



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 الشهيد حمدة لخضر الوادي

Université d'Echahid Hamma Lakdhar- EL OUED-

كلية العلوم الطبيعية والحياة

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

قسم البيولوجيا الخلوية والجزيئية

Département de Biologie Cellulaire et Moléculaire

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en Sciences biologiques

Spécialité : Biochimie

THEME

Influence des pratiques agricoles durables sur la « vie microbienne de sol »

Présenté Par :

M^{elle} : DJABALLAH IKRAM

M^{elle} : REBIA HANA

M^{elle} : MAOUCH NADJIA

M^{elle} : BOUTERA SIRINE

Devant le jury:

Président	LANEZ Elhafnaoui	MCA	Université d'El Oued.
Examineur	ZAATER Abdelmalek	MCA	Université d'El Oued.
Promoteur	ALLALI Ahmed	MCA	Université d'El Oued.

Année universitaire: 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Au nom d'Allah, le Miséricordieux, le Compatissant

Louange à Dieu, par la grâce duquel toutes les bonnes actions sont accomplies, et que la paix et les bénédictions soient sur le plus honorable des prophètes et messagers, notre Seigneur Muhammad, ainsi que sur sa famille et ses compagnons.

J'adresse mes remerciements et ma gratitude à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, j'adresse mes sincères remerciements et ma gratitude à mon professeur superviseur [ALLALI AHMED], pour ses précieux conseils, son soutien continu et sa grande patience. Son soutien scientifique a joué un rôle déterminant pour surmonter les difficultés et atteindre ce stade.

J'aimerais également exprimer ma profonde gratitude aux membres du comité de discussion [noms des membres du comité] pour leurs commentaires constructifs et leurs conseils qui ont contribué à améliorer la qualité de cette thèse.

Je tiens à remercier tous les professeurs et collègues de l'Université Chahid Hamma Lakhdar de Oued [Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département de Biologie] pour le soutien et les encouragements qu'ils m'ont apportés tout au long de la période d'étude.

Je n'oublie pas d'exprimer ma gratitude à ma famille et à mes amis, qui ont toujours été mon principal soutien dans toutes les étapes que j'ai franchies. A mes parents, merci pour tout, sans vous je ne serais pas là où je suis aujourd'hui.

En conclusion, je voudrais remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce travail, en demandant à Dieu Tout-Puissant de vous récompenser de la meilleure façon qui soit, et de faire en sorte que ce travail soit purement pour Sa face honorable et profite à tout le monde.

Que la paix, la miséricorde et les bénédictions d'Allah soient sur vous.

Les étudiantes:

DJABALLAH, MAOUCHE, REBIE, BOUTERA

Dédicace

الى خالق الروح والقلم وبارئ الذر والنسم وخالق كل شي من العدم الى من بلغ الرسالة وادى
الامانة .. ونصح الامة.. الى نبي الرحمة ونور العالمين الى السادة الاطهار وعروته
الوتقي.. اهل بيت النبوة

الى مراد قلبي والاقرب لي من نفسي المغيب عن الابصار والكامن بعين البصيرة الى بقية الله
الاعظم ... صاحب العصر والزمان (عجل الله تعالى فرجه)

الى ركني العظيم في الحياة الى من كلفه الله بالهبة والوقار الى من احمل اسمه بكل فخر الى
ذلك الرجل العظيم الذي بذل كل ما بوسعه مأمني الوحيد وفرحتي الدائمة (والدي الحبيب) متعه
الله بالصحة والعافية

الى نبراس ايامي ووهج حياتي الى معنى الحب والى معنى الحنان الى بسمة الحياة وسر
الوجود الى من كان دعائها سر نجاحي وحناتها بلسم جراحي داعمي الاول ووجهتي التي
استمد منها القوة (والدتي الحبيبة)

الى الاعمدة الثابتة في الحياة ، الداعمين الساندين ارضي الصلبة وجداري المتين ، الى من مدت
اياديهم في اوقات الضعف ويؤمنوا بشجاعتي مهما ضعفت وارتخيت واقفين خلفي الى من شد
الله بهم عضدي فكانوا خير معين (خواني واخواتي)

الحمد لله حبا وشكرا وامتنانا على البدء والختام لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي لها ان تكون
، لم يكن الحلم قريبا ولا الطريق كان محفوف بالتسهيلات لكنني
فعلتها

(وآخر دعواهم ان الحمد لله رب العالمين)

كـ ناجية

Dédicace

قال تعالى: (قل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنين)

الهي لا يطيب الليل الا بشكرك ولا يطيب النهار الا بطاعتك

ولا تطيب اللحظات الا بذكرك..

ولا تطيب الاخرة الا بعفوك..

ولا تطيب الجنة الا برويتك.. الله جل جلاله.

الى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة ونصح الأمة نبي الرحمة ونور للعالمين "سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم"

الحمد لله حبا وشكرا وامتنانا على البدء والختام بعد تعب ومشقة لسنوات في سبيل الحلم والعلم حملت في طياتها أمنيات الليالي وأصبح عنائي اليوم للعين قرة ها أنا اليوم اقف على عتبة تخرجني أقطف ثمار تعبى وارفع قبعتي بكل فخر فالحمد لك الحمد والرضا

وبكل حب اهدي ثمرة نجاحي وتخرجني لنفسي الطموحة اولا على الصبر والعزيمة والاصرار

الى نبراس أيامي ووهج حياتي الى معنى الحب والحنان والتفاني الى بسمه الحياة وسر الوجود الى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي داعمي الاول ووجهتي التي استمد منها القوة "والدتي الحبيبة" متعها الله بالصحة والعافية

الى ركني العظيم في الحياة الى من كلله الله بالهبة والوقار الى من احمل اسمه بكل فخر الى ذلك الرجل العظيم الذي بذل كل ما بوسعه مأمني الوحيد وفرحتي الدائمة "والدي الحبيب" متعه الله بالصحة والعافية

الى ضلعي الثابت الذي لا يميل الى من رزقت بهم سندي وملاذي الاول والاخير "اختي رفيقة روحي نضال" وأخوتي الابطال الهادي واعماره حقق الله أمانيتكم

الى جدتي فاطمة حفظها الله والى الارواح الطاهرة اجدادي وخاصة جدتي عائشة سوفيه التي وهبتني اسمي نور حياتي , والى عمي مبروك وعائلته وخاصة ابنته رفيقة دربي وصديقة طفولتي ايمان، والى خالاتي الاغلى على قلبي امال والعطرة، والى اخوالي الاعزاء محمد توفيق وفتحي

وأیضا ووفاء وتقديرا واعترافا مني بالجميل أقدم بجزيل الشكر للأستاذ الفاضل علالي احمد الذي لم يألوا جهدا في مساعدتنا في مجال البحث العلمي وجزاه الله كل خير وايضا الى زميلاتي وفقهم الله

بكم اكرام

Dédicace

"أهدي ثمرة جهدي هذا إلى من كانوا نورا في طريق العلم والمعرفة، إلى من
سندوني بدعواتهم ومحبتهم لأصل إلى هذا اليوم.

أهديه إلى أبي الغالي قرّة عيني ومصدر فخري، إلى من حمل همي وسهر ليالي
العمر من أجل راحتي،

وإلى روح أمي الطاهرة رحمها الله ، التي فارقتنا جسداً وبقيت روحاً ، إلى أغلى
الناس في الوجود.

إلى زوجي العزيز شريك دربي وسندي

والي ابني الغالي احمد لقمان

، إلى إخوتي :عبدالقادر وعبدالحي وآدم وابوبكر وأخواتي: فاطمة وحواء
وشيماء

إلى أجدادي وجداتي،

والي ام واب زوجي

وإلى عماتي وخاصة قايسة وأعمامي، إلى خالاتي وأخوالي، إلى زوجة أبي
الكريمة

لكم جميعاً أهدي هذا النجاح، راجية من الله أن أكون قد حققت آمالكم وبررت
تضحياتكم

هنا

Dédicace

أحمد الله عز وجل على منه وعونه لإنجاز هذا البحث.
إلى الذي وهبني كل ما يملك حتى أحقق له آمالي، إلى من كان يدفعني قدما نحو الأمام لنيل المبتغى، إلى الإنسان الذي إمتلك الإنسانية بكل قوة، إلى الذي سهّل على تعليمي بنضحيات جسام مترجمة في تقديسه للعلم، إلى مدرستي الأولى في الحياة، أبي الغالي على قلبي أطل الله في عمري؛
إلى التي وهبت فلذة كبدها كل العطاء والحنان، إلى التي صبرت على كل شيء، التي رعتني حق الرعاية وكانت سندي في الشدائد، وكانت دعواها لي بالنوفيق، تنبئني خطوة خطوة في عملي، إلى من إرحت كلما تذكرت إنسانتها في وجهي نبع الحنان أمي أعز ملاك على القلب والعين جزاها الله عني خير الجزاء في الدارين؛ إليهما أهدي هذا العمل المنوَّض لكلي أدخل على قلبهما شيئا من السعادة إلى أختي وأخوتي الذين تقاسموا معي عب الحياة؛ "أحمد عرفات، ماريّة، شعيب، يوسف، ميار».

إلى رفيق الدرب، وصديق الأيام جميعا خلّوها ومنها: زوجي الغالي عبد الرؤوف بوزيدي، أهديك هذا البحث تعبيراً عن شكري لدعمك المستمر لي.

أهدي ثمرة جهدي لأستاذي الكريم الدكتور: علالي الذي كلما تطلعت الطريق أمانا لجأنا إليه فأناورها لنا وكلما دب اليأس في أنفسنا زرع فينا الأمل لنسير قدما وكلما سألنا عن معرفتنا زودنا بها وكلما طلبنا كمية من وقته الثمين وفرة بالغر من مسق ولياته المتعددة؛ إلى كل أساتذة قسم العلوم الطبيعية والحياة؛ إلى من مكنت أياهم في أوقات الضعف، غير راضين باستكاثني أهدي هذا البحث، إليكم يا أصدقائي "جنوى، إكرام، هناء" الداعمين في أحلك الظروف أهدي لحظة فرحي. وإلى كل من يؤمن بأن بذور نجاح التغيير هي في ذواتنا وفي أنفسنا قبل أن تكون في أشياء أخرى

قال الله تعالى: "إن الله لا يغير ما بقوم حتى يغيروا ما بأنفسهم..." «آية 11 من سورة الرعد إلى كل هؤلاء. أهدي هذا العمل

سيزين

Résumé

Résumé

Le but de cette étude est de restaurer les sols dégradés et de réactiver leur vitalité biologique, en se concentrant sur la composition des sols en phases solides, liquides et gazeuses, ainsi que sur leurs propriétés physiques comme la texture et la structure organique. Elle aborde également la science de la biologie du sol, en décrivant les différents organismes vivants (animaux et végétaux), avec un accent particulier sur les bactéries et les champignons qui jouent un rôle crucial dans les cycles géochimiques et la fertilité des sols.

L'importance des micro-organismes pour l'agriculture durable est soulignée, en particulier leurs potentiels pour inciter les agriculteurs à mieux exploiter les sols, réduire les intrants chimiques et introduire des souches microbiennes bénéfiques via les fertilisants biologiques.

Pour atteindre cet objectif, une étude expérimentale a été menée pour comparer l'effet des amendements organiques et des engrais chimiques sur la biomasse microbienne et la qualité biologique d'un sol dégradé en Algérie. Différents traitements (charbon actif, acides, sels, etc.) ont été appliqués à des seaux de sol cultivés en blé. Des analyses microbiologiques ont été réalisées par comptage sur milieux de culture.

Mots-clés : sol, micro-organismes (bactérie, champignons) PMG, PH, Conductivité.

Abstract

The aim of this study is to restore degraded soils and reactivate their biological vitality, focusing on the composition of soils in solid, liquid and gaseous phases, as well as their physical properties such as texture and organic structure. It also addresses soil biology, describing the different living organisms (animals and plants), with a particular emphasis on bacteria and fungi that play a crucial role in geochemical cycles and soil fertility.

The importance of microorganisms for sustainable agriculture is emphasized, particularly their potential to encourage farmers to better exploit soils, reduce chemical inputs, and introduce beneficial microbial strains through biological fertilizers.

To achieve this goal, an experimental study was conducted to compare the effect of organic amendments and chemical fertilizers on microbial biomass and the biological quality of a degraded soil in Algeria. Different treatments (activated carbon, acids, salts, etc.) were applied to buckets of soil cultivated with wheat. Microbiological analyses were carried out by counting on culture media.

Keywords : soil, micro-organisms (bacteria, fungi) PMG, PH, Conductivity.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو إصلاح التربة المتدهورة وإعادة تنشيط حيويتها البيولوجية، حيث تركز على تركيب التربة من مراحل صلبة وسائلة وغازية، فضلاً عن خصائصها الفيزيائية مثل القوام والبنية العضوية. كما تتناول علم أحياء التربة، واصفةً الكائنات الحية المختلفة (الحيوانات والنباتات) مع التركيز بشكل خاص على البكتيريا والفطريات التي تلعب دوراً حاسماً في الدورات الجيوكيميائية وخصوبة التربة.

ويتم التأكيد على أهمية الكائنات الدقيقة للزراعة المستدامة، لا سيما إمكاناتها في تحفيز المزارعين لاستغلال التربة بشكل أفضل، وتقليل المدخلات الكيميائية، وإدخال سلالات ميكروبية مفيدة من خلال الأسمدة الحيوية.

لتحقيق هذا الهدف، تمت دراسة تجريبية لمقارنة تأثير المخصبات العضوية والأسمدة الكيميائية على الكتلة الحيوية الدقيقة وجودة التربة البيولوجية لتربة متدهورة في الجزائر. حيث تم تطبيق معاملات مختلفة (الكربون النشط، الأحماض، الأملاح، إلخ) على دلاء من التربة المزروعة بالقمح. كما أجريت تحاليل أحيائية دقيقة عن طريق العد على أوساط زراعية

الكلمات المفتاحية: التربة، الكائنات الحية الدقيقة (البكتيريا، الفطريات) PH، PMG، الموصلية

Liste des Figures

Chapitre 01: Revue de la littérature

Figure 1.1: Composition volumique idéale du sol.....	4
Figure 1.2 : vue de quelques espèces de pédofaune (Winogradsky 1950)	8
Figure 1.3 : vue de quelques espèces de pédoflore (Shinde, Sarkar et al. 2019).....	8
Figure 1.4: Relation sol-plantes-microorganismes	12

Chapitre 02: Microorganismes de sol

Figure 2.1 : Cycle du carbone (Mueller, Jensen et al. 1998).....	15
Figure 2.2 : Schéma des agents participants au cycle de l'azote .(Murray, Hart et al. 2009) ...	15
Figure 2.3 : Cycle du phosphore en agriculture(Kaye and Hart 1997).....	17

Chapitre 01: Matériel et méthodes

Figure 3.1: Milieu des échantillons	28
Figure 3.2: Charbon Actif.....	29
Figure 3.3: PEG 4000	30
Figure 3.4: sorbate de potassium	31
Figure 3.5: Gomme Guar.....	32
Figure 3.6: gomme arabica	32
Figure 3.7 :EDTA.....	33
Figure 3.8: Benzoate de sodium.....	34
Figure 3.9 :Tri éthanolamine	35
Figure 3.10 : Gomme xanthone	36
Figure 3.11 : HEC.....	37
Figure 3.12 : Acide citrique.....	37
Figure 3.13 :Acide Salicylique	38
Figure 3.14 : appareil de L'eau magnétique.....	39
Figure 3.15 : Acide sulfurique	40
Figure 3.16 : Acide lactique	41
Figure 3.17 : preparation des matériaux utilisés.....	41
Figure 3.18 : boîtes stériles pour prélever des échantillons.....	42
Figure 3.19: milieu gélose nutritive.....	43
Figure 3.20 : preparation de milieu de gelose pda.....	44
Figure 3.21 : milieu de gelose pda.....	44
Figure 3.22 :dilution de solution.....	45
Figure 3.23 : Protocole utilise pour la coloration de GRAM	48

Chapitre 02 : Résultat et discussion

Figure 4.1 :Nombre de colonies	50
Figure 4.2 :Résultat de coloration de Gram.....	51
Figure 4.3 : variations de PH.....	53
Figure 4.4 : Conductivité de matériaux	54
Figure 4.5 :Nombre de perles	55

Liste des tableaux

Chapitre 01: Revue de la littérature

Tableau 1.1 : classification texturale des sols.....	5
--	---

Chapitre 01: Matériel et méthodes

Tableau 3.1: Billon traitement du sol	28
---	----

Chapitre 02 : Résultat et discussion

Tableau 4.1: Résultat de colonies fongiques	51
---	----

Liste des abréviations

PDA	Potato Dextrose Agar
EDTA	L'acide éthylène diamine tetra acétique
PEG4000	Poly éthylène glycol
PMG	Point de mille graines
PH	Potentiel hydrogène
HEC	Hydroxyethyl cellulose

Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Liste des Figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Sommaire.....	
Introduction générale	1

Première Partie synthèse bibliographique

Chapitre 01: Revue de la littérature

1.Définition du sol :.....	4
1.1 Composition du sol :	4
2. La microbiologie des sols : un champ prometteur pour l'agroécologie :	7
2.1 Organismes vivants du sol :	7
2.1.1 Faune du sol :	7
2.1.1.1 La microfaune (<0,2mm) :	7
2.1.1.2 La mésofaune (0,2-4mm):	7
2.1.1.3 La macrofaune (>4mm) :	8
2.2 Les bactéries :	8
2.2.1 Classification en groupes physiologiques :	9
2.2.1.1 Cycle de l'azote.....	9
2.2.1.2 Cycle du carbone	9
2.2.1.3 Cycle du soufre :	10
2.2.1.4 Cycle du fer :	10
2.2.2 Les champignons:.....	10
2.3 Rôles des microorganismes dans le sol et importance de leur étude :	10
2.4 Apports de la microbiologie pour une agriculture durable :	12
2.4.1 Une composition variable du microbiote :	12
2.4.2 Une association durable :	13
2.5 Quelques thématiques porteuses à explorer pour une meilleure utilisation.....	13
2.6 des sols pour leur gestion en milieux cultivés ou industriels :	13

