.2.4	Les gibbérellines.....	22
4.3	Les biocontrôles.....	23
4.3.1	La production des antibiotiques.....	23
4.3.2	La production d'enzymes lytiques.....	23
5	Intérêt des PGPR pour l'agriculture durable.....	24
6	Définition des biofertilisants et leur importance.....	26
7	Les méthodes d'application d'inoculation des biofertilisants.....	27

Matériel et méthode

1	Le matériel biologique.....	28
2	Revivification des souches bactériennes.....	28
3	Confirmation de la pureté des souches.....	28
3.1	L'étude macromorphologique.....	28
3.2	L'étude macromorphologique sur le milieu testé.....	28
3.3	L'étude micromorphologique.....	29
4	Les Fermentations.....	29
4.1	Préparation des milieux de culture.....	29
4.1.1	En absence de tryptophane.....	29
4.2	Préparation de l'inoculum.....	29
4.3	L'inoculation des milieux de fermentation.....	30
4.4	La filtration.....	30
5	Etude de l'effet des souches sur la germination et la croissance d'une légumineuse.....	30
5.1	Le matériel végétale.....	30
5.2	Effet des souches bactérienne sur la germination des graines.....	30
5.3	La plantation des graines.....	31
6	Etude des paramètres morphologiques des plantules.....	32

Résultats et discussion

1	L'étude morphologique.....	33
1.1	L'étude macromorphologique.....	33

1.2	L'étude macromorphologique sur le milieu testé	33
1.3	L'étude micromorphologie.....	33
2	Test de la croissance des souches dans les milieux de fermentation	33
3	Effet des souches bactériennes sur la germination des graines de la légumineuse <i>Lens culinaris</i>	34
3.1	L'effet des souches sur la vitesse de germination des graines	34
3.2	Effet des souches sur la longueur des germes	38
4	Effet des filtrats de fermentation sur les plantules de la légumineuse <i>Lens culinaris</i> ..	40
4.1	L'effet des filtrats de fermentation sur la croissance des plantules	40
4.2	L'effet des filtrats de fermentation sur les paramètres morphologiques des plantules.....	43
	Conclusion.....	55
	Références bibliographiques.....	57
	Annexe	

Introduction

Au cours des dernières décennies, la population mondiale a connu une augmentation rapide, atteignant plus de 8 milliards de personnes en 2023 et devrait atteindre environ 9,8 milliards d'ici 2050 (PRB, 2023). Nourrir cette population croissante représente un défi majeur au XXI^e siècle, nécessitant une augmentation considérable de la productivité agricole dans les prochaines décennies (Goswami, 2016).

La productivité agricole est au cœur de cette problématique et son amélioration est devenue une priorité absolue. Historiquement, l'agriculture a répondu à la demande croissante en ayant massivement recours aux produits phytosanitaires. Cependant, bien que l'utilisation massive de ces produits ait permis d'accroître considérablement les rendements agricoles, la FAO en 2018 souligne que cette approche comporte des effets néfastes qui en contrebalancent les bénéfiques.

En effet, les produits phytosanitaires présentent de grands risques environnementaux, entraînant une dégradation alarmante par la pollution des sols et des nappes phréatiques, causant des maladies graves chez les animaux et une destruction de la faune et des communautés microbiennes, une diminution de la fertilité du sol et une sensibilité accrue des cultures aux maladies, menaçant la biodiversité et la santé humaine (Jiao *et al.*, 2021 ; Ma, 2019 ; Pravin *et al.*, 2016).

De plus, au niveau national l'augmentation des coûts des engrais, due à la hausse des prix des matières premières, a entraîné une pression accrue sur les consommateurs et les finances publiques, comme en témoigne la résolution n° 948 de septembre 2022, qui prévoit que l'État prenne en charge 50 % des coûts des engrais pour soutenir les agriculteurs. Malgré cette aide, de nombreux agriculteurs rencontrent des difficultés pour y accéder, souvent liées aux exigences en matière de propriété foncière ou de bail.

Les pratiques agroécologiques, en particulier l'utilisation de micro-organismes bénéfiques, notamment les bactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR), offrent une alternative écologique aux fertilisants synthétiques en stimulant la croissance des cultures par des moyens naturels et durables. Elles améliorent la nutrition des plantes et la santé des sols pour un rendement optimal des cultures et une production durable, en restaurant l'équilibre et la santé des écosystèmes agricoles (Atieno, 2020 ; Adedeji *et al.*, 2020 ; Sivasakthi *et al.*, 2014).

Dans ce cadre, les orientations du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (MADR) pour l'agriculture oasisienne offrent une perspective d'intégration de ces

pratiques agroécologiques, en harmonie avec les écosystèmes locaux et les besoins spécifiques des régions arides, ouvrant ainsi la voie à une agriculture plus durable et productive.

En effet, l'utilisation des biofertilisants à base de PGPR constitue donc un élément clé de la gestion intégrée des nutriments, offrant des avantages économiques grâce à la réduction des coûts liés aux engrais chimiques. Cette approche soutient l'engagement de Monsieur le Président de la République Abd'El Madjid Tebboune, exprimé en 2023, visant à atteindre l'autosuffisance nationale, à couvrir les besoins de l'Afrique et à s'orienter vers les exportations en arrêtant les importations (Président de la République Algérienne Démocratique et Populaire, 2023).

L'objectif de notre travail est de démontrer comment l'utilisation des bactéries PGPR en tant que biofertilisants peut révolutionner l'agriculture en favorisant la croissance des plantes et augmenter les rendements, tout en préservant notre environnement et notre santé.

Notre engagement est de développer une solution de fertilisation biologique qui non seulement soutient l'autosuffisance alimentaire locale d'une manière économique de notre pays, mais qui s'inscrit également d'une manière écologique dans la vision d'une agriculture viable et durable pour notre avenir.

Notre étude est structurée en trois parties principales. La première partie offre une revue bibliographique, dans laquelle le premier chapitre présente les pratiques de l'agriculture moderne, notamment l'emploi des produits phytosanitaires et leurs conséquences défavorables sur l'environnement et la santé humaine. Le deuxième chapitre se penche sur l'agriculture biologique, mettant en lumière les bactéries de la rhizosphère, leur importance dans cet écosystème et comment les PGPR sont utilisés pour la biofertilisation. La deuxième partie détaille les méthodologies et techniques employées tout au long de notre travail. Enfin, la troisième partie est dédiée à l'analyse des résultats, en particulier l'impact de différentes souches bactériennes, cultivées dans trois substrats de culture, sur la germination et le développement des plantules de lentilles "*Lens culinaris*".

Revue bibliographique

L'agriculture moderne, façonnée par l'évolution des techniques et des pratiques agricoles, a largement recours à l'utilisation intensive de produits phytosanitaires pour maximiser les rendements et répondre aux demandes alimentaires croissantes de la population mondiale. Les pesticides et engrais chimiques sont devenus des piliers de cette approche, visant à protéger les cultures contre les maladies, les ravageurs et les mauvaises herbes, ainsi qu'à stimuler leur croissance. Cependant, cette dépendance aux produits phytosanitaires comporte des risques pour l'environnement, la santé humaine et la durabilité à long terme de notre système alimentaire (Prashar et Shah, 2016 ; Savsi, 2012).

1 Les engrais chimiques

Selon la FAO 2003, un engrais est défini comme tout produit contenant au moins 5% d'un ou de plusieurs des trois principaux nutriments végétaux : l'azote (N), le phosphore (P) sous forme de pentoxyde de phosphore (P_2O_5) et le potassium (K) sous forme d'oxyde de potassium (K_2O). Ces substances peuvent être synthétisées chimiquement ou dérivées de sources naturelles et sont désignées sous le terme d'engrais. Parmi ces derniers, l'urée et les formules NPK sont des exemples d'engrais chimiques couramment utilisés (FAO, 2005).

En fonction de la quantité de nutriments dans les engrais, ces derniers sont divisés en deux types : les engrais simples et les engrais composés.

1.1 Les engrais simples

Les engrais simple (mono-composant) sont constitués d'un seul élément que la plante absorbe pour sa croissance et son développement (figure 1A). Ils peuvent être azotés, phosphatés ou potassiques (Bafoev *et al.*, 2022).



Figure 1 : Exemples d'engrais chimiques simples (A) et composés (B) (catalogue produits Asfertrade).

1.2 Les engrais composés

Un engrais composés est un mélange d'engrais simples qui fournissent plusieurs nutriments essentiels aux cultures (figure 1B). Ils sont classés en deux types : binaires contenant deux éléments nutritifs par exemple le NK, et ternaires contenant trois éléments comme le NPK. La composition est indiquée par des chiffres suivant les lettres NPK, qui représentent la concentration de chaque nutriment (Bafoev *et al.*, 2022 ; Sharma et Chetani, 2017).

Selon les besoins de la plante les engrais sont classés en deux catégories principales les macronutriments et les micronutriments.

1.3 Les macronutriments

Qui comprennent l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K), sont nécessaires en grandes quantités car ils jouent un rôle essentiel dans les fonctions vitales des plantes. Le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et le soufre (S) sont considérés comme des macronutriments secondaires, importants mais généralement nécessaires en moindres quantités (Goutam, 2016).

1.4 Les micronutriments

Aussi appelés oligo-éléments, sont requis en très petites quantités. Malgré leur besoin limité. Ils sont vitaux pour la santé des plantes et incluent des éléments tels que le fer (Fe), le manganèse (Mn), le bore (B), le cuivre (Cu), le molybdène (Mo), le nickel (Ni), le chlore (Cl) et le zinc (Zn). Ces nutriments sont ajoutés au sol uniquement si un besoin est identifié, souvent à travers des tests de sol ou des symptômes de carences observés sur les plantes (Goutam, 2016).

2 Les pesticides

Le mot "pesticide" tire son origine du latin, combinant le préfixe "*pestis*", qui fait référence à tout organisme vivant considéré comme nuisible pour l'agriculture ou la santé publique, et le suffixe "*cide*", dérivé du verbe "*caedere*", signifiant "tuer" (Hassan et El Nemr, 2020 ; INSERM, 2013).

Selon la FAO, un pesticide est "*toute substance ou association de substances chimiques qui est destinée à repousser, détruire ou combattre les organismes nuisibles ou à être utilisée comme régulateur de croissance des plantes*". Ces produits sont utilisés dans l'agriculture pour protéger les cultures contre les insectes, les mauvaises herbes et les maladies. Ils sont essentiels pour maintenir la santé des plantes et des animaux, ainsi que

pour assurer la sécurité alimentaire. Cependant, leur utilisation doit être responsable pour minimiser les impacts environnementaux et sanitaires (Boudet *et al.*, 2020 ; INSERM, 2013).

Les pesticides, regroupant divers produits tels que les insecticides, herbicides, fongicides, rodenticides, jouent un rôle essentiel dans la lutte contre les organismes nuisibles.

Ils sont classés en fonction du rôle qu'ils jouent et de l'organisme nuisible qu'ils ciblent, et ils reçoivent des noms spécifiques pour refléter leurs activités (tableau 1).

Le terme “*cide*” est souvent ajouté au nom de l'organisme nuisible cible (Yadav et Devi, 2017 ; Thapar *et al.*, 2016 ; Zacharia, 2011).

Le tableau numéro 1 illustre comment ces substances sont réparties en fonction de leur cible spécifique. Parmi eux, les fongicides, les herbicides et les insecticides sont les catégories les plus fréquemment utilisées.

Tableau 1 : Classification des pesticides selon l'organisme nuisible ciblés (modifié d'après Fishel et Ferrell, 2013).

Type de nuisibles	Nuisibles ciblés / Fonction	Exemple
Insecticides	Tuent les insectes et autres arthropodes	Aldicarb
Fongicides	Tuent les champignons	Azoxystrobin
Bactéricides	Tuent les bactéries ou agissent contre les bactéries	Complexes de cuivre
Virucides	Agissent contre les virus	Scytovirine
Herbicides	Tuent les mauvaises herbes	Atrazine
Acaricides	Tuent les acariens qui se nourrissent de plantes et d'animaux	Bifenawate
Rodenticides	Contrôlent les souris et autres rongeurs	Wafarine
Algicides	Contrôlent ou tuent la croissance des algues	Sulfate de cuivre
Larvicides	Inhibent la croissance des larves	Méthoprène
Termiticides	Tuent les termites	Fipronil
Nématocides	Tuent les nématodes qui agissent comme parasites des plantes	Aldicarb

3 Les effets néfastes de l'agriculture moderne

L'utilisation de pesticides et d'engrais chimiques dans l'agriculture est un sujet controversé. Bien que ces produits aient des avantages indéniables en augmentant la productivité agricole et en luttant contre les parasites, leur utilisation excessive peut avoir des conséquences néfastes sur la santé humaine, animale et l'environnement (Rai *et al.*, 2023).

3.1 Impact des produits phytosanitaires sur la santé humaine

L'exposition aux produits phytosanitaires peut survenir à travers diverses activités, qu'elles soient professionnelles, agricoles, domestiques ou même indirectement via la consommation alimentaire. Ces substances peuvent également être présentes dans des lieux publics, exposant ainsi la population. La chaîne alimentaire, l'air, l'eau, le sol, ainsi que la flore et la faune, constituent les principaux vecteurs par lesquels les humains peuvent être exposés aux produits phytosanitaires (Anderson et Meade, 2014).

Une fois dans l'organisme, ces substances se dispersent via la circulation sanguine et peuvent être excrétées par l'urine, la peau ou l'expiration (Damalas et Eleftherohorinos, 2011).

3.1.1 Voies d'exposition de l'homme aux produits phytosanitaires

Il existe quatre principales voies d'entrée dans le corps : cutanée, orale, oculaire et respiratoire (Sharma et Singhvi, 2017). La toxicité des produits phytosanitaires dépend de la voie d'exposition, et le risque de contamination augmente avec la concentration, la durée d'exposition et la toxicité spécifique du produit (Rai *et al.*, 2023 ; Meenakshi *et al.*, 2012).

3.1.1.1 Voies d'exposition cutanée

Les recherches sur l'exposition professionnelle aux produits phytosanitaires montrent que le contact direct avec la peau est souvent la voie d'exposition principale (Rai *et al.*, 2023 ; INSERM, 2013).

Les pesticides en poudre ou granulés sont moins absorbés par la peau que les liquides. Les pesticides concentrés présentent un risque accru d'absorption, surtout dans les zones sensibles comme les oreilles et les zones génitales (Dennis *et al.*, 2010).

Divers facteurs, dont la quantité de pesticide, le temps de contact, la présence d'autres substances, la température et l'humidité, affectent l'interaction des pesticides avec la peau et leur absorption (Beard *et al.*, 2014) (figure 2).

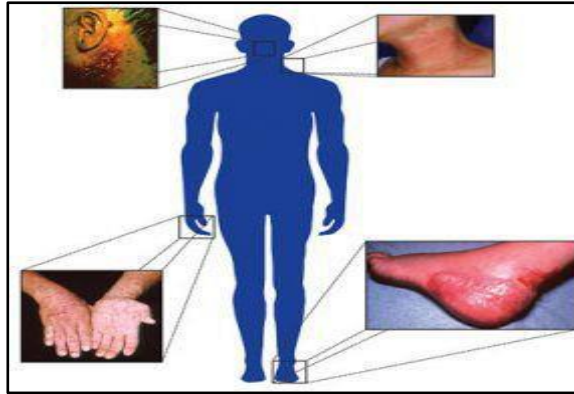


Figure 2 : Effets cutanés des produits phytosanitaires (CDC, 2022).

Les affections cutanées liées à la manipulation des produits phytosanitaires sont parmi les troubles professionnels les plus fréquemment rencontrés. Elles se manifestent sous divers aspects, notamment : éruption cutanée (dermatite de contact) causée par une irritation cutanée, éruption cutanée causée par des allergies cutanées, cancers de la peau, infections cutanées, et les blessures cutanées (CDC, 2022).

3.1.1.2 Voies d'exposition orale

L'exposition aux pesticides par ingestion peut survenir lorsqu'on mange, boit ou fume avec des mains non lavées. Cette exposition peut aussi affecter les personnes qui ont l'habitude de se ronger les ongles. De plus, certaines pratiques, comme souffler dans un équipement bouché ou négliger l'hygiène personnelle après manipulation de produits, et la contamination d'aliments et de boissons contenant des résidus de pesticides peuvent augmenter le risque de contamination orale (Rai *et al.*, 2023 ; INSERM, 2013).

3.1.1.3 Voies d'exposition respiratoire

L'exposition aux produits phytosanitaires par inhalation est particulièrement préoccupante dans certaines situations spécifiques, telles que l'utilisation de fumigants, la préparation ou l'application dans des espaces clos comme les serres (INSERM, 2013). Inhaler une quantité significative des produits phytosanitaires peut entraîner des lésions graves au niveau des tissus nasaux, pharyngés et pulmonaires (Rai *et al.*, 2023 ; Damalas et Eleftherohorinos, 2011).

Les formulations en poudre, par exemple, sont plus susceptibles de se disperser dans l'air et de pénétrer dans les voies respiratoires, en particulier pendant les phases de préparation (INSERM, 2013).

3.1.1.4 Voies d'exposition oculaire

Les produits phytosanitaires, lorsqu'ils sont absorbés par les yeux en quantités notables, peuvent causer des affections oculaires sévères et parfois fatales. Cette absorption peut survenir, par exemple, lors de l'utilisation d'équipements motorisés pour l'application de pesticides, où les produits phytosanitaires peuvent être projetés sur la végétation ou d'autres surfaces et rebondir à grande vitesse, entraînant des lésions oculaires considérables (Fareed *et al.*, 2012 ; Gilden *et al.*, 2010).

3.1.2 Impact d'exposition de l'homme aux produits phytosanitaires

La toxicité des produits phytosanitaires peut être classée en deux catégories : aiguë et chronique. La toxicité aiguë se réfère aux effets nocifs qui apparaissent rapidement après l'exposition à une substance, généralement en quelques heures ou un jour (Sharma et Singhvi, 2017). La toxicité chronique fait référence aux effets néfastes qui résultent d'une exposition prolongée à une substance (Yadav et Devi, 2017 ; Sharma et Singhvi, 2017).

Une étude approfondie menée au sein de l'unité industrielle de production des engrais NPK à Annaba, Algérie, a mis en lumière les conséquences notables de l'exposition aux composants chimiques des engrais sur la santé des travailleurs. Les résultats, issus d'observations et de questionnaires réalisés entre 2010 et 2011, révèlent une incidence élevée de troubles auditifs, respiratoires, cutanés et oculaires, ainsi que des problèmes de fertilité masculine (Mallem *et al.*, 2015) (figure 3).

