



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Téliidji- Laghouat

FACULTÉ : SCIENCES

DÉPARTEMENT : SCIENCES AGRONOMIQUES

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par : Gasmi Fatna

DOMAINE : SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE (SNV)

FILIÈRE : SCIENCES AGRONOMIQUES

OPTION : PROTECTION DES VÉGÉTAUX

Thème

Contribution à l'étude de la microflore bactérienne dans quelques exploitations conventionnelles des communes de Laghouat et d'El Assafia

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
ROUGUI Tahar	MAA	Président
MARFOUA Meriem	MCA	Examineur
MOULAI Adel	MAA	Rapporteur
AMEUR Djamila	MAA	Co-rapporteur

Promotion : juillet – 2025



REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous remercions Allah, le Tout-Puissant et Miséricordieux, de nous avoir permis de mener à bien cette étude.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos encadreur et co-encadreur **M. MOULAI ET Mme AMEUR** pour leurs disponibilités, accompagnement, rigoureux et conseils avisés tout au long de ce travail.

Nous remercions l'ensemble du personnel du Département des Sciences Agronomiques pour leur assistance et leur collaboration durant cette période.

Nos remerciements s'adressent également aux agriculteurs impliqués dans ce travail, relevant du dispositif public géré par la Coopérative des Céréales et des Légumineuses Secs (CCLS), pour leur accueil et leur précieuse coopération sur le terrain.

Nous adressons aussi nos sincères remerciements aux ingénieurs agronomes du laboratoire pour leur appui technique et leur disponibilité tout au long des travaux pratiques.

Un merci particulier à l'étudiant **Adel Djaarnia** pour sa contribution et son aide dans la réalisation de cette étude. Enfin, nous exprimons toute notre reconnaissance aux membres du jury,

M. ROUIGUI Tahar et **Mme MARFOUA Meriem**, pour l'honneur qu'ils nous font en évaluant ce modeste travail, ainsi qu'à toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont participé à sa réussite.

Merci à tous.



DÉDICACE

J'adresse ce modeste travail :

À la mémoire de mon père bien-aimé **Mohamed**,

Qu'Allah lui accorde Sa miséricorde et lui ouvre les portes de Son vaste paradis. Tu restes à jamais vivant dans mon cœur et mes prières.

À ma chère mère

Pour ton amour infini, ta tendresse et ton soutien inestimable dans chaque étape de ma vie.

À mes sœurs adorées **Charifa, Khadra, Hanen**,

Et à mes frères **Belkacem** et **Bouzid**,

Merci pour votre affection, votre présence rassurante et votre encouragement constant.

À ma belle-sœur **Oum Lekhir**

Pour votre gentillesse, vos attentions sincères et votre aide précieuse.

À notre petite princesse **Keltoum**,

Ta joie et ton innocence ont égayé mes journées les plus chargées.

À mes amies fidèles **Jamila** et **Siham**,

Pour votre écoute, vos sourires et votre belle amitié.

Et tout particulièrement à mon fiancé,

Pour ta présence, ton soutien, ta patience et ta foi en moi.

À toute ma famille et à tous ceux qui m'ont soutenue de près ou de loin,

Ce travail vous est dédié avec amour et gratitude.

Résumé

Cette étude évalue la diversité microbienne fonctionnelle des sols en agriculture conventionnelle dans les communes de Laghouat et El Assafia, situées en zone aride algérienne. En adaptant le cadre conceptuel Biofunctool® aux conditions pédoclimatiques locales, cette investigation exploratoire porte sur cinq exploitations conventionnelles caractérisées par l'usage d'intrants chimiques et de produits phytosanitaires.

L'analyse de sept fonctions microbiennes clés révèle des variations significatives de diversité effective (indices Hill N_1 2,295-2,549, Shannon 0,831-0,936) entre exploitations, avec EC3 présentant la diversité la plus élevée et EC5 la plus faible. Les résultats mettent en évidence des mécanismes complexes d'interaction entre pratiques agricoles et communautés microbiennes : les amendements organiques stimulent simultanément la dénitrification ($\rho = 0,71$) et la fixation symbiotique ($\rho = 0,71$), tandis que la fertilisation azotée réprime massivement la fixation d'azote ($\rho = -0,89$).

L'impact des traitements phytosanitaires se traduit par une corrélation négative avec la richesse fonctionnelle ($\rho = -0,56$), avec des réductions de diversité selon l'intensité des traitements. Particulièrement préoccupante est la très faible densité de bactéries solubilisatrices de phosphore (0,2% de la microflore), révélant une dépendance critique aux intrants externes.

L'analyse multivariée révèle une structuration remarquable avec 78,9% de variance expliquée par deux gradients principaux : un gradient d'alcalinité-carbonatation (53,1% de variance) et un gradient hydro-structural (25,8% de variance), identifiant quatre archétypes de gestion distincts : équilibre agroécologique optimal (EC1), modèles de transition contradictoire (EC2-EC3), syndrome extensif spécialisé (EC4), et modèle conventionnel simplifié (EC5).

Cette première application du cadre Biofunctool® en contexte aride démontre son potentiel pour l'évaluation de la qualité biologique des sols et l'orientation vers des pratiques agricoles durables.

Mots-clés : Agriculture conventionnelle, diversité microbienne, Biofunctool®, bactéries du sol, sols arides, Laghouat, gradients pédologiques, syndromes fonctionnels.

ملخص

تقيم هذه الدراسة التنوع الميكروبي الوظيفي للتربة في الزراعة التقليدية في بلديتي الأغواط والعسافية، الواقعتين في المنطقة الجافة الجزائرية. من خلال تكييف الإطار المفاهيمي Biofunctool® مع الظروف المناخية والتربة المحلية، يركز هذا البحث الاستطلاعي على خمس مزارع تقليدية تتميز باستخدام المدخلات الكيميائية ومنتجات وقاية النباتات.

يكشف تحليل سبع وظائف ميكروبية رئيسية عن تباينات كبيرة في التنوع الفعال (مؤشرات Hill N₁ 2,295-2,549 ، شانون 0,936-0,831 (بين المزارع، مع EC3 التي تُظهر أعلى تنوع و EC5 الأقل. تبرز النتائج آليات تفاعل معقدة بين الممارسات الزراعية والمجتمعات الميكروبية: فالتعديلات العضوية تحفز في نفس الوقت إزالة النترات ($\rho = 0,71$) والنتيبت التكافلي ($\rho = 0,71$) ، بينما يثبط التسميد النيتروجيني بشكل كبير تثبيت النيتروجين. ($\rho = -0,89$).

يترجم تأثير المعالجات الوقائية النباتية إلى ارتباط سلبي مع الثراء الوظيفي- ($\rho = 0,56$) مع انخفاض في التنوع حسب شدة المعالجات. والأمر المثير للقلق بشكل خاص هو الكثافة المنخفضة جداً للبكتيريا المذيبة للفوسفور (0,2% من الميكروفلورا)، مما يكشف عن اعتماد حرج على المدخلات الخارجية.

يكشف التحليل متعدد المتغيرات عن هيكل مدهلة مع 78,9% من التباين المفسر بواسطة تدرجين رئيسيين: تدرج القلوية-الكربونات (53,1% من التباين) وتدرج هيدرو-هيكلي (25,8% من التباين)، محددًا أربعة نماذج إدارة مميزة: التوازن الزراعي البيئي الأمثل (EC1)، نماذج الانتقال المتناقضة (EC2-EC3)، المتلازمة الواسعة المتخصصة (EC4)، والنموذج التقليدي المبسط (EC5). يُظهر هذا التطبيق الأول لإطار Biofunctool® في السياق الجاف إمكاناته لتقييم الجودة البيولوجية للتربة والتوجه نحو ممارسات زراعية مستدامة.

الكلمات المفتاحية: الزراعة التقليدية، التنوع الميكروبي، Biofunctool®، بكتيريا التربة، التربة الجافة، الأغواط، التدرجات التربوية، المتلازمات الوظيفية.

Abstract

This study assesses the functional microbial diversity of soils under conventional agriculture in the municipalities of Laghouat and El Assafia, located in the Algerian arid zone. By adapting the Biofunctool® conceptual framework to local pedoclimatic conditions, this exploratory investigation focuses on five conventional farms characterized by the use of chemical inputs and phytosanitary products.

The analysis of seven key microbial functions reveals significant effective diversity variations (Hill N_1 indices 2.295-2.549, Shannon 0.831-0.936) between farms, with EC3 showing the highest diversity and EC5 the lowest. The results highlight complex interaction mechanisms between agricultural practices and microbial communities: organic amendments simultaneously stimulate denitrification ($\rho = 0.71$) and symbiotic fixation ($\rho = 0.71$), while nitrogen fertilization massively suppresses nitrogen fixation ($\rho = -0.89$).

The impact of phytosanitary treatments results in a negative correlation with functional richness ($\rho = -0.56$), with diversity reductions depending on treatment intensity. Particularly concerning is the very low density of phosphorus-solubilizing bacteria (0.2% of microflora), revealing a critical dependence on external inputs.

Multivariate analysis reveals remarkable structuration with 78.9% variance explained by two main gradients: an alkalinity-carbonation gradient (53.1% variance) and a hydro-structural gradient (25.8% variance), identifying four distinct management archetypes: optimal agroecological balance (EC1), contradictory transition models (EC2-EC3), specialized extensive syndrome (EC4), and simplified conventional model (EC5).

This first application of the Biofunctool® framework in an arid context demonstrates its potential for assessing soil biological quality and guiding toward sustainable agricultural practices.