Chapitre 02: Microorganismes de sol

1. Les influences des microorganismes sur le cycle du carbone de l'azote et du phosphore dans le sol.....	15
---	----

1.1	Cycle de carbone :.....	15
1.2	Cycle de l'azote :.....	15
1.3	Phosphore.....	16
1.3.1	Description du cycle du phosphore	16
1.4	Influences des microorganismes sur les cycles du carbone, de l'azote et du phosphore:.....	17
1.4.1.1	Prise en charge du C organique dans le cycle biologique du C :.....	17
1.4.1.2	Il existe quatre types de bactéries différentes:	18
1.4.1.3	Il existe trois conditions à la fixation d'azote par les bactéries :	18
1.4.1.4	Pour le phosphore.....	18
2.	L'utilisation des microorganismes du sol pour accroître la productivité agricole : .	19
2.1	Définition les biofertilisants :.....	19
2.2	Espèces de biofertilisants et modes d'action :	19
2.2.1	Fixateurs d'azote :	19
2.2.1.1	Azospirillum :	20
2.2.1.2	Les bactéries symbiotiques telles que Rhizobium, Frankia et Azolla.	20
2.2.2	Solubilisateurs de potassium et de zinc :.....	20
2.2.3	Autres mycorhizes :	21
2.2.4	Consortia microbiens.....	21
2.3	Domaines d'application :	22
2.3.1	Utilisation en horticulture :	22
2.3.2	Utilisation dans les grandes cultures :	22
2.3.3	Utilisation pour la restauration :.....	22
Deuxième Partie expérimentale		
Chapitre 01 : Matériel et méthodes		
1.	L'objectif de l'étude	26
2.	Présentation du cadre de l'étude	26
2.1	Zone.....	26
3.	Matériel du travail.....	27
3.1.	Matériel du laboratoire :.....	27
4.	Méthode :	27
4.1.	Echantillonnage à partir de la ferme :	27
5.	Traitement:.....	28
6.	Matériaux utilisés dans le traitement.....	29
6.1	Charbon actif :	29

6.1.1 La dose utilisée	29
6.2 PEG4000 :	29
6.2.1 La dose utilisée	30
6.3 Sorbate de potassium :	30
6.3.1 La dose utilisée	30
6.4 Gomme Gouar :	31
6.5 Gomme arabica :	32
6.5.1 La dose utilisée	32
6.6 EDTA :	33
6.6.1 la dose utilisée	33
6.7 Benzoate de sodium :	34
6.8 Tri éthanolamine :	34
6.8.1 La dose utilisée	35
6.9 Gomme Xanthone :	35
6.9.1 La dose utilisée	35
6.10 HEC :	36
6.10.1 la dose utilisée	36
6.11 Acide citrique :	37
6.11.1 La dose utilisée	37
6.12 Acide salicylique :	38
6.12.1 La dose utilisée	38
6.13 Eau magnétisée :	38
6.14 Acide sulfurique :	39
6.14.1 La dose utilisée	40
6.15 Acide lactique :	40
6.15.1 la dose utilisée	40
6.16 Témoin	41
7. Préparation du mélange utilisé pour l'étude	41
8. Prélèvements à partir des pots	41
9. Préparation des milieux de culture :	42
9.1 Préparation de milieu gélose nutritive :	42
9.2 Préparation de milieu gélose pda:	43
9.3 Préparation de l'échantillon pour l'analyse	44
9.4 Observation de résultat	46
10. Caractères morphologiques	48

Chapitre 02 : Résultat et discussion

1. Résultat :	50
1.1 Dénombrement sur colonies :	50
1.2 Coloration de gram.....	51
1.3 Dénombrement sur colonies fongiques :	51
1.4 Variations de PH :	53
1.5 Conductivité de matériaux utilisation :	54
1.6 Dénombrement sur perles :	55
2. Discussions :	56
2.1 Nombre de colonies :	56
2.2 Coloration de gram +	56
2.3 Colonies fongiques :	56
2.4 pH :	57
2.5 Conductivité :	57
2.6 PMG :	57
Conclusion générale.....	59
Références.....	61

Introduction générale

Introduction générale

Les pratiques agricoles durables peuvent avoir un impact positif significatif sur la vie microbienne du sol, qui est essentielle pour la fertilité et la santé des sols (Jeffries, Gianinazzi et al. 2003). L'agriculture biologique, sans pesticides chimiques ni engrais synthétiques, favorise une plus grande biodiversité microbienne (Hartmann, Frey et al. 2015) tandis que l'utilisation d'engrais organiques comme le fumier et le compost enrichit le sol en matière organique, fournissant des nutriments aux microorganismes (Banerjee and Van Der Heijden 2023). La rotation des cultures aide à maintenir une communauté microbienne diversifiée, différentes plantes favorisant différents types de microorganismes (Horrigan, Lawrence et al. 2002), tout en évitant l'appauvrissement du sol en nutriments spécifiques (Franke-Snyder, Douds Jr et al. 2001). Le non-labour ou le labour réduit préserve la structure du sol et minimise les perturbations des communautés microbiennes (Horrigan, Lawrence et al. 2002), permettant de conserver une plus grande biomasse et activité biologiques dans les couches supérieures (Banerjee and Van Der Heijden 2023). L'utilisation de cultures de couverture ou d'engrais verts enrichit le sol en matière organique et nutriments lors de leur incorporation (Finney, Buyer et al. 2017), favorisant ainsi l'activité et la diversité microbiennes. (Arunrat, Sansupa et al. 2022) Enfin, l'agroforesterie et l'intégration d'arbres créent un environnement plus diversifié et stable pour les microorganismes du sol, les racines libérant des exsudats qui alimentent leurs communautés (Rosenstock, Tully et al. 2014). En adoptant ces pratiques, les agriculteurs peuvent améliorer durablement la santé et la fertilité de leurs sols, (Lehman, Cambardella et al. 2015) en favorisant une vie microbienne riche et diversifiée, essentielle pour un écosystème du sol équilibré.

Première Partie
synthèse
bibliographique

Chapitre 01: Revue de la littérature

1. Définition du sol :

A définit le sol comme étant le résultat de la désagrégation des roches par leurs altérations mécanique et physicochimique sous l'effet des facteurs abiotiques (fissuration consécutive à la décompression, chocs thermiques, humidité, temps, frottements, vent) et biotiques (microorganismes). (Gauthier and Champagne 2017)

1.1 Composition du sol :

Le sol est conçu comme un système de trois phases avec un nombre indéfini de composants. Il existe certains groupes de constituants qui se retrouvent dans tous les sols. Les phases du sol sont :

La phase solide sol est constituée par :

- Les matières minérale qui intègrent la roche originale et ceux qui sont le résultat de l'altération des minéraux de décomposition ; les plus importants sont les (**Andalucite , Kaolin , Feldspaths , Micas**) .
- La matière organique est le produit de la décomposition des végétaux et des animaux à la surface et dans le sol.

La phase liquide est représentée par l'humidité du sol.

La phase gazeuse désigne l'air contenu dans les espaces poreux du sol.

Les phases solide, gazeuse et liquide du sol sont toutes en équilibre.

Les phases solide et gazeuse sont en équilibre. La température, la teneur en eau, l'apport d'azote et l'activité microbienne du sol peuvent influencer sur cet équilibre. Les phases liquide et gazeuse

Les phases liquide et gazeuse sont en constante évolution et dépendent de la phase solide. Par conséquent, la composition volumétrique générale d'un sol tropical pour la croissance des plantes ; peut être celle qu'illustre la figure 1. (A. COMBEAU 1970 , Gauthier and Champagne 2017)

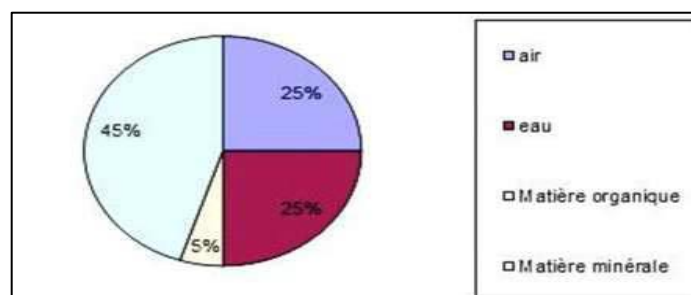


Figure 1.1: Composition volumétrique idéale du sol.

- Texture du sol :

Représente la teneur centesimale des particules constitutives du sol que sont le sable, le limon et l'argile.

La texture du sol revêt une grande importance car elle permet de déterminer la facilité d'approvisionnement des plantes en nutriments, en eau et en oxygène, la facilité de labour. (A. COMBEAU 1970)

- Classification texturale des sols :

La classification texturale du sol se base sur le pourcentage des différentes particules et leurs effets sur le sol. Souvent, on utilise le nom de sa classe texturale pour dénommer le sol.

La notion de texture d'un sol présente une importance pratique considérable: elle détermine dans une large mesure les caractéristiques principales de ce sol dans les domaines de la rétention d'eau, de la capacité d'échange d'ions et de la structure.

Tableau 1.1 : classification texturale des sols

Sol sableux	sable : 70% ou plus
	argiles plus limon : moins de 30%
Sol limoneux	limon : 80% ou plus
	argile : moins de 12%
Sol argileux	sable : moins de 45%
	limon moins de 40%
	argile : 40% ou plus

Un sol idéal (loam ou franc) peut être défini comme étant le mélange de particules de sable, limon et d'argile. (A. COMBEAU 1970 , Ahlborg, Becking et al. 1994, Gauthier and Champagne 2017)

- Structure du sol :

La structure du sol désigne la façon dont ses agrégats s'agencent entre eux. Elle se caractérise par l'aspect des ensembles ou des agrégats établis, leurs formes et leurs dispositions et la stabilité de ces agrégats. L'agrégat est solide et est défini par des formes géométriques plus ou moins régulières. Il se forme dans le sol soit d'une façon naturelle ou sous l'effet des labours. Il conserve sa forme grâce à la cohésion du sol. Cette cohésion varie suivant l'effet de divers facteurs notamment la texture du sol et son humidité. Entre les agrégats, il existe des

vides dénommés « pores » qui se divisent en micropores et macropores. Les pores du sol permettent le mouvement de l'eau et de l'air dans le sol. Ils contiennent la solution du sol. Ils sont l'interface entre les racines des plantes et le sol.

C'est ce qui justifie que la structure du sol soit considérée comme l'un des principaux facteurs dont dépend la fertilité des sols. Contrairement à la texture qui ne change pas, la structure du sol est un état qui évolue dans le temps.

Les éléments structuraux peuvent être classés par taille, mais aussi en fonction de leur forme.

Selon ce dernier critère. Trois classes de structures peuvent être distinguées:

c) Structure particulaire. Le sol est alors constitué par des éléments du squelette, non agrégés.

Exemple: structures cendreuse, fibreuse, feuilletée.

b) Structure massive ou continue. Le sol forme alors un bloc unique. Sous-classes: types ciment, grès, poudingue.

c) Structures fragmentaires. Les constituants élémentaires sont associés en agrégats ou en mottes. (A. COMBEAU 1970 , Ahlborg, Becking et al. 1994, Gauthier and Champagne 2017)

- Le complexe absorbant du sol

Le complexe absorbant des sols présente des charges permanentes et variables. Ces dernières dépendent du pH et de la force ionique de la solution en contact.

Le complexe argilo-humique :

Le complexe argilo-humique est une structure formée d'argile et d'humus. L'humus est la fraction "stable" de la matière organique du sol, c'est-à-dire qu'elle est peu sujette à la minéralisation, mais participe davantage à la structuration du sol. Les particules d'argiles et d'humus étant tous deux chargés négativement, ils retiennent les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+} ...), éléments essentiels à la plante. Des échanges de cations ont lieu entre le complexe argilo-humique et la solution du sol, ce qu'on appelle la capacité d'échange cationique (CEC). Plus elle est élevée, moins les cations seront lessivés : ils seront donc plus accessibles aux plantes. Ces aspects sont développés dans la partie fertilité chimique.

Mais comment deux structures chargées négativement, alors qu'elles devraient se repousser, peuvent-elle être si étroitement liées ? Par l'intermédiaire de ponts cationiques chargés positivement et de « colles biologiques » :

- Le calcium a une action stabilisatrice. Il s'intercale entre l'humus et les feuillets des argiles, formant des ponts calciques très résistants et aérant la structure du sol.
- Le magnésium forme lui aussi des ponts cationiques mais avec une action de resserrement de la structure.
- Des ponts constitués d'hydroxydes de fer peuvent également se mettre en place, mais ils sont moins solides que les ponts calciques.
- Enfin, l'activité biologique a un rôle fondamental. La présence de molécules organiques permet d'"enrober" les complexes, ce qui les stabilise en présence d'eau. Parmi ces substances, la glomaline, produite par certains champignons. Ces aspects sont développés dans la partie fertilité biologique.

2. La microbiologie des sols : un champ prometteur pour l'agroécologie :

La microbiologie du sol est un chapitre de la microbiologie générale. On peut la considérer comme une science charnière entre la pédologie (Sciences des sols) et la Biologie (Microflore). Le terme pédo-biologie employé à un moment a été vite délaissé parce que la Pédo-biologie englobe l'action de toute la macro et la micro faunes du sol (insectes, acariens, vers de terre, rongeurs, bactéries, actinomycètes, champignons, algues, virus, protozoaires, etc.) (Winogradsky 1950)

2.1 Organismes vivants du sol :

Les sols hébergent un quart de la biodiversité de notre planète et constituent l'un des écosystèmes les plus complexes de la nature. Ils abritent une myriade d'organismes qui interagissent et contribuent aux cycles mondiaux qui rendent toute vie possible.

De la flore à la faune, ils peuvent être classés par taille :

2.1.1 Faune du sol :

2.1.1.1 La microfaune (<0,2mm) :

Espèces pour la plupart microphages ou phytophages, comprenant les familles des protozoaires, tardigrades, rotifères et nématodes.

2.1.1.2 La mésofaune (0,2-4mm):

Composée principalement des acariens, collemboles, et enchytréides.

2.1.1.3 La macrofaune (>4mm) :

Composée principalement des vers de terre (lombriciens), millepattes, insectes (coléoptères, diptères, hyménoptères...), araignées, crustacées terrestres (cloportes), mollusques (limaces, escargots).



Figure 1.2 : vue de quelques espèces de pédofaune (Winogradsky 1950)

Flore du sol:

Micro-organismes du sol composés principalement des archées, bactéries dont actinomycètes, algues et champignons. Espèces pionnières de la décomposition des matières organiques. ((Winogradsky 1950)

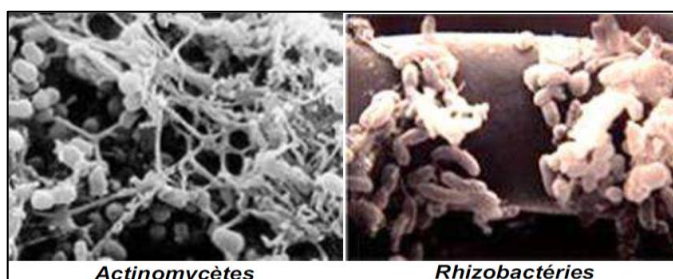


Figure 1.3 : vue de quelques espèces de pédoflore (Shinde, Sarkar et al. 2019)

2.2 Les bactéries :

Les bactéries sont des organismes composés pour la plupart d'une seule cellule. Elles mesurent environ 1 millième de millimètre et sont donc invisibles à l'œil nu.

Une bactérie est en moyenne 10 à 100 fois plus petite qu'une cellule humaine. Son matériel génétique ne se trouve pas dans un noyau, Pour cette raison, on appelle les bactéries des procaryotes.

Le monde bactérien, c'est une diversité infinie de formes et de couleurs. En bâtonnets ou arrondies, spirales ou de structure non définies, les bactéries peuvent produire différents pigments leur conférant une grande variété de couleurs.

Pour se multiplier une bactérie se divise en 2, puis les 2 cellules se divisent et donnent 4 cellules et ainsi de suite. Néanmoins la rapidité de croissance bactérienne, ajoutée à grande capacité métabolique fait des bactéries les organismes pionniers dans la colonisation de nouveaux espaces. (Sarter 2010)

1° les Eubactériales sensu lato, qui se subdivisent en deux ordres les Pseudomonadales et les Eubactériales sensu stricto;

2° les Protistes inférieurs, que l'on range habituellement à côté des Eubactériales, à savoir:

- les Chlamydo-bactériales ou Bactéries ferrugineuses filamenteuses;
- les Beggiatoales ou Bactéries sulfureuses filamenteuses;
- les Myxobactériales. (Dommergues and Mangenot 1970)

2.2.1 Classification en groupes physiologiques :

Cette classification a été et est encore très largement utilisée pour la description des paysages bactériens dans le sol. Il existe un nombre considérable de milieux permettant de mettre en évidence des groupes physiologiques intervenant dans les différents cycles biologiques.