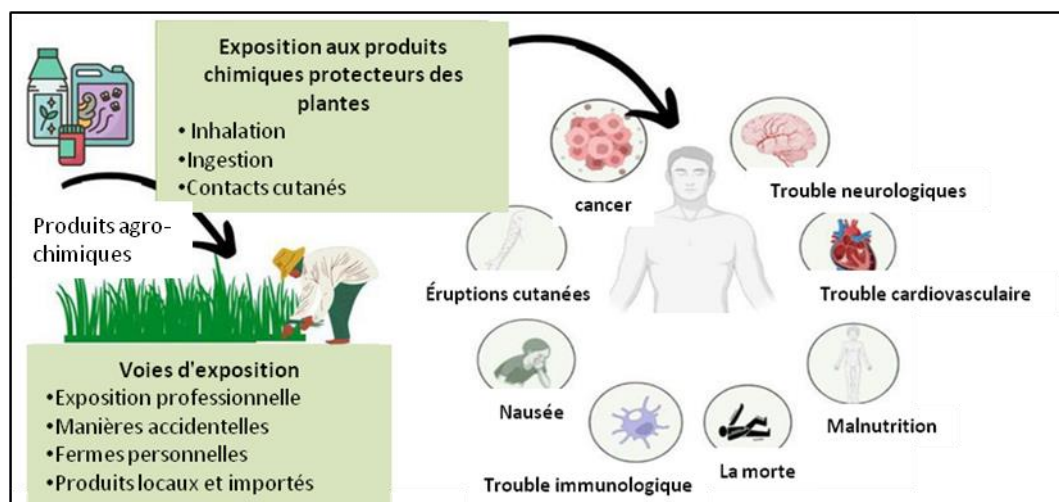


Figure 3 : Impact des produits phytosanitaires sur la santé humaine (Rai *et al.*, 2023).

Environ 11,76 % des employés ont rapporté une perte d'audition attribuable au bruit incessant des machines, tandis que plus de la moitié des travailleurs ont développé des problèmes respiratoires indépendamment de leur statut de fumeur. De plus, une

majorité a souffert d'irritations cutanées et oculaires, et 18 % ont rencontré des difficultés à concevoir, avec une stérilité observée chez 11 % des travailleurs, en particulier ceux occupant le poste d'opérateur de broyeur (Malle *et al.*, 2015).

3.1.2.1 Le cancer

Les études scientifiques ont montré que les risques de cancer liés à l'exposition directe aux produits phytosanitaires comme un facteur majeur dans l'augmentation des cas de cancer, en plus de la consommation de produits contenant des résidus de pesticides. Ces produits incluent le poisson, l'eau, les fruits de mer, le lait et d'autres produits laitiers (Kaur *et al.*, 2019).

De plus, des recherches en santé agricole aux États-Unis, ont apporté des preuves que l'exposition aux pesticides peut être liée à une augmentation de l'incidence de plusieurs types de cancers. Concernant le cancer des testicules, les résultats des études sont moins concluants, avec certaines recherches indiquant un risque significativement plus élevé chez les travailleurs agricoles. Pour les enfants, les méta-analyses récentes ont mis en évidence un lien entre l'exposition aux pesticides et un risque accru de leucémie, de plus, le cancer du sein, de la vessie, des poumons, du colon, du myélome multiple (INSERM, 2013), et le cancer de la peau (CDC, 2022).

3.1.2.2 Les maladies respiratoires

L'inhalation des substances chimiques peut entraîner des maladies respiratoires comme l'asthme, la bronchite, la pneumonie et des troubles respiratoires neuromusculaires chez les travailleurs agricoles (Sharma et Singhvi, 2017 ; INSERM, 2013).

Des études ont montré un lien entre l'asthme et l'exposition aux pesticides, qui peuvent déclencher l'apparition de l'asthme par irritation, inflammation, perturbation hormonale ou immunosuppression (Langley, 2011). De plus, il a été observé que le contact avec les pesticides en agriculture est associé à une augmentation du risque de cancer du poumon (Faria *et al.*, 2005).

3.1.2.3 Les troubles neurologiques

Les pesticides, largement utilisés dans l'agriculture moderne, suscitent de plus en plus d'inquiétudes en raison de leur potentiel neurotoxique. Des études épidémiologiques ont établi un lien entre l'exposition à ces substances et l'augmentation de la prévalence de

maladies neurodégénératives telles que la maladie d'Alzheimer et la maladie de Parkinson (INSERM, 2013).

Les pesticides organophosphorés et organochlorés peuvent perturber le fonctionnement de l'enzyme acétylcholinestérase, qui joue un rôle clé dans les connexions synaptiques du système nerveux. Cette perturbation pourrait être un facteur contribuant au développement de la maladie d'Alzheimer, (Hayden *et al.*, 2010).

Les recherches de l'Université de Californie à San Francisco (UCSF) mettent en lumière un lien préoccupant entre l'exposition aux pesticides et le risque accru de développer la maladie de Parkinson. Cette corrélation semble persister, que la maladie soit d'origine idiopathique, c'est-à-dire spontanée, ou liée à une variante génétique spécifique, comme celle du gène GBA. Les études épidémiologiques et toxicologiques révèlent que l'exposition aux pesticides, ainsi que les interactions entre certains gènes et ces substances chimiques, sont des facteurs de risque significatifs pour la maladie (Beyond Pesticides, 2020).

L'exposition à certains produits phytosanitaires tels que la roténone, le paraquat et le 2,4-D, peut être nocive pour les neurones qui produisent la dopamine. Cette atteinte neuronale peut réduire la production de dopamine, un neurotransmetteur essentiel, et est associée à l'apparition de symptômes caractéristiques de la maladie de Parkinson (Beyond Pesticides, 2020 ; INSERM, 2013 ; Thany *et al.*, 2013).

3.1.2.4 Grossesse et développement de l'enfant

Les étapes initiales de la vie, qui comprennent le développement de l'embryon, du fœtus et les premières années de l'enfance, sont extrêmement délicates. Durant ces phases, l'exposition à des substances nocives comme l'alcool, le tabac et divers polluants peut avoir des effets durables et sérieux. Ces substances toxiques peuvent causer des troubles et des handicaps qui affectent non seulement les nouveau-nés et les enfants mais aussi les adultes tout au long de leur vie (INSERM, 2013).

Parmi les effets néfastes sur le fœtus dus à ces expositions prénatales, on trouve l'interruption de la grossesse, y compris les fausses couches, ainsi que divers problèmes tels que les malformations congénitales, le retard de croissance dans l'utérus, des changements dans le poids à la naissance ou la durée de la grossesse (INSERM, 2013). Des études ont observé que les femmes travaillant dans l'agriculture et exposées aux

pesticides pendant leur grossesse présentaient un risque plus élevé de perdre leur fœtus (INSERM, 2013).

Un des effets inquiétants des engrais chimiques est ce qu'on nomme la méthémoglobinémie, souvent appelée le syndrome du bébé bleu chez les nourrissons. Ce problème survient généralement quand les bébés boivent du lait reconstitué avec de l'eau qui contient des niveaux élevés de nitrates. Cette condition peut réduire la capacité du sang à transporter l'oxygène, donnant à la peau une teinte bleuâtre et peut causer de la fatigue ou de l'irritabilité. Dans les cas graves, cela peut mener au coma ou même être fatal (Goutam, 2016).

3.1.2.4 Les troubles reproductif

De nombreuses recherches scientifiques ont confirmé que le contact avec les pesticides est susceptible d'entraîner des difficultés de reproduction tant chez les hommes que chez les femmes. Ces substances peuvent perturber les processus biologiques essentiels à la fertilité (Sharma et Singhvi, 2017 ; INSERM, 2013 ; Hanke et Jurewicz, 2004).

L'exposition aux pesticides, tels que le dibromochloropropane (DBCP), a été historiquement liée à des effets négatifs sur la fertilité masculine. Dans les années 1970, l'utilisation du DBCP dans les cultures tropicales et subtropicales a conduit à des cas de stérilité chez les travailleurs exposés, avec une diminution significative de la concentration en spermatozoïdes. Cette toxicité est principalement due à l'impact du DBCP sur les spermatogonies, les cellules souches responsables de la production de spermatozoïdes, entraînant des dommages irréversibles à la spermatogenèse (INSERM, 2013).

Les études sur l'impact des pesticides sur la fertilité féminine sont moins fréquentes, mais certaines recherches indiquent que l'exposition aux pesticides peut également affecter la capacité des femmes à concevoir. Par exemple, une étude en Ontario a révélé que l'exposition à certains pesticides pouvait légèrement augmenter le temps nécessaire pour tomber enceinte (INSERM, 2013).

3.2 Impacts des produits phytosanitaires sur l'environnement

Dans le contexte actuel de développement industriel et agricole, la question de l'impact environnemental des produits phytosanitaires se pose avec acuité. Les engrais et pesticides, bien que cruciaux pour répondre aux besoins alimentaires d'une population mondiale croissante, représentent une source significative de pollution. Leur utilisation

intensive entraîne l'accumulation de substances nocives telles que les métaux lourds dans le sol, ainsi que la contamination des eaux de surface et souterraines, affectant non seulement la santé des écosystèmes mais aussi celle des êtres humains (Prashar et Shah, 2016 ; Savsi, 2012) (figure 4).

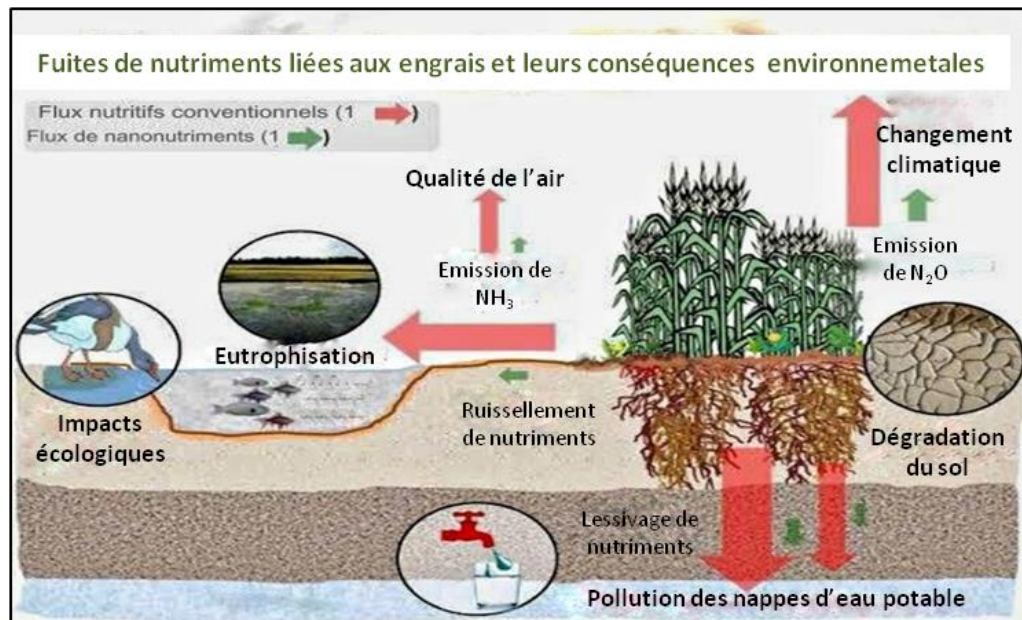


Figure 4 : Impact des produits phytosanitaires sur l'environnement (Bhardwaj *et al.*, 2022).

La dispersion de ces produits phytosanitaires dans l'environnement peut perturber les cycles naturels et la biodiversité, menaçant la viabilité à long terme des habitats naturels et des ressources agricoles (Prashar et Shah, 2016 ; Savsi, 2012).

3.2.1 Impact sur la biodiversité

La biodiversité désigne la diversité des formes de vie au sein d'un écosystème. Elle englobe la variété des espèces, la diversité génétique au sein de ces espèces et la complexité des communautés biologiques et des processus écologiques. Dans un écosystème, chaque espèce, qu'elle soit microscopique ou de grande taille, remplit des fonctions écologiques essentielles. Ces fonctions contribuent à la stabilité et à la productivité de l'écosystème (Yadav et Devi, 2017).

Cependant, l'introduction de produits chimiques, comme les pesticides, peut perturber cet équilibre délicat. Même si l'intention est de cibler des nuisibles, les effets peuvent être bien plus larges. Par exemple, un pesticide pourrait accidentellement éliminer des insectes bénéfiques, qui sont essentiels pour la pollinisation ou comme source de nourriture pour d'autres animaux. Cela peut entraîner une réaction en chaîne, où la disparition d'une espèce clé déstabilise tout l'écosystème, favorisant la prolifération

d'espèces moins désirables ou réduisant simplement la diversité globale (Yadav et Devi, 2017).

En brisant les liens alimentaires, les pesticides peuvent donc transformer radicalement la structure de la communauté biologique. Ainsi l'utilisation de produits phytosanitaires doit être considérée avec prudence, en évaluant soigneusement leur impact potentiel sur la biodiversité qui nous entoure. C'est cette diversité qui maintient nos écosystèmes sains et notre propre survie en tant qu'espèce (Yadav et Devi, 2017).

3.2.2 Impact sur les espèces non ciblés

L'usage des insecticides, bien que destiné à lutter contre les nuisibles, peut malheureusement impacter négativement les organismes non ciblés. Les vers de terre subissent une toxicité élevée face aux carbamates et une diminution de population due aux organophosphorés, ce qui déstabilise l'équilibre du sol et de l'écosystème. Les prédateurs naturels, tels que les parasitoïdes et les prédateurs, cruciaux pour la régulation des nuisibles, sont aussi gravement affectés, entraînant potentiellement une augmentation des problèmes de nuisibles. Enfin, les pollinisateurs comme les abeilles et les oiseaux, essentiels pour la pollinisation des cultures, sont perturbés par les pesticides, menaçant la biodiversité (Yadav et Devi, 2017).

3.2.3 Impact sur la microflore du sol

L'utilisation excessive de pesticides et d'engrais chimiques dans l'agriculture peut entraîner une accumulation de ces substances dans le sol, affectant négativement ses propriétés et sa microflore. Cette accumulation peut perturber les processus de dégradation, de transport et modifiant la diversité microbienne et l'activité enzymatique du sol. En conséquence, des groupes de micro-organismes peuvent être inhibés ou éliminés, ce qui libère d'autres groupes de la concurrence et perturbe l'équilibre écologique du sol. Les réactions biochimiques essentielles telles que la fixation de l'azote, la nitrification et l'ammonification peuvent être affectées, influençant la minéralisation de la matière organique du sol et par conséquent, sa qualité et sa productivité (Dessureault-Romppe, 2022 ; Srivastava *et al.*, 2020 ; Yadav et Devi, 2017; Prashar et Shah, 2016).

L'acidification du sol, souvent plus prononcée dans les sols sableux, peut réduire l'apport de phosphate par les cultures, augmenter la concentration d'ions toxiques et inhiber la croissance des plantes. De plus, l'excès d'azote appliqué pour équilibrer les nutriments peut détruire l'équilibre entre l'azote, le phosphore et le potassium, entraînant

une réduction des micronutriments et endommageant la couche arable (Gnanaprakasam et Vanisree, 2022 ; Iqbal *et al.*, 2020 ; Srivastava *et al.*, 2020 ; Sharma et Chetani, 2017; Lawani *et al.*, 2017 ; Prashar et Shah, 2016).

3.2.4 Impact sur la biodiversité aquatique

Les produits phytosanitaires tels que les pesticides constituent une menace majeure pour nos écosystèmes aquatiques. En effet, ces substances peuvent considérablement réduire la quantité d'oxygène disponible dans l'eau, ce qui est vital pour la survie de nombreuses espèces aquatiques. Du plus petit des micro-organismes, comme les algues, jusqu'aux plus grands, comme les poissons, tous les niveaux de la chaîne alimentaire peuvent être affectés. Lorsque les pesticides sont utilisés de manière intensive, ils peuvent perturber cet équilibre délicat, entraînant potentiellement une réduction significative de la population piscicole. Cela peut avoir des conséquences en cascade, affectant non seulement les poissons mais aussi les espèces qui dépendent d'eux, mettant ainsi en péril la diversité biologique de nos cours d'eau (Scholz *et al.*, 2012).

3.3 Impact des produits phytosanitaires sur les ressources en eau

Aujourd'hui, nous sommes de plus conscients des conséquences environnementales de l'utilisation des engrais azotés. Ces substances se retrouvent dans les milieux aquatiques principalement par le drainage, le lessivage et le ruissellement. Le lessivage des nitrates est particulièrement préoccupant car il est directement lié aux pratiques agricoles comme la fertilisation et l'irrigation, surtout dans les zones arides et semi-arides où l'évaporation de l'eau favorise l'accumulation de nitrates dans le sol. Ces nitrates peuvent ensuite être lessivés en quantités variables et atteindre les eaux souterraines (Savci, 2012 ; Keddal et N'dri., 2008).

Dans le sol, les engrais azotés se transforment en nitrates par le processus de nitrification, réalisé par des micro-organismes. Les nitrates, en raison de leur charge négative, peuvent migrer vers les eaux souterraines. Il est estimé que les plantes n'utilisent que 50 % des engrais azotés, le reste se perd par évaporation, réaction avec les composés organiques ou contamination des eaux de surface et souterraines (Savsi, 2012).

L'azote non absorbé par les cultures est éliminé du sol par lessivage, drainage ou érosion, et peut contaminer les eaux souterraines. L'eau potable contenant plus de 50 mg de nitrates par litre peut causer de graves problèmes de santé (Gnanaprakasam et Vanisree, 2022).

Enfin, l'azote et le phosphate présents dans l'eau sont les principaux facteurs d'eutrophisation, un processus où une croissance excessive d'algues et de plantes aquatiques nuit à la qualité de l'eau et à la vie aquatique. Cette prolifération peut entraîner une diminution de l'oxygène dans l'eau, affectant ainsi la faune et la flore (Gnanaprakasam et Vanisree, 2022 ; Sharma et Chetani, 2017 ; Lawani *et al.*, 2017 ; Keddal et N'dri., 2008). Ceci est confirmé par la publication intitulée “*More People, More Food, Worse ? A global Reviewog Water Pollution drom Agrigulture*” de la FAO et de l’institut de gestion internationale, publiée en juin 2018 (figure 5).



Figure 5 : Impact des produits phytosanitaires sur les ressources en eau selon le rapport de la FAO et de l’institut de gestion internationale.

3.4 Impact des produits phytosanitaires sur l’atmosphère

La pollution de l'air causée par les engrais chimiques est un problème environnemental sérieux. Car ils libèrent des gaz à effet de serre, notamment le protoxyde d'azote (N_2O), qui est produit à environ 60 % par les sols agricoles. Ce gaz contribue significativement à l'effet de serre, aggravant le réchauffement climatique et endommageant la couche d'ozone, ce qui augmente l'exposition aux rayons ultraviolets nocifs (Gnanaprakasam et Vanisree, 2022 ; Savsi, 2012).

Le N_2O est considéré comme le troisième gaz le plus important pour le réchauffement climatique, après le CO_2 et le méthane. La production d'engrais azotés entraîne également l'émission d'autres oxydes d'azote (NO_x), tels que le N_2O et le NO , qui sont transformés par les bactéries du sol. Ces gaz aggravent la pollution de l'air et peuvent avoir des effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine. L'ammoniac (NH_3) émis par l'utilisation d'engrais peut se déposer dans l'atmosphère et se transformer en acides nitrique et sulfurique, contribuant ainsi à la formation de pluies acides. Ces pluies acides ont un impact négatif sur l'environnement et peuvent endommager la végétation et les organismes aquatiques (Gnanaprakasam et Vanisree, 2022 ; Savsi, 2012).