Keywords: Conventional agriculture, microbial diversity, Biofunctool®, soil bacteria, arid soils, Laghouat, pedological gradients, functional syndromes.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACP : Analyse en Composantes Principales

AEP : Alimentation en Eau Potable

ALS : Acétolactate Synthase

Anammox : Oxydation Anaérobie de l'Ammonium

AOB : Ammonia-Oxidizing Bacteria (Bactéries Oxydant l'Ammoniac)

ATP : Adénosine Triphosphate

BNEDER : Bureau National d'Études pour le Développement Rural

CCLS : Coopérative des Céréales et des Légumineuses Secs

CE : Conductivité Électrique

CFU : Colony Forming Units (Unités Formatrices de Colonies)

CNHPPUA : Comité National d'Homologation des Produits Phytosanitaires à Usage Agricole

DDT : Dichloro-diphényl-trichloroéthane

DGGE : Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (Électrophorèse en Gel à Gradient Dénaturant)

DJA : Dose Journalière Acceptable

DNRA : Réduction Dissimilaire des Nitrates

DSA : Direction des Services Agricoles

DT50 : Temps de Demi-vie

EC1-EC5 : Codes Exploitations Conventiionnelles enquêtées 1 à 5

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

IANOR : Institut Algérien de Normalisation

LL : Living Lab (Laboratoire Vivant)

LMR : Limites Maximales de Résidus

LPGA : Levure Peptone Glucose Agar

NASA : National Aeronautics and Space Administration

NATAE : North African Transition to AgroEcology

NBRIP: National Botanical Research Institute's Phosphate Growth Medium

OTU : Unités Taxonomiques Opérationnelles

PC1, PC2 : Première et Deuxième Composante Principale

PCR : Polymerase Chain Reaction (Réaction en Chaîne par Polymérase)

PGPR : Plant Growth Promoting Rhizobacteria (Rhizobactéries Promotrices de la Croissance des Plantes)

PLFA : Phospholipid Fatty Acid (Acides Gras Phospholipidiques)

PPh : Produits Phytosanitaires

PS : Plateau Saharien

qPCR : quantitative Polymerase Chain Reaction (PCR Quantitative)

RISA : Ribosomal Intergenic Spacer Analysis (Analyse de l'Espace Intergénique Ribosomal)

ROS : Espèces Réactives de l'Oxygène

RSI : Résistance Systémique Induite

SAR : Sodium Adsorption Ratio (Ratio d'Absorption du Sodium)

SAT : Surface Agricole Totale

SAU : Surface Agricole Utile

SIP : Stable Isotope Probing (Marquage aux Isotopes Stables)

SMAF : Soil Management Assessment Framework (Cadre d'Évaluation de la Gestion des Sols)

T-RFLP : Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism (Polymorphisme de Longueur des Fragments de Restriction Terminaux)

TGGE : Temperature Gradient Gel Electrophoresis (Électrophorèse en Gel à Gradient de Température)

CFU : Unités Formatrices de Colonies

VESS : Visual Evaluation of Soil Structure (Évaluation Visuelle de la Structure du Sol)

YMA : Yeast Extract Mannitol Medium (Milieu Extrait de Levure Mannitol)

TABLE DES MATIÈRES

Résumés

Liste d'abréviation

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction.....	1
Chapitre I : Agriculture conventionnelle et écologie microbienne des sols : enjeux et interactions dans les agroécosystèmes arides	
Introduction.....	4
1.1. Les produits phytosanitaires en agriculture conventionnelle.....	5
1.1.1. Définition des produits phytosanitaires.....	5
1.1.2. Classification et mode d'action des différentes catégories.....	5
1.1.2.1. Complexité du monde des pesticides.....	5
1.1.2.2. Classification biologique (cible principale).....	5
A. Fongicides.....	5
B. Insecticide.....	6
C. Herbicides.....	6
D. Bactéricides.....	6
1.1.2.3. Classification selon l'origine chimique.....	6
1.1.2.4. Classification selon la famille chimique.....	7
1.1.2.5. Classification selon le mode d'action.....	7
1.1.3. Évolution historique de l'utilisation des produits phytosanitaires.....	8
1.1.3.1. Dans le monde.....	8
1.1.3.2. En Algérie.....	8
1.1.4. Réglementations nationales et internationales encadrant leur usage.....	9
1.1.4.1. Cadre réglementaire international.....	9
1.1.4.2. Réglementation nationale algérienne.....	9
1.1.5. Devenir des produits phytosanitaires dans l'environnement.....	9
1.1.5.1. Mécanismes de dispersion environnementale.....	9
a) Dans l'atmosphère.....	10
b) Dans l'eau.....	10
c) Dans le sol.....	10
1.1.5.2. Persistance dans les sols.....	10
1.1.5.3. Effets des pesticides sur la santé humaine.....	11
a) Types de toxicité.....	11
1.1.5.4. Contamination de la chaîne alimentaire algérienne.....	11
1.1.5.5. Données épidémiologiques locales.....	12
1.2. Écologie microbienne des sols agricoles.....	12
1.2.1. Diversité taxonomique et fonctionnelle des communautés bactériennes.....	12

1.2.1.1.Définition et caractéristiques générales des bactéries du sol	13
1.2.1.2.Méthodes d'étude de la diversité microbienne	13
a) Limitations des méthodes classiques	13
b) Révolution des approches moléculaires	13
1.2.1.3.Diversité taxonomique	14
a. Amplitude de la diversité bactérienne	14
b. Organisation taxonomique	14
1.2.1.4.Diversité fonctionnelle	14
a. Principales fonctions microbiennes	15
b. Approches d'étude des fonctions	15
c. Groupes fonctionnels majeurs	15
1.2.2. Rôles écologiques des bactéries dans les cycles biogéochimiques des sols	16
1.2.2.1.Rôle dans le cycle du carbone	16
A. Stockage et transformation du carbone	16
B. Processus de fixation et minéralisation	16
C. Contributions spécifiques des procaryotes	17
1.2.2.2.Rôle dans le cycle de l'azote	17
a) Importance fondamentale	17
b) Fixation symbiotique de l'azote	18
c) Fixation libre de l'azote	18
d) Processus de nitrification	18
1.2.2.3.Rôle dans le cycle du phosphore	19
A. Importance du phosphore pour les plantes.....	19
B. Problématique de la biodisponibilité.	19
C. Rôle des bactéries solubilisatrices	19
.	
1.2.3. Interactions bactéries-plantes et leur influence sur la croissance végétale	20
1.2.3.1.Importance générale des interactions microbiennes	20
1.2.3.2.Les bactéries phytobénéfiques (PGPR)	20
a. Définition et rôles généraux	20
b. Mécanismes d'action.....	20
1.2.4. Bio-indicateurs microbiens de la santé des sols	21
1.2.4.1.Importance de la diversité microbienne en agriculture.....	21
A. Bioindicateurs microbiens quantitatifs	21
1. Biomasse microbienne	21
2. Densité des populations microbiennes	21
B. Bioindicateurs microbiens qualitatifs	21
1. Outils moléculaires	22
2. Sensibilité aux perturbations	22
1.2.4.2.Activités microbiennes fonctionnelles	22
1.2.5. Vulnérabilité des communautés microbiennes aux perturbations anthropiques	22
1.2.5.1.Sensibilité aux produits phytosanitaires.....	22
1.2.5.2.Mécanismes d'impact	23

1.2.5.3.Conséquences écologiques	23
1.3. Interactions entre pratiques agricoles et microbiome du sol	23
1.3.1. Impact des produits phytosanitaires sur les communautés bactériennes du sol	23
1.3.1.1.Mécanismes généraux d'impact	23
1.3.1.2.Effets spécifiques sur les bactéries du sol	24
1.3.1.3. Réduction de la biodiversité bactérienne	24
1.3.1.4. Déséquilibre des populations bactériennes.....	24
1.3.1.5. Persistance et effets à long terme.....	25
1.3.1.6.Facteurs modulant l'impact des pesticides	25
1.3.1.7.Exemples d'impacts documentés	25
A. Données de la région des Ziban (Algérie)	25
1.3.1.8. Observations sur les pratiques phytosanitaires	25
1.3.2. Effets des pratiques culturales sur la diversité et l'activité microbienne	26
1.3.2.1.Principe de perturbation intermédiaire.....	26
1.3.2.2.Impact du travail du sol.....	26
1.3.2.3.Effet de la rotation des cultures	27
a. Principe et bénéfices généraux	27
b. Impacts quantifiés sur les communautés microbiennes	27
c. Mécanismes sous-jacents	28
1.3.2.4.Impact de la jachère	28
a) Définition et principe	28
b) Effets sur la diversité bactérienne.....	28
c) Implications pour la gestion des sols	29
1.3.2.5.Effets des engrais sur la diversité et l'activité microbienne.....	29
A. Impact des amendements organiques	29
B. Effets contrastés des engrais chimiques.....	29
1.3.3. Interactions complexes entre facteurs	29
1.3.3.1.Effets synergiques et antagonistes	29
1.3.3.2.Facteurs de variabilité temporelle.....	30
1.3.3.3.Spécificités des régions arides.....	30
1.3.4. Conséquences écologiques et agronomiques	30
1.3.4.1.Altération des services écosystémiques	30
1.3.4.2. Fertilité naturelle du sol.....	30
1.3.4.3.Résistance aux stress biotiques.....	30
1.3.4.4.Résilience écologique	30
1.3.5. Implications pour la durabilité agricole	31
1.3.5.1.Dépendance accrue aux intrants	31
1.3.5.2.Vulnérabilité économique	31
1.3.6. Perspectives d'atténuation	31
1.3.6.1. Approches préventives	31
1.3.6.2. Approches correctives	31
1.3.7. Méthodes d'évaluation de l'impact.....	31
1.3.7.1.Indicateurs biologiques	31
1.3.7.2.Indicateurs quantitatifs	31

1.3.7.3. Indicateurs qualitatifs	32
1.3.7.4. Approches intégratives	32
1.3.7.5. Indices composites	32
1.3.7.6. Approches multivariées	32
1.3.8. Cas d'étude : Régions arides méditerranéennes	32
1.3.8.1. Spécificités environnementales	32
A. Contraintes climatiques	32
B. Caractéristiques édaphiques	32
1.3.8.2. Adaptations des pratiques	32
A. Irrigation et fertigation	32
B. Cultures sous abris	33
1.3.8.3. Enjeux spécifiques	33
a) Vulnérabilité accrue	33
b) Opportunités de restauration	33
Conclusion.	33