2.2.1.1 Cycle de l'azote

- groupe des fixateurs d'azote en aérobiose,
- groupe des fixateurs d'azote en anaérobiose,
- groupe des protéolytiques,
- groupe des ammonificateurs, groupe des nitrificateurs,
- groupe des dénitrificateurs ;

2.1.1.2 Cycle du carbone

- groupe des amylolytiques,

- groupe des pectinolytiques
- groupe des hémicellulolytiques
- groupe des cellulolytiques aérobies
- groupe des cellulolytiques anaérobies;

2.1.1.3 Cycle du soufre :

- groupe des sulfato-réducteurs,
- groupe des sulfo-oxydants,
- groupe des minéralisateurs du soufre organique;

2.1.1.4 Cycle du fer :

- groupe des minéralisateurs des complexes organo-ferriques. (Dommergues and Mangenot 1970)

2.2.2 Les champignons:

- Ils sont des organismes filamenteux (moisissures) ou unicellulaires (levures) capables de se développer en saprophytes ou parasites sur tous les milieux,. Ce sont des hétérotrophes dépourvus de chlorophylle, ce qui les différencie à la fois des algues et des végétaux.
 - Avec les bactéries et peu d'autres groupes d'organismes chemoorganotrophes, les fungi fonctionnent comme des décomposeurs, un rôle d'une grande importance. Ils dégradent Les matériaux organiques complexes dans l'environnement a de simples composés
- Utilisation des microorganismes du sol pour accroître la productivité agricole :

Organiques et de molécules inorganiques. Dans cette voie, le carbone, l'azote, le phosphore et d'autres constituants critiques d'organismes morts sont libérés et rendus disponibles pour des organismes vivants. (Gauthier and Champagne 2017)

2.3 Rôles des microorganismes dans le sol et importance de leur étude :

Les fonctions utiles des microorganismes du sol dans la rhizosphère sont les suivantes :

Décomposition des résidus de plantes, d'animaux, de microorganismes et de déchets organiques à travers la dégradation de sources carbonées , la synthèse d'humus, la minéralisation et l'immobilisation de l'azote, du soufre et du phosphore puis l'amélioration de la structure du sol (stabilité des agrégats) ;

- nutrition a travers l'augmentation de la disponibilité de nutriments pour la plante (P, Mn, Fe, Zn, Cu), les associations mycorhiziennes symbiotiques, la production d'agents organiques utilisables et les réactions d'oxydoréduction ;

- fixation biologique d'azote par les bactéries libres ou associatives avec des plantes nonlégumineuses et les bactéries symbiotiques fixatrices d'azote ;

- amélioration de la croissance des plantes à travers la production d'hormones de croissance pour les plantes et la protection des plantes contre des pathogènes et autres organismes nuisibles ;

- amélioration de la santé des plantes à travers la lutte contre les nématodes, les insectes et les mauvaises herbes ainsi que la protection contre des pathogènes ou autres organismes nuisibles ;

- épuration des sols et de l'eau par la biodégradation des pesticides et de contaminants exogènes notamment les hydrocarbures et les métaux (bio-rémédiation), la réduction des nitrates et le recyclage des nutriments ;

- épuration de l'air par la réduction de la production de gaz à effet de serre (CO₂, N₂O, CH₄) ;

- structuration du sol par la production de substances adhésives et l'agrégation de particules par des champignons filamenteux ;

- régulation des populations microbiennes à travers la prédation des bactéries par des protozoaires, l'antibiose et la compétition/commensalisme ;

- adaptation de plantes à des environnements sous contraintes par la sélection des plantes résistantes/tolérantes aux stress hydriques et l'amélioration de la croissance des plantes en milieu contaminé (phyto-stabilisation/ phyto-rémédiation) ;

- conservation et enrichissement des réservoirs de biodiversité avec des organismes d'intérêt biotechnologique et pharmaceutique .

En général, les mycorhizes constituent des partenaires essentielles dans la relation sol– plantes – microorganismes . (Gauthier and Champagne 2017)

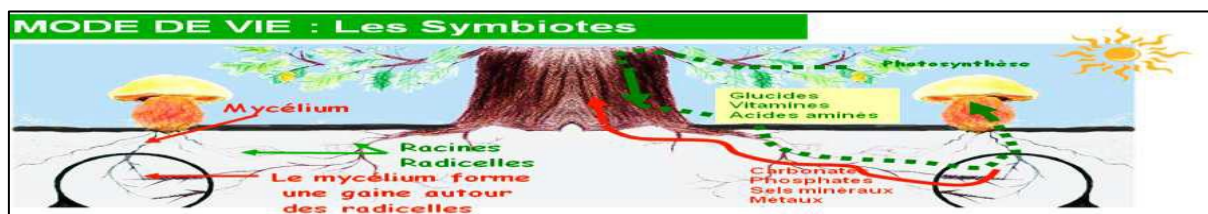


Figure 1.4: Relation sol-plantes-microorganismes

2.4 Apports de la microbiologie pour une agriculture durable :

Les plantes évoluent dans un environnement riche en micro-organismes qui proviennent de multiples sources et qui peuvent entrer en contact avec les tissus végétaux. Chaque plante interagit donc avec un milieu composé d'une grande diversité microbienne appartenant aux bactéries, archées, champignons et protistes. Par ailleurs, les virus après infection de cellules vivantes, peuvent également faire partie de ces communautés microbiennes. Parmi cette diversité de micro-organismes environnant les plantes, certains peuvent interagir directement avec elles, et même les coloniser en surface ou à l'intérieur de leurs tissus, pour former ce qu'on appelle le microbiote des plantes. (Saadaoui 2023).

2.4.1 Une composition variable du microbiote :

La composition du microbiote des plantes varie fortement selon :

- le génotype de la plante (dépendant de l'espèce végétale et de la variété cultivée),
 - les propriétés de son lieu de croissance (type de sol, climat et autres facteurs environnementaux),
 - la capacité génétique des micro-organismes environnants à interagir avec la plante.
- (Saadaoui 2023).

Une compartimentation spécifique du microbiote selon les tissus :

Le microbiote des plantes colonise tous les tissus végétaux accessibles et se retrouve donc dans tous les organes des plantes : la rhizosphère, les racines, les tiges, les feuilles, les fleurs et les graines. Cependant, de la même manière que la composition du microbiote dépend de chaque plante cultivée, la composition du microbiote varie selon les organes de la plante car les propriétés de ces habitats (pH, disponibilité en dioxygène, en nutriments et en eau) diffèrent. Cela aboutit à une compartimentation du microbiote, formant ainsi des microbiotes spécifiques à chaque tissu.

Au niveau des racines, il existe un gradient de biomasse et de diversité décroissant de l'extérieur vers l'intérieur de ces organes .(Offroy-Chave 2015)

2.4.2 Une association durable :

Les plantes évoluent donc avec leur microbiote en conservant une partie des micro-organismes transmis verticalement de génération en génération et en acquérant une autre partie depuis l'environnement. Collectivement, les organismes du microbiote apportent des fonctions essentielles à la survie des plantes. Face à cette observation, les plantes ne peuvent plus être considérées comme des êtres individuels et autonomes mais comme un assemblage d'espèces et de leurs répertoires de gènes que l'on appelle un holobionte (une plante hôte + son microbiote associé).(Saadaoui 2023).

À l'interface entre le sol et les racines, le microbiote de la rhizosphère a des implications importantes dans le fonctionnement des plantes (Saadaoui 2023).

2.5 Quelques thématiques porteuses à explorer pour une meilleure utilisation

2.6 des sols pour leur gestion en milieux cultivés ou industriels :

Stimulation des populations naturelles du sol où la plante est cultivée

Réduction d'intrants dans la production agricole

Introduction des souches sélectionnées

Chapitre 02:

Microorganisms de sol

1. Les influences des microorganismes sur le cycle du carbone ,de l'azote et du phosphore dans le sol

1.1 Cycle de carbone :

L'atome de C est complètement indissociable du vivant : tous les êtres vivants sont formés de squelettes de C et les autotrophes comme les hétérotrophes dépendent de cet atome pour leur survie. Notamment par exemple pour faire fonctionner leur métabolisme énergétique.](Calonne 2012).

Le cycle global du C se répartit dans l'ensemble de la biosphère et entre quatre principaux réservoirs : l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère et la géosphère (Borschinger 2016). Il est naturellement dans un équilibre décrivant un cycle « parfait », dans lesens où le C est retourné à l'environnement à peu près à la même vitesse qu'il n'en est retiré- par les organismes vivants .

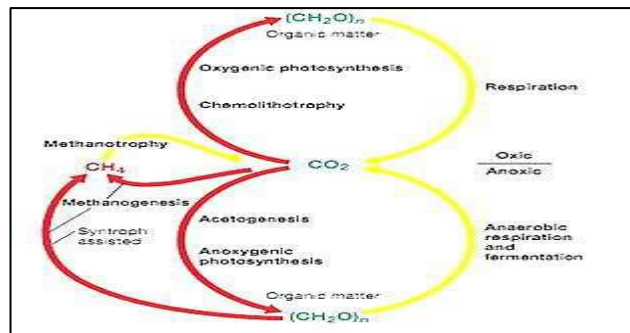


Figure 2.1 : Cycle du carbone (Mueller, Jensen et al. 1998).

1.2 Cycle de l'azote :

L'azote est présente dans l'atmosphère sous une forme non assimilable. Le diazote étant un composé inerte, il doit suivre son propre cycle pour être disponible aux végétaux.

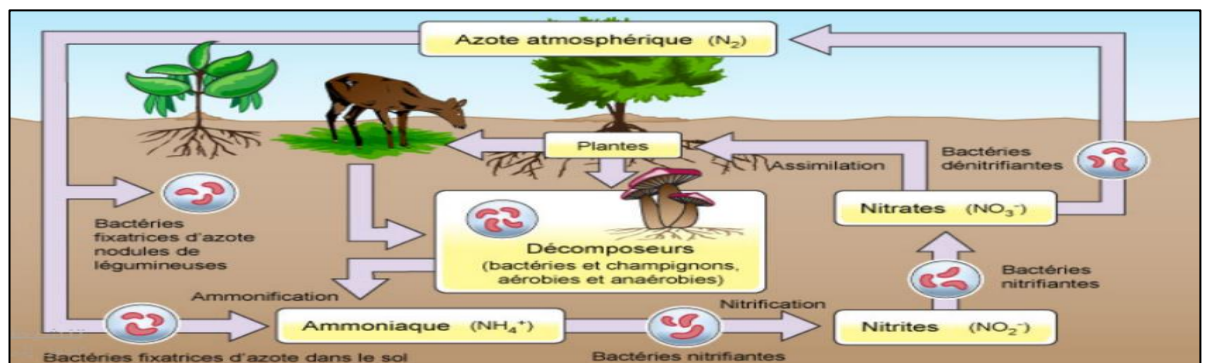


Figure 2.2 : Schéma des agents participants au cycle de l'azote .(Murray, Hart et al. 2009)

Sur ce schéma, nous constatons que le diazote va être fixé soit pas les bactéries symbiotiques*, soit pas les bactéries libres*. Il est ensuite transformé sous une forme d'ammoniac (NH_4^+). En outre, l'ammoniac obtenue participera au cycle des bactéries nitrifiantes qui nous permettrons d'obtenir du NO_2^- et du NO_3^- . C'est donc ces formes d'azote minérales qui pourront être utilisées par les plantes. Par ailleurs, nous savons que dans un milieu naturel, la fixation biologique représente 60% des entrées du cycle de l'azote. Ce sont les bactéries qui se chargent de cette fixation. (Ratsiatosika 2018)

Les différentes étapes du cycle de l'azote :

- Ammonification
- Nitrification
- Assimilation
- Dénitrification

1.3 Phosphore

Le phosphore (P) est un atome essentiel à la fabrication des acides nucléiques ARN (acide ribonucléique) et ADN (acide désoxyribonucléique) et des molécules énergétiques comme ATP (adénosine triphosphate). A la différence du carbone et de l'azote, le phosphore n'est pas contenu en grande quantité dans l'atmosphère. Il est majoritairement présent dans les roches volcaniques et sédimentaires. Les sols contiennent un grand volume de phosphore mais une faible partie seulement est accessible aux organismes vivants.

1.3.1 Description du cycle du phosphore

- Le phosphore entre dans les systèmes biologiques par les processus naturels d'érosion. Ce phosphore est absorbé par les plantes qui le transforment en phosphate organique. Il transporte l'énergie dans la plante et favorise sa croissance générale, notamment du système racinaire et des tiges. Ces phosphates organiques entrent dans les cycles de la matière par les chaînes alimentaires et de décomposition. En milieu marin, le phosphore accède aux chaînes alimentaires marines par l'intermédiaire du plancton et des poissons qui en ont besoin pour construire leur squelette.
- Une partie du phosphore insérée dans la matière par les chaînes alimentaires, retourne aux sols à travers les déjections et les restes animaux et les végétaux à la fin de leur vie. L'autre partie se dépose au fond des océans sous forme d'organismes morts ou de particules et est

intégrée aux sédiments. Ces derniers sont transformés au cours du temps en roches sédimentaires. Les roches sont ensuite ramenées à la surface par les mouvements tectoniques et le cycle recommence (figure1)(Gauthier and Champagne 2017)

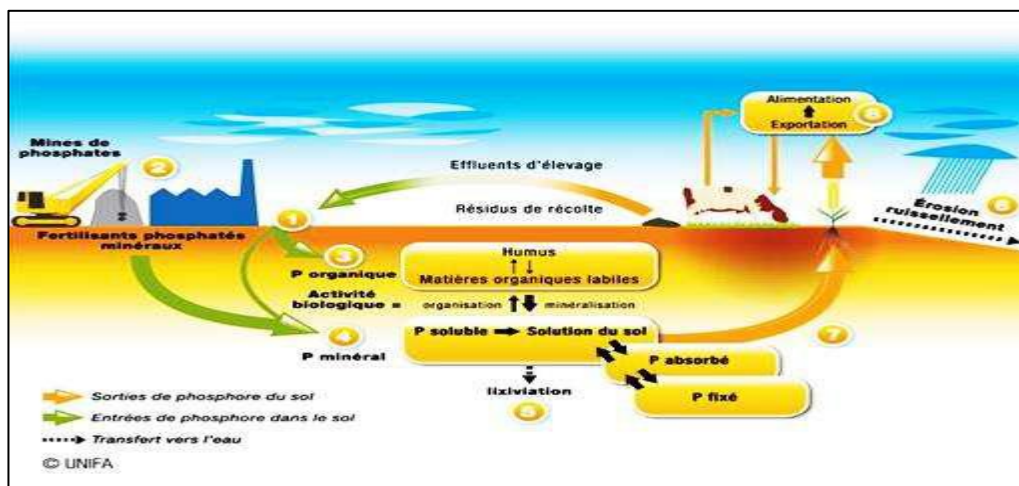


Figure 2.3 : Cycle du phosphore en agriculture(Kaye and Hart 1997).

1.4 Influences des microorganismes sur les cycles du carbone, de l'azote et du phosphore:

Les bactéries du sol ont des capacités métaboliques très diverses ; et, dans la décomposition biochimique de la MO fraîche, interviennent beaucoup aux étapes de conversion des composés organiques en des formes inorganiques](Whalen and Hamel 2004). La plupart sont des espèces unicellulaires mais les actinomycètes et plusieurs cyanobactéries sont filamenteuses .(Whalen and Hamel 2004) Ce sont des organismes sédentaires qui vivent en colonie à la surface du sol ou, dans le sol au sein des agrégats (s'y attachant par les sécrétions d'exopolysaccharides sur leur membrane cellulaire).(Lardjane and Belhaneche-Bensemra 2021)

Les champignons sont capables de décomposer les composés organiques les plus complexes qu'il est possible de retrouver dans le sol (Paul and Clark 1996). Ils bougent dans les sols sur de courtes distances, à mesure que leur hyphes grandit vers les patch de sol riches en nutriments ou vers les débris organiques(Whalen and Hamel 2004). Les champignons arbusculaires mycorrhiziens (AM) ne décomposent pas la MO (Whalen and Hamel 2004).

1.4.1.1 Prise en charge du C organique dans le cycle biologique du C :

Les substrats facilement décomposés : acides aminés, sucres facilement solubilisés, et acides nucléiques (=MO labile), sont minéralisés avant tout, et en quelques jours, suite à la colonisation microbienne de la MO fraîche. Ensuite vient le tour des substrats plus difficiles à

décomposer, qui demandent un bagage enzymatique spécifique et un investissement en énergie important : cellulose et ensuite lignine (Whalen and Hamel 2004).(Mueller, Jensen et al. 1998). (Zara-Meylan 2016)]. Les organismes cellulolytiques sont capables de décomposer les polysaccharides délignifiés et peuvent donc aussi intervenir au moment de la lignilolyse. .(Zara-Meylan 2016)

- Une bactérie fixatrice d'azote est un microorganisme capable de capter l'azote atmosphérique, le diazote et de le restituer à la plante sous une forme assimilable : l'ammoniaque (Deacon). Ces bactéries mesurent environ 1 micromètre de moyenne, ce qui est environ 600 00 fois plus petit qu'un homme.

1.4.1.2 Il existe quatre types de bactéries différentes:

Les bactéries endophytes, qui se situent à l'intérieur des racines des végétaux. Les bactéries diazotrophes et les bactéries endophytes permettent également de fixer l'azote. Et enfin, les bactéries dites « associatives ».

1.4.1.3 Il existe trois conditions à la fixation d'azote par les bactéries :

- Il faut un faible taux d'oxygène car la nitrogénase est inactive. Ainsi, ce sont les bactéries en conditions d'anaérobiose qui pourront permettre la fixation d'azote.
- La présence de ressource et d'énergie comme le Carbone est indispensable
- En présence d'azote minérale, la fixation est inhibée. (Ratsiatosika 2018).

1.4.1.4 Pour le phosphore

Les bactéries capables de rendre soluble du phosphore inorganique sont des bactéries des genres *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Burkholderia*, *Micrococcus*, *Flavobacterium*, etc. Ces bactéries sont capables de libérer le phosphore inorganique combiné aux minéraux dans le sol.

Cette réaction se fait grâce à la production d'acides organiques par les bactéries.

D'autres types de bactéries peuvent agir sur la mise à disposition du phosphore organique majoritairement immobilisé sous forme de phytates. Ces enzymes libèrent les ions phosphates à partir des phytates les rendant ainsi disponibles aux plantes.