Les risques et problèmes environnementaux, écosystémiques et sanitaires associés à l'agriculture moderne et à ses pratiques d'utilisation de produits phytosanitaires synthétiques ne cessent d'augmenter. Cela nécessite de nouvelles stratégies agricoles et un remplacement vers des pratiques de gestion des cultures et des bioressources qui dépendent moins de ces produits synthétiques (Jiao *et al.*, 2021 ; Ma, 2019 ; Pravin *et al.*, 2016). L'accent est mis sur l'utilisation des microbes du sol pour une production durable et robuste des cultures sans avoir de conséquences à long terme pour l'écosystème (Adedeji *et al.*, 2020 ; Sivasakthi *et al.*, 2014), afin d'optimiser le rendement et la production de biomasse des cultures d'un point de vue environnemental, économique et sanitaire (Ma, 2019).

Les micro-organismes du sol ont souvent le potentiel d'apporter des avantages considérables à l'agriculture, essentiellement en favorisant la santé et la nutrition des plantes, ainsi que l'amélioration de la qualité du sol (Adedeji *et al.*, 2020 ; Sivasakthi *et al.*, 2014).

1 Les communautés microbiennes du sol

Le sol est une couche essentielle de l'écorce terrestre qui s'étend verticalement depuis la roche altérée jusqu'à la surface (Gobat *et al.*, 2010).

La diversité des communautés microbiennes est complexe et variable à différents niveaux d'organisation biologique. Elle constitue un mélange complexe d'organismes essentiels de la planète, comprenant des micro-organismes, des animaux et des végétaux. Cette diversité joue un rôle important dans la biotransformation et le transfert des éléments ou des composés (Ma *et al.*, 2016).

Les communautés microbiennes du sol représentent la plus grande diversité que l'on rencontre sur terre (Hinsinger *et al.*, 2009). Elle varie en termes de richesse taxonomique, d'abondance et de distribution en fonction du type de sol, des conditions climatiques, de la végétation et de l'utilisation des terres (Adedayo *et al.*, 2022).

Le sol est considéré comme la fondation de tous les écosystèmes terrestres, et les micro-organismes du sol interagissent entre eux et avec leur environnement pour influencer de nombreux processus écologiques. La biodiversité microbienne dans le sol est incroyablement riche ; on peut trouver près d'un million d'espèces de bactéries, d'archées et de champignons dans un gramme de sol (Adedeji *et al.*, 2020).

Au cœur de cette complexité se trouve la rhizosphère (Adedayo *et al.*, 2022 ; Morgan *et al.*, 2005).

2 La rhizosphère

Le terme de rhizosphère a été introduit par Hiltner en 1904, dérivé du mot grec «*rhiza*» signifiant racine et «*sphère*» signifiant champ d'influence (Morgan *et al.*, 2005).

La rhizosphère est une région dynamique du sol directement influencée par les racines des plantes et leurs micro-organismes associés (Adedayo *et al.*, 2022 ; Morgan *et al.*, 2005).

Plus récemment, il a été élargi pour inclure trois zones définies en fonction de leur proximité relative avec les racines des plantes (figure 6), s'étendant de la surface des racines à l'intérieur du sol sur 1 à 3 mm (Hinsinger *et al.*, 2009).

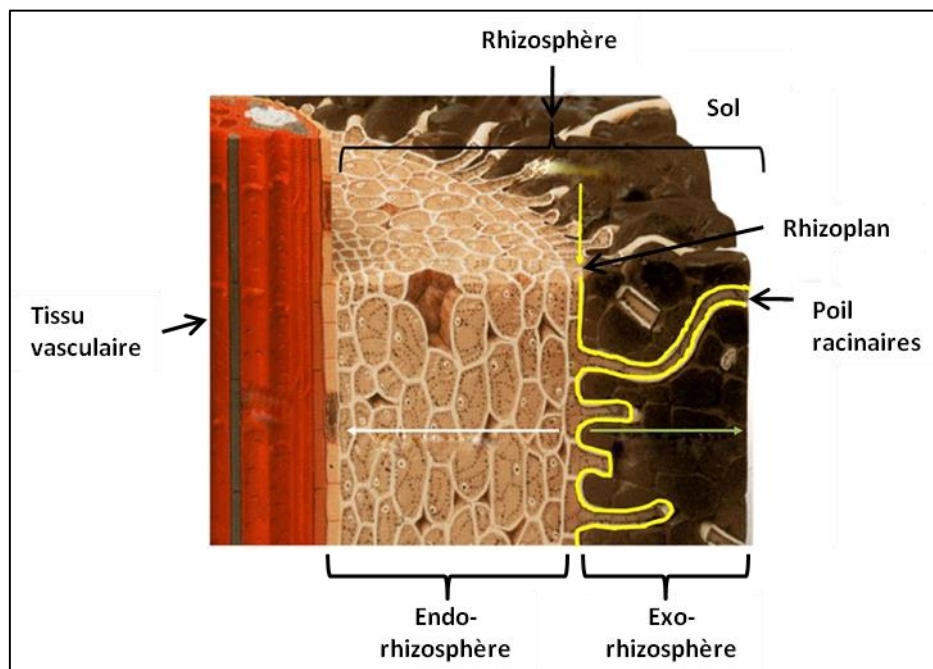


Figure 6 : Schéma illustrant la structure de la rhizosphère dans une section de racine (McNear Jr, 2013).

Endorhizosphère (ou rhizosphère interne) : Cette zone comprend l'écorce racinaire située entre l'endoderme et l'épiderme, et elle est envahie par les micro-organismes.

Rhizoplane : Il s'agit de la surface des racines et des micro-organismes qui y sont associés.

Exorhizosphère (ou rhizosphère externe) : Cette zone est en contact étroit avec la surface des racines des plantes (Sivasakthi *et al.*, 2014 ; Morgan *et al.*, 2005).

Les plantes gèrent les carences en nutriments en ajustant leurs racines, en coopérant avec des micro-organismes et en modifiant l'environnement autour des racines. Les substances organiques sécrétées par les racines, appelées exsudats, sont essentielles pour l'absorption des nutriments, agissant par acidification du sol, modification des conditions redox ou chélation directe des éléments nutritifs. Ces exsudats, tels que les sucres, les acides aminés et les acides organiques, nourrissent les micro-organismes, favorisant ainsi la santé des sols et des plantes. De plus, la matière organique des racines stabilise la structure du sol, favorisant la croissance des plantes et stimulant les activités microbiennes bénéfiques dans la rhizosphère (Swarnalakshmi *et al.*, 2020 ; Ma *et al.*, 2016).

3 Les rhizobactéries

Les bactéries sont les microorganismes les plus nombreux dans la rhizosphère, sous le terme de rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (RFCP) ou *Plant growth promoting rhizobacteria* (PGPR) introduit par Kloepper et Schroth, ouvrant la voie à de plus grandes découvertes sur les PGPR (Pellegrini *et al.*, 2020). Ce groupe, connu pour ses avantages sur la santé des plantes, a été catégorisé selon ses interactions avec les plantes. Certaines de ces interactions produisent directement à la plante les nutriments nécessaires et maintiennent sa croissance (figure 7), tandis que d'autres agissent de manière indirecte en prévenant les effets néfastes notamment le stress biotique et abiotique par la production de composés antagonistes (Vejan *et al.*, 2016).

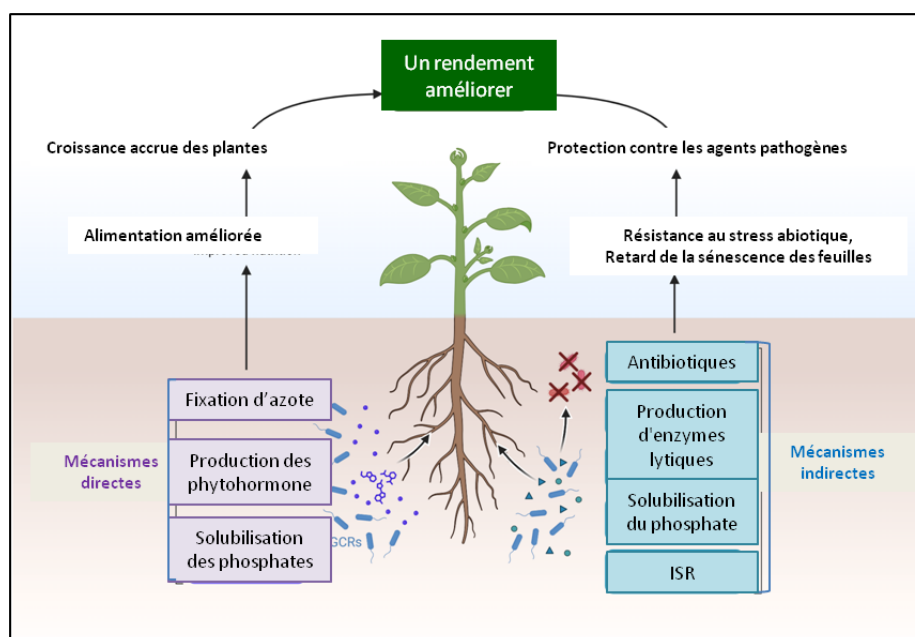


Figure 7 : Mécanismes d'action directs et indirects des PGPR (Hakim *et al.*, 2021).

4 Les mécanismes d'action des PGPR

Les PGPR exercent leur action bénéfique en facilitant l'absorption des nutriments de l'environnement par les plantes (processus appelé biofertilisation) (figure 8), en synthétisant des composés ou des phytohormones spécifiques stimulant la croissance végétale (appelés biostimulants), et en protégeant les cultures contre les agents pathogènes (également appelées bioprotectons ou biocontrol) (Odoh, 2017 ; Rifat *et al.*, 2010).

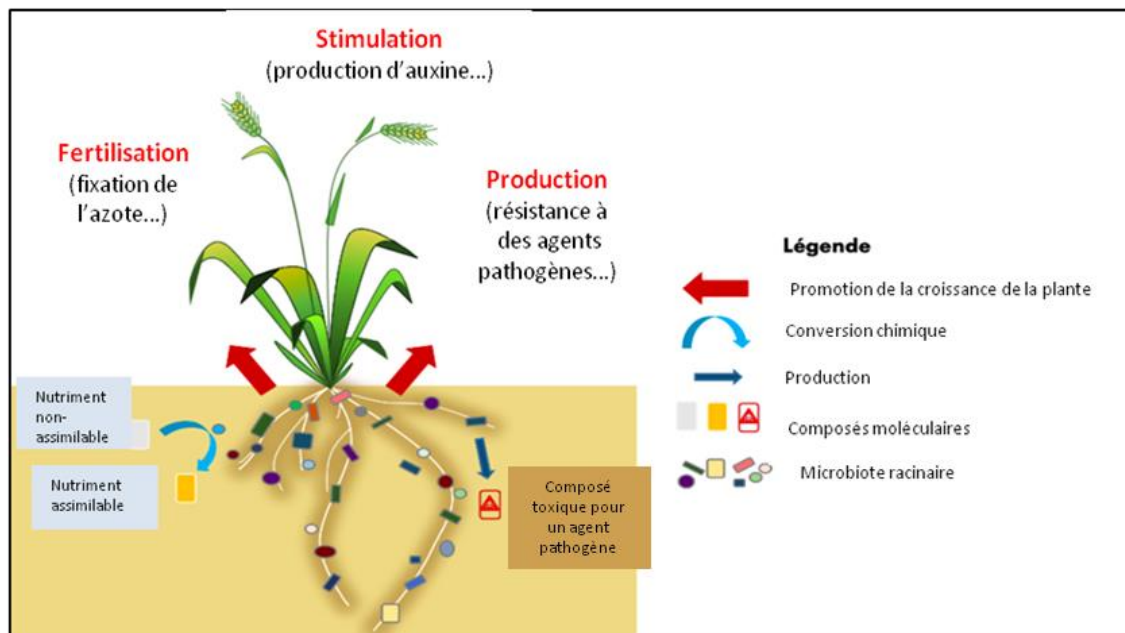


Figure 8 : Les fonctions des rhizobactéries pour la survie des plantes (Masson et Simonin, 2022).

4.1 La biofertilisation

Cette action améliore la croissance en fournissant et rendant disponibles les nutriments primaires pour la plante. Les PGPR ont un rôle dans la fixation atmosphérique de l'azote, la solubilisation des phosphates, la production de sidérophores et la minéralisation des composés organiques (Odoh, 2017).

4.1.1 La fixation de l'azote

La fixation de l'azote atmosphérique est cruciale pour la croissance des plantes et l'amélioration de la fertilité des sols. L'azote est un élément essentiel dont les plantes ont grandement besoin, mais elles ne peuvent pas l'absorber directement de l'air sous forme de (N_2) (Sivasakthi *et al.*, 2014).

Certaines rhizobactéries possèdent une enzyme spéciale appelée nitrogénase qui leur permet de capturer l'azote moléculaire inerte (N_2) et de le transformer en ammonium (NH_4^+), une forme assimilable par les végétaux (Swarnalakshmi *et al.*, 2020).

Les principaux genres bactériens fixateurs d'azote sont *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Rhizobium*, *Bacillus* et certaines souches de *Pseudomonas* (Adedayo *et al.*, 2022 ; Mahanty *et al.*, 2017 ; Goswami *et al.*, 2016). Grâce à cet apport en azote, les PGPR stimulent la croissance des parties aériennes et des racines, augmentent la teneur en chlorophylle et permettent d'obtenir de meilleurs rendements (Swarnalakshmi *et al.*, 2020 ; Pravin *et al.*, 2016).

La fixation d'azote par les PGPR représente une alternative durable et écologique aux engrais azotés chimiques coûteux et polluants (Santi *et al.*, 2013 ; Bhattacharyya et Jha, 2012).

4.1.2 La solubilisation des phosphates

Le phosphore est un macronutriment essentiel pour la croissance et le développement biologique, mais il se trouve souvent sous des formes insolubles et non assimilables par les plantes dans de nombreux sols (Goswami *et al.*, 2016 ; Sivasakthi *et al.*, 2014).

Heureusement, diverses PGPR sont capables de solubiliser ces phosphates grâce à la production d'acides organiques tels que l'acide citrique, l'acide gluconique ou des acides gras (Adedayo *et al.*, 2022 ; Swarnalakshmi *et al.*, 2020).

Les genres bactériens les plus connus pour cette capacité incluent *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Serratia* et *Rhizobium*. En libérant des phosphates solubles et biodisponibles pour les plantes, ces PGPR améliorent l'absorption de ce nutriment essentiel à de nombreux processus tels que le développement racinaire, la floraison, la croissance des graines et le rendement (Pravin *et al.*, 2016 ; Sharma *et al.*, 2013).

La capacité des PGPR à solubiliser les phosphates constitue donc une alternative biologique prometteuse aux engrais phosphatés chimiques (Sivasakthi *et al.*, 2014 ; Bhattacharyya et Jha, 2012).

4.1.3 La production de sidérophores

Les sidérophores sont de petites molécules chélatrices sécrétées par les bactéries de la rhizosphère qui ont une très forte affinité pour lier le fer, lequel est hautement insoluble. Ce dernier est généralement présent à la surface de la terre dans la nature sous forme de (Fe^{3+}) (Goswami *et al.*, 2016).

La production de sidérophores a également été enregistrée comme l'un des mécanismes importants de nombreuses PGPR comme *Bradyrhizobium japonicum*, *Rhizobium leguminosarum* et *Sinorhizobium meliloti* (Bhattacharyya et Jha, 2012).

Les sidérophores des bactéries PGPR possèdent donc un effet direct en alimentant la plante en fer. De plus, les sidérophores confèrent également un effet indirect en tant que biocontrôle en privant les agents pathogènes de fer (Swarnalakshmi *et al.*, 2020 ; Vejan *et al.*, 2016).

4.2 La biostimulation

Les biostimulants sont des substances organiques qui stimulent la croissance des plantes en agissant comme des régulateurs de croissance ou des phytostimulants. Ils comprennent des hormones végétales, qui jouent un rôle crucial dans le développement biochimique, physiologique et morphologique des plantes (Odoh, 2017).

Les phytohormones, sont des substances chimiques organiques naturelles qui influencent l'ensemble des processus physiologiques de croissance, de différenciation et de développement des plantes et leur confèrent des capacités d'adaptation aux variations de conditions de l'environnement (Goswami *et al.*, 2016). Elles sont composées de plusieurs familles telles que l'auxine, l'acide gibbérellique, les cytokinines et l'éthylène (Odoh, 2017 ; Pravin *et al.*, 2016).

En d'autres termes, elles sont produites à partir de PGPR appartenant aux genres *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Xanthomonas*, *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Alcaligenes*, *Enterobacter*, *Acetobacterium* et *Klebsiella* (Odoh., 2017).

4.2.1 L'auxine

L'auxine est la première hormone découverte dans les plantes et l'un des premiers agents, parmi une longue liste, de signalisation chimique régulant le développement des plantes (Odoh, 2017 ; Cassán *et al.*, 2013).

Dans ce groupe, l'acide indole-3-acétique (AIA) est le plus crucial, produit courant du métabolisme du L-tryptophane, synthétisé par des champignons et divers groupes de bactéries du sol vivant dans la rhizosphère (Mohite, 2013), tels que *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Enterobactercloacae*, *Bradyrhizobium* et *Azospirillum* (Odoh, 2017 ; Goswami *et al.*, 2016 ; Sivasakthi *et al.*, 2014).

L'AIA régule de nombreux processus de croissance de base, tels que les réponses trophiques et cellulaires, comme l'élongation, la division et la différenciation cellulaire, à divers niveaux, des tissus et des organes jusqu'à la plante entière (Zazimalová *et al.*, 2007).

4.2.2 Les cytokinines

Les cytokinines jouent un rôle clé dans divers processus de croissance et de développement chez les plantes, tels que la division cellulaire, la production de chlorophylle, le retardement de la sénescence foliaire et la dominance apicale (Goswami *et al.*, 2016).

Plusieurs genres bactériens comme *Pseudomonas*, *Bacillus* et *Rhizobium* sont capables de synthétiser des cytokinines (Odoh, 2017 ; Goswami *et al.*, 2016).

La production de ces cytokinines par les PGPR stimule non seulement la croissance végétative aérienne, mais favorise également le développement du système racinaire, ce qui améliore l'absorption des nutriments et l'accès à l'eau. L'inoculation des semences ou du sol avec des souches de PGPR productrices de cytokinines confère aux plantes une résistance et une tolérance aux stress abiotiques et permet donc d'améliorer leurs rendements (Odoh, 2017).

4.2.3 L'éthylène

L'éthylène est la seule phytohormone qui se présente sous forme gazeuse. Elle joue un rôle crucial dans la croissance, le développement, tels que la maturation des fruits, l'abscission des feuilles, ainsi que dans les réponses au stress chez les plantes à faibles concentrations. Toutefois, des niveaux élevés d'éthylène conduisent à une performance réduite des cultures (Adedayo *et al.*, 2022).

Certaines bactéries de la rhizosphère sont capables de synthétiser l'éthylène en produisant l'enzyme 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC), le précurseur de l'éthylène, en réponse à divers types de stress environnementaux.

Ainsi, l'inoculation des cultures avec des rhizobactéries synthétisant l'ACC désaminase représente une stratégie durable pour favoriser le développement des plantes et optimiser leurs rendements (Pravin *et al.*, 2016).