Chapitre II Matériels et Méthode

Introduction	35
2.1. Présentation de la zone d'étude : les communes de Laghouat et El Assafia	36
2.1.1. Localisation et situation géographique	36
2.1.2. Caractéristiques géomorphologiques	37
2.1.2.1. Relief et topographie	37
2.1.2.2. Altitude	37
2.1.3. Ressources en eau	37
2.1.4. Systèmes de production agricole	38
2.1.4.1. Structure foncière et répartition territoriale	38
2.1.4.2. Caractéristiques de la structure foncière	38
2.1.4.3. La Surface Agricole Utile (SAU)	38
2.2. Synthèse climatique de la zone d'étude (communes de Laghouat et d'El assafia) et impact potentiel sur l'activité microbienne du sol	39
2.2.1. Températures	39
2.2.2. Précipitations	39
2.2.3. Période sèche	40
2.2.4. Indice de Marton	41
2.2.5. Vent	41
2.2.6. L'humidité relative et spécifique de l'air	42
2.3. Protocole d'évaluation de la santé du sol	43
2.3.1. Cadre conceptuel et adaptation de la méthode Biofunctool®	43
2.3.1.1. Avantages et limites de la méthode Biofunctool®	44
A. Avantages de l'approche adoptée	44
B. Limites et contraintes méthodologiques	45
2.3.2. Stratégie d'échantillonnage des exploitations en agriculture conventionnelle	45
2.3.2.1. Identification de la population d'étude conventionnelle	45
2.3.2.2. Justification de la taille d'échantillon et du design comparatif	46
2.3.2.3. Critères de sélection et processus de validation	46

2.3.2.4. Limites méthodologiques et biais potentiels	47
2.3.2.5. Période de collecte et protocole harmonisé	47
2.3.3. Collecte des données	48
2.3.3.1. Enquêtes auprès des agriculteurs	48
2.3.3.2. Échantillonnage du sol	48
2.3.4. Mesures et indicateurs effectués sur terrain et au niveau du laboratoire	49
2.3.5. Analyses microbiologiques	51
2.3.5.1. Préparation des échantillons	51
2.3.5.2. Milieux de culture et dilutions	52
2.3.5.3. Incubation et dénombrement	53
2.3.5.4. Indices de diversité fonctionnelle microbienne : fondements théoriques	53
Conclusion	54

Chapitre III Résultats et Discussions

Introduction	58
3.1. Évaluation de la diversité microbienne fonctionnelle dans les sols d'exploitations conventionnelles	59
3.1.1. Caractéristiques générales de la diversité microbienne	59
3.1.1.1. Diversité globale et richesse fonctionnelle	59
3.1.1.2. Indices de diversité et équitabilité	59
3.1.2. Analyse des fonctions microbiennes spécifiques	60
3.1.2.1. Cycle de l'azote : Fixation biologique à travers des bactéries diazotrophes (milieux A et YMA)	60
3.1.2.2. Cycle de l'azote : Populations dénitrifiantes (milieux AN, N, D)	60
3.1.2.3. Cycle du phosphore : Bactéries solubilisatrices du phosphore (milieu P-NBRIP)	61
3.1.3. Profil microbien des sols	61
3.2. Relations entre pratiques agricoles et communautés microbiennes	63
3.2.1. Analyse des corrélations : mécanismes et implications écologiques	63
a. Un impact différentiel de la fertilisation azotée minérale	64
b. Effet structurant de la diversification des cultures au sein de l'exploitation Agricole	65
c. Impact négatif des traitements herbicides	65
d. Régulation par les amendements organiques	65
3.2.2. Ordination multivariée : révélation des syndromes fonctionnels	66
3.2.2.1. Interprétation biologique des gradients principaux	66
3.2.2.2. Typologie des exploitations et stratégies agronomiques	66
3.2.2.3. Implications agronomiques et leviers d'optimisation	67
3.3. Analyse des interactions sol-microbiologie en agriculture conventionnelle : synthèse des résultats et implications éco systémiques	68
3.3.1. Matrice des corrélations : révélation des mécanismes biogéochimiques	69
3.3.2. Structure de la variance édaphique : analyse en composantes principales ...	71
3.3.2.1. Interprétation des gradients principaux	72
3.3.2.2. Typologie des niches pédoclimatiques	73
3.3.2.3. Implications agronomiques	73
3.4. Synthèse des résultats : Évaluation de la diversité microbienne fonctionnelle dans les sols d'exploitations conventionnelles	73

3.4.1. Adaptation du cadre Biofunctool® en contexte aride.....	74
3.4.2. Structure et diversité des communautés microbiennes fonctionnelles	74
3.4.3. Mécanismes complexes d'interaction pratiques-microbiome.....	74
3.4.4. Déterminisme édaphique et niches pédoclimatiques	75
3.4.5. Architecture fonctionnelle et syndromes microbiens	75
3.4.6. Impact des pratiques phytosanitaires	75
3.4.7. Implications agronomiques et perspectives.....	75
Conclusion et Perspectives	76
Conclusion générale	77
Références bibliographiques (norme APA)	80

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : morphologie bactérienne telle qu'elle pouvait être observée en microscopie optique au début du XXe siècle.	13
Figure 2 : Image montre une version simplifiée du cycle du carbone, mettant en avant le rôle des procaryotes.	17
Figure 3 : Influence de la profondeur et du type de travail du sol sur la biomasse microbienne et sa répartition au sein du profil cultural (0-30 cm).	27
Figure 4 : Les zones agroécologiques de la wilaya de Laghouat et localisation de la zone d'étude du living lab (Communes de Laghouat et El Assafia).	38
Figure 5 : Part de la SAU des communes de Laghouat et d'El Assafia dans le total Wilaya.	40
Figure 6 : Diagramme ombrothermique de Bangouls et Gausсен (Station de Laghouat 1981-2025).	41
Figure 7 : Vitesse moyenne du vent à 2 m (1981-2025).....	42
Figure 8 . Rose des vents (direction dominante entre 1981 et 2025).	43
Figure 9 . Humidité relative et spécifique moyenne (1981-2025).	43
Figure 10 . Cadre conceptuel d'évaluation de la qualité des sols selon les approches réductionniste ou intégrative.....	45
Figure 11 : Distribution des densités microbiennes par fonction écologique dans les sols d'exploitations conventionnelles.	59
Figure 12 : Répartition relative des groupes bactériens fonctionnels par exploitation agricole (%).	60
Figure 13 : Matrice des corrélations de Spearman entre pratiques agricoles et communautés microbiennes fonctionnelles.	62
Figure 14 : Position des exploitations conventionnelles dans l'espace fonctionnel défini par l'ACP.	65
Figure 15 : Profils édaphiques des exploitations agricoles conventionnelles.....	67
Figure 16 : Matrice des corrélations de Spearman entre pratiques agricoles et communautés microbiennes fonctionnelles.	68
Figure 17 : Position des exploitations dans l'espace pédoclimatique défini par l'ACP.	70

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classification des pesticides selon le mode d'action.....	7
Tableau 2: Évolution historique des principales classes de pesticides (1900-2000).....	8
Tableau 3: Persistance de quelques pesticides dans les eaux de rivière.....	10
Tableau 4: Classification des différentes formes d'intoxication.....	11
Tableau 5: Principaux genres et espèces de bactéries nitrifiantes.....	18
Tableau 6: Classes de phytohormones et leurs effets sur les plantes.....	20
Tableau 7. Tableau récapitulatif des mesures et des indicateurs effectués sur terrain et en laboratoire.	50
Tableau 8 : Clés de lecture des abréviations des milieux de culture utilisés.....	53
Tableau 9: Statistiques descriptives des densités microbiennes par fonction écologique dans les sols d'exploitations conventionnelles (CFU/g de sol sec).....	58
Tableau 10: Profils microbiens fonctionnels par exploitation agricole (%).	60

Introduction générale

L'agriculture conventionnelle s'est historiquement développée autour d'un objectif central : l'augmentation constante de la productivité agricole. Cette orientation fondamentale se manifeste tant par l'accroissement du rendement par surface cultivée que par l'optimisation du rapport entre production et temps de travail (Murua et Laajimi, 1995). Pour atteindre ces objectifs ambitieux, l'agriculture s'est engagée dans un processus d'intensification caractérisé par l'utilisation croissante d'intrants variés, incluant les aliments composés, les variétés sélectionnées, les fertilisants et les pesticides. Parallèlement, on observe une spécialisation et une homogénéisation grandissantes des cultures, réduisant considérablement la diversité génétique des systèmes agricoles.

Cette intensification a trouvé un écho particulier dans les pays méditerranéens, où les conditions climatiques et la pression économique ont favorisé l'adoption de pratiques agricoles intensives. En Algérie, cette évolution s'est notamment traduite par un usage ciblé, mais significatif de produits phytosanitaires, avec une prédominance des insecticides par rapport aux pays du nord de la Méditerranée (Moulai et Harrane, 2008).

L'usage des pesticides en Algérie présente un profil spécifique influencé par les conditions climatiques arides et semi-arides. Selon Moulai et Harrane (2008), l'Algérie a consommé en 2004 près de 7 260 tonnes d'insecticides, suivies de 3 749 tonnes de fongicides, 780 tonnes d'acaricides et 799 tonnes d'herbicides. Cette répartition témoigne d'une adaptation aux contraintes locales, mais soulève néanmoins des interrogations environnementales majeures quant à l'impact de ces substances sur les écosystèmes fragiles et sur la santé des populations.

Les données récentes montrent une évolution notable de cette consommation. Entre 2007 et 2017, l'utilisation des pesticides en agriculture a fortement augmenté, passant de 3 478 tonnes à 5 898 tonnes (Soudani, 2022). Cette augmentation concerne particulièrement les fongicides et bactéricides, qui sont passés de 770 tonnes en 2007 à 1 577 tonnes en 2017, reflétant l'intensification des pratiques culturales et l'émergence de nouvelles problématiques phytosanitaires.