- En conclusion, la microfaune qui comprend des collemboles, des acariens et des nématodes, ainsi que les protozoaires, animaux unicellulaires grands prédateurs de bactéries, assurent de nombreuses fonctions de décomposition de la matière organique, de régulation des populations microbiennes pathogènes des plantes. Les champignons sont capables de dégrader

les lignines qui sont des polymères à longue chaîne liés par des fonctions phénols et constituants du bois. Par ailleurs, ils assurent la production d'hyphes qui sont de longs filaments microscopiques, et de substances colloïdales, participent à la stabilisation des agrégats. Les bactéries dégradent les matières organiques fraîches et les minéralisent. C'est pourquoi elles ont un rôle essentiel dans le recyclage de certains éléments nutritifs notamment l'azote, le phosphore et le soufre liés aux composés organiques afin de les remettre sous leur forme minérale utilisable par les plantes.

Les microorganismes du sol contribuent notamment à broyer le sol, à réduire et à décomposer les résidus organiques. Ils contribuent également à associer la matière organique à l'argile, favorisant la circulation de l'eau et de l'air. Les microorganismes du sol participent donc aux cycles biogéochimiques des éléments minéraux dans le sol. (Gauthier and Champagne 2017).

2. L'utilisation des microorganismes du sol pour accroître la productivité agricole :

2.1 Définition les biofertilisants :

Les biofertilisants sont des produits qui contiennent des cellules vivantes ou inactives de bactéries, de champignons ou d'algues efficaces, seuls ou en association. Les micro-organismes qu'ils contiennent sont en mesure de coloniser la rhizosphère ou l'intérieur de la plante. Ils favorisent la croissance des végétaux en améliorant l'absorption des principaux nutriments. Les biofertilisants peuvent être appliqués sur le sol, la semence ou la surface des végétaux. (Mäder, Fließbach et al. 2002)

2.2 Espèces de biofertilisants et modes d'action :

2.2.1 Fixateurs d'azote :

Certaines souches bactériennes et algues sont capables de fixer l'azote atmosphérique (N) et de le restituer sous des formes assimilables par les plantes, telles que l'ammoniac et le nitrate. Ce processus est appelé fixation biologique de l'azote (FBA) (Bolan 1991).

Ce mécanisme permet l'utilisation de certains micro-organismes comme biofertilisants pour remplacer les engrais azotés minéraux. Cela pourrait aider à préserver les réserves d'azote dans le sol de manière naturelle (Peoples and Craswell 1992). Les fixateurs d'azote peuvent être divisés en trois groupes: bactéries libres et associatives telles que **Azobacter** : ce sont des bactéries fixatrices d'azote libres et associatives. Outre la FBA, les souches d'*Azotobacter* offrent de nombreux autres effets bénéfiques qui stimulent la croissance et améliorent

l'absorption des nutriments par les plantes (Jnawali, Ojha et al. 2015),(Viscardi, Ventorino et al. 2016).

2.2.1.1 Azospirillum :

La capacité d'*Azospirillum* à favoriser la croissance végétale est imputée à divers mécanismes, dont la résistance aux maladies et la tolérance à la sécheresse, mais plus spécifiquement à la FBA (Van Dommelen and Vanderleyden 2007)

2.2.1.2 Les bactéries symbiotiques telles que Rhizobium, Frankia et Azolla.

Rhizobia: ce sont des bactéries fixatrices d'azote symbiotiques, qui sont responsables de la formation de nodules sur les légumineuses avec lesquelles elles entrent en symbiose . Ce type de symbiose contribue pour une part importante à la teneur en azote de la biosphère(Poole, Ramachandran et al. 2018). Cette interaction est particulièrement intéressante, sachant que les légumineuses constituent l'une des cultures et des plantes fourragères les plus importantes au monde.

Solubilisateurs de phosphore:

Dans le sol, la solubilisation du phosphore est principalement assurée par les bactéries solubilisatrices de phosphore (BSP) et, dans une moindre mesure, par des champignons solubilisateurs de phosphore (CSP)(Khan, Zaidi et al. 2009).

On estime que 20 à 25 % des besoins en phosphore des plantes sont satisfaits par des bactéries et des champignons.

Les bactéries du sol *Pseudomonas putida* et *Bacillus megaterium* ont été particulièrement bien étudiées.

Les types de champignons les plus connus sont *Aspergillus*, *Penicillium* et *Trichoderma*.

Certains actinomycètes sont également connus pour leur activité de solubilisation du phosphore et sont de plus en plus prisés du fait de leur capacité à survivre dans des environnements extrêmes (Kumar, Reddy et al. 2018).

2.2.2 Solubilisateurs de potassium et de zinc :

Les bactéries, les champignons et les actinomycètes peuvent dissoudre le potassium dans le sol par le biais de diverses réactions chimiques(Kumar, Reddy et al. 2018),(Sattar, Naveed et al. 2019)]. *Bacillus licheniformis*, *Pseudomonas azotoformans* et *Enterobacter hormoechei*

figurent parmi les solubilisateurs de potassium les plus efficaces, comme le montrent les expérimentations menées sur le riz et le concombre(Meena, Maurya et al. 2015),35(Saha, Maurya et al. 2016),Prajapati and Modi 2016)].

Le zinc (Zn) peut être dissous par diverses espèces microbiennes telles que *Bacillus subtilis*, *Thiobacillus thiooxidans* et *Saccharomyces* sp.(Mahdi, Hassan et al. 2010)

Champignons mycorhiziens arbusculaires :

Ces champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) sont des symbiotes appartenant au groupe des gloméromycètes. Ils forment des associations symbiotiques avec les racines de plus de 80 % de toutes les plantes terrestres, y compris la plupart des cultures agricoles(Parniske 2008). Les champignons jouent un rôle fondamental dans l'accès des végétaux aux nutriments minéraux. Spores de différents types de CMA extraits d'un sol cultivé. CMA colonisant des racines de maïs avec des hyphes, des arbuscules et des vésicules. CMA colonisant des racines de sorgho. racines du sol.

2.2.3 Autres mycorhizes :

Les champignons qui forment des ectomycorhizes (ECM) appartiennent au groupe des basidiomycètes et, dans une moindre mesure, au groupe des ascomycètes(Anderson and Cairney 2007). Ces champignons mobilisent les nutriments issus de composés organiques, améliorant ainsi leur absorption par les arbres. Parallèlement, ils contribuent aussi à l'apport de carbone aux sols et interviennent donc dans le cycle du carbone dans les écosystèmes forestiers(Anderson and Cairney 2007).

2.2.4 Consortia microbiens

Les associations de souches microbiennes telles que les rhizobactéries avec des champignons, appelées consortia microbiens, représentent une approche très prometteuse dans le cadre du développement de biofertilisants pour une agriculture durable (Woo and Pepe 2018). En raison de leurs propriétés complémentaires, les consortia microbiens sont potentiellement multifonctionnels. On estime également que les produits contenant des consortia microbiens pourraient mieux survivre dans des environnements différents que les produits contenant une seule souche. Cet effet est dû au fait que les micro-organismes se stimulent mutuellement par la communication et la différenciation.(Brenner, You et al. 2008)

2.3 Domaines d'application :

2.3.1 Utilisation en horticulture :

Les biofertilisants sont fréquemment utilisés en horticulture pour les raisons suivantes(Colla and Rouphael 2019),(Ortaş 2008),: (Pathak, Kumar et al. 2017)

- production de cultures de qualité supérieure et à haut rendement,
- utilisation de substrats de croissance exempts de micro-organismes appropriés,
- conditions environnementales contrôlables (par opposition à la culture en plein champ),
- possibilité d'application simplifiée grâce à l'irrigation(Colla and Rouphael 2019),
- cultures hautement spécialisées et application de méthodes horticoles intensives, qui entraînent une perte de fertilité des sols.

2.3.2 Utilisation dans les grandes cultures :

L'utilisation de biofertilisants ne se limite pas à l'horticulture et gagne également en importance dans les grandes cultures.

L'inoculation de rhizobia se pratique depuis longtemps dans la culture des légumineuses. (Weissenhorn and Külling 2008)

. D'autres essais menés par le FiBL ont montré que le choix de produits commerciaux efficaces est une condition préalable à la stabilité des rendements et des teneurs en protéines dans la culture du soja bio (Zimmer, Messmer et al. 2016).

Les biofertilisants gagnent également en importance dans d'autres grandes cultures. L'utilisation d'*Azospirillum* en association avec d'autres souches microbiennes a donné des résultats favorables dans différentes cultures: *Pseudomonas* a augmenté le rendement du maïs grain et du coton graine (Mohammadi and Sohrabi 2012), *Azotobacter* le rendement du mil à chandelle, du sorgho et du riz(Wani 1990), et *Arthrobacter* associé à une souche bactérienne solubilisatrice de phosphore a augmenté le rendement de l'orge(Belimov, Kojemiakov et al. 1995) .

2.3.3 Utilisation pour la restauration :

Cela peut conduire à une détérioration de la fertilité du sol et limiter fortement le développement naturel de la végétation. Plusieurs études ont démontré l'utilisation réussie des

CMA est la restauration des écosystèmes pour la restauration de la couverture végétale des sols désertifiés dans la région méditerranéenne (Jeffries, Craven-Griffiths et al. 2002) et pour la restauration des sols dégradés par l'exploitation minière(Wang 2017).

Deuxième Partie expérimentale

Chapitre 01: Matériel et méthodes

1. L'objectif de l'étude

Cette étude vise à évaluer l'impact comparatif des amendements organiques d'origine naturelle et des fertilisants chimiques sur la revitalisation de la biomasse microbienne et l'amélioration de la qualité biologique d'un sol dégradé, dans l'optique de rétablir un écosystème édaphique riche et équilibré, essentiel au bon fonctionnement des cycles biogéochimiques et à la fertilité durable des terres cultivées.

2. Présentation du cadre de l'étude

2.1 Zone

La commune de Ouarmas est située dans la wilaya d'El Oued, au nord-est de l'Algérie. Cette région fait partie du Sahara septentrional algérien et est caractérisée par un climat aride à semi-aride, avec des précipitations faibles et irrégulières.

Malgré ces conditions climatiques rudes d'El Oued, dispose d'un potentiel agricole important, en particulier pour la culture de la pomme de terre. Les terres fertiles et l'accès aux ressources en eau souterraine ont permis le développement d'une agriculture intensive basée sur la monoculture de la pomme de terre.

Cependant, cette pratique de monoculture intensive a engendré une dégradation rapide des sols. L'utilisation excessive de la fiente de volailler, le fumier et engrais chimiques, le travail excessif du sol et le manque de rotation des cultures ont conduit à l'épuisement des nutriments, à la perte de structure et de matière organique des sols, ainsi qu'à une baisse de leur fertilité.

Les sols dégradés deviennent alors moins productifs, nécessitant davantage d'intrants chimiques pour maintenir les rendements, créant ainsi un cercle vicieux. Cette situation met en péril la durabilité de l'agriculture dans la région à long terme.

Il est donc crucial d'étudier et de mettre en place des pratiques agricoles plus durables, telles que l'utilisation d'amendements organiques, la rotation des cultures et la gestion intégrée des nutriments, afin de restaurer la qualité des sols et de préserver ce potentiel agricole précieux de la région d'El Oued,.

3. Matériel du travail

3.1. Matériel du laboratoire :

Ce sont les éléments utilisés dans tous les laboratoires d'analyse bactériologique : un bec bunsen, un autoclave, un four, une balance, des tubes à essai, un flacon de 200 ml, des boîtes de pétri, des béchers, des pipettes, une éprouvette graduée, un agitateur magnétique.

✓ gélose: nutritive pda

✓ Réactifs (alcool, lugol)

✓ Colorants : fuschine, violet de gentiane et bleu de méthylène

4. Méthode :

4.1. Echantillonnage à partir de la ferme :

Des échantillons de sol ont été prélevés pour l'étude à partir de la ferme de Kamel Chebbah située dans la zone agricole de Hadhoudi, dans la commune de Ouarmas wilaya d'Oued Souf, le 29 janvier 2024. Ils ont été étudiés au niveau de la pépinière de l'Université Shahid Hamah Lakhder. Les échantillons ont été répartis dans 48 seaux, chaque seau contenant 23 kg de terre avec une surface estimée à 0.07065 cm². Le 31 janvier 2024, les seaux ont été irrigué avant le semis avec 2 litres d'eau par seau, et les graines de triticales ont été trempées pendant 12 heures avant le semi. Nous avons semé 16 graines/ seau à une profondeur de 2 cm avec une densité de semis équivalente à 226 graines par mètre carré. Après le semis, chaque seau a été irrigué avec 1 litre d'eau 1 litre d'eau.



Figure 3.1: Milieu des échantillons

5. Traitement:

Le traitement est effectué en divisant 48 seaux en 3 sections, chaque section contenant 16 seaux, comme indiqué dans le schéma suivant.

Le premier traitement du sol a été effectué le 12 février 2024 en utilisant plusieurs produits chimiques. Chaque traitement comprend 3 répétitions et dans chaque section, il y a un témoin.

Une fois le traitement mis en place, l'arrosage a été effectué le 15 février 2024

Le deuxième traitement du sol a été effectué le 17Avril 2024

Tableau 3.1: Billon traitement du sol

Témoin	Acide citrique	EDTA	Gouar	Sorbate de potassium	Acide Salicilique	Acide lactique	Benzoate de sodium	الممر
Gomme arabica	PEG 4000	Acide sulfurique	Xanthone	HEC	Magnatic Wat	Charbon actif	Tri-éthylène-amine	
PEG 4000	Témoin	Acide sulfurique	Tri-éthylène-amine	EDTA	Magnatic Wat	Acide citrique	Gomme arabica	
HEC	Charbon actif	Gouar	Acide lactique	Sorbate de potassium	Xanthone	Benzoate de sodium	Acide Salicilique	
Acide Salicilique	Xanthone	Témoin	Benzoate de sodium	Acide lactique	Gouar	Magnatic Wat	PEG 4000	
Acide citrique	HEC	Tri-éthylène-amine	EDTA	Gomme arabica	Acide sulfurique	Sorbate de potassium	Charbon actif	

6. Matériaux utilisés dans le traitement

6.1 Charbon actif :

Le charbon actif (ou carbone activé) est une matière carbonée hautement poreuse largement utilisée comme adsorbant pour éliminer les polluants organiques et inorganiques de l'eau, du sol et de l'air. En ce qui concerne son effet sur le sol, il améliore sa structure, aide à retenir les nutriments et fixe les polluants organiques et les métaux lourds. Il stimule également l'activité microbienne bénéfique dans le sol, favorisant ainsi sa décomposition et sa fertilité (Lehmann and Joseph 2009)

6.1.1 La dose utilisée

Vous avez préparé 3 grammes de charbon actif. Ensuite, vous avez incorporé ce charbon actif dans 1,5 litre d'eau pour créer un mélange. Par la suite, vous avez divisé ce mélange en trois portions égales, chacune ayant un volume de 0,5 litre. Enfin, vous avez placé chacune de ces trois portions dans un seau distinct.



Figure 3.2: Charbon Actif

6.2 PEG4000 :

Le polyéthylène glycol 4000 (PEG4000) est un polymère synthétique hydrosoluble largement utilisé dans diverses applications, y compris dans le domaine agricole. Ajouté au sol, le PEG4000 peut aider à retenir l'eau grâce à sa nature hygroscopique. Cela peut être utile dans les régions arides ou les sols sableux ayant une faible capacité de rétention d'eau.

Impact sur la croissance des plantes : L'application de PEG4000 au sol peut affecter la germination des graines, la croissance des plantes et le rendement des cultures en raison de son effet sur la disponibilité de l'eau et l'absorption des nutriments. (Fitouri 2011)

6.2.1 La dose utilisée

Nous avons préparé une solution en dissolvant 3 grammes de PEG4000 dans 1,5 litre d'eau. Ensuite, nous avons réparti de manière égale cette préparation dans trois récipients distincts, chacun contenant un tiers du mélange initial.

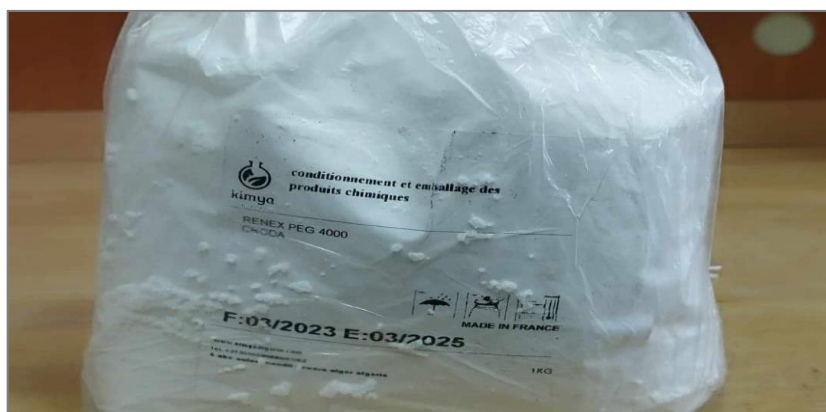


Figure 3.3: PEG 4000

6.3 Sorbate de potassium :

Le sorbate de potassium (potassium sorbate en anglais) est un composé chimique utilisé comme conservateur alimentaire. Il a la formule chimique $C_6H_7KO_2$. Il est principalement utilisé pour inhiber la croissance des moisissures et levures dans les aliments. Voici quelques informations sur son effet sur le sol :

Dans le sol, le sorbate de potassium peut être biodégradé par les microorganismes du sol en acide sorbique et en ions potassium.

L'acide sorbique est ensuite dégradé plus avant en dioxyde de carbone et en eau par les microorganismes. (Fernandez, André et al. 2014)

6.3.1 La dose utilisée

Pour préparer une solution de sorbate de potassium (potassium sorbate), les étapes suivantes ont été suivies :

3 grammes de sorbate de potassium ont été pesés.

Les 3 grammes ont été dissous dans 1,5 litre d'eau.

La solution totale de 1,5 litre a été divisée en 3 parties égales.

Chaque partie de la solution a été répartie dans un seau séparé.