4.2.4 Les gibbérellines

Les gibbérellines constituent une autre famille majeure de phytohormones impliquées dans de nombreux processus physiologiques clés chez les plantes, tels que la germination des graines, l'élongation des tiges, l'induction florale et le développement des fruits (Goswami *et al.*, 2016 ; Cassán *et al.*, 2013). Bien que leur mode d'action diffère de celui des auxines, les effets des gibbérellines sur les plantes sont quelque peu similaires à ceux des auxines en termes de stimulation de la croissance (Adedayo *et al.*, 2022).

De plus, les gibbérellines jouent un rôle vital dans l'amélioration des processus photosynthétiques efficaces chez les plantes. En effet, ces phytohormones et les gènes impliqués dans leur production deviennent cruciaux dans des conditions de stress environnemental. Elles constituent ainsi d'importants biorégulateurs de la croissance végétale, capables d'augmenter la tolérance au stress de nombreuses espèces végétales (Odoh, 2017).

4.3 Les biocontrôles

Les PGPR ont été reconnus comme des agents de lutte biologique efficaces contre les pathogènes bactériens, fongiques et viraux, utilisant des mécanismes spécifiques pour contrôler les maladies des plantes dans leur environnement (Wang *et al.*, 2021 ; Odoh, 2017).

4.3.1 La production des antibiotiques

La production d'antibiotiques est l'un des mécanismes indirects majeurs par lequel les PGPR exercent un biocontrôle contre les agents pathogènes des plantes.

De nombreux genres bactériens comme *Bacillus*, *Pseudomonas* et *Streptomyces* sont connus pour synthétiser divers composés antibiotiques tels que les phénazines, les pyolutéorines, la pyrrolnitrine et la karalicine (Odoh, 2017 ; Goswami *et al.*, 2016). Ces antibiotiques sécrétés par les PGPR dans la rhizosphère inhibent la croissance des bactéries, des champignons et d'autres microorganismes phytopathogènes (Odoh, 2017).

Leur activité antimicrobienne confère un rôle crucial dans le contrôle des pathogènes végétaux et des maladies du sol, ce qui en fait une alternative prometteuse aux pesticides chimiques pour les cultures agricoles, contribuant ainsi à une agriculture plus durable (Goswami *et al.*, 2016).

4.3.2 La production d'enzymes lytiques

La production d'enzymes lytiques, également connues sous le nom d'enzymes de dégradation ou hydrolytiques, est considérée comme une forme vitale de biocontrôle contre les agents pathogènes des plantes. Les rhizobactéries produisent des enzymes extracellulaires lytiques telles que les chitinases, les β -1,3-glucanases, les lipases, les cellulases et les protéases, qui peuvent dégrader divers composés d'origine végétale et fongique.

Pour lyser les parois cellulaires des champignons phytopathogènes, les micro-organismes doivent sécréter des chitinases, glucanases, cellulases, protéases, déshydrogénases, lipases, phosphatases et pectinases.

Ces enzymes lytiques protègent les plantes contre les attaques d'agents pathogènes et confèrent également une protection contre le stress abiotique. Elles ont montré leur efficacité contre diverses maladies fongiques comme celles causées par *Phytophthora capsici* sur le poivron, *Fusarium* sur diverses cultures et *Pythium ultimum* sur la betterave à sucre (Odoh, 2017).

5 Intérêt des PGPR pour l'agriculture durable

L'utilisation des bactéries rhizosphériques tels que les bactéries fixatrices d'azote, solubilisantes des phosphates et productrices de sidérophores a fourni une solution alternative biotechnologique en agriculture durable pour répondre aux besoins nutritionnels des plantes (Alves *et al.*, 2023; Khatoon *et al.*, 2020 ; Sivasakthi *et al.*, 2014).

Les PGPR qui favorisent la croissance et le développement des plantes, jouent un rôle important en fournissant de la nourriture aux plantes et à la communauté microbienne de la rhizosphère, ainsi que l'amélioration de la fertilité des sols (tableau 2) (Alves *et al.*, 2023 ; Odoh, 2017).

De plus, la production d'enzymes lytiques, la libération de substances régulatrices de la croissance des plantes et la production d'antibiotiques par les PGPR peuvent jouer un rôle d'agents de biocontrôle et leur capacité à aider les plantes à croître dans différentes conditions de stress telles que la salinité (Evelin *et al.*, 2019 ; Arora *et al.*, 2011), les variations de température (Islam *et al.*, 2014), la sécheresse (Naylor *et al.*, 2018 : Kavamura *et al.*, 2013), l'infestation d'herbes, le manque de nutriments (Adedeji *et al.*, 2020 ; Pravin *et al.*, 2016).

Ainsi, les biocontrôles peuvent être utilisés comme une source de protection de la plante hôte contre les bactéries pathogènes, les champignons et les virus (Wang *et al.*, 2021 ; Goswami *et al.*, 2016 ; Choudhary *et al.*, 2007).

Les rhizobactéries sont couramment utilisées comme inoculants pour augmenter le taux de germination des graines, la croissance, et le rendement des cultures agricoles. Elles sont utilisées également pour réduire les applications d'engrais chimiques, de pesticides ou de fongicides et de suppléments. Par conséquent, elles réduisent le coût de production (Saranraj *et al.*, 2014 ; Bhattacharyya *et al.*, 2011).

Les interactions bénéfiques des plantes avec les rhizobactéries réduisent les effets néfastes et favorisent les organismes utiles tels que les cultures, les arbres, la santé humaine, les animaux, les insectes et les microorganismes bénéfiques (Alves *et al.*, 2023 ; Odoh, 2017).

Tableau 2 : Exemples de rhizobactéries favorisant la croissance des plantes et leurs effets.

Rézosbactéries	Plantes	Mécanismes	Effets bénéfiques	Références
<i>Rhodopseudomonas palustris</i>		Solubilisation du phosphore	Amélioration de la fertilité des sols	(De Andrade <i>et al.</i> , 2023)
<i>Bacillus sp</i> , <i>Citrobacter sp</i> , <i>Flavobacterium sp</i> et <i>Pantoea sp</i>		Production de phytohormones, sidérophore	Réduction des pathogènes fongiques des plantes	(De Andrade <i>et al.</i> , 2023)
<i>Pseudomonas alcaliphila</i> , <i>Streptomyces laurentii</i> , <i>Sinorhizobiumsp</i> et <i>Bacillus safensis</i>	Haricots (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Fixation de l'azote	Améliorent la croissance de la racine des haricots	(Adedayo <i>et al.</i> , 2022)
<i>Enterobacter hormaechei</i>	Tomato (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Solubilisent du potassium	Améliorent la croissance des plantes dans des conditions salines, contribuant à l'élongation des racines	(Adedayo <i>et al.</i> , 2022)
<i>Pseudomonas putida</i> , <i>Azospirillum spp</i> et <i>Azotobacter spp</i>	Artichaut (<i>Cynara Scolymus</i>)	Production d'AIA, solubilisation du phosphate	Développement de la racine et réduction du temps de germination	(Adedeji <i>et al.</i> , 2020)

Il est également possible d'utiliser les PGPR pour la bioremédiation grâce à leur capacité accrue d'utilisation des substances dérivées des déchets biologiques (telles que *Azospirillum spp*, *Pseudomonas spp*, *Bacillus spp* et *Arthrobacter spp*), ce qui constitue une stratégie viable pour lutter contre la pollution rapide de l'environnement et protéger les plantes de la toxicité des métaux lourds (Alves *et al.*, 2023 ; Saeed *et al.*, 2021 ; Sivasakthi *et al.*, 2014).

Les PGPR contribuent également à la durabilité environnementale en réduisant la pollution de l'eau et la dégradation des sols (Khatoon *et al.*, 2020 ; Bhardwaj *et al.*, 2014).

Ces stratégies de PGPR assurent non seulement un environnement sain, mais aussi améliorent la qualité nutritionnelle des cultures, renforçant ainsi la sécurité alimentaire (Odoh, 2017 ; Bhardwaj *et al.*, 2014).

6 Définition des biofertilisants et leur importance

Les biofertilisants sont des produits contenant des micro-organismes vivants ou des substances dérivées de micro-organismes qui sont bénéfiques lorsqu'ils sont utilisés comme inoculants pour les semences, les plantes ou les sols. Ils colonisent la rhizosphère ou l'intérieur de la plante et maintiennent l'environnement du sol riche en toutes sortes de micro et macro-nutriments par la fixation d'azote, la solubilisation ou la minéralisation des phosphates et du potassium, la libération de substances régulatrices de la croissance des plantes, la production d'antibiotiques et la biodégradation de la matière organique dans le sol (Khatoon *et al.*, 2020).

L'inoculation d'un seul type de biofertilisant peut servir à plusieurs fins en offrant une meilleure absorption des nutriments et une meilleure résistance aux stress biotiques et abiotiques (figure 9), ce qui favorise la productivité des cultures (Kalia *et al.*, 2020 ; Suhag, 2016 ; Bhardwaj *et al.*, 2014).

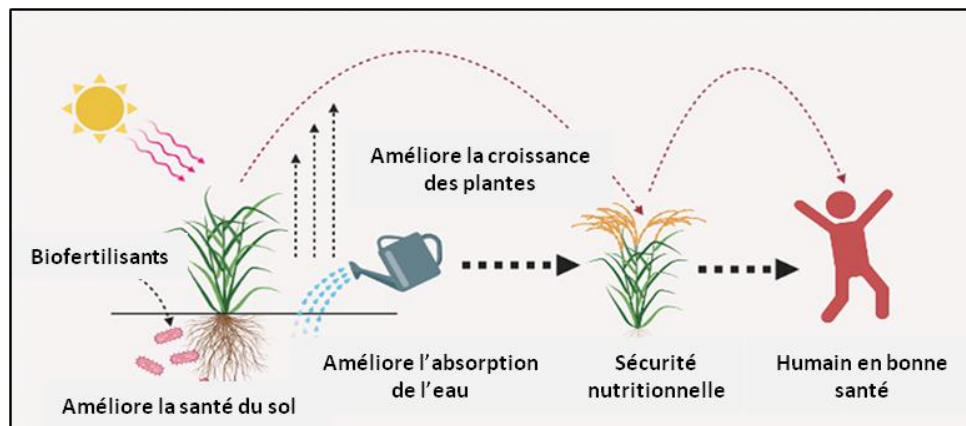


Figure 9 : Rôle des biofertilisants pour le maintien de la productivité des cultures et de la santé des sols (Sreethu *et al.*, 2023).

Les biofertilisants sont une alternative biotechnologique viable et durable qui s'est avérée très efficace pour augmenter le rendement des cultures, améliorer et restaurer la fertilité des sols, stimuler la croissance des plantes et réduire les impacts néfastes environnementaux et sanitaires (Atieno *et al.*, 2020 ; Pravin *et al.*, 2016 ; Sivasakthi *et al.*, 2014).

7 Les méthodes d'application d'inoculation des biofertilisants

Les biofertilisants peuvent être appliqués sous forme solide ou liquide selon différentes méthodes en fonction du type de culture et du stade de croissance des plantes (Gautam *et al.*, 2021 ; Sundaram, 1999).

Les principales méthodes d'inoculation des biofertilisants comprennent les traitements de semences (figure 10), le trempage boutures (tiges coupées) ou des tubercules (parties souterraines renflées), le traitement des racines de semis, l'application au sol et l'utilisation sur les cultures sur permanentes (Gautam *et al.*, 2021 ; Kalia *et al.*, 2020 ; Sundaram, 1999).

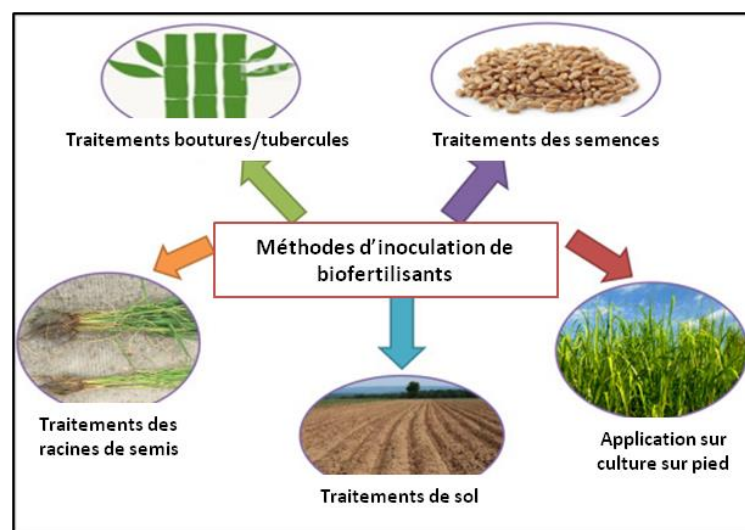


Figure 10 : Différentes méthodes d'inoculation des biofertilisants (Gautam *et al.*, 2021).

Le traitement des semences, souvent utilisé pour les céréales, légumineuses et oléagineux, consiste à enrober ou tremper les semences dans l'inoculum biofertilisant avant le semis. Pour les cultures comme la canne à sucre, la pomme de terre ou la banane, on procède au trempage des boutures ou des tubercules dans une solution liquide de biofertilisants avant la plantation. Le traitement des racines de semis est généralement utilisé pour les cultures maraîchères, les plantes ornementales et les espèces agroforestières.

La méthode d'application au sol permet d'appliquer directement le biofertilisant sur le sol, et la plupart des cultures peuvent en bénéficier. Enfin, pour les cultures pérennes taillées annuellement, comme les arbres fruitiers, le café, le thé, etc. qui restent plusieurs années au champ, le biofertilisant peut être appliqué sur les plantes adultes en croissance (Gautam *et al.*, 2021; Sundaram, 1999).

Matériel et méthodes

Nous avons conduit cette étude au sein du Laboratoire de Génie Microbiologique et Applications, localisé au Biopôle de Chaab Erssas de l'Université Frères Mentouri Constantine 1, sous la direction du Docteur L. Oulmi.

1 Le matériel biologique

Pour notre travail, nous avons utilisé des souches bactériennes (M43, S26, B20, O18) de la collection du laboratoire.

2 Revivification des souches bactériennes

Les souches conservées sont revivifiées sur un milieu de culture gélosé. Cette procédure implique l'ensemencement, à l'aide d'une anse d'inoculation stérile à usage unique, de quelques colonies des souches par des stries à la surface de la gélose préalablement coulée dans des boîtes de Pétri. Ces boîtes sont incubées à température optimale pendant une période adéquate pour obtenir des cultures jeunes et pures.

3 Confirmation de la pureté des souches

Les cultures ont été surveillées quotidiennement pour détecter toute contamination possible. La surveillance est basée sur les caractères morphologiques caractéristiques de nos souches et passe par des examens microscopiques de confirmation après coloration de Gram.

L'étude morphologique a été réalisée à trois reprises à intervalles égaux pendant la période d'incubation à température optimale.

3.1 L'étude macromorphologique

L'analyse des caractéristiques macroscopiques repose sur les traits culturels des colonies sur le milieu de culture.

3.2 L'étude macromorphologique sur le milieu testé

Pour évaluer la capacité des souches à se développer dans un milieu de fermentation enrichi par notre produit testé, ainsi que leur potentiel à se servir des composants du produit comme sources de nutriments, nous avons procédé à l'ensemencement du produit avec des stries série et incubées à température optimale pendant quelques jours.

3.3 L'étude micromorphologique

Pour observer microscopiquement la structure des souches, nous avons utilisé la méthode du frottis. Cette technique implique de prélever délicatement des échantillons pour chaque souche à l'aide d'une anse de platine, puis de les étendre sur des lames stériles. Les échantillons ont ensuite été fixés et colorés avec les colorants de Gram avant d'être observés au microscope optique à l'objectif $\times 100$.

Cette procédure a été répétée à trois reprises à intervalles égaux pendant la période d'incubation afin d'évaluer la morphologie de chaque souche.

4 Les Fermentations

4.1 Préparation des milieux de culture

Les fermentations ont été réalisées avec les deux souches bactériennes qui ont montré une capacité de croissance dans le milieu contenant le produit testé, notées souche S1 et souche S2. Elles ont été cultivées séparément dans trois substrats différents, notés M1, M2 et M3. Les fermentations ont été réalisées en présence et en absence de tryptophane.

4.1.1 En absence de tryptophane

Nous avons préparé trois flacons pour chacune des deux souches bactériennes. Chaque flacon contenait un volume réactionnel égal de milieu de fermentation. Dans le flacon M1, nous avons ajouté du glucose. Les flacons M2 et M3 contenaient différentes concentrations de produit testé.

4.1.2 En présence de tryptophane

Pour déterminer l'effet de tryptophane, nous avons préparé les mêmes milieux de fermentation (M1, M2 et M3) pour les deux souches bactériennes, auxquels nous avons ajouté du tryptophane dans chaque flacon pour avoir une concentration finale entre 50 et 200 mg/L.

Ensuite, tous les milieux ont été stérilisés à 121 °C pendant 20 minutes.

4.2 Préparation de l'inoculum

Les cultures bactérienne ont été incubées à température optimale jusqu'à formation d'une bonne biomasse sur la surface des colonies. À l'aide d'une anse de platine stérile, nous avons récupérées la masse cellulaire des deux souches (S1 et S2 séparément) dans

deux petits erlenmeyers contenant de l'eau physiologique stérile. Ainsi, nous avons préparé les deux suspensions d'une turbidité dense.

4.3 L'inoculation des milieux de fermentation

Nous avons inoculés chaque milieu de fermentation avec la même quantité d'inoculum. Six milieux de fermentation pour la souche S1 (trois en présence de tryptophane et trois en absence de tryptophane) et les six autres milieux pour la souche S2. Ensuite, les douze flaconsensemencés ont été incubés dans une étuve réglée à la température optimale de croissance, avec une agitation manuelle quotidienne et une aération dans la zone stérile.

4.4 La filtration

Après incubation, nous avons filtré, dans les conditions d'asepsie, les cultures de fermentation. La filtration a été réalisée à travers des compresses stériles et le filtrat a été récupéré dans des tubes coniques. Par la suite, les compresses retenant les biomasses ont été placées séparément dans des boîtes de pétri destinées à être utilisées pour l'inoculation future des graines. Parallèlement, les filtrats ont été gardés dans les tubes coniques, prévus pour l'arrosage des plantes. L'ensemble a été conservé à une température ambiante pour maintenir l'intégrité des échantillons.

5 Etude de l'effet des souches sur la germination et la croissance d'une légumineuse

5.1 Le matériel végétale

Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé des graines de lentilles, *Lens culinaris*, appartenant à la variété Syrie 229 de la catégorie ordinaire (figure 11). Ces graines ont été obtenues, le 24 mars l'année 2024, auprès de la coopérative des céréales et légumes secs de Constantine O.A.I.C, située dans la région N20, El kheroub, Constantine.

5.2 Effet des souches bactérienne sur la germination des graines

Pour étudier l'effet PGPR de nos souches sur la stimulation de la croissance végétale, nous avons procédé à un traitement pré-germinatif des graines. Le traitement basé sur l'inoculation des graines de lentille avec les biomasses bactériennes collectées de chaque fermentation (figure 12). Au total, 12 tests différents ont été établis, incluant un témoin où les graines ont été trempées dans de l'eau physiologique stérile en absence des

souches. Les graines placées dans les boîtes de Pétri (dix graines par test) ont été incubées à l'obscurité totale pendant trois jours.