Des études menées dans quelques régions d'Algérie révèlent la complexité de cette problématique et l'ampleur de la contamination. Mebdoua et al., (2017) ont réalisé la première évaluation systématique des résidus de pesticides dans les fruits et légumes consommés en Algérie, analysant 160 échantillons de 13 types de produits frais. Leurs résultats révèlent que 57,5% des échantillons contenaient au moins un résidu de pesticide, avec 12,5% des échantillons présentant des résidus supérieurs aux limites maximales autorisées. Cette contamination généralisée illustre non seulement l'ampleur de l'utilisation des pesticides dans l'agriculture algérienne, mais aussi leurs implications potentielles pour la sécurité alimentaire et, par extension, pour la santé des écosystèmes agricoles. L'évaluation des risques d'exposition a révélé des dépassements préoccupants de la dose de référence aiguë pour plusieurs

combinaisons pesticide/denrée alimentaire, particulièrement avec le chlorpyrifos, la deltaméthrine et la lambda-cyhalothrine.

Au-delà de leurs effets directs sur la santé humaine, les pesticides constituent des polluants environnementaux particulièrement préoccupants en raison de leur stabilité, leur mobilité et leurs effets à long terme sur les organismes vivants. Si leur dispersion affecte l'ensemble des compartiments environnementaux (eau, air), le sol demeure un milieu récepteur clé où une proportion significative des produits phytosanitaires appliqués lors des traitements atteint directement ce compartiment, soit par application intentionnelle, soit par lessivage du feuillage traité (Bendaouia et Guermit, 2020).

Les recherches de Bettiche et al. (2019) dans la région des Ziban (Biskra) ont démontré la complexité de cette contamination. Leur étude comparative entre enquêtes de terrain et analyses multi-résidus a révélé la présence de substances inattendues comme l'azinphos-méthyl et le p,p-DDE dans tous les échantillons de sol analysés, soulignant les limites des enquêtes phytosanitaires traditionnelles et la nécessité d'analyses périodiques multi-résidus pour surveiller la contamination des sols.

La dégradation des écosystèmes microbiens constitue un enjeu majeur pour la durabilité des systèmes agricoles. Comme le souligne la pédologue Elaine Ingham, citée par Savonen (1997) : *"Si nous perdons à la fois des bactéries et des champignons, le sol se dégrade. L'utilisation excessive d'engrais chimiques et de pesticides a des effets sur les organismes du sol similaires à la surconsommation humaine d'antibiotiques"*. Cette observation met en lumière les relations complexes entre pratiques agricoles intensives et fertilité des sols à long terme.

Les micro-organismes du sol, en particulier les bactéries, jouent un rôle fondamental dans les cycles biogéochimiques. Par exemple, les plantes dépendent de divers micro-organismes pour la transformation de l'azote atmosphérique en nitrates assimilables. L'application intensive de pesticides peut entraîner un déclin significatif des populations microbiennes bénéfiques responsables de ces processus essentiels (Aktar et al., 2009), compromettant ainsi la fertilité naturelle des sols et la durabilité des systèmes agricoles.

Dans le contexte spécifique de notre living lab de Laghouat comprenant les communes de Laghouat et d'El Assafia, situées dans une zone aride, l'impact des produits phytosanitaires sur les écosystèmes microbiens du sol demeure insuffisamment documenté et étudié. Cette lacune dans les connaissances scientifiques locales constitue un obstacle majeur à l'évaluation de la durabilité des pratiques agricoles actuelles et au développement d'alternatives respectueuses de l'environnement.

Les écosystèmes arides présentent des caractéristiques particulières qui peuvent influencer le devenir et l'impact des pesticides : faible teneur en matière organique, pH souvent élevé, faible activité microbienne, et conditions climatiques extrêmes. Ces spécificités nécessitent une approche adaptée pour comprendre comment ces substances affectent la diversité et la fonctionnalité des communautés bactériennes dans ces environnements particuliers

Question de recherche et hypothèses.

Face à ces enjeux complexes et multifactoriels, notre travail s'articule autour de la question centrale suivante : **Comment l'utilisation des intrants chimiques influence-t-il la diversité et la fonctionnalité des communautés bactériennes des sols agricoles dans les exploitations des communes de Laghouat et d'El Assafia ? Ces modifications ont-elles un impact significatif sur la fertilité du sol ?**

Cette question principale se décline en plusieurs sous-questions :

- Quels sont les produits phytosanitaires les plus utilisés dans ces régions et selon quelles modalités d'application ?
- Comment ces pratiques influencent-elles la structure et la diversité des communautés bactériennes ?
- Existe-t-il des corrélations entre l'intensité d'utilisation des pesticides et l'altération des fonctions microbiennes du sol ?
- Quelles sont les implications de ces modifications pour la durabilité des systèmes agricoles locaux ?

Nous émettons l'hypothèse que **l'utilisation intensive de produits phytosanitaires réduit significativement la diversité bactérienne du sol, compromettant ainsi sa fertilité naturelle et, par extension, la santé des cultures qui en dépendent.** Cette hypothèse s'appuie sur les observations rapportées dans la littérature scientifique internationale et sur les constats préliminaires réalisés dans d'autres régions d'Algérie.

Objectifs de l'étude

Notre objectif général à travers cette étude est d'évaluer **la diversité et la structure des communautés bactériennes dans les sols soumis à différentes pratiques agricoles** dans les communes de Laghouat et d'El Assafia.

Plus spécifiquement, nous visons à :

1. **Caractériser les pratiques phytosanitaires** actuelles dans les exploitations agricoles de la zone d'étude
2. **Analyser la relation entre l'utilisation des produits phytosanitaires et la santé des sols** par l'évaluation de la diversité microbienne
3. **Identifier les facteurs déterminants** de la structure des communautés bactériennes dans ces écosystèmes arides
4. **Proposer des pratiques agricoles alternatives** pour préserver la flore bactérienne et améliorer la durabilité des systèmes agricoles locaux

Afin de répondre à notre question de recherche et de vérifier notre hypothèse, ce mémoire s'articule en trois chapitres complémentaires :

- Le premier chapitre. Agriculture conventionnelle et écologie microbienne des sols : enjeux et interactions dans les agroécosystèmes arides
- Le deuxième chapitre, matériels et méthodes
- Enfin, le troisième chapitre résultats et discussions

Chapitre I

Agriculture conventionnelle et écologie microbienne des sols : enjeux et interactions dans les agroécosystèmes arides

Introduction

L'intensification de l'agriculture conventionnelle au cours des dernières décennies s'est accompagnée d'une utilisation croissante de produits phytosanitaires, dont les volumes d'application ont progressé de 4 à 5,4% annuellement dans certaines régions du monde (FAO, 2002). Cette évolution, qui témoigne de l'intégration progressive de ces substances dans les systèmes de production agricole, soulève aujourd'hui des interrogations majeures quant à leurs répercussions sur le fonctionnement des agroécosystèmes, particulièrement dans les régions méditerranéennes où les conditions pédoclimatiques spécifiques peuvent amplifier ou moduler ces impacts.

Les sols agricoles abritent une diversité microbienne exceptionnelle, avec 10^3 à 10^7 espèces bactériennes par gramme de sol, constituant l'un des réservoirs de biodiversité les plus riches de la biosphère. Ces communautés microbiennes assurent des fonctions écosystémiques essentielles : cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote et du phosphore, structuration des sols, protection contre les pathogènes telluriques, et promotion de la croissance végétale. Leur préservation constitue donc un enjeu majeur pour la durabilité des systèmes agricoles et la sécurité alimentaire.

Cependant, les pratiques agricoles conventionnelles, et notamment l'usage intensif de produits phytosanitaires, exercent des pressions multiples sur ces communautés microbiennes. Les mécanismes d'interaction entre pesticides et microbiome tellurique demeurent complexes et partiellement élucidés, impliquant des effets directs de toxicité, des modifications des conditions physicochimiques du sol, et des perturbations des réseaux trophiques microbiens. Ces interactions revêtent une dimension particulière dans les régions arides et semi-arides, où les conditions environnementales extrêmes peuvent modifier la persistance des molécules actives et la résilience des communautés microbiennes.

Le présent chapitre propose une synthèse bibliographique structurée autour de trois axes complémentaires. Dans un premier temps, nous examinerons les caractéristiques des produits phytosanitaires utilisés en agriculture conventionnelle, leur évolution historique, leur devenir environnemental et leurs effets documentés sur la santé humaine et écosystémique. La deuxième partie sera consacrée à l'écologie microbienne des sols agricoles, en analysant la diversité taxonomique et fonctionnelle des communautés bactériennes, leurs rôles dans les cycles biogéochimiques, et leur potentiel en tant que bio-indicateurs de la qualité des sols. Enfin, la troisième partie abordera les interactions complexes entre pratiques agricoles et microbiome tellurique, en mettant l'accent sur les mécanismes d'impact des pesticides et les facteurs modulant ces interactions dans le contexte spécifique des régions méditerranéennes.

Cette approche intégrative vise à fournir les bases théoriques nécessaires à la compréhension des enjeux actuels de l'agriculture conventionnelle, tout en identifiant les lacunes de connaissance qui nécessitent des investigations approfondies, particulièrement dans le contexte algérien où les données restent fragmentaires malgré l'intensification récente des pratiques phytosanitaires.

1.4. Les produits phytosanitaires en agriculture conventionnelle

1.4.1. Définition des produits phytosanitaires

Les produits phytosanitaires (PPh) sont définis comme des matières actives, d'origine biologique ou synthétique, employées pour protéger les plantes contre les ennemis des cultures, incluant les insectes, les adventices et les maladies (Fleury et Montmollin, 2017). Cette définition distingue les produits phytosanitaires du terme plus large de "pesticide" ou "biocide", qui comprend toutes les substances utilisées contre de nombreux autres ravageurs dans divers secteurs (bois, bâtiments, bateaux, etc.).

Il convient de noter que plusieurs secteurs économiques utilisent également des produits phytosanitaires (espaces verts, constructions, désinfestations), mais les données les concernant ne sont pas toujours disponibles ou fiables. La grande majorité des PPh est toutefois appliquée en agriculture : grandes cultures, viticulture, arboriculture et horticulture (Fleury et Montmollin, 2017).