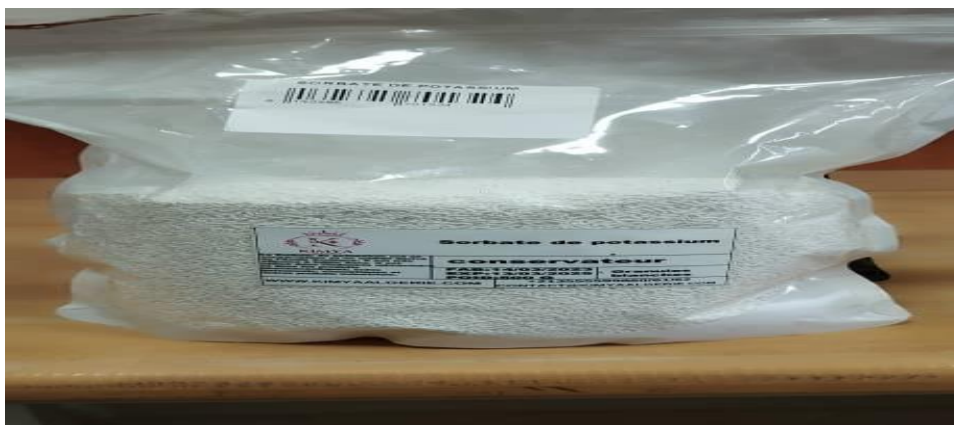


Figure 3.4: sorbate de potassium

6.4 Gomme Guar :

Le guar (*Cyamopsis tetragonoloba*) est une culture légumineuse dont les graines contiennent une forte proportion de galactomannane, un sucre polysaccharide utilisé comme additif alimentaire et industriel.

Il améliore également la structure du sol et augmente la rétention d'eau dans le sol.

Activation de l'activité microbienne : L'ajout de résidus de guar peut aider à activer les micro-organismes du sol qui participent à la décomposition de la matière organique et au cycle des nutriments (Yadav et al., 2000).

Effet sur la croissance des plantes : Certaines études ont montré que l'ajout de résidus de guar peut améliorer la croissance et la production des cultures.

Décomposition dans le sol : Les résidus de guar se décomposent relativement facilement dans le sol sous l'action des micro-organismes.

La dose utilisée Pour préparer un mélange, nous avons pesé 3g de Gouare que nous avons dissous dans 1,5l d'eau. Nous avons ensuite divisé ce mélange en 3 parties égales et avons placé chaque partie dans un seau séparé.



Figure 3.5: Gomme Guar

6.5 Gomme arabica :

La gomme arabique est un polysaccharide naturel extrait de l'acacia, utilisé dans de nombreuses applications industrielles et alimentaires. Bien que généralement considérée comme sûre et biodégradable, la gomme arabique améliore également la structure du sol. Elle stabilise les agrégats du sol, réduisant ainsi l'érosion et augmentant la rétention d'eau du sol. Elle favorise également la transformation de la matière organique et la libération des nutriments. La gomme arabique agit également comme un adsorbant des métaux lourds tels que le plomb, le cadmium et le cuivre. (Vinale, Sivasithamparam et al. 2008)

6.5.1 La dose utilisée

Pour préparer un mélange, nous avons pesé 3g de gomme arabique que nous avons ajoutés à 1,5l d'eau. Ensuite, nous avons divisé ce mélange en 3 parties égales et avons placé chacune de ces parties dans un seau séparé



Figure 3.6: gomme arabica

6.6 EDTA :

L'acide éthylènediamine tétraacétique (EDTA) est un agent chélateur largement utilisé dans diverses applications, notamment dans les domaines de l'agriculture et de la gestion des sols. Son utilisation sur les sols peut avoir différents impacts qui dépendent de facteurs tels que la concentration, le type de sol et les conditions environnementales. Voici quelques informations sur les effets potentiels de l'EDTA sur les sols :

Mobilisation des métaux lourds : L'EDTA peut former des complexes stables avec certains métaux lourds présents dans le sol, tels que le plomb, le cadmium, le zinc et le cuivre. Cela peut augmenter la mobilité et la biodisponibilité de ces métaux, ce qui peut être utile pour la phytoremédiation (utilisation de plantes pour extraire les métaux du sol), mais aussi problématique si les métaux sont lessivés et contaminent les eaux souterraines ou les cours d'eau.

Modification de la structure du sol : L'EDTA peut affecter la stabilité des agrégats de sol en modifiant les liens entre les particules de sol et les minéraux. Cela peut modifier la porosité et la perméabilité à l'air et à l'eau.

Impact sur les microorganismes du sol : L'EDTA peut affecter les communautés microbiennes du sol en modifiant la disponibilité des minéraux et des nutriments. (Dąbrowski, Hubicki et al. 2004)

6.6.1 la dose utilisée

Pour préparer un mélange, nous avons pesé 3g d'EDTA que nous avons ajoutés à 1,5l d'eau. Ensuite, nous avons divisé ce mélange en 3 parties égales et avons placé chacune de ces parties dans un seau séparé.

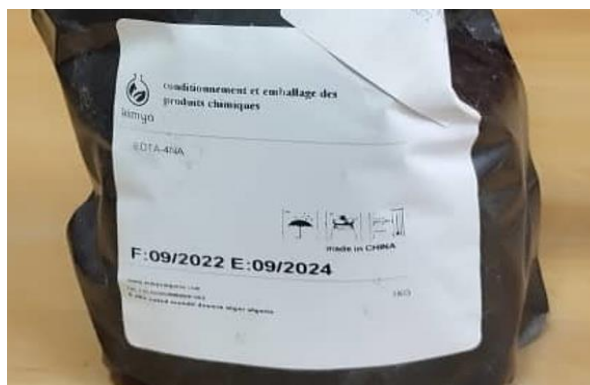


Figure 3.7 :EDTA

6.7 Benzoate de sodium :

Le benzoate de sodium (C_6H_5COONa) est largement utilisé comme agent de conservation alimentaire et antimicrobien. Bien qu'il soit généralement considéré comme sûr pour une utilisation alimentaire, de nombreuses études ont examiné son impact potentiel sur l'environnement, y compris le sol.

Le sol : Certaines études ont montré que le benzoate de sodium pouvait inhiber la croissance et l'activité de certaines bactéries et champignons dans le sol à des concentrations élevées . Cependant, à des niveaux d'utilisation normaux, son impact sur la communauté microbienne du sol est généralement considéré comme minime et temporaire.(Park, Clough et al. 2008)

6.7.1 La dose utilisée

Pour préparer un mélange, nous avons pesé 3g de benzoate de sodium que nous avons ajoutés à 1,5l d'eau. Ensuite, nous avons divisé ce mélange en 3 parties égales et avons placé chacune de ces parties dans un seau séparé.

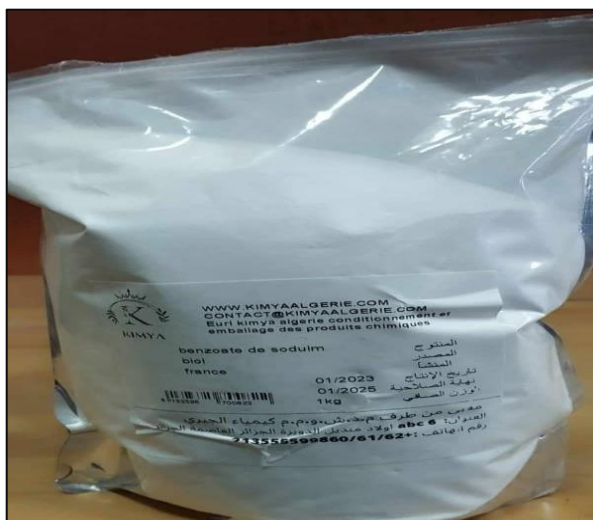


Figure 3.8: Benzoate de sodium

6.8 Tri éthanolamine :

La triéthanolamine est un composé organique de la famille des amines, largement utilisé dans de nombreuses applications industrielles et domestiques. En ce qui concerne son effet sur le sol, elle subit une biodégradation microbienne et affecte la fertilité du sol.(Fisk, Wiens et al. 1998)

6.8.1 La dose utilisée

Pour préparer un mélange contenant de la triéthanolamine, nous avons prélevé 3 ml de ce liquide et les avons ajoutés à 1,5 litre d'eau. Ensuite, nous avons divisé ce mélange en 3 parties égales que nous avons réparties de manière égale dans 3 seaux distincts.

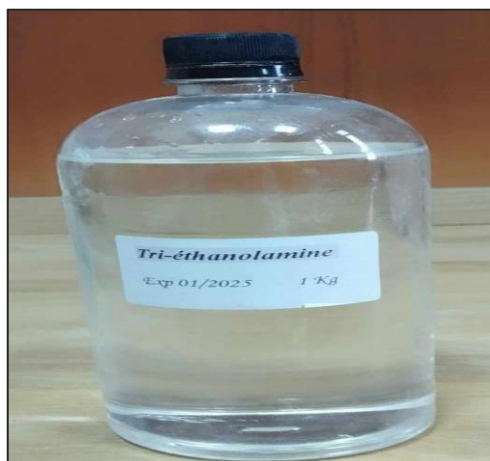


Figure 3.9 :Tri éthanolamine

6.9 Gomme Xanthone :

La xanthone est un composé organique polyphénolique présent naturellement dans certaines plantes, fruits et champignons. Ses effets potentiels sur le sol sont :

Activité antimicrobienne : Certains dérivés de la xanthone possèdent des propriétés antimicrobiennes qui peuvent affecter la croissance et l'activité des micro-organismes dans le sol.(Hussain 2015)

6.9.1 La dose utilisée

Pour préparer un mélange, nous avons pesé 3g xanthone que nous avons ajoutés à 1,5l d'eau. Ensuite, nous avons divisé ce mélange en 3 parties égales et avons placé chacune de ces parties dans un seau séparé.



Figure 3.10 : Gomme xanthone

6.10 HEC :

HEC fait référence à l'hydroxyéthylcellulose, qui est un polymère dérivé de la cellulose.

Selon une étude publiée dans Soil, l'ajout d'hydroxyéthylcellulose au sol peut avoir plusieurs effets bénéfiques :

Amélioration de la stabilité structurelle des agrégats du sol en liant les particules ensemble.

Augmentation de la capacité de rétention en eau du sol.

Réduction de l'érosion et du lessivage des nutriments. (Shinde, Sarkar et al. 2019) indique également que l'hydroxyéthylcellulose peut améliorer la croissance des plantes en agissant comme un amendement du sol :

"L'HEC augmente la capacité de rétention en eau du sol, améliorant ainsi la disponibilité en eau pour les plantes. Elle réduit également les pertes de nutriments par lessivage."

Une utilisation excessive d'HEC pourrait éventuellement entraver l'aération du sol et les échanges gazeux si une couche trop épaisse se forme. Des niveaux modérés sont recommandés.

Lorsqu'elle est utilisée de manière appropriée, l'hydroxyéthylcellulose peut avoir des effets bénéfiques sur la structure, la rétention en eau et la fertilité du sol en réduisant l'érosion et les pertes de nutriments, favorisant ainsi la croissance des plantes.

6.10.1 la dose utilisée

Pour préparer un mélange, nous avons pesé 3g de HEC (hydroxyéthylcellulose) que nous avons ajoutés à 1,5l d'eau. Ensuite, nous avons divisé ce mélange en 3 parties égales et avons placé chacune de ces parties dans un seau séparé.



Figure 3.11 : HEC

6.11 Acide citrique :

L'acide citrique ($C_6H_8O_7$) est un acide organique naturellement présent dans de nombreux fruits et légumes. en raison de sa nature acide, peut abaisser le pH du sol, affectant ainsi la disponibilité des nutriments et l'activité microbienne. Cependant, il possède également la capacité de former des complexes avec des métaux tels que le fer, le zinc, le cuivre et le manganèse, augmentant leur biodisponibilité pour les plantes. Son utilisation doit donc être équilibrée, car il est facilement biodégradable. (Ahlborg, Becking et al. 1994, Dąbrowski, Hubicki et al. 2004)

6.11.1 La dose utilisée

Pour préparer un mélange, nous avons pesé 3g d'acide citrique que nous avons ajoutés à 1,5l d'eau. Ensuite, nous avons divisé ce mélange en 3 parties égales et avons placé chacune de ces parties dans un seau séparé.



Figure 3.12 : Acide citrique

6.12 Acide salicylique :

L'acide salicylique ($C_7H_6O_3$) est un composé aromatique présent naturellement dans certaines plantes. Bien qu'il soit principalement utilisé dans les industries pharmaceutiques, il est également utilisé dans l'agriculture comme inducteur des défenses des plantes et comme amendement du sol.

Stimulation de l'activité microbienne : Des concentrations modérées d'acide salicylique peuvent stimuler l'activité de certains groupes microbiens bénéfiques dans le sol, tels que les bactéries fixatrices d'azote et les champignons (Nur, Islami et al. 2014)

6.12.1 La dose utilisée

Pour préparer un mélange, nous avons pesé 3g d'acide salicylique que nous avons ajoutés à 1,5l d'eau. Ensuite, nous avons divisé ce mélange en 3 parties égales et avons placé chacune de ces parties dans un seau séparé.

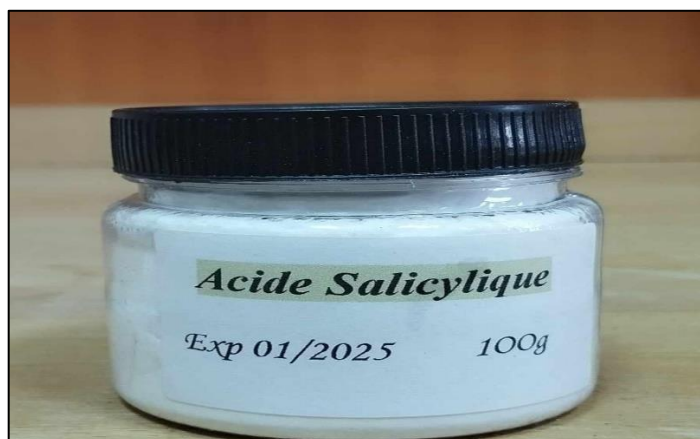


Figure 3.13 :Acide Salicylique

6.13 Eau magnétisée :

L'eau magnétique est de l'eau exposée à un champ magnétique statique ou alternatif, modifiant certaines propriétés physiques et chimiques . Ses effets potentiels sur le sol incluent:

- Amélioration de la structure du sol en brisant les agrégats compacts, augmentant la perméabilité et l'aération
- Augmentation de la capacité de rétention en eau, réduisant les besoins en irrigation
- Accroissement de la disponibilité des nutriments pour les plantes grâce à une meilleure solubilité

- Influence positive sur l'activité et la croissance de certains micro-organismes bénéfiques du sol .

Cependant, les résultats sont mitigés. Certaines études n'ont pas montré d'avantages significatifs , tandis que d'autres ont rapporté des effets positifs modérés Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre le potentiel et les limites de l'eau magnétique selon le sol et l'environnement (Rotillon 2019)

La méthode Le traitement par l'eau magnétisée consiste à arroser avec un appareil qui magnétise l'eau pendant toute la durée du traitement.



Figure 3.14 : appareil de L'eau magnétique

6.14 Acide sulfurique :

L'acide sulfurique (H_2SO_4) est un acide fort très corrosif. Lorsqu'il est libéré dans l'environnement, il peut avoir des impacts néfastes sur les sols, notamment :

Acidification des sols - L'acide sulfurique fait baisser le pH du sol, le rendant très acide. Cela peut perturber la biodisponibilité des nutriments et affecter la croissance des plantes.

Toxicité pour les organismes du sol - À fortes concentrations, l'acide sulfurique est toxique pour de nombreux microorganismes, vers de terre, insectes et autres formes de vie du sol. Pollution des eaux souterraines - S'il s'infiltre, l'acide sulfurique peut contaminer les nappes phréatiques et rendre l'eau impropre à la consommation

Article de Soil Science Society of America (2014) "Impact de la pollution acide sur la fertilité des sols" - Décrit les mécanismes par lesquels l'acidité excessive nuit à la croissance des plantes.

6.14.1 La dose utilisée

Pour préparer un mélange contenant de l'acide sulfurique, nous avons pris 3 ml d'un liquide et l'avons mis dans 1,5 litres d'eau. Ensuite, nous avons divisé le mélange en 3 parties égales et les avons réparties de manière égale dans chaque seau.



Figure 3.15 : Acide sulfurique

6.15 Acide lactique :

L'acide lactique, ou acide 2-hydroxypropanoïque (formule brute $C_3H_6O_3$), est un acide organique hydroxycarboxylique possédant un groupe carboxyle ($-COOH$) et un groupe hydroxyle ($OH-$) sur le carbone adjacent. Il existe sous deux formes isomériques optiquement actives : l'isomère L(+) lévogyre et l'isomère D(-) dextrogyre.

Rôle de l'acide lactique sur le sol :

Acidification du sol : L'acide lactique est un acide faible qui peut contribuer à l'acidification du sol lorsqu'il est produit par des bactéries lactiques pendant la décomposition de la matière organique. Solubilisation des minéraux : Grâce à son caractère acide, l'acide lactique peut solubiliser certains minéraux du sol, les rendant ainsi plus disponibles pour les plantes [4]. Stimulation de l'activité microbienne : L'acide lactique peut servir de source de carbone pour les microorganismes du sol, stimulant ainsi leur activité et leur croissance. Amélioration de la structure du sol : Les acides organiques comme l'acide lactique favorisent la formation d'agrégats stables dans le sol, améliorant ainsi sa structure et sa porosité (Tonukari 2004)

6.15.1 la dose utilisée

Pour préparer un mélange contenant de l'acide lactique, nous avons prélevé 3 ml de ce liquide incolore et les avons ajoutés à 1,5 litre d'eau. Ensuite, nous avons divisé ce mélange en 3 parties égales que nous avons réparties de manière égale dans 3 seaux distincts.



Figure 3.16 : Acide lactique

6.16 Témoin

Un témoin (ou contrôle en anglais) est un élément essentiel de la méthode scientifique expérimentale. C'est un échantillon qui n'est pas soumis au traitement ou à la variable étudiée, servant de référence pour comparer les résultats avec les échantillons traités.

