الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Université Ferhat Abbas Sétif 1
Faculté des Sciences de la
Nature et de la Vie

جامعة فرحات عباس، سطيف1
كلية علوم الطبيعة و الحياة

DÉPARTEMENT D'ÉCOLOGIE & ENVIRONNEMENT

N°……/SNV/**2026**

Mémoire

Présentée par

Halima Zouaoui

Pour l'obtention du diplôme de

Master

Filière : Écologie & Environnement.

Spécialité : Biodiversité et environnement.

Thème

Effet des systèmes de culture durables sur la biodiversité microbienne des sols agricoles(travail à caractére bibliographique)

Soutenue publiquement le 28/06/2026

Devant le Jury

Présidente :**Ramdane**	**Esma**	**MCB**	**UFA Sétif-1**
Promotrice :**Daroui**	**Atika**	**MCA**	**UFA Sétif-1**
Examinatrice :**Guerroudj**	**Fatima Zohra**	**MCB**	**UFA Sétif-1**

2025/2026

Abstract

Sustainableagricultural systems – includingorganic farming, biodynamic agriculture, conservation agriculture, and diversified rotations – are recognized for theirpotential to restoreecosystem services. However, theireffects on soilmicrobialbiodiversityremaininsufficientlycharacterized in the scientificliterature. This study proposes a systematic review and meta-analysis to evaluate how thesesustainablepractices influence the structure and diversity of soilmicrobialcommunities.

We synthesizedresults from publishedstudiesexaminingmicrobialdiversity indices (Shannon H', Simpson, Chao1), community profiles (Bray-Curtis, UniFrac), and microbial biomasses (microbial carbon and microbial nitrogen), using culture-dependent and culture-independentmethods (PLFA, 16S rRNA metabarcoding, ITS metabarcoding, and FISH). Our preliminaryresults show that significanteffects of sustainablepractices on microbialbiodiversityemerge after five or more years of implementation, with soil pH modification and increasedorganic carbon as key mediatingmechanisms. Sustainable systems favoroligotrophs (notablyAcidobacteria) at the expense of copiotrophs (Proteobacteria), reflecting a less labile-nutrient environment. Effectsizesvaryaccording to the index used (median Shannon: 0.036; Bray-Curtis: 0.741), highlighting the critical importance of methodologicalchoice.

This quantitative synthesisprovides an integrative perspective on the mechanisms by whichsustainableagriculturalpractices restructure soilmicrobialecosystems, therebystrengthening the empiricalbasis for agricultural and environmental policies supporting the agroecological transition.

Keywords Microbial biodiversity, Agricultural soils, Sustainable farming systems, Organic farming, Conservation agriculture, Biodynamic agriculture, Diversified crop rotations, Microbial biomass, Bacterial diversity, Soil organic matter, Soil pH, Enzymatic activity, 16S rRNA sequencing, High-throughput sequencing, Meta-analysis, Beta diversity, Shannon index, Microbial richness, Copiotrophic bacteria, Ecosystem function

الملخص

تُعرف النظم الزراعية المستدامة – بما في ذلك الزراعة العضوية، والزراعة البايوديناميكية، والزراعة الحافظة، والتناوبات المتنوعة – بقدرتها على استعادة الخدمات البيئية. غير أن تأثيرها على التنوع الميكروبي للتربة لا يزال غير محدد بشكل كافٍ في الأدبيات العلمية. تقدم هذه الدراسة مراجعة منهجية وتحليلاً تلويًا لتقييم كيفية تأثير هذه الممارسات الزراعية المستدامة على بنية وتنوع المجتمعات الميكروبية في التربة.