La terminologie relative aux produits phytosanitaires mérite une attention particulière. Dans le contexte algérien, comme dans de nombreux pays méditerranéens, les termes "pesticides", "produits phytosanitaires" et "produits phytopharmaceutiques" sont souvent utilisés de manière interchangeable, bien qu'ils puissent avoir des acceptions légèrement différentes selon les réglementations nationales et internationales.

1.4.2. Classification et mode d'action des différentes catégories

1.4.2.1. Complexité du monde des pesticides

Le monde des pesticides se caractérise par une grande diversité de classes chimiques et d'applications. Leur utilisation s'étend bien au-delà de l'agriculture, incluant l'entretien des voiries et des jardins publics. Cette diversité rend nécessaire une classification systématique qui peut s'opérer selon différents critères : la cible biologique, la structure chimique, la persistance dans l'environnement, ou encore le mode d'action (Mahdjiba, 2018).

1.4.2.2. Classification biologique (cible principale)

E. Fongicides

Les fongicides, utilisés contre les maladies fongiques, représentent une part importante des traitements phytosanitaires et permettent d'assurer la santé des plantes. Selon Laifa (2020), ils se divisent en plusieurs catégories :

Fongicides minéraux :

- À base de cuivre (ex : bouillie bordelaise)
- À base de soufre
- Au permanganate de potassium (efficace contre l'oïdium).

Fongicides organiques :

- Dérivés de l'acide carbamique (carbamates, benzimidazoles)

- Dérivés thiocarbamiques (mancozèbe, manèbe)
- Dérivés phénoliques (ex : dinocap).

Dans le contexte algérien, les études récentes montrent une utilisation prédominante des fongicides. L'analyse de Ramdani et al., (2009) dans les localités de Tolga et Sidi-Okba révèle que les fongicides représentent 39,21% des pesticides vendus au niveau des phytopharmacies enquêtées, confirmant leur importance dans les pratiques agricoles locales.

F. Insecticides

Les insecticides ciblent les insectes nuisibles en perturbant leur physiologie, leur reproduction ou en les intoxiquant via contact, ingestion ou action systémique. Leur classification s'effectue selon leur mode d'action :

- Agissant sur le système nerveux (organochlorés, organophosphorés)
- Agissant sur la respiration cellulaire (roténone)
- Régulateurs de croissance (benzhydrazides, thiadiazines).

En Algérie, les insecticides occupent une place particulière avec 36,27% des ventes dans les phytopharmacies (Ramdani et al., 2009), reflétant l'adaptation aux conditions climatiques locales favorables au développement d'arthropodes ravageurs.

G. Herbicides

Classés comme les deuxièmes pesticides les plus utilisés mondialement, les herbicides visent à éliminer les mauvaises herbes en compétition avec les cultures. Ils peuvent être sélectifs ou non sélectifs selon la dose, le moment et le mode d'action :

- Perturbateurs de l'auxine (ex : 2,4-D)
- Inhibiteurs de la photosynthèse (carbamates)
- Inhibiteurs de la division cellulaire (dinitroanilines).

Contrairement aux tendances mondiales, l'utilisation d'herbicides en Algérie reste relativement modérée, représentant 15,7% des ventes (Ramdani et al., 2009), probablement en raison de pratiques culturelles traditionnelles privilégiant le désherbage mécanique.

H. Bactéricides

Selon Fortier (2024), une substance bactéricide est capable de tuer les bactéries, comme les antibiotiques. Elle fait partie des microbicides qui détruisent les microbes et se trouve dans les anti-infectieux et les désinfectants. On distingue :

- Un bactéricide : tue les bactéries
- Un bactériostatique : empêche la croissance des bactéries sans les tuer
- Un antibactérien : terme général désignant une substance qui tue ou inhibe les bactéries.

1.4.2.3. Classification selon l'origine chimique

Selon Mehda (2020), environ un millier de matières actives de pesticides, appartenant à une centaine de familles chimiques différentes, ont été recensées. Cette classification chimique distingue trois catégories principales :

Inorganiques : Issus de sources minérales, utilisées avant l'avènement de la chimie de synthèse. Il s'agit souvent de fongicides à base de soufre ou de cuivre (ex : bouillie bordelaise).

Organo-métalliques : Composés d'une molécule organique liée à un élément minéral. Ce sont principalement des fongicides (ex : Manèbe, Mancozèbe).

Organiques : Très nombreux, appartenant à 80 familles chimiques, chaque famille ayant une structure de base spécifique.

1.4.2.4. Classification selon la famille chimique

La classification des matières actives repose principalement sur leur structure chimique et le type d'organisme cible (Boukhatem, 2018). Parmi les grandes familles chimiques les plus importantes, on retrouve :

- Organochlorés ;
- Organophosphorés ;
- Carbamates ;
- Pyréthroïdes ;
- Triazines ;
- Benzimidazoles ;
- Dithiocarbamates.

1.4.2.5. Classification selon le mode d'action

Le mode d'action constitue un critère de classification particulièrement pertinent pour comprendre l'impact potentiel des pesticides sur les organismes non-cibles, incluant les micro-organismes du sol.

Tableau 1 : Classification des pesticides selon le mode d'action.

Type de poison	Mode d'action	Exemples
Physiques	Tuent l'insecte par un effet physique : obstruction des spiracles ou déshydratation par absorption de l'humidité corporelle	Huiles lourdes, goudrons
Protoplasmiques	Détruisent le protoplasme des cellules de l'épithélium intestinal moyen	Mercure, cuivre, composés arsenicaux
Respiratoires	Inhibent la respiration cellulaire en neutralisant les enzymes respiratoires	Acide cyanhydrique (HCN), monoxyde de carbone (CO)
Nerveux	Affectent le système nerveux, provoquant des troubles puis la mort	Insecticides organophosphorés, carbamates
Inhibiteurs de la chitine	Inhibent la synthèse de la chitine, empêchant le développement normal de l'insecte	Diflubenzuron

Source : Adapté de Sawant (2022).

1.4.3. Évolution historique de l'utilisation des produits phytosanitaires

1.4.3.1. Dans le monde

L'histoire de l'utilisation des pesticides remonte à l'Antiquité, où les populations développaient déjà des techniques de lutte pour protéger les graines, les semis et les produits récoltés. L'intervention manuelle contre les mauvaises herbes, qui demeure d'actualité, était la technique la plus répandue. Les Sumériens utilisaient du soufre contre les insectes et les mites, les Romains employaient l'huile comme chasse-moustique, tandis que les Chinois avaient recours à l'arsenic et au mercure contre les tiques et puces (Bettiche, 2017).

L'avènement de l'industrie chimique moderne au XXe siècle a marqué un tournant décisif avec l'apparition de nouvelles substances pour répondre aux besoins en herbicides, fongicides et insecticides. Cette période a vu naître les grandes classes de pesticides de synthèse qui dominent encore aujourd'hui le marché mondial.

Tableau 2: Évolution historique des principales classes de pesticides (1900-2000).

Période	Insecticides	Fongicides	Herbicides
1900-1920	Arséniate de plomb, nicotine	Soufre, cuivre	Désherbage manuel
1920-1940	Pyrèthre naturel	Bouillie bordelaise	Acide sulfurique
1940-1960	DDT, organochlorés	Dithiocarbamates	2,4-D, MCPA
1960-1980	Organophosphorés	Benzimidazoles	Triazines, urée
1980-2000	Pyréthroïdes, carbamates	Triazoles, strobilurines	Sulfonylurées

Source : Adapté de Bajard (2016).

1.4.3.2. En Algérie

L'évolution de l'utilisation des pesticides en Algérie reflète les transformations de l'agriculture nationale et l'influence des modèles d'intensification importés. Entre 2007 et 2017, l'utilisation des pesticides en agriculture a connu une augmentation significative, passant de 3 478 tonnes à 5 898 tonnes, soit une croissance de près de 70% en une décennie (Soudani, 2022).

Cette évolution présente plusieurs caractéristiques notables :

Les fongicides et bactéricides dominent le marché avec une progression de 770 tonnes en 2007 à 1 577 tonnes en 2017, reflétant l'intensification des cultures sous abris et l'émergence de nouvelles pathologies.

Les insecticides ont enregistré plusieurs pics d'utilisation, notamment en 2007 (707 tonnes), 2009 (497 tonnes) et 2011 (460 tonnes), en lien avec les attaques de *Tuta absoluta* sur la tomate. En 2017, leur usage est estimé à 367 tonnes.

Les herbicides restent moins utilisés avec une progression modérée de 201 tonnes en 2007 à 286 tonnes en 2017, probablement en raison du maintien de pratiques de désherbage manuel dans de nombreuses exploitations.

Les régulateurs de croissance ont connu un pic exceptionnel en 2013 avec 6 380 tonnes, avant de chuter à 3 753 tonnes en 2017, illustrant l'instabilité des pratiques dans ce domaine.

1.4.4. Réglementations nationales et internationales encadrant leur usage

1.4.4.1. Cadre réglementaire international

Les cadres juridiques internationaux relatifs à la gestion des pesticides ont connu d'importantes évolutions au cours des 25 dernières années. Le Code international de conduite pour la distribution et l'utilisation des pesticides, adopté par la FAO en 1985, constitue le socle de cette réglementation internationale (FAO, 2020).

Ce code a été modifié en 1989 pour intégrer la procédure de consentement préalable en connaissance de cause (PIC), révisé en 2002, puis actualisé en 2013 pour inclure les pesticides de santé publique, devenant le Code international de conduite sur la gestion des pesticides. En 2014, l'OMS a également adopté ce Code comme cadre de référence pour la gestion internationale des pesticides.

Plusieurs instruments internationaux majeurs complètent ce dispositif :

- **Convention de Rotterdam** (PIC pour certains produits chimiques et pesticides dangereux) ;
- **Convention de Stockholm** (polluants organiques persistants) ;
- **Convention de Bâle** (mouvements transfrontaliers de déchets dangereux) ;
- **Protocole de Montréal** (substances appauvrissant la couche d'ozone) ;
- **Convention 184 de l'OIT** sur la sécurité en agriculture.