Par exemple, dans une expérience testant l'effet d'un nouveau médicament sur une maladie, le groupe témoin recevra un placebo inerte au lieu du médicament. Cela permet d'isoler l'effet du médicament des autres facteurs. (Rosner 2006)

7. Préparation du mélange utilisé pour l'étude



Figure 3.17 : preparation des matériaux utilisés

8. Prélèvements à partir des pots

Dans le cadre des études et recherches sur les sols agricoles, un protocole spécifique est suivi pour préserver la santé des sols et favoriser l'activité des micro-organismes bénéfiques, notamment les bactéries. Ce processus commence par l'irrigation de chaque eau ou contenant de culture avant une certaine période, fournissant ainsi l'humidité nécessaire pour activer les

bactéries présentes dans les sols de ces contenants et favoriser leur croissance et leur multiplication

Ensuite, des boîtes stériles sont proposées pour prélever des échantillons de sol dans ces contenants. Ces échantillons sont prélevés à une profondeur d'environ 5 centimètres sous la surface du sol dans chaque contenant, à l'aide d'outils spéciaux comme des pelles ou des spatules stériles. Un soin particulier est apporté pour collecter des échantillons représentatifs de chaque contenant individuellement, afin d'obtenir des résultats fiables et précis

Une fois que tous les échantillons ont été prélevés des différents contenants, ils sont transférés avec précaution au laboratoire pour effectuer les analyses et études nécessaires. Au laboratoire



Figure 3.18 : boîtes stériles pour prélever des échantillons

9. Préparation des milieux de culture :

Preparation apartir deux milieu de culture

- ❖ Gélose nutritive
- ❖ Gélose pda

9.1 Préparation de milieu gélose nutritive :

Gelose Nutritive, également connue sous le nom d'agar nutritif, est un milieu de culture à usage général utilisé pour la culture de bactéries non fascinantes. Il s'agit d'un milieu solide composé d'agar en tant qu'agent solidifiant et de divers nutriments qui favorisent la croissance bactérienne

- 28g de gelose nutrituve
- 1000ml l'eau destile
- Melange avec un Agitateur magnetique hotoplate.

Pendant 20min a l'autoclave, Au-dela de cette periode, ils ontete mis pres de bec Bunsen puis le milieu a été coule dans des boites de petri apres refroidissement.

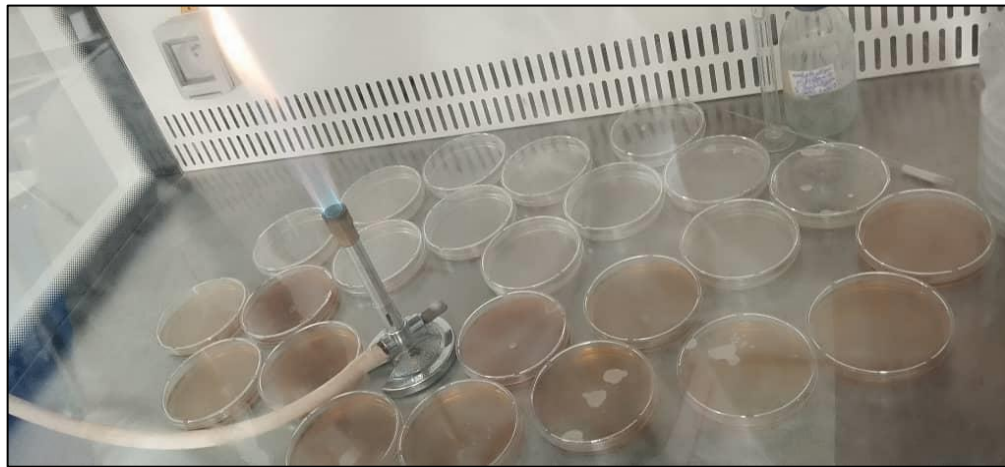


Figure 3.19: milieu gélose nutritive

9.2 Préparation de milieu gélose pda:

La Potato Dextrose Agar (PDA) est un milieu de croissance microbiologique couramment utilisé pour la culture de champignons et de bactéries. Il s'agit d'un milieu à usage général souvent utilisé pour l'isolement, le dénombrement et la maintenance de divers micro-organismes.

- 300g pomme de terre
- 1500ml l'eau destilée
- 75g agar
- Mélange avec un Agitateur magnétique hotoplate.

Pendant 20min a l'autoclave, Au-dela de cette periode, ils ontete mis pres de bec Bunsen puis le milieu a été coule dans des boites de petri apres refroidissement

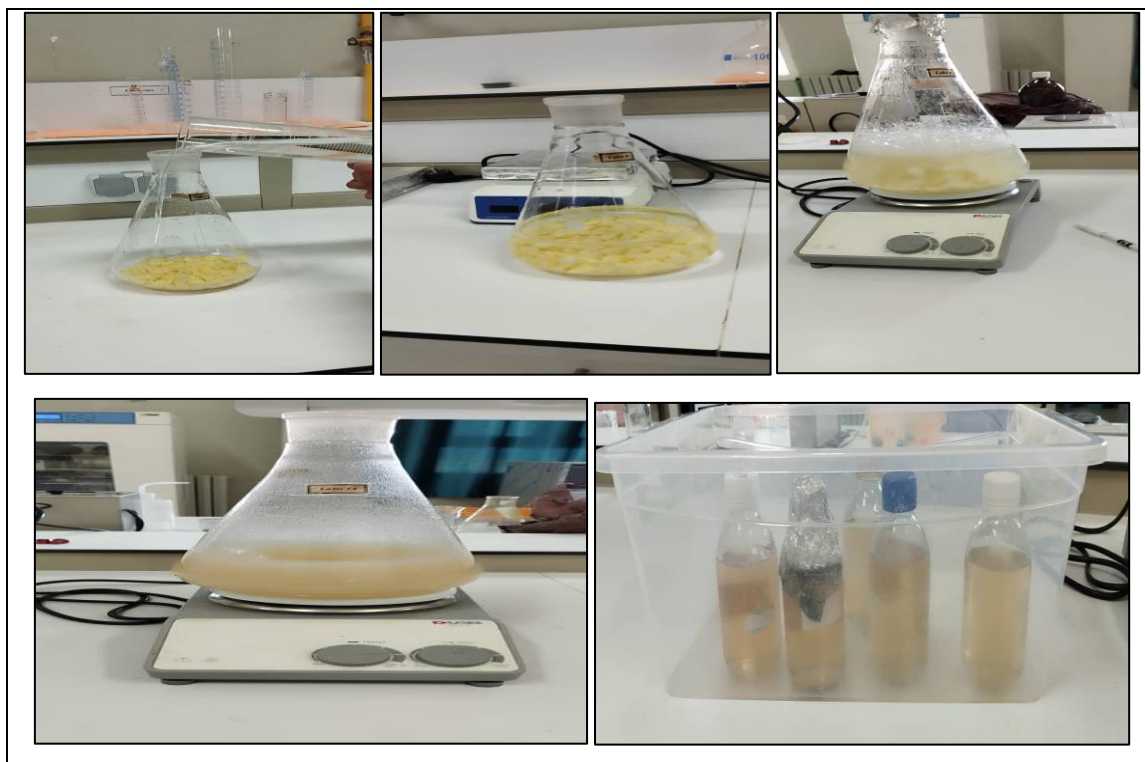


Figure 3.20 : preparation de milieu de gelose pda

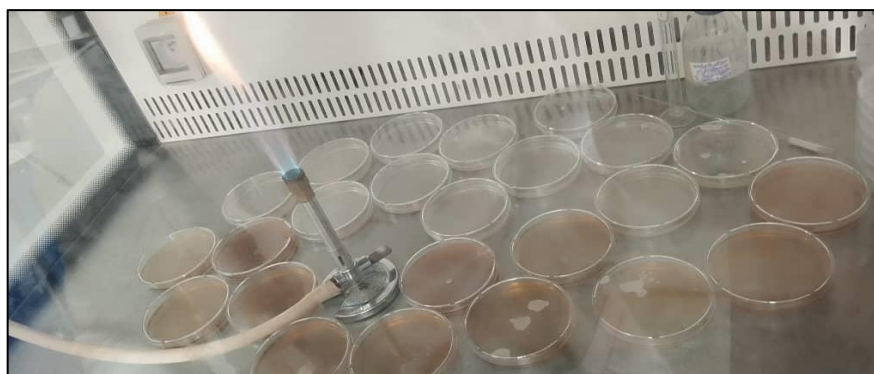


Figure 3.21 : milieu de gelose pda

9.3 Préparation de l'échantillon pour l'analyse

Pour étudier les bactéries et les champignons dans le sol et connaître leur nombre avant et après le traitement, nous procédons comme suit:

Préparation de 196 tubes à essai, chacun contenant 9 ml de NaCl, de milieu PDA (Potato Dextrose Agar) et de milieu gélosé nutritif.

Stérilisation de tous les milieux à l'autoclave.

Placer toutes les solutions dans l'autoclave et faire fonctionner le benzène pendant 15 minutes.

Désinfecter le lieu de travail avec de l'éthanol.

Couler les milieux PDA et gélosé nutritif dans des boîtes de Pétri.

Envelopper complètement les boîtes avec du papier aluminium et les placer au réfrigérateur pendant 24 heures pour refroidir et solidifier les milieux de culture.

Le jour suivant, désinfecter à nouveau le lieu de travail avec de l'éthanol et faire fonctionner le benzène pendant 15 minutes.

Préparer tous les matériels qui seront utilisés pendant le processus d'ensemencement (prélèvement des échantillons dans des boîtes stériles, micropipettes, anses d'inoculation, tubes à essai, boîtes de Pétri).

Se désinfecter les mains et porter des masques et des gants stériles.

Peser 1 g de chaque échantillon de sol.

Procéder à la dilution en plaçant 1 g dans un tube à essai contenant 9 ml de NaCl, bien agiter le mélange.

Prélever 1000 μ l du mélange avec une micropipette et le transférer dans un autre tube (2ème dilution), bien agiter.

Répéter la même opération pour les 3ème et 4ème dilutions.

Ensemencer une goutte de chaque dilution à la surface d'une boîte de Pétri et l'étaler sur toute la surface avec une anse en verre stérile.

Stériliser l'anse en verre en la passant à la flamme après l'avoir trempée dans l'alcool.

Répéter les mêmes étapes pour l'ensemencement des champignons.

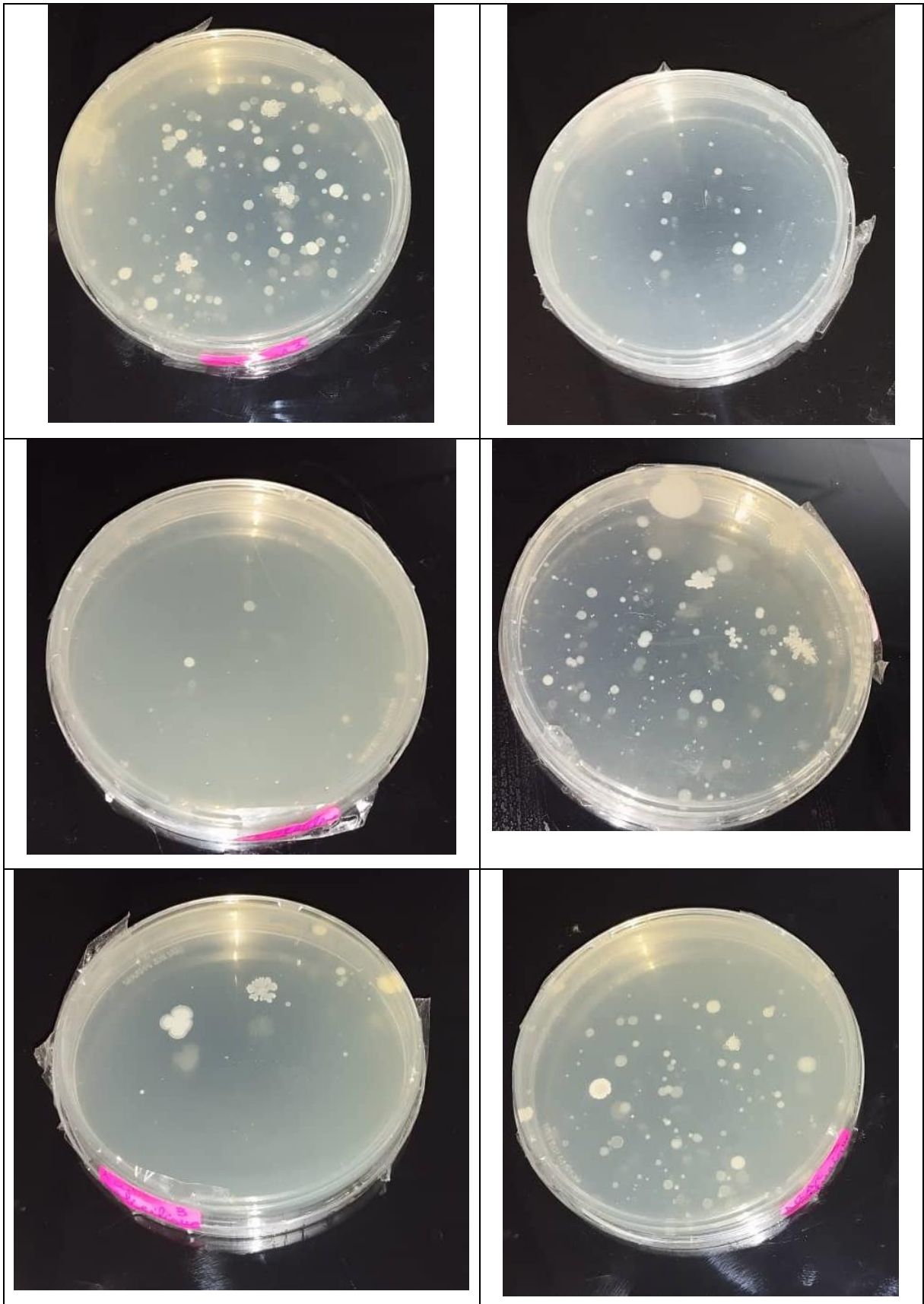
Après avoir ensemencé tous les échantillons, placer les boîtes de bactéries dans une étuve à 30°C pendant 24 heures, et les boîtes de champignons dans une étuve à 28°C pendant 5-6 jours.



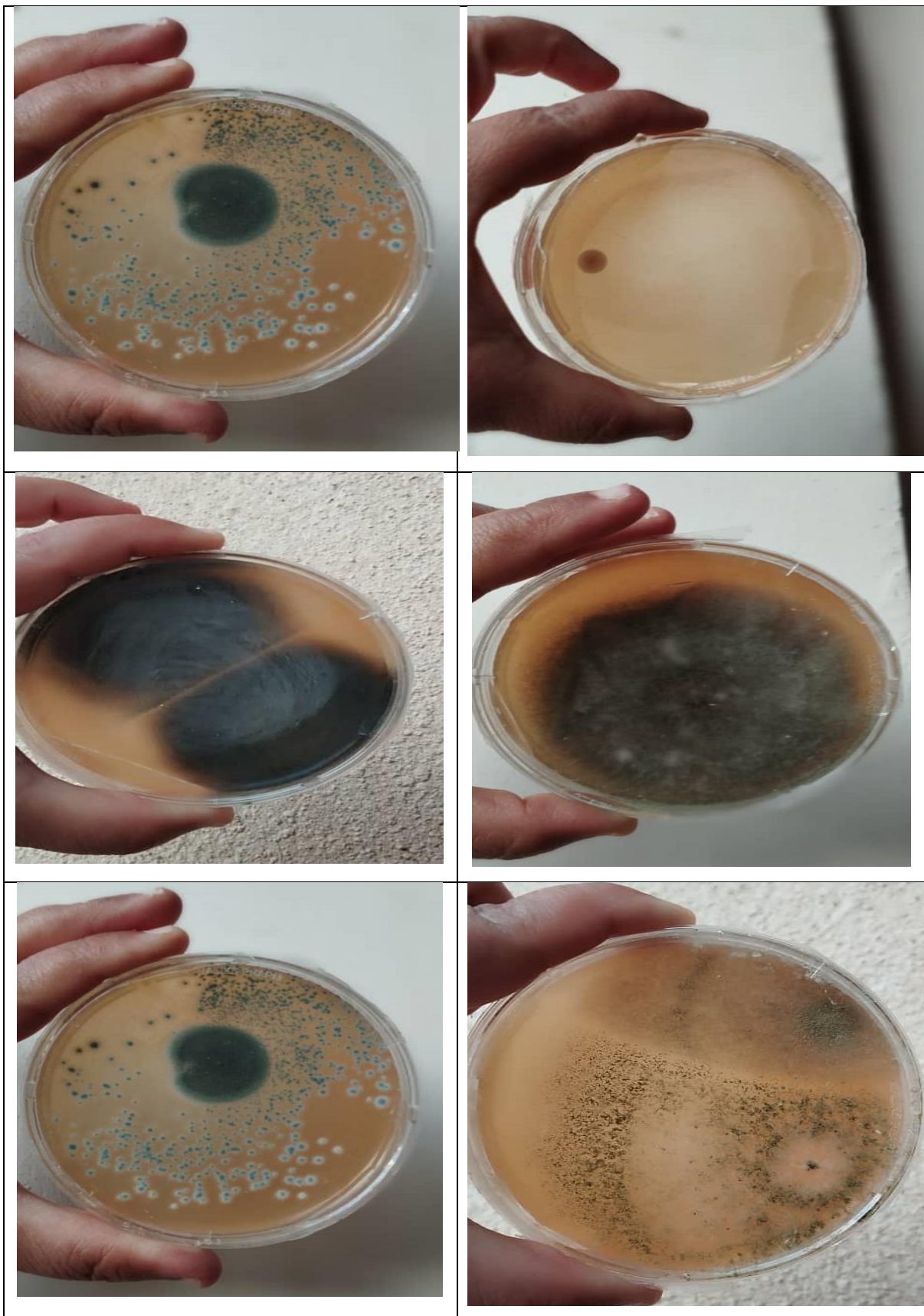
Figure 3.22 :dilution de solution

9.4 Observation de résultat

Quelques résultats pour les bactéries



Quelques résultats pour les champignons



10. Caractères morphologiques

Examen microscopique après coloration de Gram

La coloration reliée à la différence de structure chimique des parois cellulaires des bactéries.