قمنا بتجميع نتائج الدراسات المنشورة التي بحثت في مؤشرات التنوع الميكروبي (Simpson،Shannon H' ، Chao1)، وملفات المجتمعات الميكروبية (UniFrac،Bray-Curtis)، والكتلة الحيوية الميكروبية (الكربون الميكروبي والنيتروجين الميكروبي)، باستخدام طرق تعتمد على الزراعة وأخرى مستقلة عنها (PLFA، والاستعراف الجيني للـ16 S rRNA، والاستعراف الجيني للـITS، والتألق الهجيني الموضعي FISH). تظهر نتائجنا الأولية أن التأثيرات الكبيرة للممارسات المستدامة على التنوع الميكروبي تظهر بعد خمس سنوات أو أكثر من التطبيق، مع تعديل درجة حموضة التربة وزيادة الكربون العضوي كآليتين وسيطتين رئيسيتين. تعزز النظم المستدامة الكائنات قليلة التغذية (خاصة Acidobacteria) على حساب الكائنات متعددة التغذية (Proteobacteria)، مما يعكس بيئة أقل غنى بالمغذيات سريعة التحلل. تختلف أحجام التأثير حسب المؤشر المستخدم (متوسط Shannon الوسيطي: 0.036؛ Bray-Curtis: 0.741)، مما يبرز الأهمية الحاسمة للاختيار المنهجي.

يقدم هذا التركيب الكمي منظورًا تكامليًا حول الآليات التي تعيد من خلالها الممارسات الزراعية المستدامة تشكيل النظم البيئية الميكروبية للتربة، مما يعزز القاعدة التجريبية للسياسات الزراعية والبيئية الداعمة للانتقال الإيكولوجي الزراعي.

الكلمات المفتاحية :

التنوع البيولوجي الميكروبي، التربة الزراعية، أنظمة الزراعة المستدامة، الزراعة العضوية، الزراعة الحفاظية، الزراعة البيوديناميكية، الدورات المحصولية المتنوعة، الكتلة الحية الميكروبية، تنوع البكتيريا، المادة العضوية في التربة، درجة حموضة التربة، النشاط الإنزيمي، تسلسل الحمض الريبوسومي 16S، التسلسل عالي الإنتاجية، التحليل البعدي، التنوع بيتا، مؤشر شانون، ثراء الميكروبات، البكتيريا المحبة للمغذيات، الوظيفة الإيكولوجية

Résumé

Les systèmes agricoles durables – incluant l'agriculture biologique, l'agriculture biodynamique, l'agriculture de conservation et les rotations diversifiées – sont reconnus pour leur potentiel à restaurer les services écosystémiques. Toutefois, leurs effets sur la biodiversité microbienne des sols demeurent insuffisamment caractérisés dans la littérature scientifique. Cette analyse comparative propose une revue systématique et une méta-analyse visant à évaluer comment ces pratiques influencent la structure et la diversité des .communautés microbiennes édaphiques

Nous avons synthétisé les résultats d'études publiées examinant les indices de diversité microbienne (Shannon H', Simpson, Chao1), les profils de communautés (Bray-Curtis, UniFrac) ainsi que les biomasses microbiennes (carbone microbien et azote microbien), en mobilisant des méthodes culturales et indépendantes de la culture (PLFA, métabarcoding 16S rRNA, métabarcoding ITS et FISH). Nos résultats préliminaires montrent que les effets significatifs des pratiques durables sur la biodiversité microbienne émergent après cinq ans ou plus de mise en œuvre, avec une modification du pH du sol et une augmentation du carbone organique comme principaux mécanismes médiateurs. Les systèmes durables favorisent les oligotrophes (notamment Acidobacteria) au détriment des copiotrophes (Proteobacteria), traduisant un environnement moins riche en nutriments labiles. Les tailles d'effet varient selon l'indice utilisé (médiane de Shannon : 0,036 ; Bray-Curtis : 0,741), .soulignant l'importance déterminante du choix méthodologique

Cette analyse comparative offre une perspective intégrative sur les mécanismes par lesquels les pratiques agricoles durables restructurent les écosystèmes microbiens édaphiques, renforçant ainsi la base empirique pour l'élaboration de politiques agricoles et environnementales en faveur de la transition agroécologique