1.4.4.2. Réglementation nationale algérienne

En Algérie, l'utilisation des produits phytosanitaires est régie par un cadre réglementaire établi par la loi n° 87-17 du 1er août 1987, qui définit les principes de fabrication, d'entreposage, de distribution, de commercialisation et d'application de ces produits (Ben Smaine, 2023).

Ce cadre légal est complété par :

- **Le décret exécutif n° 93-286** du 23 novembre 1993, encadrant le contrôle phytosanitaire aux frontières.
- **L'arrêté du 14 juillet 2002** imposant une autorisation technique préalable pour l'importation de certaines espèces végétales.

Le processus d'homologation s'effectue par le Comité national d'homologation des produits phytosanitaires à usage agricole (CNHPPUA), qui évalue l'efficacité et la sécurité des produits. Les produits homologués figurent sur une liste officielle régulièrement mise à jour.

Les normes techniques sont élaborées par l'Institut algérien de normalisation (IANOR) et s'appuient sur des recommandations internationales. Ces normes portent sur les caractéristiques physicochimiques, toxicologiques et écotoxicologiques des produits, ainsi que sur les méthodes d'analyse et d'étiquetage.

1.4.5. Devenir des produits phytosanitaires dans l'environnement

1.4.5.1. Mécanismes de dispersion environnementale

Selon Ouchebouk et Amokrane (2015), les pesticides se dispersent dans l'environnement par différents mécanismes influencés par les conditions géologiques, climatiques et les caractéristiques physicochimiques des produits appliqués.

d) Dans l'atmosphère

La volatilisation représente l'un des processus de perte les plus importants. Ce phénomène peut entraîner la dispersion rapide des substances actives hors de la zone traitée, avec des pertes pouvant atteindre jusqu'à 90% du produit appliqué. Ces pertes gazeuses sont généralement plus significatives que celles causées par la dégradation chimique, le ruissellement ou la lixiviation.

La dérive des gouttelettes pulvérisées lors de l'application contribue également à la contamination de zones non ciblées. Ce phénomène est influencé par la taille des gouttelettes, la vitesse du vent, le type de matériel utilisé et la hauteur de pulvérisation.

e) Dans l'eau

Les pesticides peuvent être entraînés par le lavage des feuilles, le ruissellement et la lixiviation. Le ruissellement est responsable de la contamination des eaux de surface, tandis que la lixiviation affecte les eaux souterraines. La mobilité des pesticides dépend de leurs propriétés physicochimiques : solubilité, volatilité, persistance et capacité d'adsorption.

f) Dans le sol

L'évolution des pesticides dans le sol dépend de leurs propriétés physicochimiques (solubilité, DT50 - temps de demi-vie) ainsi que des caractéristiques pédoclimatiques et topographiques du sol (structure, texture, teneur en matière organique, biodiversité, présence de microorganismes) (Slimani, 2022).

Après épandage, les pesticides peuvent subir différents processus :

- **Rétention** dans la matrice du sol
- **Transfert** vers les eaux souterraines
- **Volatilisation** vers l'atmosphère
- **Dégradation biologique** (biodégradation) par les microorganismes
- **Dégradation abiotique** par hydrolyse, oxydoréduction ou photodégradation.

1.4.5.2. Persistance dans les sols

La persistance des pesticides, définie comme la durée nécessaire pour que 50% d'un pesticide soit dégradé, revêt une importance particulière pour les écosystèmes microbiens. Certains composés présentent une stabilité remarquable : le dichloro-diphényl-trichloroéthane (DDT) a une demi-vie estimée à environ dix ans dans les eaux, tandis que la dieldrine peut persister plus de vingt ans (Hassini, 2018).

Tableau 3: Persistance de quelques pesticides dans les eaux de rivière.

Composé	Semaine 1 (%)	Semaine 2 (%)	Semaine 3 (%)	Semaine 4 (%)	Semaine 5 (%)
Lindane	100	100	100	100	100
Heptachlor	100	25	0	0	0
Aldrine	100	100	80	40	20
Endosulfan	100	30	5	0	0
Dieldrine	100	100	100	100	100
DDT	100	100	100	100	100
DDE	100	100	100	100	100
Chlordane	100	86	86	86	86

Source : Zeboudji (2005) in Hassini (2018).

1.4.5.3. Effets des pesticides sur la santé humaine

L'exposition aux pesticides constitue un risque sanitaire significatif, particulièrement lors de leur manipulation ou à proximité des zones traitées. Ce risque dépend des propriétés physicochimiques des substances actives, de la fréquence d'utilisation, de la durée et de l'intensité de l'exposition (Benelouezzane et Fatit, 2020).

b) Types de toxicité

Deux formes majeures de toxicité sont généralement distinguées :

Toxicité aiguë : résulte d'une exposition unique, avec des effets qui se manifestent immédiatement ou peu après l'exposition.

Toxicité chronique : résulte d'expositions répétées à faibles doses sur une longue période, avec des effets différés apparaissant souvent après plusieurs mois ou années.

Tableau 4: Classification des différentes formes d'intoxication.

Formes d'intoxication	Fréquences d'utilisation	Durée de l'exposition
Aiguë	Unique (immédiat)	< 24 heures
Subaiguë	Répétée (court terme)	< 1 mois
Subchronique	Répétée (moyen terme)	De 1 à 3 mois
Chronique	Répétée (long terme)	> 3-6 mois
Cancérogène	Répétée (très long terme)	Exposition durant toute la vie

Source : Soudani (2022).

1.4.5.4. Contamination de la chaîne alimentaire algérienne

L'ampleur de la contamination par les pesticides en Algérie est documentée par l'étude de Mebdoua et al. (2017), qui constitue l'une des rares investigations systématiques sur les résidus de pesticides dans les fruits et légumes consommés en Algérie. Cette étude, basée sur l'analyse de 160 échantillons de 13 types de fruits et légumes frais d'origine domestique et d'importation, révèle une contamination généralisée des produits alimentaires.

Les résultats montrent que 57,5% des échantillons analysés contenaient au moins un résidu de pesticide, avec 25,0% positifs pour un pesticide, 23,1% pour deux pesticides, 7,5% pour trois pesticides et 1,9% pour quatre pesticides ou plus. Plus préoccupant encore, 12,5% des échantillons présentaient des concentrations de résidus supérieures aux limites maximales de résidus (LMR) établies par les réglementations européennes et FAO/WHO.

Les pesticides les plus fréquemment détectés incluaient la lambda-cyhalothrine (63 échantillons), le métalaxyl (37 échantillons), le chlorpyrifos (35 échantillons) et la deltaméthrine (12 échantillons). L'analyse différentielle entre production locale et importée révèle des profils de contamination comparables pour certains pesticides, mais des différences notables pour d'autres, suggérant des pratiques phytosanitaires distinctes selon l'origine des produits.

L'évaluation des risques d'exposition chronique a révélé que, bien que la plupart des expositions soient inférieures à 1% de la dose journalière acceptable (DJA), le chlorpyrifos et la lambda-cyhalothrine présentent des niveaux d'exposition plus élevés (respectivement 42% et 3% de la DJA). Pour l'exposition aiguë, des dépassements de la dose de référence aiguë ont été identifiés

pour sept combinaisons pesticides/denrée alimentaires, concernant principalement le chlorpyrifos, la deltaméthrine et la lambda-cyhalothrine.

1.4.5.5. Données épidémiologiques locales

Les études réalisées en Algérie révèlent des préoccupations sanitaires significatives. L'enquête de Ramdani et al. (2009) auprès de 200 serristes maraîchers dans les localités de Tolga et Sidi-Okba ont révélé que :

- 73% des agriculteurs de Tolga et 59% de ceux de Sidi-Okba ne prennent aucune mesure de protection.
- Les symptômes les plus fréquemment rapportés incluent des maux de tête (27-39%), des troubles de la vision (19-29%) et de la fatigue (19-23%).
- 52% des agriculteurs de Sidi-Okba et 59% de ceux de Tolga ne respectent pas les délais d'attente avant récolte.

Ces données soulignent l'urgence de programmes de formation et de sensibilisation pour améliorer les pratiques phytosanitaires et protéger la santé des agriculteurs et des consommateurs.

Une étude cas-témoins plus récente menée par Zamoum et al., (2023) dans la commune de Hassi Khalifa (wilaya d'El Oued) apporte des éclairages préoccupants sur l'ampleur de la problématique sanitaire liée aux pesticides dans les régions sahariennes algériennes. Cette enquête, réalisée auprès de 159 participants (79 agriculteurs exposés et 80 témoins), révèle des taux d'intoxication particulièrement élevés. Les résultats montrent que 70,13% des agriculteurs manipulant des pesticides ont connu au moins un épisode d'intoxication, avec des symptômes incluant principalement des maux de tête (cités par 35 personnes), des irritations oculaires (21 cas) et des troubles digestifs (vomissements chez 15 personnes, nausées chez 14). L'analyse étiologique révèle que les agriculteurs exposés présentent un risque 41 fois supérieur de développer une intoxication par rapport aux témoins (OR=41,040 ; IC95% : 13,50-124,73).

Cette étude identifie plusieurs facteurs de risque significativement associés à la survenue d'intoxications : le niveau d'instruction, l'utilisation peu professionnelle des pesticides, la mauvaise protection, et le non-respect des consignes de sécurité. Particulièrement alarmant, seulement 78,5% des agriculteurs déclarent respecter les mesures de protection, dont 36 avec une protection partielle et 26 avec une protection complète.