Le protocole de coloration de Gram selon est le suivant:

- Préparer un frottis d'une culture bactérienne pure.
- Recouvrir le frottis violet de Gentiane; laisser agir 1 min, rincer à l'eau distillée.
- Verser du Lugol et le laisser agir pendant 1 min, rincer à l'eau distillée.
- Décolorer à l'alcool à 95%, entre 15 et 30s, rincer à l'eau distillée.
- Recolorer avec la Fushine pendant 10 à 30s, rincé à l'eau distillée.
- Sécher au-dessus de la flamme du bec Bunsen.
- Avec cette coloration double, les bactéries Gram positifs apparaissent en violet foncé
- Tandis que les bactéries Gram négatif sont colorées en rose

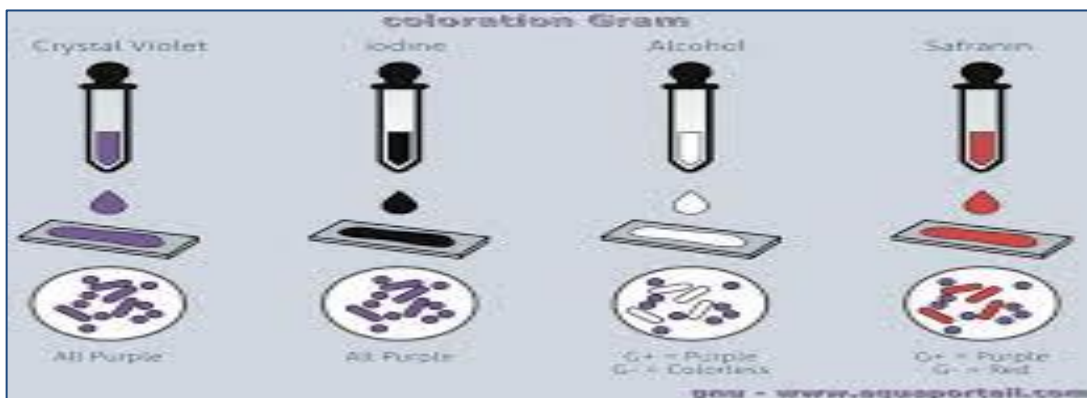


Figure 3.23 : Protocole utilise pour la coloration de GRAM

Chapitre 02 : Résultat et discussion

1. Résultat :

1.1 Dénombrement sur colonies :

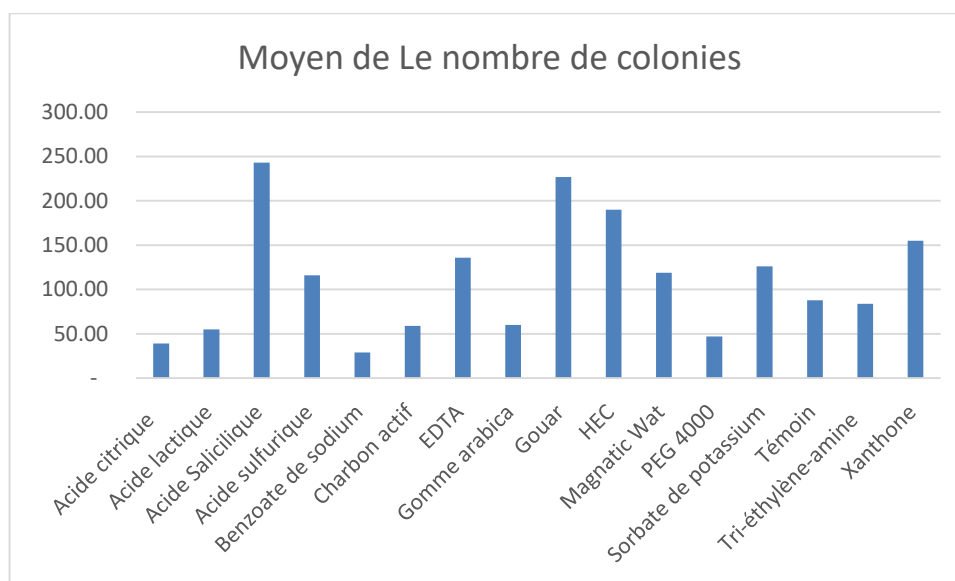


Figure 4.1 :Nombre de colonies

Ces résultats montrent des différences très importantes dans le nombre moyen de colonies entre les différents traitements appliqués sur le sol.

Le traitement à l'acide salicylique se démarque nettement avec 243 colonies en moyenne, suivi du gouar avec 227 colonies. Ces deux traitements semblent favoriser de manière significative le développement de colonies microbiennes dans le sol.

A l'inverse, les traitements donnant les nombres de colonies les plus faibles sont le benzoate de sodium (29 colonies), l'acide citrique (39 colonies) et le PEG 4000 (47 colonies). Ces produits pourraient avoir un effet inhibiteur ou défavorable sur les micro-organismes du sol.

La plupart des autres traitements ont des nombres de colonies dans une gamme intermédiaire, autour de 100-150 colonies en moyenne, comme l'acide sulfurique (116), l'eau magnétisée (119), le sorbate de potassium (126) ou l'EDTA (136).

Le sol non traité (témoin) présente 88 colonies en moyenne, ce qui est relativement faible comparé à certains traitements stimulants.

Ces écarts très marqués dans les dénombrements de colonies laissent supposer des impacts très contrastés des différents traitements sur l'activité biologique du sol. Certains

stimulent fortement les populations microbiennes tandis que d'autres semblent les inhiber par rapport au témoin.

1.2 Coloration de gram

L'apparition de bactéries Gram-positives dans tous les échantillons de couleur pourpre.

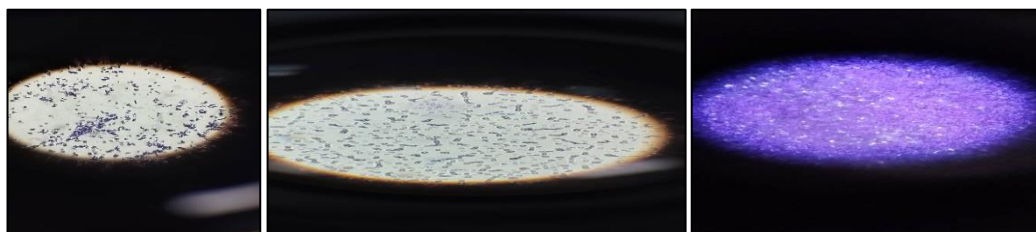


Figure 4.2 :Résultat de coloration de Gram

1.3 Dénombrement sur colonies fongiques :

Tableau 4.1: Résultat de colonies fongiques

Traitements	Nobre de colonies Repetition 1	Nobre de colonies Repetition 2	Nobre de colonies Repetition 3
Charbon actif	1	0	0
PEG4000	Charge élevé	0	1
Sorbate de potassium	Charge élevé	0	4
Magnatic wat	0	1	0
Acide sulfurique	0	0	0
Gouar	0	0	0
Acide lactique	0	0	Charge élevé
Gomme arabica	0	Charge élevé	0
Benzoat de soduim	Charge élevé	0	0
EDTA	0	0	0
Tri ethanl amine	Charge élevé	0	2
xanthone	Charge élevé	Charge élevé	Charge élevé
HEC	0	Charge élevé	0
Acide salicilque	19	Charge élevé	0
Acide citrique	1	0	7
Témoin	61	12	36

D'après le tableau présenté, il est possible d'interpréter les observations suivantes concernant l'activité fongique dans le sol dégradé après l'application des différents traitements:

1. Présence de colonies fongiques:

- Le témoin (sans traitement) a montré la présence de colonies fongiques dans toutes les répétitions, avec 61 colonies dans la répétition 1, 12 colonies dans la répétition 2 et 36 colonies dans la répétition 3.

- Certains traitements comme "Acide salicylique" (19 colonies dans la répétition 1), "Acide citrique" (1 colonie dans la répétition 1) et "Sorbate de potassium" (4 colonies dans la répétition 3) ont également permis la croissance de colonies fongiques, mais dans une moindre mesure que le témoin.

2. Charge fongique élevée:

- Pour plusieurs traitements, une "charge élevée" est mentionnée, ce qui peut indiquer une forte activité fongique ou la présence d'une biomasse fongique importante, sans quantification précise.

- Les traitements "PEG4000", "Sorbate de potassium", "Gomme arabica", "Benzoate de sodium", "Tri ethanolamine", "Xanthone" et "HEC" ont montré une charge fongique élevée dans au moins une des répétitions.

3. Absence de colonies fongiques:

- Certains traitements comme "Charbon actif", "Magnatic wat", "Acide sulfurique", "Gouar", "Acide lactique" et "EDTA" n'ont pas permis la croissance de colonies fongiques visibles dans les répétitions indiquées.

Il est important de noter que ces observations sont basées uniquement sur les données du tableau et ne fournissent pas d'informations quantitatives précises sur la biomasse fongique ou l'activité enzymatique. Des analyses complémentaires, telles que des mesures d'ergostérol ou d'activités enzymatiques, seraient nécessaires pour une évaluation plus complète de l'activité fongique.

De plus, il serait utile d'avoir des informations supplémentaires sur les conditions expérimentales, le type de sol et les doses des traitements pour mieux comprendre les raisons des différences observées entre les traitements et le témoin.

1.4 Variations de PH :

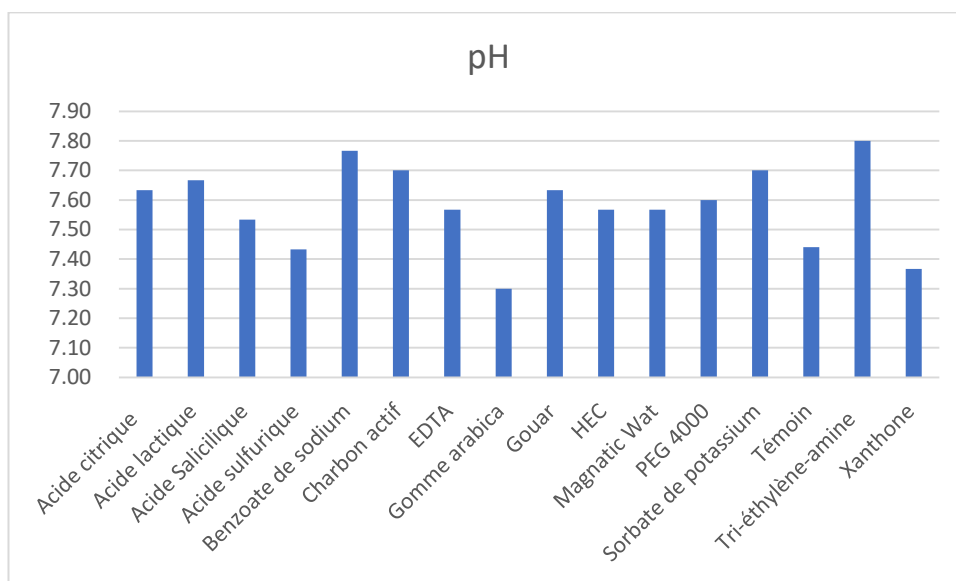


Figure 4.3 : variations de PH

Ces résultats mettent en évidence des variations notables du pH du sol en fonction des traitements appliqués, avec des valeurs s'échelonnant de 7,30 à 7,80.

Le traitement induisant le pH le plus alcalin (basique) est le tri-éthylène-amine avec un pH de 7,80. Viennent ensuite le benzoate de sodium (7,77), le sorbate de potassium (7,70) et le charbon actif (7,70).

À l'opposé, les traitements entraînant les pH les plus acides sont la gomme arabique (7,30), la xanthone (7,37) et l'acide sulfurique (7,43).

Le sol non traité (témoin) a un pH de 7,44, ce qui est légèrement inférieur à la moyenne générale de 7,58 pour l'ensemble des traitements.

Plusieurs traitements ont un pH très proche de 7,60 comme le PEG 4000, le HEC, l'eau magnétisée et l'EDTA.

Cette plage de variation du pH allant de 7,30 à 7,80 représente un écart d'une demi-unité de pH, ce qui est considérable pour un sol. De telles différences peuvent avoir des impacts importants sur la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes ainsi que sur l'activité microbienne du sol.

Les traitements basiques ou salines comme le tri-éthylène-amine ont logiquement tendance à augmenter le pH, tandis que les acides ont l'effet inverse de l'abaisser légèrement.

1.5 Conductivité de matériaux utilisation :

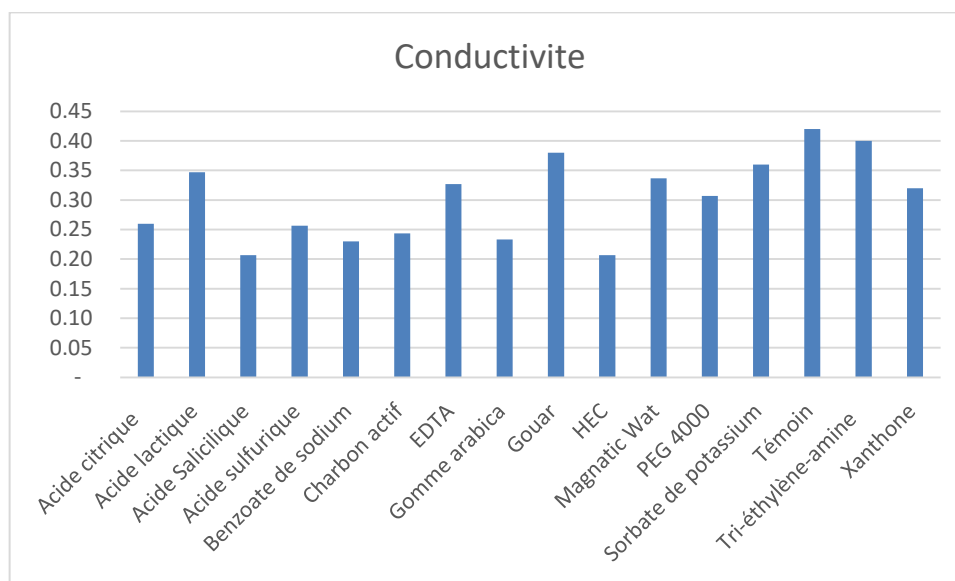


Figure 4.4 : Conductivité de matériaux

Ces résultats montrent des variations de la conductivité électrique en fonction des amendements apportés au sol. La conductivité est un indicateur de la salinité et de la teneur en sels solubles du sol.

Le sol non traité (témoin) présente la conductivité la plus élevée avec 0,42 mS/cm, ce qui suggère une salinité relativement importante.

Les traitements diminuant le plus la conductivité, et donc potentiellement la salinité, sont l'acide salicylique (0,21 mS/cm), le HEC (0,21 mS/cm) et le benzoate de sodium (0,23 mS/cm). Cela pourrait indiquer un effet dessalant de ces amendements.

A l'inverse, les traitements augmentant le plus la conductivité sont le gouar (0,38 mS/cm), le sorbate de potassium (0,36 mS/cm), l'acide lactique (0,35 mS/cm) et la tri-éthylène-amine (0,40 mS/cm). Une conductivité plus élevée est généralement signe d'un apport de sels solubles supplémentaires dans le sol.

La plupart des autres traitements ont des valeurs de conductivité intermédiaires, légèrement en-dessous ou au-dessus du témoin non traité.

Ces variations de conductivité laissent supposer des impacts contrastés des amendements sur la salinité du sol. Certains semblent avoir un effet dessalant appréciable, tandis que d'autres pourraient au contraire augmenter la teneur en sels

1.6 Dénombrement sur perles :

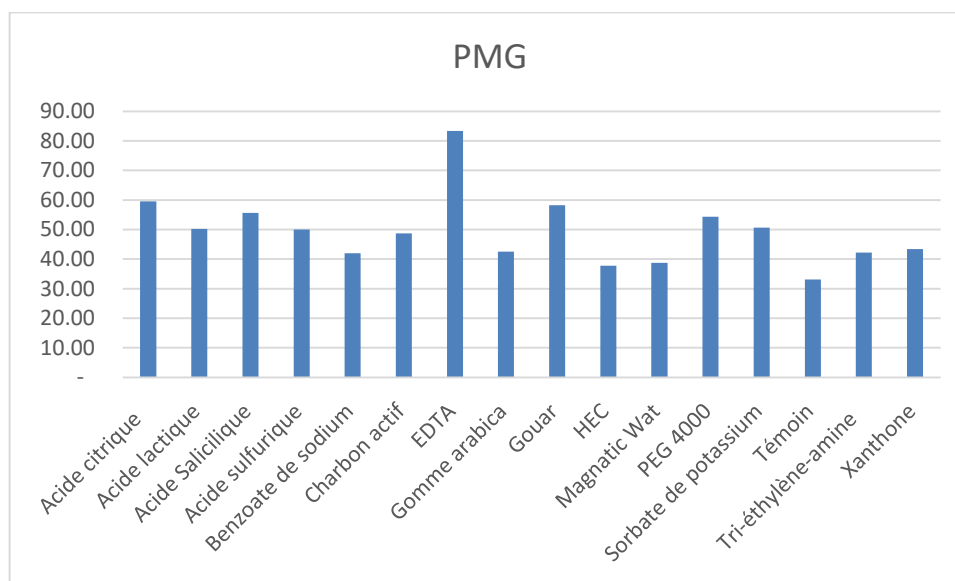


Figure 4.5 :Nombre de perles

Ces résultats montrent des différences très marquées du PMG entre les différents traitements appliqués au sol, avec des valeurs s'étalant de 33,08 g pour le témoin non traité à 83,38 g pour le traitement avec l'EDTA.