Figure 11: Les graines de lentilles, variété Syrie 229 de la catégorie ordinaire.



Figure 12: L'inoculation des graines.

Afin de suivre l'évolution de la germination, des photographies ont été prises toutes les 12 heures, avec des mesures de la longueur des germes en centimètres.

5.3 La plantation des graines

Après trois jours de la germination des graines, celles-ci ont été transférées dans du terreau stérile (stérilisation à 121 °C pendant 20 minutes).

Pour chaque test, les dix graines ont été réparties en deux pots. Chaque pot contient cinq graines, ce qui fait un total de douze pots pour chaque souche bactérienne. Les graines germées sont semées à une profondeur de 1 cm de la surface (figure 13).



Figure 13 : La plantation des graines de lentilles dans les pots.

Ensuite, chaque groupe de cinq graines a été soit arrosé avec le filtrat de fermentation spécifique à la souche, soit avec de l'eau normale. Cette procédure a été répétée pour chaque milieu et pour les deux souches.

Pour les deux souches bactériennes, nous avons préparé un témoin (S1 et S2) qui a été trempé dans l'eau physiologique et arrosé avec de l'eau normale.

L'expérience a été menée pendant 15 jours. Les pots ont été placés à une température ambiante, près d'une fenêtre pour assurer une exposition suffisante à la lumière naturelle (soleil indirect), ce qui est essentiel pour la photosynthèse et la croissance des plantes.

6 Etude des paramètres morphologiques des plantules

Après 15 jours de croissance, les plantules ont été retirées de tous les pots. Nous avons lavé leur système racinaire puis les avons placées sur des feuilles graduées afin de mesurer divers paramètres morphologiques. Ces paramètres incluent la longueur des tiges et des racines en centimètres, le nombre de feuilles, ainsi que le développement racinaire, comprenant l'observation de la ramification et l'épaisseur des racines.

Résultats et discussion

1 L'étude morphologique

1.1 L'étude macromorphologique

Après une période d'incubation à une température optimale sur le milieu de culture, nous avons observé une croissance modérée des souches bactériennes.

L'étude macroscopique des souches a été réalisée à trois reprises à intervalles égaux pendant la période d'incubation.

Après une période d'incubation initiale, une croissance modérée a été observée pour les quatre souches bactériennes (M43, S26, B20, et O18). Les colonies formées sont circulaires, mesurant de 1 à 2 mm de diamètre, et se caractérisent par une consistance plate et sèche.

Lors de la deuxième observation ultérieure, les colonies ont montré une expansion notable, leur taille s'échelonnant désormais entre 3 et 4 mm. Cette période a été marquée par un développement vigoureux des cultures.

À la troisième observation, une croissance abondante des souches bactériennes a été constatée. La maturation des cultures s'est traduite par une augmentation significative de leur taille, notamment pour les souches M43 et B20 en comparaison avec les autres souches.

1.2 L'étude macromorphologique sur le milieu testé

Afin de tester la capacité des souches à croître dans le milieu de fermentation enrichi avec notre produit testé, Et suite à une période d'incubation, une croissance significative a été constatée pour seulement deux souches bactériennes sur le milieu gélosé testé (notées souche S1 et souche S2). Les colonies formées sont circulaires mesurant de 2 à 3 mm de diamètre.

1.3 L'étude micromorphologie

Pendant les observations microscopiques après coloration de Gram, les quatre souches bactériennes Gram-positives ont présenté une coloration violette foncée caractéristique sous l'objectif x100 du microscope.

2 Test de la croissance des souches dans les milieux de fermentation

Après avoir testé la capacité des souches étudiées (S1 et S2) à développer dans les trois milieux de fermentation différents (M1, M2 et M3) en présence et en absence de

tryptophane, et après incubation, nous avons observé les caractéristiques de développement pour les deux souches testé dans les douze milieux de fermentation. La manifestation de la croissance et du développement cellulaire était visible dans les flacons, caractérisée par une turbidité et la présence des particules (figure 14).

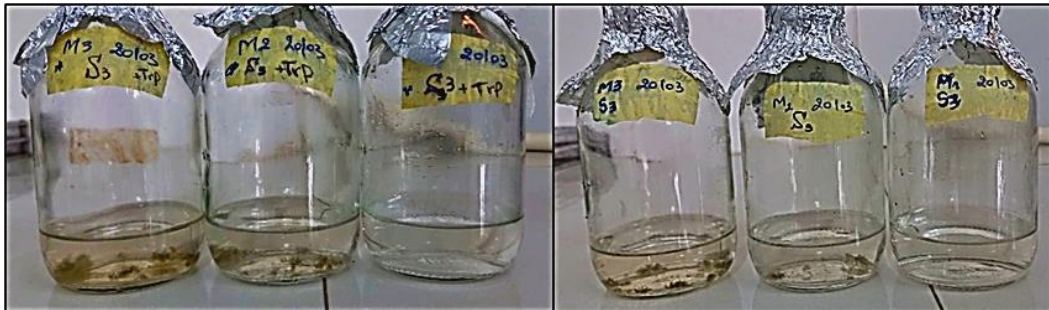


Figure 14 : Les milieux de fermentation après incubation.

Pour les milieux M2 et M3, qui contenaient différentes concentrations de notre produit testé, nous avons observé une bonne croissance à la fois en présence et en absence de tryptophane. En revanche, le milieu M1, enrichi en glucose, a montré une croissance plus faible. Ces résultats suggèrent que notre produit testé pourrait favoriser un environnement plus propice au développement bactérien que le glucose seul.

3 Effet des souches bactériennes sur la germination des graines de la légumineuse *Lens culinaris*

3.1 L'effet des souches sur la vitesse de germination des graines

Les graines de lentilles ont été imprégnées par les deux souches bactériennes S1 et S2 (séparément) pendant trois jours à l'obscurité.

Les tableaux 3 et 4 présentent des séries de photographies illustrant la germination des graines de lentilles inoculées avec les souches S1 et S2 respectivement, dans différents milieux de culture (M1, M2 et M3) sans ou avec tryptophane (M1+Trp, M2+Trp et M3+Trp).

Ces photographies ont été prises après un jour, deux jours et trois jours d'inoculation.

Tableau 3 : Suivi de la germination des graines de *Lens culinaris* après inoculation par la souche S1.

	Témoin	M1	M2	M3	M1+Trp	M2+Trp	M3+Trp
1 ^{er} jour							
2 ^{ème} Jour							
3 ^{ème} Jour							

Tableau 4 : Suivi de la germination des graines de *Lens culinaris* après inoculation par la souche S2.

	Témoin	M1	M2	M3	M1+Trp	M2+Trp	M3+Trp
1 ^{er} jour							
2 ^{ème} Jour							
3 ^{ème} Jour							

Les figures 15 à 18 montrent les représentations graphiques des vitesses de germination des graines inoculées avec les souches S1 et S2, comparées au témoin inoculé dans l'eau, pendant les trois jours. Les observations ont été réalisées à des intervalles réguliers de 12 heures.

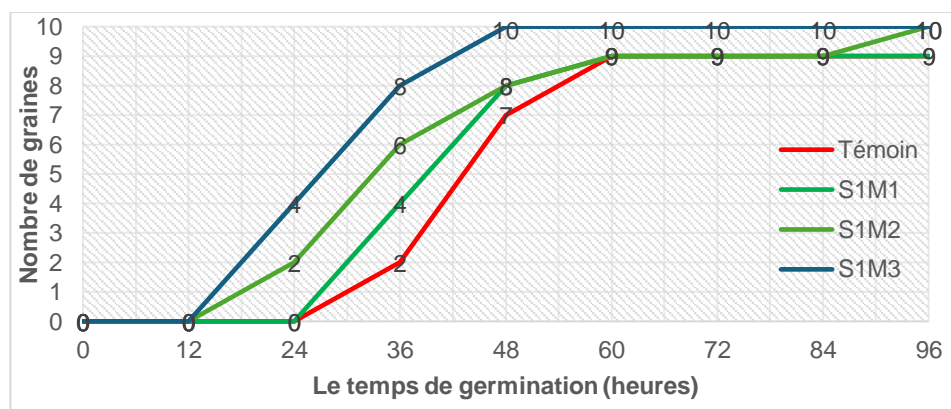


Figure 15 : L'effet de la souche 1 sur le taux de germination des graines (S1 cultivée sur les milieux sans tryptophane).

D'après les résultats de la figure 15, nous pouvons observer que le milieu M3 présente le taux de germination le plus élevé (graines germées à 100 %) et dans le temps le plus court.

En effet, après 24 heures, 40 % des graines ont germé dans le milieu M3, contre seulement 20 % dans le milieu M2. Alors qu'aucune germination n'a été enregistrée pour le témoin et le milieu M1.

Le deuxième jour, le milieu M3 a atteint un taux de germination de 100 %, tandis que le témoin a enregistré un taux de 70 %. Ceci indique une augmentation de 30 % du taux de germination pour les graines inoculées dans le milieu M3 par rapport au témoin. De plus, une différence de 24 heures dans la période de germination suggère que plus cette période est longue, plus le risque de contamination est élevé.

Cela peut s'expliquer par le fait que la grande concentration de produit testé que contient le milieu M3, qui a permis d'obtenir de bons résultats de germination, indique que ce produit testé n'était pas toxique mais servait plutôt de substrat nutritif pour la souche 1, fournissant une gamme de nutriments organiques et minéraux essentiels. Ces nutriments ont été métabolisés pour produire des substances qui ont stimulé et accéléré la germination des graines.

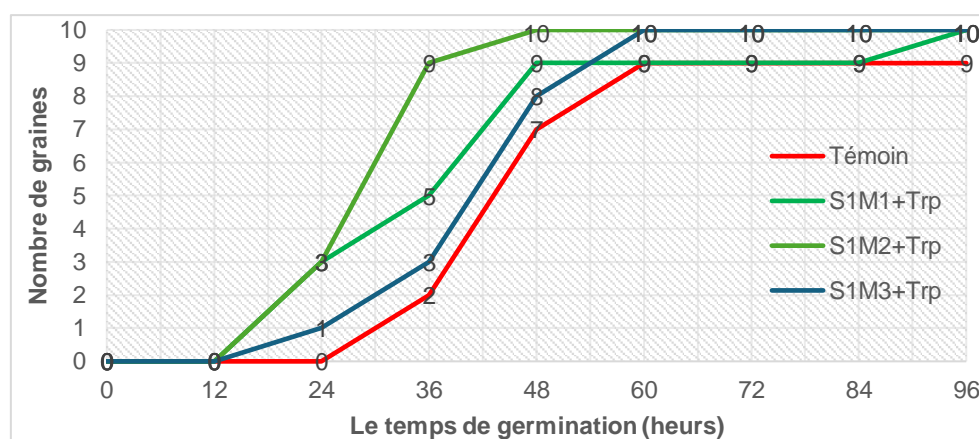


Figure 16 : L'effet de la souche 1 sur le taux de germination des graines (S1 cultivée sur les milieux additionnés de tryptophane).

En présence de tryptophane dans les milieux de fermentation, la figure 16, montre que les bactéries cultivées sur le milieu M2+Trp sont celles qui ont données le 100 % de germination après 48h suivi par le milieu M3+Trp après 60h (différence de 12 heures). On note que le témoin avait un taux de germination de 70 % seulement après 48h et qu'après 96h, que le milieu M1+Trp a montré le taux de 100 % de germination.

Les milieux contenant du produit testé (M2 et M3) ont atteint un taux de germination de 100 %, tandis que le témoin et le milieu contenant du glucose (M1) ont présenté un taux de germination de 90 % seulement. Cette différence peut s'expliquer par le fait que le glucose, en tant que source de carbone facilement assimilable, favorise la croissance de nombreux micro-organismes, y compris les contaminants fongiques. En revanche, la composition complexe du produit testé semble limiter le développement de ces contaminants, ce qui a permis d'obtenir une germination complète et une absence totale de contamination.

D'autre part, ces résultats suggèrent que la présence du tryptophane dans les milieux a un effet sur le métabolisme de la souche S1 et qui a entraîné une germination plus rapide des graines de lentille.

Ceci est en concordance avec la travaux de Peret (2007) et de Truskina *et al.*, (2020) qui indiquent que le tryptophane favorise la production des auxines chez les bactéries rhizosphériques. Ces phytohormones ont un grand effet sur la croissance des plantes.

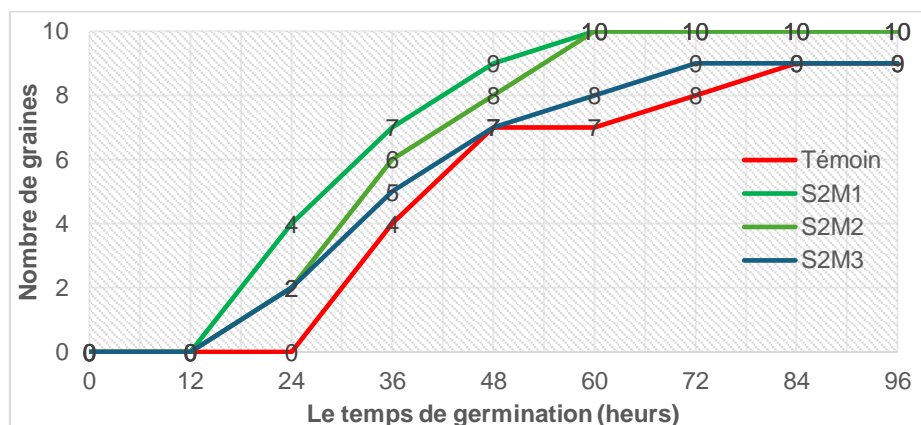


Figure 17 : L'effet de la souche 2 sur le taux de germination des graines (S2 cultivée sur les milieux sans le tryptophane).

À partir des résultats mentionnés dans la figure 17 de germination des graines inoculées avec la souche 2, après 24 heures, par rapport au témoin, il y a une augmentation du taux de germination de 40 % pour le milieu M1 et de 20 % pour les milieux M2 et M3.

Après 60 heures, 100 % des graines ont germé dans les milieux M1 et M2, tandis que 70 % des graines ont germé dans le témoin.

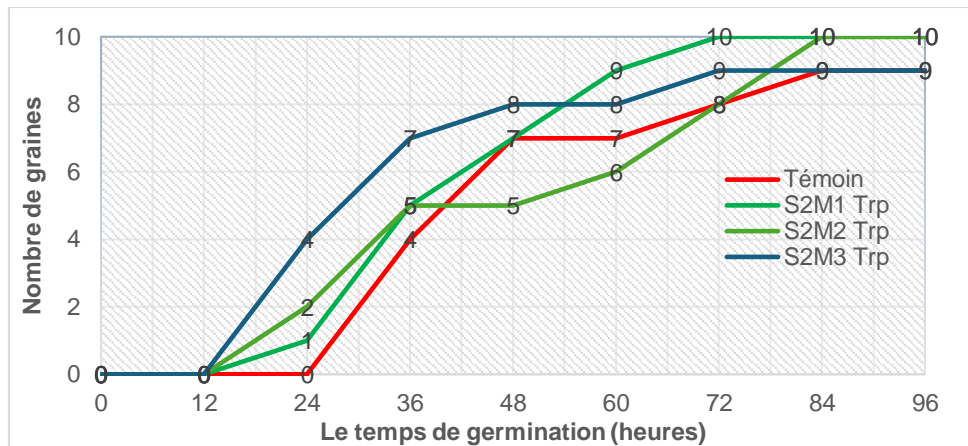


Figure 18 : L'effet de la souche 2 sur le taux de germination des graines (S2 cultivée sur les milieux additionnés de tryptophane).

En présence de tryptophane dans les milieux de fermentation (figure 18), nous remarquons que le milieu M3+Trp présente le taux de germination le plus élevé par rapport au témoin.

Cependant, ces résultats montrent une diminution de la vitesse de germination pour les graines inoculées dans les milieux M1+Trp et M2+Trp par rapport à l'absence de tryptophane. Cependant, pour le milieu M3+Trp, 40 % des graines ont germé dès le premier jour, contre seulement environ 20 % pour le milieu M3 en l'absence de tryptophane.

Ainsi, en l'absence de tryptophane, les milieux M1 et M2 permettent d'atteindre une germination plus rapide et complète, comparé aux milieux M1+Trp et M2+Trp où la vitesse de germination est réduite malgré la présence de tryptophane.

3.2 Effet des souches sur la longueur des germes

Après 3 jours de germination, nous avons mesuré la longueur des germes exprimée en centimètre. Les résultats sont résumés et représentés dans les figures 19 et 20.

Pour les graines inoculées avec la souche 1 (figure 19), on observe que les milieux M2 et M3 ont permis d'obtenir respectivement 70 % et 80 % des germes mesurant entre 1 cm et 1,5 cm, correspondant aux plus grandes longueurs de germes. En comparaison, le témoin et le milieu M1 ont montré une majorité de germes de petite taille, inférieurs à 0,3cm.

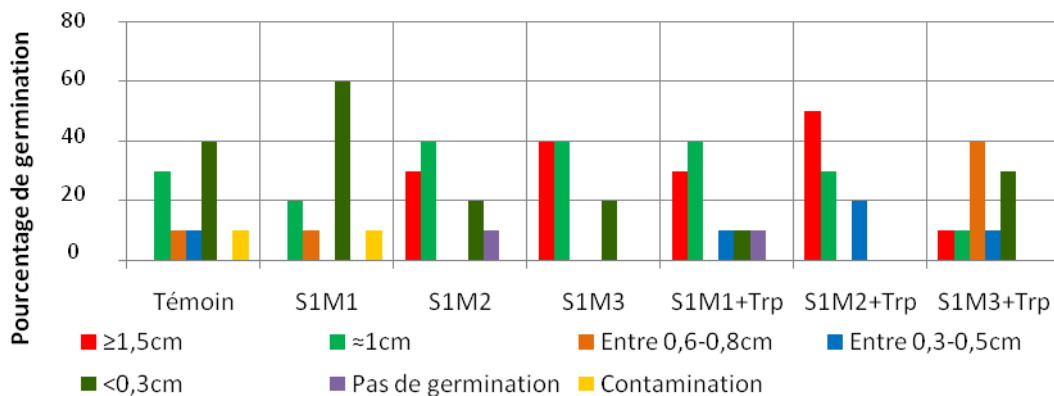


Figure 19 : Les variations des longueurs des germes issus des graines inoculées avec la souche 1 en fonction du milieu (présence et absence de tryptophane).

En présence de tryptophane, on remarque que son effet est visible dans les milieux M1+Trp et M2+Trp où respectivement 70 % et 80 % des germes ont atteint des longueurs comprises entre 1 cm et 1,5 cm, indiquant une augmentation de la croissance par rapport aux milieux sans tryptophane.

La figure suivante représente les variations des longueurs pour les graines inoculées avec la souche 2.