1.5. Écologie microbienne des sols agricoles

1.5.1. Diversité taxonomique et fonctionnelle des communautés bactériennes

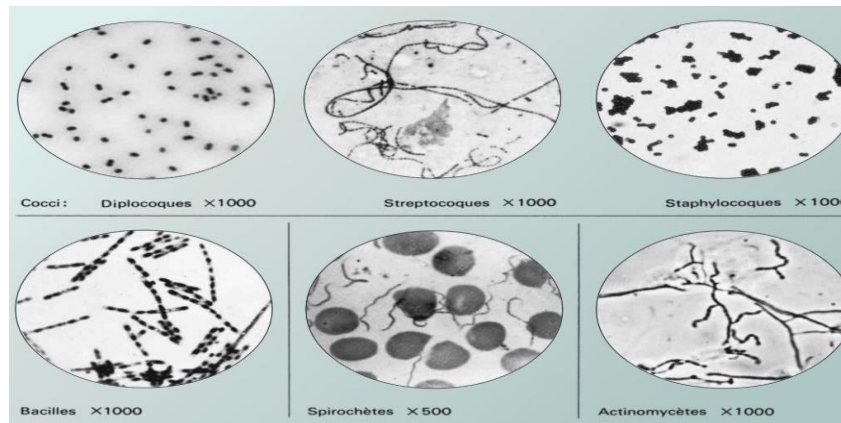
1.5.1.1. Définition et caractéristiques générales des bactéries du sol

Les bactéries sont des micro-organismes procaryotes ubiquitaires, de très petite taille et à morphologie simple, généralement en forme de bâtonnets ou de sphères. Leur rapport surface/volume élevé leur confère une activité métabolique intense, ce qui explique leur rôle central dans les processus biogéochimiques. Elles sont particulièrement abondantes dans les sols riches en azote, notamment au niveau de la rhizosphère des plantes (Naam et Ferhat, 2019).

En microscopie optique, les bactéries peuvent se présenter sous différentes formes morphologiques. La cellule peut être :

- **En forme de coque (cocci)** : sphérique ou ovoïde, groupées par deux (diplocoques) ou assemblées sous forme de chaînettes.
- **En forme de bâtonnet (bacille)** : régulier ou irrégulier, rectiligne ou spiralé.
- **Parfois ramifiée** : comme dans le cas des actinomycètes.

Cette diversité morphologique reflète l'adaptation des bactéries à différentes niches écologiques au sein du sol et constitue un premier niveau de caractérisation de la diversité microbienne (Alonso et al, 2025).



Source : Alonso, Bejot et Forterr, 2025.

Figure 1 : morphologie bactérienne telle qu'elle pouvait être observée en microscopie optique au début du XXe siècle.

1.5.1.2.Méthodes d'étude de la diversité microbienne

c) Limitations des méthodes classiques

Les méthodes classiques d'étude de la diversité microbienne révèlent que seule une faible proportion des microorganismes du sol (0,1 à 10%) est cultivable dans les conditions de laboratoire. Cette limitation importante est en partie due à l'absence des interactions naturelles entre les microorganismes et leur environnement, ce qui a motivé le développement de nouvelles approches méthodologiques plus performantes.

d) Révolution des approches moléculaires

À partir de 1985, une avancée majeure a été introduite avec l'extraction, l'amplification, le clonage et la caractérisation directe de gènes d'ADNr à partir d'échantillons environnementaux. Cette stratégie novatrice a marqué le début d'une ère nouvelle dans l'étude des communautés microbiennes, en facilitant l'accès à la diversité non cultivable (Ighilhariz, 2018).

Cette révolution méthodologique a été rapidement suivie par d'autres techniques moléculaires :

- **L'électrophorèse sur gel** pour la séparation des acides nucléiques
- **La PCR (Polymerase Chain Reaction)** pour l'amplification spécifique
- **Les outils bio-informatiques** pour l'analyse des séquences
- **La génomique microbienne** pour l'étude des génomes complets.

Depuis la fin des années 1990, les analyses du transcriptome et du protéome ont également connu un essor important grâce à l'amélioration des techniques d'extraction et de caractérisation des ARN et des protéines. Aujourd'hui, l'écologie microbienne se positionne comme une discipline intégrative, à l'interface de multiples domaines scientifiques : systématique, génétique, biochimie, biologie moléculaire, physiologie, modélisation, paléobiologie, sciences du sol, parasitologie et épidémiologie.

1.5.1.3. Diversité taxonomique

La diversité taxonomique désigne la variété et la répartition des taxons au sein d'une communauté microbienne. Dans les sols, cette diversité est particulièrement importante chez les bactéries, qui représentent le groupe microbien le plus abondant et le plus diversifié (Lemmel et Florian, 2020).

c. Amplitude de la diversité bactérienne

Chaque gramme de sol peut contenir entre 10^3 et 10^7 espèces bactériennes différentes, constituant l'un des écosystèmes les plus riches de la biosphère. Bien que moins de 1% d'entre elles soient cultivables par les méthodes traditionnelles, les approches moléculaires, notamment le séquençage haut débit de l'ADNr 16S, permettent de caractériser avec précision la composition taxonomique bactérienne à partir de l'ADN extrait directement du sol.

d. Organisation taxonomique

Ces méthodes donnent accès à une grande richesse de données, organisées en unités taxonomiques opérationnelles (OTU), qui servent à quantifier la diversité et à identifier les groupes dominants. Malgré la variabilité entre types de sols et conditions environnementales, plusieurs études convergent vers l'existence d'un noyau dominant de phyla bactériens.

Les **Protéobactéries**, **Actinobactéries** et **Acidobactéries** sont régulièrement identifiés comme les groupes les plus ubiquitaires et abondants dans les sols à l'échelle mondiale. Ils représentent à eux seuls une part substantielle des séquences 16S détectées, bien que les phylotypes qu'ils englobent ne constituent qu'une fraction de l'ensemble de la diversité taxonomique.

1.5.1.4. Diversité fonctionnelle

La diversité fonctionnelle des communautés bactériennes désigne la variété des fonctions métaboliques et écologiques assurées par les micro-organismes au sein d'un écosystème. Elle ne se limite pas à la composition taxonomique des communautés, mais reflète les rôles concrets joués par les bactéries dans le maintien de la fertilité et de la santé des sols (Florence, 2011).

b. Principales fonctions microbiennes

Les fonctions assurées par les bactéries du sol incluent :

- **La dégradation de composés organiques complexes**
- **La nitrification** et autres transformations de l'azote
- **La méthanogénèse** dans les environnements anaérobies
- **La réduction des sulfates** et autres accepteurs d'électrons

- **La solubilisation** des éléments nutritifs
- **La production de substances bioactives.**

d. Approches d'étude des fonctions

Des approches comme le SIP (Stable Isotope Probing) permettent de relier l'identité phylogénétique des bactéries à leurs fonctions in situ, en identifiant spécifiquement les populations actives impliquées dans l'assimilation de substrats marqués. Ainsi, cette diversité fonctionnelle constitue un indicateur clé du fonctionnement et de la résilience des écosystèmes microbiens.

e. Groupes fonctionnels majeurs

Selon Abbou et Bensaber (2023), plusieurs groupes bactériens jouent des rôles fonctionnels particulièrement importants :

Les Actinomycètes : Groupe de bactéries appartenant à la flore du sol, qui jouent un rôle important dans la décomposition des matières organiques. Les actinomycètes sont particulièrement importants en raison de leur rôle dans la fertilisation des sols et de leur capacité de synthèse de composés complexes comme les antibiotiques, les vitamines et les stérols.

Le genre *Pseudomonas* sp : Plusieurs rhizobactéries du genre *Pseudomonas* ont la capacité d'induire une résistance systémique chez la plante, ce qui engendre une protection contre un grand nombre d'agents pathogènes fongiques et bactériens.

Le genre *Rhizobium* sp : Les Rhizobia, du grec "rhiza" (racine) et "bio" (vie), signifie littéralement "organisme vivant dans la racine". Ce sont des bactéries formant une symbiose fixatrice d'azote avec les légumineuses. Après colonisation du système racinaire par des rhizobia compatibles avec la plante hôte, il y a formation de nodules (nodosités), à l'intérieur desquelles les Rhizobia endosymbiotiques fixeront l'azote atmosphérique au bénéfice de la plante.

Le genre *Bacillus* sp : Bactérie aérobie stricte et libre dans le sol qui génère une enzyme phytase permettant de libérer davantage de phosphore organique du sol. Elle colonise les racines, ralentit les champignons nuisibles et génère également des auxines (hormones de croissance).

Le genre *Azotobacter* sp : Bactérie aérobie stricte et libre dans le sol qui fixe l'azote atmosphérique chez la plupart des végétaux et le transforme en ammonium (20 à 40 kilos par hectare). *Azotobacter* sp, qualifié de PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria), synthétise des substances biologiquement actives telles que les phytohormones (auxines) stimulant ainsi la croissance des plantes.

1.5.2. Rôles écologiques des bactéries dans les cycles biogéochimiques des sols

Les bactéries sont indispensables dans les cycles biogéochimiques, ces processus naturels qui font circuler des éléments comme le carbone, l'azote, le soufre et le phosphore dans l'environnement. À travers ces cycles, les bactéries transforment les éléments en formes utilisables par les plantes, les animaux et d'autres organismes, soutenant ainsi l'équilibre écologique (Charlotte, 2024).

1.5.2.1. Rôle dans le cycle du carbone

D. Stockage et transformation du carbone

Les sols stockent une grande quantité de carbone organique, issu des plantes, animaux et micro-organismes. Ce carbone est transformé dans le sol grâce à l'action des micro-organismes, surtout les bactéries, qui dégradent la matière organique, l'utilisent pour leur croissance, et libèrent du CO₂ par respiration. Les bactéries jouent donc un rôle clé dans la circulation, la transformation et la libération du carbone (Chenu et al., 2014).

Leur activité influence directement la capacité du sol à stocker du carbone, ce qui est essentiel pour la fertilité du sol et la lutte contre le changement climatique. Cette fonction revêt une importance particulière dans les régions arides, où le stockage de carbone est souvent limité par les conditions climatiques extrêmes.