Le traitement avec l'EDTA se démarque nettement avec le PMG le plus élevé (83,38 g), suivi de l'acide citrique (59,55 g) et du gouar (58,19 g). Ces valeurs élevées de PMG indiquent un bon remplissage des grains et suggèrent un impact positif de ces traitements sur le rendement du triticale.

A l'inverse, les traitements donnant les PMG les plus faibles sont le témoin (33,08 g), le HEC (37,75 g), l'eau magnétisée (38,71 g) et la gomme arabique (42,53 g). Ces faibles valeurs de PMG pourraient être le signe d'un remplissage déficient des grains, probablement lié à des carences nutritionnelles ou un stress hydrique.

La plupart des autres traitements ont des valeurs de PMG intermédiaires, se situant autour de 50 g, à l'exception du PEG 4000 (54,33 g) et de la xanthone (43,43 g).

Ces différences très importantes dans le PMG selon les traitements laissent supposer des impacts variables sur le développement des plantes et leur productivité finale. Une analyse statistique appropriée permettrait de confirmer la significativité de ces écarts et d'identifier les meilleurs traitements.

Le PMG est un composant essentiel du rendement. Les valeurs extrêmes observées ici montrent donc le potentiel de certains traitements pour améliorer significativement ou au contraire réduire le rendement du triticale par rapport à une culture non traitée.

2. Discussions :

une interprétation globale des résultats pour les six paramètres : et nombre moyen de colonies microbiennes, coloration de gram), pH du sol, conductivité électrique , poids de mille grains (PMG), en tenant compte des différents traitements appliqués :

2.1 Nombre de colonies :

Le nombre moyen de colonies microbiennes varie énormément selon l'amendement, de 29 colonies pour le benzoate de sodium à 243 pour l'acide salicylique. Certains traitements stimulent donc fortement l'activité biologique du sol tandis que d'autres ont un effet inhibiteur marqué par rapport au témoin (88 colonies).

Dans l'ensemble, ces résultats mettent en évidence des impacts très contrastés des différents traitements sur les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol pouvant se répercuter sur le développement des cultures.

2.2 Coloration de gram +

La présence de ces bactéries dans le sol est un indicateur de la biodiversité et de la bonne santé du sol. Elles aident à décomposer les résidus végétaux et animaux et à les recycler en nutriments pour les plantes.

Les bactéries Gram-positives contribuent également à la formation de la structure granuleuse du sol et améliorent ses propriétés physiques et chimiques.

D'un autre côté, un très haut pourcentage de ces bactéries pourrait indiquer un problème dans le sol comme la pollution ou un déséquilibre environnemental.

C'est pourquoi la présence et le pourcentage de bactéries Gram-positives dans le sol sont étudiés comme indicateurs pour évaluer

2.3 Colonies fongiques :

Il est important de noter que ces observations sont basées uniquement sur les données du tableau et ne fournissent pas d'informations quantitatives précises sur la biomasse fongique ou

l'activité enzymatique. Des analyses complémentaires, telles que des mesures d'ergostérol ou d'activités enzymatiques, seraient nécessaires pour une évaluation plus complète de l'activité fongique.

De plus, il serait utile d'avoir des informations supplémentaires sur les conditions expérimentales, le type de sol et les doses des traitements pour mieux comprendre les raisons des différences observées entre les traitements et le témoin.

2.4 pH :

On observe des variations de pH allant de 7,30 (sol plus acide avec la gomme arabique) à 7,80 (sol plus alcalin avec le tri-éthylène-amine). Cet écart de 0,5 unité pH est conséquent pour un sol et peut impacter la disponibilité des éléments nutritifs. Les traitements basiques/salins tendent à augmenter le pH tandis que les acides l'abaissent légèrement.

2.5 Conductivité :

La conductivité électrique, liée à la salinité, est la plus élevée pour le sol non traité (0,42 mS/cm). Certains traitements comme l'acide salicylique ou le HEC permettent de bien la diminuer (0,21 mS/cm), ayant potentiellement un effet dessalant intéressant. D'autres comme le gouar, le sorbate de potassium ou la tri-éthylène-amine l'augmentent au contraire.

2.6 PMG :

Les valeurs de PMG varient grandement selon les traitements, avec l'EDTA permettant d'obtenir le PMG le plus élevé (83,38g) tandis que le sol non traité (témoin) a le PMG le plus faible (33,08g). Un PMG élevé est un indicateur de bon remplissage des grains et de meilleur rendement potentiel. Certains traitements comme l'EDTA, l'acide citrique ou le gouar semblent donc très favorables, contrairement au témoin, HEC ou l'eau magnétisée.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les pratiques agricoles durables (agriculture biologique, rotation des cultures, labour minimal, utilisation de fumier et compost) favorisent la vie microbienne du sol. Elles améliorent la biodiversité, l'activité des micro-organismes bénéfiques, la fertilité et la résilience des cultures. À l'inverse, l'agriculture conventionnelle intensive, utilisant beaucoup d'engrais chimiques et pesticides, nuit aux communautés microbiennes et à la santé des écosystèmes agricoles. Il est crucial d'adopter des systèmes agricoles régénératifs basés sur l'agroécologie pour préserver la biodiversité microbienne du sol, élément clé d'une agriculture durable. Une transition vers ces méthodes respectueuses du sol est nécessaire face aux défis environnementaux actuels.

Analyse des effets de différents traitements sur un sol cultivé en triticales, en examinant quatre paramètres principaux :

1. Poids de Mille Grains (PMG) :

Varie de 33,08 g (témoin non traité) à 83,38 g (EDTA). EDTA, acide citrique et guar donnent les meilleurs résultats. Le témoin, HEC et eau magnétisée donnent les plus faibles PMG.

2. pH du sol :

Varie de 7,30 à 7,80, la tri-éthylène-amine donne le pH le plus alcalin, la gomme arabique le plus acide. Le témoin a un pH de 7,44.

3. Conductivité électrique :

Indicateur de la salinité du sol, le témoin a la conductivité la plus élevée (0,42 mS/cm), l'acide salicylique et HEC réduisent le plus la conductivité (0,21 mS/cm), le guar et la tri-éthylène-amine l'augmentent.

4. Nombre moyen de colonies microbiennes :

Varie de 29 (benzoate de sodium) à 243 (acide salicylique). L'acide salicylique et le guar stimulent fortement l'activité microbienne. Le benzoate de sodium et l'acide citrique l'inhibent.

Les traitements ont des impacts très variés sur les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol, pouvant influencer significativement le développement et le rendement des cultures de triticales.

Références

Références

1. A. COMBEAU, P. S. e. G. B. (1970). l'etude du sol au laboratoire caracteristiques physiques, chimiques, mineralogiques et biologiques techniques l'ul'ales en a.pique. V. PARIS.
2. Ahlborg, U. G., et al. (1994). "Toxic equivalency factors for dioxin-like PCBs: Report on WHO-ECEH and IPCS consultation, December 1993." Chemosphere **28**(6): 1049-1067.
3. Anderson, I. C. and J. W. Cairney (2007). "Ectomycorrhizal fungi: exploring the mycelial frontier." FEMS microbiology reviews **31**(4): 388-406.
4. Arunrat, N., et al. (2022). "Soil microbial diversity and community composition in rice–fish co-culture and rice monoculture farming system." Biology **11**(8): 1242.
5. Banerjee, S. and M. G. Van Der Heijden (2023). "Soil microbiomes and one health." Nature Reviews Microbiology **21**(1): 6-20.
6. Belimov, A., et al. (1995). "Interaction between barley and mixed cultures of nitrogen fixing and phosphate-solubilizing bacteria." Plant and soil **173**: 29-37.
7. Bolan, N. (1991). "A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants." Plant and soil **134**: 189-207.
8. Borschinger, B. (2016). Démarche d'ingénierie écologique en santé des plantes: étude du rôle des couvre-sol végétaux des vergers dans l'émergence des maladies des arbres fruitiers causées par *Pseudomonas syringae*, Université d'Avignon.
9. Brenner, K., et al. (2008). "Engineering microbial consortia: a new frontier in synthetic biology." Trends in biotechnology **26**(9): 483-489.
10. Calonne, M. (2012). Impact des hydrocarbures aromatiques polycycliques sur le métabolisme lipidique et le transport du phosphore chez le champignon mycorhizien à arbuscules Rhizophagus irregularis, Université du Littoral Côte d'Opale.
11. Colla, G. and Y. Roupael (2019). Biostimolanti per una agricoltura sostenibile: cosa sono, come agiscono e modalità di utilizzo, Edizioni Informatore Agrario.
12. Dąbrowski, A., et al. (2004). "Selective removal of the heavy metal ions from waters and industrial wastewaters by ion-exchange method." Chemosphere **56**(2): 91-106.
13. Dommergues, Y. and F. Mangenot (1970). Ecologie microbienne du sol, Masson Paris.
14. Fernandez, X., et al. (2014). Hydrolats et eaux florales: vertus et applications, Vuibert.
15. Finney, D., et al. (2017). "Living cover crops have immediate impacts on soil microbial community structure and function." Journal of Soil and Water Conservation **72**(4): 361-373.
16. Fisk, A. T., et al. (1998). "Accumulation and depuration of sediment-sorbed C12-and C16-polychlorinated alkanes by oligochaetes (*Lumbricus variegatus*)." Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal **17**(10): 2019-2026.

17. Fitouri, S. D. (2011). Diversités phénotypique et moléculaire des microsymbiotes du Sulla du nord (*Hédysarum Coronarium* L.) et sélection de souches rhizobiales efficaces, PhD dissertation.
18. Franke-Snyder, M., et al. (2001). "Diversity of communities of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi present in conventional versus low-input agricultural sites in eastern Pennsylvania, USA." Applied Soil Ecology **16**(1): 35-48.
19. Gauthier, M. and M. Champagne (2017). "Évaluation de la Santé Globale des Sols."
20. Hartmann, M., et al. (2015). "Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming." The ISME journal **9**(5): 1177-1194.
21. Horrigan, L., et al. (2002). "How sustainable agriculture can address the environmental and human health harms of industrial agriculture." Environmental health perspectives **110**(5): 445-456.
22. Hussain, S. (2015). Effects of allelopathic crop water extracts with low doses of herbicides on weeds and yield of rainfed wheat and groundnut, Arid Agriculture University Rawalpindi.
23. Jeffries, P., et al. (2002). "Application of arbuscular mycorrhizal fungi in the revegetation of desertified Mediterranean ecosystems." Mycorrhizal Technology in Agriculture: From Genes to Bioproducts: 151-174.
24. Jeffries, P., et al. (2003). "The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility." Biology and fertility of soils **37**: 1-16.
25. Jnawali, A., et al. (2015). "Role of Azotobacter in soil fertility and sustainability—a review." Adv. Plants Agric. Res **2**(6): 1-5.
26. Kaye, J. P. and S. C. Hart (1997). "Competition for nitrogen between plants and soil microorganisms." Trends in Ecology & Evolution **12**(4): 139-143.
27. Khan, M. S., et al. (2009). "Role of phosphate solubilizing microorganisms in sustainable agriculture—a review." Sustainable agriculture: 551-570.
28. Kumar, M. S., et al. (2018). "Role of bio-fertilizers towards sustainable agricultural development: A review." Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry **7**(6): 1915-1921.
29. Lardjane, N. and N. Belhaneche-Bensemra (2021). "Impact study of new formulations based on plasticized polyvinyl chloride (PVC)." Polymers from Renewable Resources **12**(1-2): 3-18.
30. Lehman, R. M., et al. (2015). "Understanding and enhancing soil biological health: the solution for reversing soil degradation." Sustainability **7**(1): 988-1027.
31. Lehmann, J. and S. Joseph (2009). "Biochar for environmental management: science and technology. Earthscan." London, Sterling.
32. Mäder, P., et al. (2002). "The Ins and Outs of Organic Farming. FiBL response to the letter of Goklany in Science Vol 298." Science **298**(5600): 1889-1890.
33. Mahdi, S. S., et al. (2010). "Bio-fertilizers in organic agriculture." Journal of phytology **2**(10): 42-54.

34. Meena, V. S., et al. (2015). "Potassium solubilizing rhizobacteria (KSR): isolation, identification, and K-release dynamics from waste mica." Ecological Engineering **81**: 340-347.
35. Mohammadi, K. and Y. Sohrabi (2012). "Bacterial biofertilizers for sustainable crop production: a review." ARPN J Agric Biol Sci **7**(5): 307-316.
36. Mueller, T., et al. (1998). "Turnover of carbon and nitrogen in a sandy loam soil following incorporation of chopped maize plants, barley straw and blue grass in the field." Soil biology and Biochemistry **30**(5): 561-571.
37. Murray, R., et al. (2009). "US Environmental Protection Agency uses operations research to reduce contamination risks in drinking water." Interfaces **39**(1): 57-68.
38. Nur, M., et al. (2014). "The use of biochar fortified compost on calcareous soil of East Nusa Tenggara, Indonesia: 2. Effect on the yield of maize (*Zea mays* L) and phosphate absorption." American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture: 105-112.
39. Offroy-Chave, M. (2015). Ingénierie agroécologique et santé des cultures: Conception innovante de systèmes de cultures recourant aux plantes mycorrhizotrophes pour la bioprotection de la tomate contre le flétrissement bactérien, Antilles-Guyane.
40. Ortaş, I. (2008). "Field trials on mycorrhizal inoculation in the Eastern Mediterranean horticultural region."
41. Park, R. A., et al. (2008). "AQUATOX: Modeling environmental fate and ecological effects in aquatic ecosystems." Ecological Modelling **213**(1): 1-15.
42. Parniske, M. (2008). "Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses." Nature Reviews Microbiology **6**(10): 763-775.
43. Pathak, D., et al. (2017). "Biofertilizer application in horticultural crops." Microorganisms for Green Revolution: Volume 1: Microbes for Sustainable Crop Production: 215-227.
44. Paul, E. and F. Clark (1996). "Soil microbiology and biochemistry."
45. Peoples, M. B. and E. T. Craswell (1992). "Biological nitrogen fixation: investments, expectations and actual contributions to agriculture." Plant and soil **141**: 13-39.
46. Poole, P., et al. (2018). "Rhizobia: from saprophytes to endosymbionts." Nature Reviews Microbiology **16**(5): 291-303.
47. Prajapati, K. and H. Modi (2016). "Growth promoting effect of potassium solubilizing *Enterobacter hormaechei* (KSB-8) on cucumber (*Cucumis sativus*) under hydroponic conditions." Int. J. Adv. Res. Biol. Sci **3**(5): 168-173.
48. Ratsiatosika, O. H. (2018). Vers de terre et services écosystémiques en riziculture pluviale à Madagascar. Connaissances des processus et propositions d'innovations agricoles, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO.
49. Rosenstock, T. S., et al. (2014). "Agroforestry with N₂-fixing trees: sustainable development's friend or foe?" Current Opinion in Environmental Sustainability **6**: 15-21.
50. Rosner, B. A. (2006). Fundamentals of biostatistics, Thomson-Brooks/Cole Belmont, CA.

51. Rotillon, G. (2019). Economie des ressources naturelles, La découverte.
52. Saadaoui, N. (2023). Impact stimulateur des PGPR sur la croissance végétale et sur les communautés bactériennes bénéfiques cultivables du microbiote racinaire du blé dur.
53. Saha, M., et al. (2016). "Identification and characterization of potassium solubilizing bacteria (KSB) from Indo-Gangetic Plains of India." Biocatalysis and agricultural biotechnology **7**: 202-209.
54. Sarter, S. (2010). Quel enseignement de l'intensification aquacole pour mieux gérer l'emploi des antibiotiques en crevetticulture?, Direction de la recherche [Madagascar].
55. Sattar, A., et al. (2019). "Perspectives of potassium solubilizing microbes in sustainable food production system: A review." Applied soil ecology **133**: 146-159.
56. Shinde, R., et al. (2019). "Soil conditioners." AGRICULTURE & FOOD: e-newsletter **1**(10): 1-5.
57. Tonukari, N. J. (2004). "Cassava and the future of starch." Electronic journal of biotechnology **7**(1): 5-8.
58. Van Dommelen, A. and J. Vanderleyden (2007). Associative nitrogen fixation. Biology of the nitrogen cycle, Elsevier: 179-192.
59. Vinale, F., et al. (2008). "Trichoderma–plant–pathogen interactions." Soil biology and Biochemistry **40**(1): 1-10.
60. Viscardi, S., et al. (2016). "Assessment of plant growth promoting activities and abiotic stress tolerance of Azotobacter chroococcum strains for a potential use in sustainable agriculture." Journal of soil science and plant nutrition **16**(3): 848-863.
61. Wang, F. (2017). "Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in mining-impacted sites and their contribution to ecological restoration: Mechanisms and applications." Critical Reviews in Environmental Science and Technology **47**(20): 1901-1957.
62. Wani, S. (1990). "Inoculation with associative nitrogen-fixing bacteria: Role in cereal grain production improvement." Indian Journal of Microbiology **30**(4): 363-393.
63. Weissenhorn, I. and C. Külling (2008). "Real case applications of commercial mycorrhiza products in the Netherlands:" prove us that mycorrhiza works and we will use it."."
64. Whalen, J. K. and C. Hamel (2004). "Effects of key soil organisms on nutrient dynamics in temperate agroecosystems." Journal of crop improvement **11**(1-2): 175-207.
65. Winogradsky, S. (1950). Microbiologie du sol, LWW. **69**: 417.
66. Woo, S. L. and O. Pepe (2018). "Microbial consortia: promising probiotics as plant biostimulants for sustainable agriculture." Frontiers in plant science **9**: 428205.
67. Zara-Meylan, V. (2016). "Quelles conceptions temporelles pour analyser l'activité? Une proposition issue de recherches en ergonomie dans l'horticulture." Activités **13**(13-1).

68. Zimmer, S., et al. (2016). "Effects of soybean variety and Bradyrhizobium strains on yield, protein content and biological nitrogen fixation under cool growing conditions in Germany." European Journal of Agronomy **72**: 38-46.