Mots-clés: Biodiversité microbienne, Sols agricoles, Systèmes de culture durables, Agriculture biologique, Agriculture de conservation, Agriculture biodynamique, Rotations diversifiées, Biomasse microbienne, Diversité bactérienne, Matière organique du sol, pH du sol, Activité enzymatique, 16S rRNA, Séquençage haut débit, Méta-analyse, Diversité bêta, Indice Shannon, Richesse microbienne, Bactéries copiotrophes, Fonction écosystémique

Remerciements
Dédicace
Résumé
Liste des abréviations
Liste des Figures
Liste des Tableaux

SOMMAIRE

Introduction 1

Chapitre I:la biodiversité microbienne des sols

Définitions et enjeux 15

1Définition et composantes du sol 16

1.1 Définition du sol 17

1.2 Composantes du sol 6

2. Groupes fonctionnels : bactéries, champignons, archées et protozoaire 20

2.1 Les Bactéries 21

2.2 Les Champignons (Mycètes) 22

2.3 Les Archées (Archaea) 23

2 .4 Les Protozoaires 24

3. Rôles écosystémiques des microorganismes du sol : cycles biogéochimiques, fertilité des sols et croissance des plantes 24

3.1 Le cycle du carbone et la décomposition de la matière organique 25

3.2 Le cycle de l'azote 26

3.3 Le cycle du phosphore 28

3.4 La rhizosphère 30

3.5 Suppression des maladies et protection des plantes 31

3.6. Formation et stabilisation de la structure du sol 32

3.7 Croissance et nutrition des plantes 33

3.8 Synthèse : Interdépendance entre diversité et fonction 35

4. Analyse comparative des systémes agricoles et implications microbiennes 35

4.1 Caractéristiques et impacts des systèmes durables sur la biologie du sol 36
4.2 Prédictions quantitatives : Le pont théorique vers les données: 38
4.3 Nuances critiques et limites de convergence des systèmes durables : 39

CHAPITRE II MÉTHODES DE MESURE DE LA BIODIVERSITÉ MICROBIENNE DES SOLS

2.1 L'hétérogénéité méthodologique comme défi 41
2.2 Indices et concepts de diversité 41
2.3 Méthodes de caractérisation des communautés microbiennes 43
2.4 standardisation et comparabilité 46
2.5 limites et biais méthodologiques 47
2.6 Sélection des méthodes pour la méta-analyse 48

Chapitre III: Analyse comparative de la biodiversité microbienne du sol sous pratiques agricoles durables

3.1 Méthodes 51
3.2 Résultats 53
3.3 Discussion 61

Chapitre IV:Discussion générale

4.1Synthèse des apports de chaque chapitre 67
4.2Interprétation intégrée : de la théorie aux mécanismes 68
4.3 Implications pour les quatre systèmes agricoles durables 68
4.4 Convergences et consensus au-delà des divergences méthodologiques 69
4.5 Limitations de ce travail et directions futures 70
4.6 Implications pour l'agroécologie et la politique agricole 71
Conclusion Générale 72
Références bibliographiques 77

Introduction Générale

Le sol est la couche supérieure de la croûte terrestre, transformée par des processus climatiques, physiques, chimiques et biologiques. Bien plus qu'un simple substrat physique il constitue un écosystème complexe et dynamique considéré comme l'un des plus importants réservoirs de diversité biologique de notre planète **(Swift et *al*., 1998 ; Jangid et *al*., 2010)**. Au cœur de cet écosystème se trouvent les communautés microbiennes (bactéries, champignons, archées et protozoaires) essentielles au fonctionnement et à la fertilité du sol **(Nannipieri et *al*., 2017 ; Hartmann & Six, 2022).**

Ces communautés microbiennes jouent des rôles pivots dans les processus écosystémiques majeurs : cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote et du phosphore **(Schimel & Schaeffer, 2012 ; Frouz, 2017)** décomposition de la matière organique, formation de la structure du sol, nutrition des plantes et suppression des pathogènes **(Bertola et *al*., 2021 ; Wagg et *al*., 2021)**. Elles réagissent rapidement aux changements des conditions du sol approvisionnement en matière organique, pH, teneur en eau **(Silva et *al*., 2010 ; Bååth et *al.*, 1995)** ce qui en fait des indicateurs sensibles de la santé des sols. La santé et la résilience des écosystèmes agricoles dépendent ainsi intrinsèquement de la richesse et de la fonctionnalité de ce microbiome édaphique.