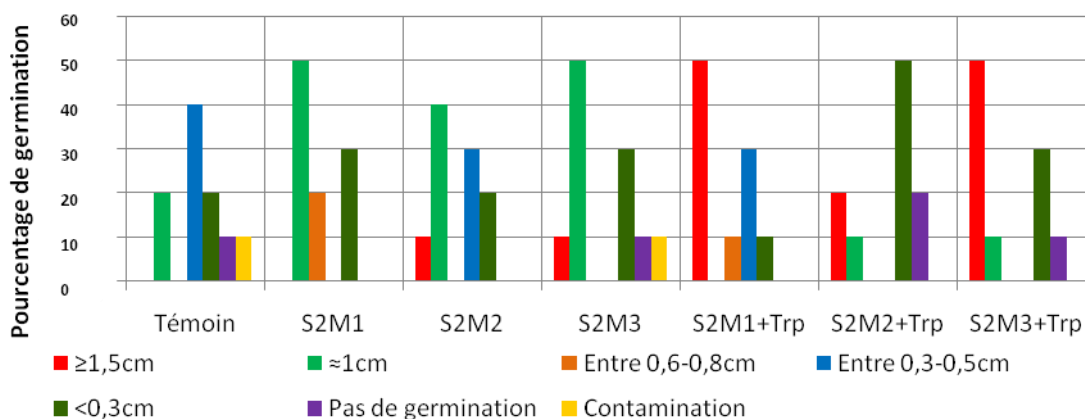


Figure 20 : Les variations des longueurs des germes issus des graines inoculées avec la souche 2 en fonction du milieu (présence et absence de tryptophane).

Nous observons que la plupart des graines dans les milieux M1, M2 et M3 mesurent environ 1 cm de longueur.

Notamment, En présence de tryptophane dans les milieux M1+Trp et M3+Trp affichent des longueurs des germes significativement plus élevés de 50 %, compris entre 1 cm et plus de 1,5 cm.

D'après nos résultats, nous avons observé que les deux souches bactériennes exercent un effet bénéfique sur l'accélération des paramètres de la germination évalués, notamment le pourcentage de germination, la vitesse de germination et la longueur des germes, même en absence de tryptophane.

Les deux souches se sont avérées plus efficaces et ont obtenu de meilleurs résultats dans les milieux enrichis avec le produit testé à différentes concentrations. Cela suggère que l'utilisation de ce produit comme source de nutriments pour les bactéries, accélère la germination des graines. Cette accélération est bénéfique pour la croissance des plantes, car elle favorise un développement rapide et robuste dès les premiers stades (phase pré-germinative).

4 Effet des filtrats de fermentation sur les plantules de la légumineuse *Lens culinaris*

4.1 L'effet des filtrats de fermentation sur la croissance des plantules

À fin d'étudier l'effet des souches bactériennes cultivées dans les douze milieux de fermentation sur la croissance des plantules de la légumineuse *Lens culinaris*, nous avons procédé à planter les graines germées dans du terreau stérile, ensuite les graines ont été arrosées avec le filtrat de fermentation et avec de l'eau normale. Les témoins ont été traités uniquement avec de l'eau.

Sur une période de 15 jours, les plantules dont les graines ont été inoculées avec les bactéries ont montrées une croissance plus rapide dès le premier et le deuxième jour de plantation, par rapport aux témoins, qui n'ont commencé à croître qu'à partir du troisième jour.

De plus, les plantules obtenues présentaient un bon état sanitaire. Elles possédaient des feuilles primaires remarquables, de longues tiges et un système racinaire développé avec de longues racines.

Les figures 21 et 22 illustrent le suivi de la croissance des plantes, expériences réalisées avec les souches S1 et S2 respectivement.



Figure 21 : Effet de l’arrosage avec de l’eau normale et du filtrat de fermentation de la souche 1 sur la croissance des plantules de lentilles traitées dans différents milieux après 12 jours. (M1, M2, M3, M1+Trp, M2+Trp, M3+Trp Normale : graines inoculées avec la souche et arrosées avec l’eau normale en présence et en absence de tryptophane / M1, M2, M3, M1+Trp, M2+Trp, M3+Trp filtrat : graines inoculées avec la souche et arrosées avec le filtrat de fermentation en présence et en absence de tryptophane / Témoin : graines non inoculées arrosées avec l’eau).



Figure 22 : Effet de l’arrosage avec de l’eau normale et du filtrat de fermentation de la souche 2 sur la croissance des plantules de lentilles traitées dans différents milieux après 12 jours. (M1, M2, M3, M1+Trp, M2+Trp, M3+Trp Normale : graines inoculées avec la souche et arrosées avec l’eau normale en présence et en absence de tryptophane ; M1, M2, M3, M1+Trp, M2+Trp, M3+Trp filtrat : graines inoculées avec la souche et arrosées avec le filtrat de fermentation en présence et en absence de tryptophane / Témoin : graines non inoculées arrosées avec l’eau).

Le pourcentage de croissance des plantes était élevé et nettement visible, en comparaison avec le témoin constitué des graines non inoculées (tableau 5 et 6).

Tableau 5 : Le pourcentage de croissance des plantules issues des graines inoculées avec la souche 1 après 12 jours.

Les milieux	Témoin	M1	M2	M3	M1+Trp	M2+Trp	M3+Trp
Solution d'arrosage							
Eau normale	66,6%	100%	80%	100%	100%	100%	80%
filtrat de fermentation		60%	80%	60%	80%	60%	60%

Nous remarquons que les plantules issues des graines inoculées avec la souche 1 et arrosées avec de l'eau normale présentent les pourcentages de croissance les plus élevés en l'absence de tryptophane (tableau 5), avec 100 % des plantes en développement pour les milieux M1 et M3, et 80 % pour le milieu M2. Cela démontre l'efficacité de la souche 1 couplée à ces milieux spécifiques pour favoriser une levée et un développement complet des plantules, en comparaison avec le témoin (graines non inoculées arrosées avec l'eau) dont le pourcentage de croissance n'était que de 66,6 %.

En présence de tryptophane, les plantules issues des graines mises dans les milieux M1+Trp et M2+Trp ont également atteint une croissance complète de 100 %, et celles du milieu M3+Trp un taux de 80 %, marquant une grande différence par rapport au pourcentage de croissance du témoin.

Pour les plantules arrosées avec leur propre filtrat de fermentation spécifique de la souche 1 en l'absence de tryptophane, un pourcentage de croissance de 80 % a été atteint pour le milieu M2, supérieur à celui du témoin. Cependant, les pourcentages les plus faibles de 60 % ont été obtenus avec les milieux M1 et M3.

En présence de tryptophane, les plantules arrosées avec leur filtrat de fermentation spécifique ont montré que le milieu M1+Trp a permis d'atteindre un pourcentage de croissance de 80 %, supérieur à celui du témoin. Néanmoins, les pourcentages les plus faibles de 60 % ont été obtenus avec les milieux M2+Trp et M3+Trp.

Par contre, nous constatons que les plantules issues des graines inoculées avec la souche 2 et arrosées avec leur propre filtrat de fermentation présentant les pourcentages de croissance les plus élevés en l'absence de tryptophane (tableau 6), avec 100 % des plantes en développement pour les milieux M2 et M3, et 80 % pour le milieu M1.

Tableau 6 : Le pourcentage de croissance des plantules issues des graines inoculées avec la souche 2 après 12 jours

Les milieux / Solution d'arrosage	Témoin	M1	M2	M3	M1+Trp	M2+Trp	M3+Trp
Eau normale	55,5%	60%	80%	25%	60%	20%	80%
filtrat de fermentation		80%	100%	100%	100%	80%	100%

Cela démontre l'efficacité de la souche 2 couplée à ces milieux spécifiques pour favoriser une levée et un développement complet des plantules, en comparaison avec le témoin de la souche 2 dont le pourcentage de croissance n'était que de 55.5 %.

En présence de tryptophane, les plantules issues des graines mises dans les milieux M1+Trp et M3+Trp ont également atteint une croissance complète de 100%, et celles du milieu M2+Trp un taux de 80 %, marquant une grande différence par rapport au pourcentage de croissance du témoin.

Pour les plantules arrosées avec de l'eau normale, nous avons observés des pourcentages de croissance plus faible par rapport aux plantules arrosées avec le filtrat de fermentation.

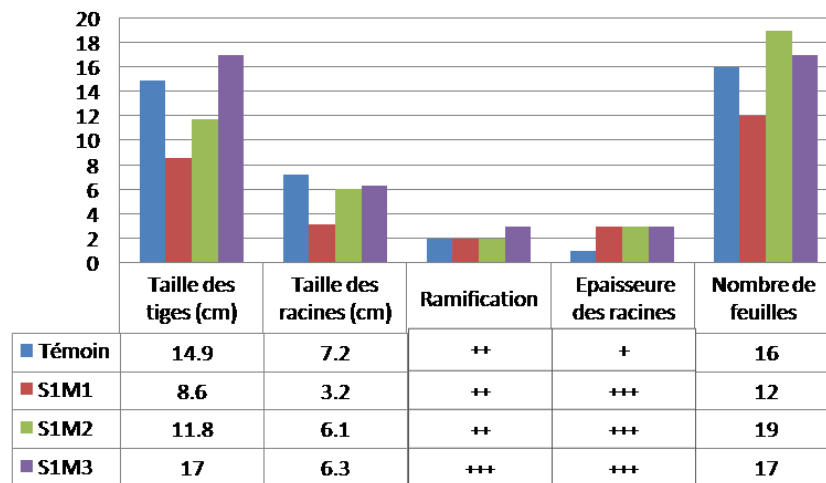
En absence de tryptophane, le milieu M2 à enregistré le taux le plus élevé avec 80% des plantes en développement par rapport aux d'autres milieux, et par rapport au témoin dont le pourcentage n'était que 55,5 %. Cependant les pourcentages les plus faibles à été obtenus avec les milieux M1 et M3.

En présence de tryptophane, le milieu M3+Trp permis d'atteindre un pourcentage de croissance de 80 %, supérieur à celui du témoin. Cependant les pourcentages les plus faibles à été obtenus avec les milieux M1+Trp et M2+Trp.

4.2 L'effet des filtrats de fermentation sur les paramètres morphologiques des plantules

Après 15 jours de croissance des plantules, nous avons mesuré les paramètres morphologiques des plantes en centimètres. Ces paramètres, représentés par la longueur des tiges, et des racines, le degré de ramification, ainsi que l'épaisseur des racines.

Tableau 7 : L'effet de l'inoculation et l'arrosage avec la souche 1 sur la croissance et les paramètres morphologiques des graines de lentilles.



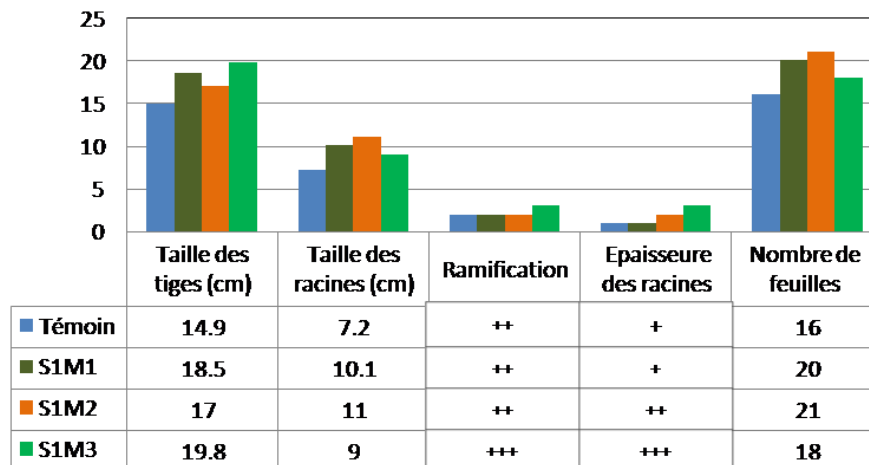
(+) : Ramification peu développé / Racines fin ; (++) : Ramification moyenne / Épaisseur moyenne des racines ; (+++) : Ramification abondante / Racines très épaisse.

Selon le tableau 7 et la figure 23A, les plantules issues des graines inoculées avec la souche 1 et arrosées avec le filtrat de fermentation correspondant, sans tryptophane, ont présenté une croissance globalement moins importante que le témoin. Plus précisément, les milieux M1 et M2 ont conduit à des tailles de racines et de tiges inférieures à celles observées pour les plantules témoins.

Cependant, le milieu M3 a permis d'obtenir une longueur de tige supérieure (17 cm) par rapport au témoin (14,9 cm), malgré une taille de racine plus petite. Les racines des plantules cultivées dans les milieux M1, M2 et M3 étaient plus épaisses que celles du témoin.

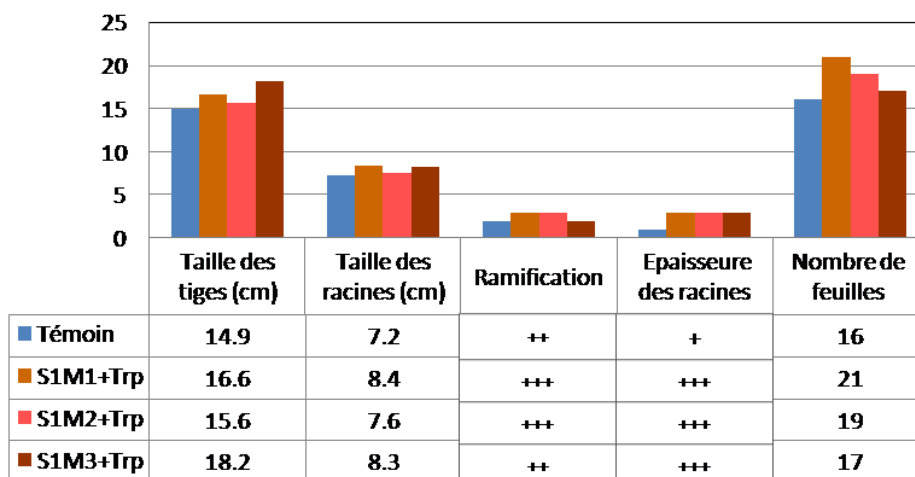
En ce qui concerne les plantules issues des graines inoculées et arrosées avec de l'eau normale (tableau 8 et figure 23B) pour les milieux M1, M2 et M3, elles ont montrées une bonne croissance avec un bon développement de leurs parties aériennes (respectivement 16,6 cm, 15,6 cm et 18,2 cm). Elles ont également présentées un nombre de feuilles plus important et un développement supérieur du système racinaire (racines plus longues, mieux ramifiées et plus épaisses) par rapport au témoin.

Tableau 8 : L'effet de l'inoculation avec la souche 1 et de l'arrosage avec de l'eau normale sur la croissance et les paramètres morphologiques des graines de lentilles.



(+) : Ramification peu développé / Racines fin ; (++) : Ramification moyenne / Épaisseur moyenne des racines ; (+++) : Ramification abondante / Racines très épaisse.

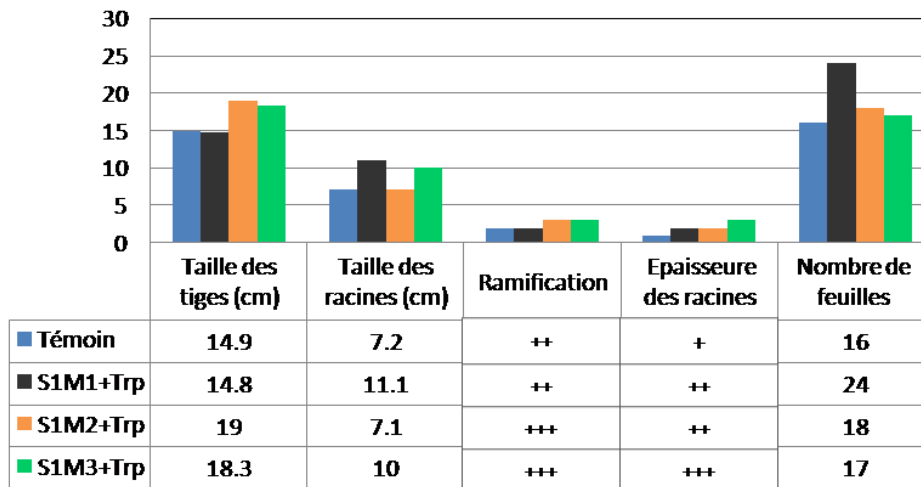
Tableau 9 : L'effet de l'inoculation et l'arrosage avec la souche 1 en présence de tryptophane sur la croissance et les paramètres morphologiques des graines de lentilles.



(+) : Ramification peu développé / Racines fin ; (++) : Ramification moyenne / Épaisseur moyenne des racines ; (+++) : Ramification abondante / Racines très épaisse.

L'ajout de tryptophane a eu un effet bénéfique global sur la croissance, que ce soit avec le filtrat de fermentation (tableau 9 et figure 23C) ou avec de l'eau normale (tableau 10 et figure 23D). Les longueurs des tiges et des racines étaient supérieures au témoin pour les milieux M1+Trp, M2+Trp et M3+Trp dans les deux cas.

Tableau 10 : L'effet de l'inoculation avec la souche 1 et de l'arrosage avec de l'eau normale en présence de tryptophane sur la croissance et les paramètres morphologiques des graines de lentilles.



(+) : Ramification peu développé / Racines fin ; (++) : Ramification moyenne / Épaisseur moyenne des racines ; (+++) : Ramification abondante / Racines très épaisse.

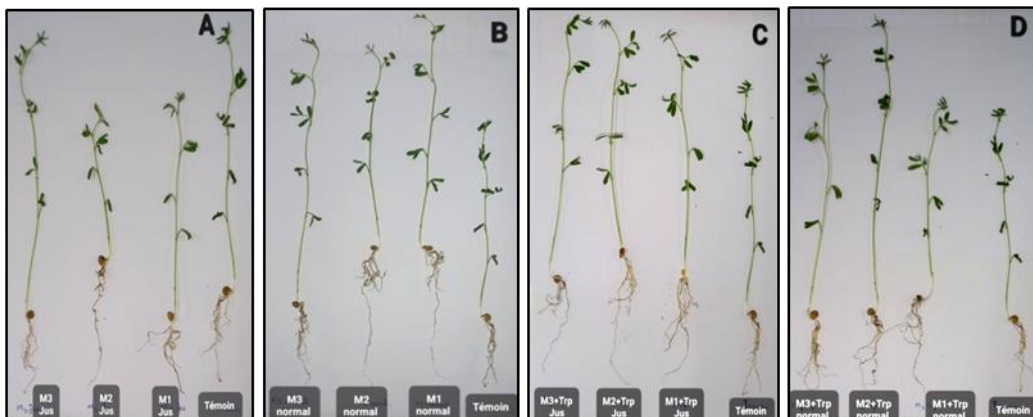


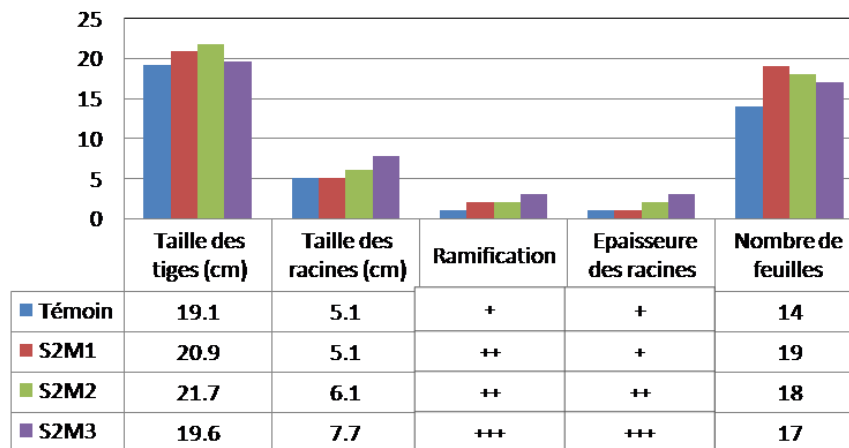
Figure 24 : Comparaison des plantules de lentilles dans trois milieux différents en présence de tryptophane (C,D) et absence de tryptophane (A,B), arrosés avec de l'eau normale (B,D) et avec du filtrat de fermentation de souche 1 (A,C), par rapport au témoin après 15 jours.

Nous remarquons que l'arrosage avec le filtrat de fermentation a généralement induit une ramification et une épaisseur racinaires plus abondantes qu'avec l'eau normale.

Cependant, les meilleurs pourcentages de croissance ont été enregistrés avec l'arrosage normal dans les cas où le tryptophane était présent ou absent, avec une bonne croissance des parties aériennes et des parties racinaires des plantules, témoignant d'une photosynthèse accrue et d'une meilleure capacité de production de biomasse. Cela indique que la souche 1 est peut être capable de promouvoir la croissance des plantules de lentilles même en l'absence de nutriments supplémentaires apportés par le filtrat de fermentation. Cela pourrait être dû à la capacité intrinsèque de la souche à solubiliser et à rendre disponibles les nutriments présents dans le sol ou le milieu de culture.

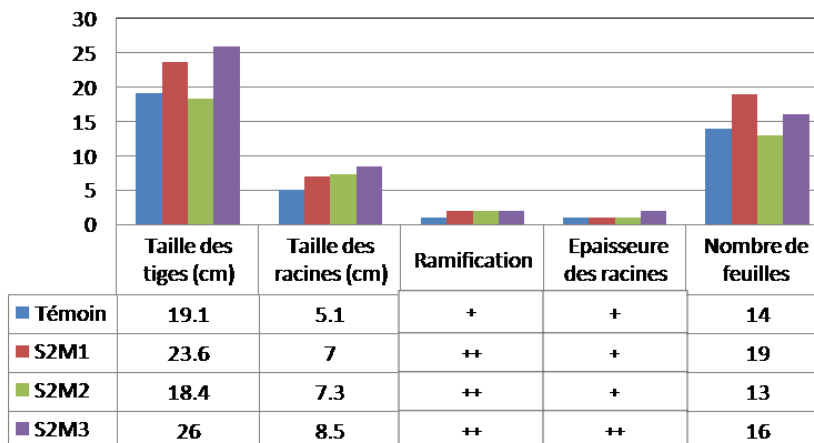
À partir des résultats du tableau suivant et la figure 24A, les plantules issues des graines inoculées avec la souche 2 et arrosées avec leur filtrat de fermentation spécifique ont montré un taux de croissance supérieur aux témoins dans les milieux M1, M2 et M3. Le milieu M3 a permis d'obtenir le système racinaire le plus long (7,7 cm) et les racines les plus épaisses.

Tableau 11 : L'effet de l'inoculation et l'arrosage avec la souche 2 sur la croissance et les paramètres morphologiques des graines de lentilles.



(+) : Ramification peu développé / Racines fin ; (++) : Ramification moyenne / Épaisseur moyenne des racines ; (+++) : Ramification abondante / Racines très épaisses.

Tableau 12 : L'effet de l'inoculation avec la souche 2 et de l'arrosage avec de l'eau normale sur la croissance et les paramètres morphologiques des graines de lentilles.



(+) : Ramification peu développé / Racines fin ; (++) : Ramification moyenne / Épaisseur moyenne des racines ; (+++) : Ramification abondante / Racines très épaisses.

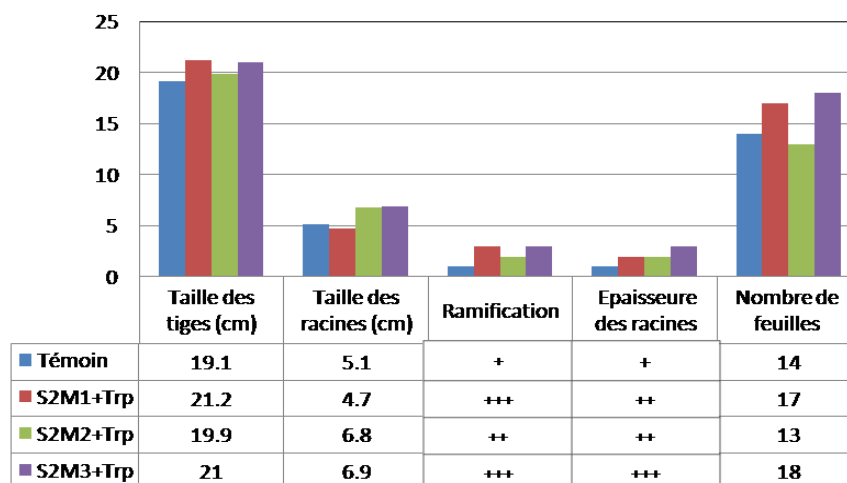
Selon le tableau 12 et la figure 24B, pour les plantes issues des graines inoculées avec la souche 2 et arrosées avec de l'eau normale, c'est le milieu M3 qui a favorisé la taille la plus importante des tiges (26 cm) et des racines (8,5 cm). Cependant, comme illustré dans le tableau 6, le pourcentage de croissance le plus élevé n'a atteint que 25 %.

Le milieu M1 a permis un bon développement des tiges (23,6 cm) et des racines relativement longues (7 cm), tandis que le milieu M2 a donné des racines de longueur similaire (7,3 cm).

Pour l'arrosage avec de l'eau normale en présence de tryptophane (tableaux 13 et figure 24C), les taux de croissance obtenus étaient généralement plus faibles que ceux observés avec l'arrosage par le filtrat de fermentation spécifique (tableau 14 et figure 24D).

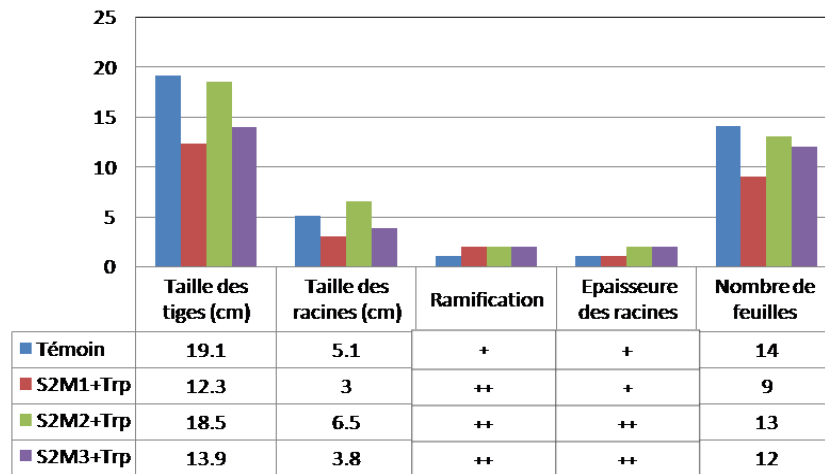
Cependant, certains milieux ont permis un bon développement des tiges et des racines. C'est le cas du milieu M3+Trp, qui a favorisé un nombre des feuilles plus important (18), une longueur de tige de 21 cm et une longueur de racine de 6,9 cm.

Tableau 13 : L'effet de l'inoculation et l'arrosage avec la souche 2 en présence de tryptophane sur la croissance et les paramètres morphologiques des graines de lentilles.



(+) : Ramification peu développé / Racines fin ; (++) : Ramification moyenne / Épaisseur moyenne des racines ; (+++) : Ramification abondante / Racines très épaisse.

Tableau 14 : L'effet de l'inoculation avec la souche 1 et de l'arrosage avec de l'eau normale en présence de tryptophane sur la croissance et les paramètres morphologiques des graines de lentilles.



(+) : Ramification peu développé / Racines fin ; (++) : Ramification moyenne / Épaisseur moyenne des racines ; (+++) : Ramification abondante / Racines très épaisse.

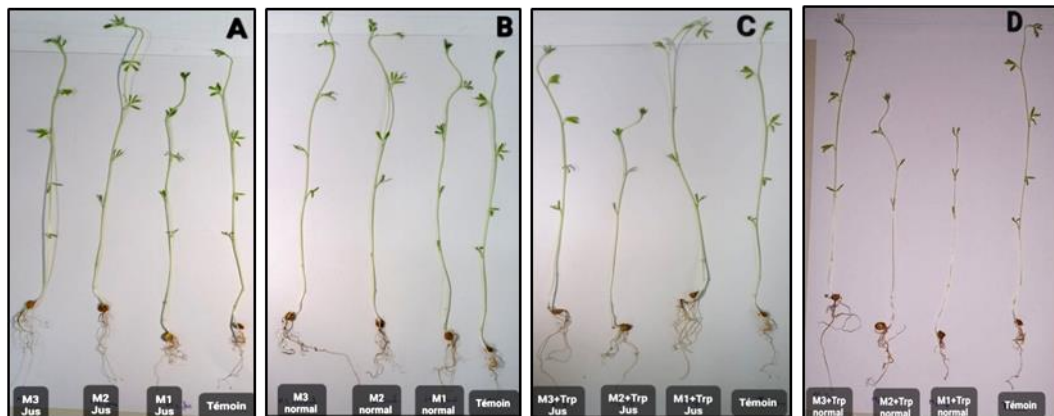


Figure 24 : Comparaison des plantules de lentilles dans trois milieux différents en présence de tryptophane (C,D) et absence de tryptophane (A,B), arrosés avec de l'eau normale (B,D) et avec du filtrat de fermentation de souche 2 (A,C), par rapport au témoin après 15 jours.

À partir de ces résultats, la souche 2 a favorisé la croissance des plantules, avec une bonne croissance des parties aériennes et racinaires, surtout dans les milieux enrichis avec le filtrat de fermentation.

Cela peut être expliqué par le fait que la souche 2 peut nécessiter des composés organiques complexes ou des nutriments supplémentaires présents dans le filtrat de fermentation pour exercer pleinement son effet. Et l'eau normale ne contient pas les minéraux essentiels tels que le calcium, le sodium et le magnésium, qui sont vitaux non seulement pour les plantes mais aussi pour les micro-organismes bénéfiques, ce qui peut expliquer le fait que les plantules arrosées avec l'eau normale ont enregistré le plus faible taux de croissance.

Cependant, les réponses varient en fonction de la composition des milieux de culture, de la présence ou l'absence de tryptophane (précurseur de l'auxine), et de la nature de la solution d'arrosage (filtrat de fermentation spécifique ou e normale).

En effet, ces résultats peut être expliqué par le fait que les deux souches bactériennes pourraient stimuler l'activité microbienne dans la rhizosphère, la zone d'influence des racines, favorisant la disponibilité des nutriments et le développement des plantules de lentilles par leur effet PGPR de façon directe en stimulant la croissance des parties aériennes et racinaires par la production des substances spécifiques stimulant la croissance végétale comme les phytohormones (Lemanceau *et al.*, 2017).

L'auxine, notamment produite à partir du tryptophane, favorise l'allongement cellulaire et le développement du système racinaire (Lebrazi *et al.*, 2020).

La production d'autres phytohormones comme les cytokinines et les gibbérellines par les PGPR peut également contribuer à l'amélioration des paramètres morphologiques observés, tels que le nombre de feuilles et la ramification des racines (Zazimalová *et al.*, 2007).

Conclusion

L'objectif principal de notre étude était de vérifier, tout d'abord, la capacité de nos souches bactériennes à se développer dans un milieu testé. Par la suite, évaluer leur effet sur la germination des graines de lentilles (*Lens culinaris*) et sur la croissance de leurs plantules ; pour qu'à la fin, élaborer une solution biologique qui contribuerait à une agriculture à la fois durable et économique.

Les études macroscopique et microscopique, réalisées grâce à la méthode du frottis, de deux souches bactériennes cultivées sur un milieu de culture gélosé ont confirmées la pureté des souches étudiées et leurs appartenances à un groupe bactérien très liées à la biotechnologie verte.

Le test de croissance des souches bactériennes sur un milieu gélosé intégrant notre produit testé, a révélé une croissance culturelle satisfaisante.

Concernant les fermentations, les deux souches bactériennes étudiées ont montrées une grande capacité à se développer dans les trois milieux testés, aussi bien en présence et en absence de tryptophane. Notamment, dans les milieux enrichis avec le produit testé, nous avons observé une croissance et un développement cellulaires remarquables, visibles dans les flacons de fermentations. Cette croissance s'intensifiait proportionnellement à l'augmentation de la concentration de notre produit testé.

Dans un premier lieu, nous avons testé l'effet des souches sur la germination des graines de la légumineuse *Lens culinaris*. Les résultats suggèrent que les deux souches bactériennes testées exercent un effet bénéfique sur l'accélération des paramètres de la germination évalués, notamment le pourcentage de germination, la vitesse de germination et la longueur des germes, même en absence de tryptophane.

Dans un deuxième lieu, nous avons testé l'effet des filtrats de fermentation sur la croissance des plantules. Les résultats suggèrent que les deux souches bactériennes exercent un effet bénéfique sur le pourcentage de croissance des plantules ainsi que sur leurs paramètres morphologiques.

Notre étude a montré que la souche 1 a permis de donner les meilleurs pourcentages de croissance avec l'arrosage normal en cas de présence ou d'absence de tryptophane, en conséquence, elle a permis d'avoir une bonne croissance des parties aériennes et des parties racinaires des plantules.

Pour la souche 2, les meilleurs pourcentages de croissance ont été enregistrés avec l'arrosage du filtrat de fermentation, qui a donné une bonne croissance des parties aériennes et des parties racinaire des plantules.

Notre étude a démontré de manière convaincante que les souches étudiées sont capable de croître dans le produit testé. De plus, leur potentiel en tant que bactéries PGPR se manifeste par une germination plus rapide des graines de lentilles et une augmentation significative du taux de croissance des plantules.

Nos travaux actuels représentent une phase introductive visant à découvrir une solution biologique grâce à l'utilisation de ces souches bactériennes cultivées dans le produit testé.

À partir de ces résultats préliminaires, et pour parvenir à notre produit final, des recherches supplémentaires s'imposent :

- Répéter les mêmes expériences précédentes afin de confirmer et valider les résultats obtenus dans cette étude.
- Tester les effets sur d'autres graines de diverses cultures telles que le blé, les plantes fourragères et d'autres légumineuses.
- Nous envisageons de mener des études plus prolongées, tant en serre qu'en plein champ, pour valider les résultats observée, en milieu naturel, accompagnées d'analyses de sol, afin de confirmer l'efficacité de notre biofertilisant.

Références bibliographiques

- Adedayo A.A., Babalola O.O., Prigent-Combaret C., Cruz C., Stefan M., Kutu F. and Glick B.R. (2022). The application of plant growth-promoting rhizobacteria in *Solanum lycopersicum* production in the agricultural system : a review *PeerJ*[enligne].10.7717/peerj.13405.
- Adedeji A.A., Häggblom M.M. and Babalola O.O. (2020). Sustainable agriculture in Africa : Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) to the rescue. *Scientific African* [en ligne]. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00492>
- Ahamad A. et Kumar J. (2023). Pesticides pyréthriinoïdes : un aperçu de la classification, de l'évaluation toxicologique et de la surveillance. *Journal des progrès des matières dangereuses*, 100284.
- Anderson S. E. and Meade B. J. (2014). Potential health effects associated with dermal exposure to occupational chemicals. *Environmental Health Insights*, p : 51-62. <https://doi.org/10.4137/EHI.S15258>.
- Arora N.K., Tewari S., Singh S., Lal N. et Maheshwari D.K. (2011). PGPR pour la Protection Sanitaire des Végétaux en Conditions Salines. *Bactéries en agrobiologie : gestion du stress*, p : 239-258. 10.1007/978-3-642-23465-1_12
- ASFERTRADE (2022). *Catalogue de produits ASFERTRADE*. Récupéré de asfertrade-dz.com.
- Atieno M., Herrmann L., Nguyen H.T., Phan H.T., Nguyen N.K., Srean P. et Lesueur D. (2020). Évaluation de l'utilisation des biofertilisants pour une agriculture durable dans la région du Grand Mékong. *Journal de gestion environnementale*, 275(111300). 10.1016/j.jenvman.2020.111300
- Bafoev A.X., Rajabboev A.I., Niyozov SA., Bakhshilloev NK. et Mahmudov R.A (2022). Importance et classification des engrais minéraux. *Journal d'ingénierie et de technologie du Texas*, 5, p : 1-5.
- Beard J.D., Umbach D.M., Hoppin J. A., Richards M., Alavanja M. C. R., Blair A., Sandler D.P. and Kamel F. (2014). Pesticide exposure and depression among male private pesticide applicators in the agricultural health study. *Environmental Health Perspectives*, 122(9), p : 984-991. <https://doi.org/10.1289/ehp.1307450>.
- Beyond Pesticides. (2020). Parkinson's Disease Explodes as Researchers Find Connection to Pesticide Exposure and Genes. *Beyond Pesticides Daily News Blog*. (Consulté le 10/05/2024). <https://beyondpesticides.org/dailynewsblog/2020/11/pesticide-exposure-increases-the-risk-of-developing-gene-specific-and-sporadic-parkinsons-disease-incidences>.
- Bhardwaj AK., Geeta A., Raj K., Lamy H., Hadi P.A., Poonam J., Prem L.K. and Gyanendra P.S. (2022). Switching to nanonutrients for sustaining agroecosystems and environment : the challenges and benefits in moving up from ionic to particle feeding 20:19. <https://doi.org/10.1186/s12951-021-01177-9>
- Bhardwaj D., Ansari M.W, Sahoo R.K. et Tuteja N. (2014). Les biofertilisants jouent un rôle clé dans l'agriculture durable en améliorant la fertilité des sols, la tolérance des plantes et la productivité des cultures. *Fait sur les cellules microbiennes*, 13 (66). <https://doi.org/10.1186/1475-2859-13-66>
- Bhattacharyya P.N. and Jha D.K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) : emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(4), p : 1327-1350.
- Cassán F., Vanderleyden J. and Spaepen S. (2013). Physiological and Agronomical Aspects of Phytohormone Production by Model Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) Belonging to the Genus *Azospirillum*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 33(2), p : 440-459. 10.1007/s00344-013-9362-4
- Centres de contrôle et de prévention des maladies (CDC). (2022). Sujets NIOSH : expositions cutanées et effets. (Consulté le 09/05/2024). <https://www.cdc.gov/niosh/topics/skin/default.html>
- Chaudhary P., Singh S., Chaudhary A., Sharma A. and Kumar, G. (2022). An Overview of Biofertilizers in Plant Production and Stress Management for Sustainable Agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 13 (930340). <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.930340>
- Damalas C.A., and Eleftherohorinos I. G. (2011). Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(5), p : 1402-1419. <https://doi.org/10.3390/ijerph8051402>