Or, l'agriculture intensive caractérisée par le labour profond, les monocultures prolongées et l'utilisation massive d'engrais de synthèse et de pesticides. a profondément altéré les propriétés biologiques des sols. Une fertilisation exclusivement minérale exerce une forte pression de sélection sur les communautés microbiennes réduisant leur diversité au profit d'espèces spécialistes **(Hu et *al*., 2020)**. Cette dégradation compromet la productivité à long terme et réduit la capacité des sols à fournir des services écosystémiques vitaux : régulation climatique, cycle des nutriments, purification de l'eau **(Hartmann & Six, 2022 ; Bender et *al*., 2021)**. À l'échelle mondiale un quart des sols agricoles sont estimés dégradés compromettant les services écosystémiques qui en dépendent **(Wagg et *al*., 2021)**.

Face à ces constats une transition vers des systèmes de culture durables s'impose. Les systèmes de culture durables (agriculture biologique, biodynamique, conservation des sols et rotations diversifiées) proposent des approches alternatives reposant sur des principes agronomiques communs : favoriser les apports en matière organique, réduire les perturbations physiques et chimiques du sol, et augmenter la diversité végétale **(Rojas-García et *al*., 2024).** L'agriculture biologique en excluant les intrants chimiques de synthèse, favorise une biomasse microbienne plus élevée et une activité enzymatique accrue **(Lori et *al*., 2017).**

L'agriculture de conservation par le non-labour préserve la structure des agrégats du sol et les réseaux des champignons mycorhiziens **(Hartmann & Six, 2022)**.

Les rotations culturales diversifient les substrats carbonés disponibles via les exsudats racinaires, stimulant la richesse des communautés fongiques **(Zhao et *al*., 2025)**.

Cependant, ces effets varient selon les contextes pédoclimatiques et les méthodes de mesure employées rendant les comparaisons entre études difficiles **(Morugán-Coronado et *al*., 2025)**. La question centrale est donc : dans quelle mesure ces systèmes influencent-ils la biodiversité microbienne des sols agricoles et quels mécanismes biologiques sous-tendent ces effets ? Pour répondre à cette question une approche comparative et systématique s'impose.

Bien que des études empiriques et des analyses synthétiques se multiplient une comparaison systématique des approches et résultats entre études majeures peut éclairer les consensus scientifiques et les divergences méthodologiques. Ce mémoire examine deux publications fondamentales : une méta-analyse globale **(Lori et *al*., 2017**)synthétisant 56 études et 149 comparaisons à l'échelle mondial et une étude empirique récente **(Mondaca et *al*., 2024)** fournissant des données détaillées sur plusieurs systèmes durables. Ces deux articles offrent des perspectives complémentaires : l'une synthétise les données à grande échelle l'autre analyse les mécanismes détaillés.

Le mémoire se propose de synthétiser et d'évaluer les effets des pratiques agricoles durables sur la composition la structure et la fonctionnalité des communautés microbiennes du solen mettant l'accent sur les mécanismes médiateurs (matière organique du sol, pH) et les variations contextuelles. Sur la base de ces deux publications majeures nous comparerons les résultats pour les principaux indicateurs de la biodiversité microbienne (richesse, indices de diversité, biomasse, activité enzymatique) afin de mettre en évidence les mécanismes biologiques par lesquels les pratiques durables modulent ces communautés. Enfin, nous analyserons les implications de ces données pour le développement d'une agriculture plus résiliente et respectueuse de l'environnement. Ce travail entièrement théorique est structuré selon la méthode IMRAD (Introduction, Méthodes, Résultats et Discussion).