- De Andrade L. A., Santos C.H.B., Frezarin E. T., Sales L. R. and Rigobelo E. C. (2023). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria for Sustainable Agricultural Production. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11041088>
- Dennis L.K., Lynch C.F., Sandler D.P. and Alavanja M.C.R. (2010). Pesticide use and cutaneous melanoma in pesticide applicators in the agricultural health study. *Environmental Health Perspectives*, 118(6), p : 812-817. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901518>.
- Dessureault-Romppe J. (2022). Restoring Soil Functions and Agroecosystem Services Through Phytotechnologies. *Front. Soil Science*, 2(927148). doi: 10.3389/fsoil.2022.927148
- Dos Santos RM., Diaz PAE., Lobo LLB and Rigobelo EC. (2020). Use of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria in Maize and Sugarcane: Characteristics and Applications. *Front. Sustain. Food Syst.* 4(136). 10.3389/fsufs.2020.00136
- Evelin H., Kapoor R. and Giri, B. (2009). Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: a review. *Annals of Botany*, 104(7), p : 1263-1280.
- Fageria N.K., Filho M.P.B., Moreira A. and Guimarães C.M. (2009). Foliar Fertilization of Crop Plants. *J. Plant Nutr.* 32, p : 1044-1064
- FAO (2003). Les engrais et leur application : précis à l'usage des agents de vulgarisation agricole.
- Fareed M., Kesavachandran C.N., Pathak, M.K., Bihari V., Kuddus M. and Srivastava A.K. (2012). Visual disturbances with cholinesterase depletion due to exposure of agricultural pesticides among farm workers. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 94(8), p : 1601-1609. <https://doi.org/10.1080/02772248.2012.718780>.
- Faria N.M.X., Facchini L.A., Fassa A.G. and Tomasi E. (2005). Pesticides and respiratory symptoms among farmers. *Revista de Saúde Pública*, 39(6), p : 973-981. <https://doi.org/10.1590/S0034-89102005000600016>.
- Ma Y., Oliveira R.S., Freitas H. and Zhang C. (2016). Biochemical and Molecular Mechanisms of Plant Microbe-Metal Interactions : Relevance for Phytoremediation. *Frontiers in Plant Science* [en ligne], 7 (918). 10.3389/fpls.2016.00918.
- Ma, Y. (2019). Enrobage des semences avec des micro-organismes bénéfiques pour l'agriculture de précision. *Progrès de la biotechnologie*. 10.1016/j.biotechadv.2019.107423.
- Fishel F.M. and Ferrell J.A. (2013). Managing pesticide drift. Agronomy department.PI232 University of Florida, Gainesville, FL, USA. (Consulté le 26/04/2024). <http://edis.ifas.ufl.edu/pi232>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome and International Water Management (2018). More People, More Food, Worse Water ? A Global Review of Water Pollution from Agriculture. (Consulté le 10/05/2024).
- Gautam K., Sirohi C., Singh N.R., Thakur Y., Jatav S.S., Rana K., Chitara M., Meena R.P., Singh A.K. and Parihar, M. (2021). Microbial biofertilizer : Types, applications, and current challenges for sustainable agricultural production. *Science Direct*, p: 3-19. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821667-5.00014-2>
- Gilden R.C., Huffling K. and Sattler B. (2010). Pesticides and health risks. *Journal of Obstetric, Gynecologic and Neonatal Nursing*, 39(1), p : 103-110. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1552-6909.2009.01092.x>. PMID 20409108
- Gnanaprakasam P.D., et Vanisree A.J. (2022). Impact néfaste récurrent des produits agrochimiques sur l'écosystème et aperçu de l'agriculture biologique comme possible sauvetage. *Science de l'environnement et recherche sur la pollution*, 29 (50), p : 75103-75112.
- Gobat J.M., Aragno M. et Matthey W. (2010). Le sol vivant : Bases de pédologie-Biologie des sols. *Presses polytechniques et universitaires romanes*.
- Goswami D., Thakker J.N. and Dhandhukia P.C. (2016). Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) : A review. *Cogent Food and Agriculture*, 2(1).

- Hakim S., Naqqash T., Nawaz M.S., Laraib I., Siddique M.J., Zia R., Mirza M.S. and Imran A. (2021). Rhizosphere Engineering With Plant Growth-Promoting Microorganisms for Agriculture and Ecological Sustainability. *Front. Sustain. Food Syst.* 5:617157. Doi: 10.3389/fsufs.2021.617157 2.
- Hanke W. and Jurewicz J. (2004). The risk of adverse reproductive and developmental disorders due to occupational pesticide exposure: an overview of current epidemiological evidence. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 17(2), p : 223-243.
- Hayden K.M., Norton M.C., Darcey D., Ostbye T., Zandi P.P., Breitner J. C.S., Welsh-Bohmer K.A. and For the Cache County Study Investigators. (2010). Occupational exposure to pesticides increases the risk of incident AD: The cache county study. *Neurology*, 74(19), p:1524-1530. <https://doi.org/10.1212/WNL.0b013e3181dd4423>.
- Hazra G. (2016). Différents types d'engrais écologiques : un aperçu. *Durabilité dans l'environnement* , 1 (1), p:54-70.
- Hinsinger P., Bengough A.G, Vetterlein D. et Young I.M. (2009). Rhizosphère : biophysique, biogéochimie et pertinence écologique. *Plante et sol*, 321(1-2), p : 117-152. 10.1007/s11104-008-9885-9
- Hinsinger P., Bengough A.G., Vetterlein D. et Young I.M. (2009). Rhizosphère : biophysique, biogéochimie et pertinence écologique. *Plante et sol* [en ligne], 321(1), p : 117-152. 10.1007/s11104-008-9885-9.
- INSERM (2013). Pesticides : Effets sur la santé. Paris : *Inserm*. p : 1001. - (expertise collective).
- Iqbal S., Riaz U., Murtaza G., Jamil M., Ahmed M., Hussain A. et Abbas Z. (2021). Engrais chimiques, formulation et leur influence sur la santé des sols. *Microbiote et biofertilisants : un continuum durable pour la santé des plantes et des sols*, p : 1-15.
- Islam F., Yasmeen T., Ali Q., Ali S., Arif M.S., Hussain S. and Rizvi H. (2014). Influence of *Pseudomonas aeruginosa* as PGPR on oxidative stress tolerance in wheat under Zn stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, p : 285-293. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.03.008>
- Jiao X., Takishita Y., Zhou G. and Smith D.L. (2021). Plant Associated Rhizobacteria for Biocontrol and Plant Growth Enhancement. *Front. Plant Sci.* 12 (634796).doi: 10.3389/fpls.2021.634796
- Kalia A., Sharma S.P., Kaur S. et Kaur H. (2020). Inoculants bactériens : comment ces microbes peuvent-ils maintenir la santé des sols et la productivité des cultures ?. dans: B. Giri et A. Varma (Éds.). *Soil Health*. Springer. p: 337-373. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_18
- Kaur R., Mavi G.K., Raghav S. et Khan I. (2019). Classification des pesticides et son impact sur l'environnement. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 8 (3), p : 1889-1897.
- Kavamura V.N., Santos S.N., Silva J.L., Parma M.M., Ávila L.A., Visconti A. and Melo I.S. (2013). Screening of Brazilian cacti rhizobacteria for plant hormone production and seed germination promotion. *Bioscience Journal*, 29(2), p : 343-355. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micres.2012.12.002>
- Keddal H. et N'dri J.Y. (2008). Impacts de l'intensification agricole sur la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines. *Revue HTE*, 138, p : 13-28.
- Khatoon Z., Huang S., Rafique M., Fakhar A., Kamran M.A et Santoyo G. (2020). Libérer le potentiel des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes sur la santé des sols et la durabilité des systèmes agricoles. *Journal de gestion environnementale*, 273 (111118). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111118>
- Khatoon Z., Huang S., Rafique M., Fakhar A., Kamran M.A. and Santoyo G. (2020). Unlocking the potential of plant growth-promoting rhizobacteria on soil health and the sustainability of agricultural systems. *Journal of Environmental Management*, 273 (111118). 10.1016/j.jenvman.2020.111118
- Kirkhorn S.R. et Garry V.F. (2000). Agricultural lung diseases. *Environmental Health Perspectives*, 108(4), p : 705-712.
- Langley R.L. (2011). Consequences of respiratory exposures in the farm environment. *North Carolina Medical Journal*, 72(6), p : 477-480. <http://dx.doi.org/10.18043/ncm.72.6.477>

- Mahanty T., Bhattacharjee S., Goswami M., Bhattacharyya P., Das B., Ghosh A., and Tribedi P. (2017). Biofertilizers : a potential approach for sustainable agriculture development. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(4), p : 3315-3335.
- Mallem L., Loukil B. et Boulakoud M. (2015). L'effet des engrais sur la santé des travailleurs dans le milieu professionnel. *Ecophysiologie et Toxicologie*, 3 (1), p : 16-21.
- Masson A.S et Simonin M. (2022). Le microbiote des plantes, de son rôle dans la survie végétale à son ingénierie pour une agriculture durable. *Planète-Vie*.<https://planet-vie.ens.fr/thematiques/microbiologie/le-microbiote-des-plantes-de-son-role-dans-la-survie-vegetale-a-son>
- McNear Jr., D.H. (2013). The Rhizosphere – Roots, Soil and Everything In Between. *Nature Education Knowledge*, 4(3).
- Meenakshi M., Sharon Prabhakar S.P., Bhawana Mittal B.M., Anita Sharma A.S. et Gothecha V.K. (2012).short review on how pesticides affect human health. *International Journal of Ayurvedic and Herbal Medicine*,2(05).
- Mohite B. (2013). Isolement et caractérisation des bactéries produisant de l'acide indole acétique (IAA) à partir du sol rhizosphérique et son effet sur la croissance des plantes. *Journal des sciences du sol et de la nutrition des plantes*, 13(3) . <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000051>
- Morgan J.A.W., Bending G.D. and White P. J. (2005). Biological costs and benefits to plant-microbe interactions in the rhizosphere. *Journal of Experimental Botany* [en ligne], 56(417), p : 1729-1739. 10.1093/jxb/eri205.
- Naylor D. and Coleman-Derr D. (2018). Drought stress and root-associated bacterial communities. *Frontiers in Plant Science*, 8 (2223). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02223>
- Odoh C.K. (2017). Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) : A Bioprotectant bioinoculant for Sustainable Agrobiolgy. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, 4(5),p : 123-142. 10.22192/ijarbs
- Owen A.G., and Jones D.L. (2001). Competition for amino acids between wheat roots and rhizosphere microorganisms and the role of amino acids in plant N acquisition. *Soil Biol. Biochem.* 33, p : 651–657.
- Pellegrini M., Pagnani G., Bernardi M., Mattedi A., Spera D.M. and Del Gallo M. (2020). Cell-Free Supernatants of Plant Growth-Promoting Bacteria : A Review of Their Use as Biostimulant and Microbial Biocontrol Agents in Sustainable Agriculture [en ligne], 12(9917). <https://doi.org/10.3390/su12239917>
- Population Reference Bureau (PRB). (2023). *World Population Data Sheet Booklet*. <https://2023-wpds.prb.org/wp-content/uploads/2023/12/2023-World-Population-Data-Sheet-Booklet.pdf>
- Prashar P. et Shah S. (2016). Impact des engrais et des pesticides sur la microflore du sol en agriculture. *Examens de l'agriculture durable*, p : 331-361.
- Pravin V., Rosazlin A., Tumirah K., Salmah I. and Amru N.B. (2016). Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Agricultural Sustainability—A Review. *Molecules*, 21(5). 10.3390/molecules21050573
- Rai S., Mago Y., Aggarwal G., Yadav A. et Tewari S. (2023). Bioformulation liquide : une approche tendance vers une agriculture durable. *Biotechnologie moléculaire*, p : 1-26.
- Rifat H., Safdar A., Ummay A., Rabia k. et Iftikhar A. (2010). Bactéries bénéfiques pour le sol et leur rôle dans la promotion de la croissance des plantes : une revue. *Annales de microbiologie*, 60(4), p : 579-598. 10.1007/s13213-010-0117-1
- Saeed Q., Xiukang W., Haider F.U., Kucerik J., Mumtaz MZ., Holatko J., Naseem M., Kintl A., Ejaz M., Naveed M, et al., (2021). Les bactéries de la rhizosphère dans la promotion de la croissance des plantes, la lutte biologique et la bioremédiation des sites contaminés : une revue complète des effets et des mécanismes. *International Journal of Molecular Sciences*, 22 (10529). <https://doi.org/10.3390/ijms221910529>

- Sanchez E., Muñoz E., AnchondoÁ., Ruiz J.M. and Romero L.(2009). Nitrogen impact on nutritional status of Phosphorus and its main bioindicator: response in the roots and leaves of green be an plants. *RevistaChapingo. Seriehorticultura*, 15(2), p : 177-182.
- Santi C., Bogusz D. and Franche C. (2013). Biological nitrogen fixation in non-legume plants. *Annals of botany*, 111(5), p : 743-767.
- Savci S. (2012). Enquête sur l'effet des engrais chimiques sur l'environnement. *ApcbeeProcedia* ,1, p : 287-292.
- Scholz N.L., Fleishman E., Brown L., Werner I., Johnson M.L., Brooks M.L., Mitchelmore C.L. andSchlenk D. (2012). A perspective on modern pesticides, pelagic fish declines, and unknown ecological resilience in highly managed ecosystems. *BioScience*, 62(4), p : 428-434. <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.4.13>
- Sharma A. et Chetani R. (2017). Une revue de l'effet des engrais organiques et chimiques sur les plantes. *Int. J. Rés. Appl. Sci. Ing. Technol*, 5 , p : 677-680.
- Sharma N. et Singhvi R. (2017). Effets des engrais chimiques et des pesticides sur la santé humaine et l'environnement : une revue. *Revue internationale sur l'agriculture, l'environnement et la biotechnologie*, 10 (6), p : 675-680.
- Sharma S.B., Sayyed R.Z., Trivedi, M.H., and Gobi T.A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *Springer Plus*, 2(1), p : 1-14.
- Sivasakthi S., Usharani G. and Saranraj P. (2014). Biocontrol potentiality of plant growth promoting bacteria (PGPR) – *Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus subtilis* : A review. *African Journal of Agricultural Research*, 9(16), 1265-1277. DOI: 10.5897/AJAR2013.7914.
- Sreethu S., Chhabra V., Kaur G. and Ali B. (2023). Biofertilizers as a Greener Alternative for Increasing Soil Fertility and Improving Food Security Under Climate Change Condition. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*.
- Srivastava P., BalharaM.AndGiri B. (2020). Soil Health in India : Past History and Future Perspective. In :Giri B., Varma A. Soil Health. *SoilBiology*. Springer, Cham. India. p : 1-19.
- Suhag, M. (2016). Potentiel des biofertilisants pour remplacer les engrais chimiques. *Revue internationale de recherche avancée en science, ingénierie et technologie*, 3(5), p : 163-167. <https://doi.org/10.17148/IARJSET.2016.3534>
- Sundaram, S.P. (1999). Formuler et produire des biofertilisants. *Biotechnologie des champignons pour laproduction de biofertilisants*, p : 395-411.
- Swarnalakshmi K., Yadav V., Tyagi D., Dhar D.W., Kannepalli A. and Kumar S. (2020). Significance of Plant Growth PromotingRhizobacteria in Grain Legumes : Growth Promotion and Crop Production. *Plants* ,9(11).10.3390/plants9111596.
- Thany S.H., Reynier P. and Lenaers G. (2013). Neurotoxicité des pesticides-Quel impact sur les maladies neurodégénératives?. *Médecine/sciences*, 29(3), p : 273-278.
- Thapar A., Zalawadia A., Pokharkar O.V. et Satam S.S. (2016). Classification des pesticides et ses effets néfastes : une revue. *Biovie*, 4 (1),p : 13-24.
- Wang H., Liu R., You M.P., Barbetti M.J. and Chen Y. (2021). Pathogen Biocontrol Using Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPR) : Role of Bacterial Diversity. *Microorganisms*, 9(1988).<https://doi.org/10.3390/microorganisms9091988>
- Yadav I. C. and Devi N. L. (2017). Pesticides classification and its impact on human and environment. *Environmental science and engineering*, 6, p : 140-158.
- Zacharia J.T. (2011). Identité, propriétés physiques et chimiques des pesticides. *Les pesticides dans le monde moderne : Tendances en matière d'analyse des pesticides*, p : 1-8.
- Zažímalová E., Křeček P., Skůpa P., Hoyerova K. et Petrášek, J. (2007). Transport polaire de l'hormone végétale auxine – rôle des protéines PIN-FORMED (PIN). *Sciences de la vie cellulaire et moléculaire* , p : 1621-1637.

Annexes

Composition de milieu de culture

Facteurs de croissance

Glucose

Agar

Eau distillée

pH entre 5-11

Composition de milieu de fermentation

Source de carbone

Source d'azote

Sels minéraux

Facteurs de croissance

Eau distillée

pH entre 5-11

Composition de la solution Tryptophane entre 50 - 200 mg/L

Tryptophane entre 0,05 - 0,2 g

Eau distillée QSP 1000 mL

Année universitaire : 2023-2024	Présenté par : MERMOUL Boutheyna BELIHAM Souad
Étude de l'effet des bactéries sur la croissance de <i>Lens culinaris</i>	
Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Microbiologie Appliquée	
<p>Résumé</p> <p>Les bactéries favorisant la croissance des plantes par la production des auxines, sont des bactéries rhizosphériques utilisées en agriculture biologique comme une alternative écologique aux produits phytosanitaires. Dans ce travail nous avons testé le pouvoir de deux souches bactériennes à croître dans un substrat constitué majoritairement d'un produit réputé polluant des écosystèmes naturel. Dans un premier temps, une étude morphologique détaillée a été réalisée confirmant l'appartenance des deux souches à un groupe bactérien très liée à la biotechnologie verte. Dans un deuxième temps, une recherche a été menée sur l'effet des souches sur la germination des graines de la légumineuse <i>Lens culinaris</i>, et sur la croissance de leurs plantules. Trois substrats de culture différents, à base du produit testé, ont été expérimentés en présence et en absence de tryptophane. Les résultats suggèrent que les deux souches bactériennes exercent un effet bénéfique sur l'accélération de la germination des graines et le pourcentage de croissance des plantules avec une bonne croissance des parties aériennes et racinaires. Les meilleurs résultats ont été enregistrés avec la souche 1 qui a montré un effet sur l'accélération de la germination des graines, et avec la souche 2 qui a dévoilé un effet significative sur la croissance des plantules de lentille <i>Lens culinaris</i>.</p>	
<p>Mots clés : Auxines, produits phytosanitaires, PGPR, <i>Lens culinaris</i>.</p>	
<p>Laboratoires de recherche : laboratoire de Génie Microbiologique et Applications Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie (Université Constantine 1 Frères Mentouri).</p>	
<p>Président du jury : Mr BENHIZIA Yacine (Pr - UFM, Constantine 1). Encadrant : Mme OULMI Lamia (Dr - UFM, Constantine 1) Examineur : Mr KITOUNI Mahmoud (Pr - UFM, Constantine 1).</p>	