E. Processus de fixation et minéralisation

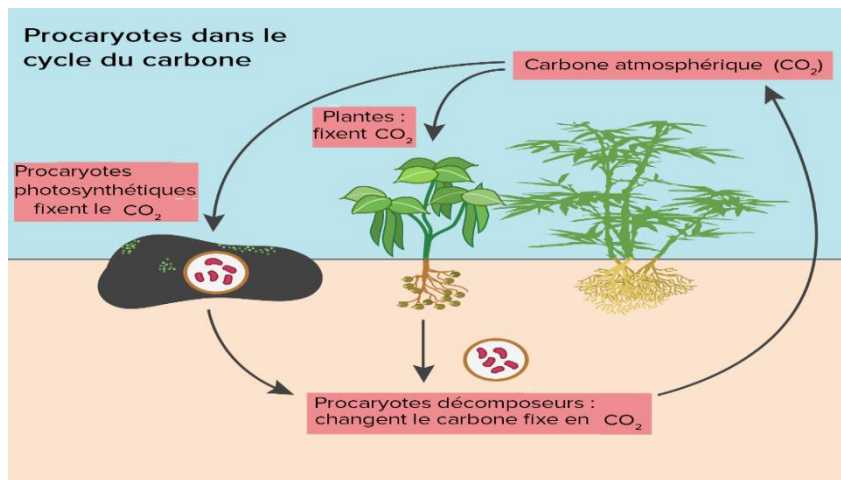
Les bactéries du sol jouent un rôle central dans le cycle biogéochimique du carbone, en assurant aussi bien sa fixation que sa minéralisation (Gaouar, 2024) :

Fixation du carbone : Certaines bactéries autotrophes, notamment les bactéries chimiolithotrophes et les cyanobactéries, sont capables de fixer le CO₂ atmosphérique pour le transformer en composés organiques simples tels que les oses, qui servent ensuite à la synthèse de glucides de réserve, d'acides aminés et d'acides nucléiques.

Minéralisation : La majorité des bactéries hétérotrophes, dits chimioorganotrophes, interviennent dans la décomposition de la matière organique. À travers les processus de respiration aérobie et de fermentation, elles dégradent les résidus organiques présents dans le sol, libérant ainsi du CO₂ et contribuant à la restitution du carbone à l'atmosphère.

F. Contributions spécifiques des procaryotes

Selon Khan Academy (2025), en plus de leur rôle de décomposeurs, certains procaryotes comme les cyanobactéries participent activement à la fixation du carbone atmosphérique grâce à la photosynthèse. À l'inverse, d'autres bactéries hétérotrophes, en décomposant les matières organiques issues des plantes et des animaux, assurent la libération du CO₂ par la respiration cellulaire, contribuant ainsi à la boucle du cycle du carbone et à la remise en circulation des nutriments essentiels dans l'écosystème.



Source : Khan,2025

Figure 2: Image montre une version simplifiée du cycle du carbone, mettant en avant le rôle des procaryotes.

1.5.2.2. Rôle dans le cycle de l'azote

e) Importance fondamentale

Le cycle de l'azote est un processus biogéochimique fondamental dans les sols, assurant la transformation continue de l'azote entre ses différentes formes chimiques. Les microorganismes, en particulier les bactéries, y jouent un rôle central et irremplaçable (Keuschnig, 2016).

Grâce à des processus tels que la fixation biologique de l'azote atmosphérique, la minéralisation de la matière organique, la nitrification, la dénitrification, la réduction dissimilatoire des nitrates (DNRA) et l'oxydation anaérobie de l'ammonium (Anammox), ces bactéries assurent la disponibilité de l'azote sous des formes assimilables (NH_4^+ , NO_3^-) pour les plantes, tout en maintenant l'équilibre global du cycle.

f) Fixation symbiotique de l'azote

Les fixateurs symbiotiques sont des bactéries appartenant au groupe des *Rhizobium* et apparentés, qui vivent en association étroite avec les plantes légumineuses. Cette relation mutualiste s'établit dans des structures spécialisées appelées nodules, localisées sur les racines (Biofertilisants, 2025).

C'est notamment le cas de *Bradyrhizobium japonicum*, souvent associé aux racines du soja. Dans ces nodules, la plante fournit aux bactéries des composés carbonés comme source d'énergie. En échange, les bactéries captent l'azote gazeux de l'atmosphère (N_2) et le transforment en ammonium (NH_4^+), une forme que la plante peut assimiler pour sa croissance. Ces bactéries peuvent fixer jusqu'à 300 unités d'azote par an. Toutefois, leur action reste limitée aux légumineuses, à l'exception des actinomycètes du genre *Frankia*, qui forment des associations symbiotiques similaires avec certaines plantes dites actinorhiziennes comme les aulnes, les argousiers et d'autres espèces d'arbres ou arbustes.

g) Fixation libre de l'azote

Les bactéries diazotrophes représentent le groupe le plus intéressant pour l'agriculture générale. Elles ont la capacité de développer différents types d'associations avec des racines et différentes espèces de plantes. Ces bactéries vivent dans le sol à l'interface entre le sol et les racines, dans une zone appelée la rhizosphère (Delamotte, 2019).

Les bactéries diazotrophes libres se nourrissent de molécules sécrétées par les racines et, en contrepartie, elles fixent le diazote pour le restituer à la plante sous forme d'ammonium. Trois exemples principaux peuvent être cités :

- *Azotobacter* sp
- *Pseudomonas* sp
- *Azomonas* sp.

h) Processus de nitrification

La **nitrification** est un processus microbiologique essentiel dans le cycle de l'azote, au cours duquel l'ammonium (NH_4^+) est d'abord oxydé en nitrite (NO_2^-), puis en nitrate (NO_3^-). Ce processus, réalisé par des bactéries spécifiques, joue un rôle crucial dans la nutrition des plantes, car il conditionne la forme de l'azote assimilable par ces dernières (Kambouz & Zenasni, 2021). Deux groupes de bactéries appartenant à la famille des Nitrobacteriaceae sont responsables de ces réactions :

- **Les bactéries du genre *Nitrosomonas*** : assurent l'oxydation de l'ammonium en nitrite (étape de nitritation) ;
- **Celles du genre *Nitrobacter*** : transforment le nitrite en nitrate (étape de nitratisation).

Ces micro-organismes sont des bactéries Gram négatif, de petite taille et à mobilité variable.

Tableau 5: Principaux genres et espèces de bactéries nitrifiantes.

Types d'oxydation	Genre	Espèces principales
Nitritation ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$)	<i>Nitrosomonas</i>	<i>N. aestuarii</i> , <i>N. communis</i> , <i>N. halophila</i> , <i>N. ureae</i> , <i>N. nitrosa</i> , <i>N. oligotropha</i>
	<i>Nitrococcus</i>	<i>N. mobilis</i> , <i>N. nitrosus</i> , <i>N. oceanus</i>
	<i>Nitrospira</i>	<i>N. briensis</i>
Nitratisation ($\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$)	<i>Nitrobacter</i>	<i>N. alkalicus</i> , <i>N. vulgaris</i> , <i>N. mobilis</i>
	<i>Nitrococcus</i>	<i>N. marina</i>
	<i>Nitrospira</i>	<i>N. gracilis</i>

Source : Adapté de Kambouz & Zenasni (2021).

1.5.2.3. Rôle dans le cycle du phosphore

D. Importance du phosphore pour les plantes

Le phosphore est, avec l'azote et le potassium, l'un des éléments nutritifs majeurs pour la croissance des plantes. Il joue un rôle essentiel dans le développement précoce, la croissance racinaire, la rigidité des tissus, la floraison et la fructification, ainsi que dans la synthèse de la matière organique végétale et la résistance aux stress abiotiques (Biofertilisants, 2025).

E. Problématique de la biodisponibilité

Toutefois, bien que le sol contienne des quantités importantes de phosphore, seule une faible portion est biodisponible pour les plantes, sous forme d'ions H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} . Le phosphore du sol se présente principalement sous deux formes :

Le phosphore inorganique : complexé avec des minéraux comme le fer, l'aluminium, le calcium ou le magnésium selon le pH du sol

Le phosphore organique : immobilisé dans la matière organique sous forme de monoesters ou de phytates.

F. Rôle des bactéries solubilisatrices

Dans ce contexte, certaines bactéries du sol jouent un rôle crucial en rendant le phosphore insoluble assimilable. Ces microorganismes, appelés bactéries solubilisatrices de phosphates, agissent en produisant des acides organiques ou des enzymes qui libèrent le phosphore fixé, permettant ainsi son absorption par les racines, en particulier dans les sols très acides ou très basiques.

La minéralisation du phosphore organique est un processus clé en agriculture, assuré par des micro-organismes du sol, notamment des rhizobactéries promotrices de la croissance. Ces bactéries, comme *Pseudomonas*, *Bacillus* ou *Rhizobium*, transforment le phosphore insoluble en formes assimilables par les plantes (Djeghar et Djeghar, 2014).

Deux mécanismes principaux sont impliqués :

1. **La dissolution des phosphates inorganiques** par des acides organiques (lactique, oxalique, citrique) qui libèrent le phosphore en complexant les métaux.
2. **La minéralisation des composés organiques phosphorés** par des enzymes phosphatases.

1.5.3. Interactions bactéries-plantes et leur influence sur la croissance végétale

1.5.3.1. Importance générale des interactions microbiennes

L'activité microbienne du sol est essentielle à la fertilité et à la santé des plantes. Les microorganismes décomposent la matière organique, libèrent des nutriments (N, P), fixent l'azote, améliorent l'absorption des éléments par les mycorhizes, renforcent la structure du sol, protègent contre les pathogènes, et interagissent avec les racines par des signaux chimiques (Lehas et al., 2024).

1.5.3.2. Les bactéries phyto-bénéfiques (PGPR)

a. Définition et rôles généraux

Les bactéries phyto-bénéfiques, regroupées sous le terme de PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria), jouent un rôle clé dans la stimulation de la croissance végétale. Elles favorisent la germination rapide des graines, l'accroissement de la biomasse, l'accélération de la floraison, tout en limitant le développement des maladies et en atténuant les effets négatifs des conditions environnementales sous-optimales (Riah, 2021)

b. Mécanismes d'action

Les mécanismes d'action de ces micro-organismes, bien que partiellement élucidés, reposent principalement sur :

- **Production et modulation de phytohormones** : incluant l'auxine, l'éthylène, la cytokinine et la gibbérelline.
- **Mobilisation des nutriments** : via la solubilisation du phosphore, la fixation d'azote et la production de sidérophores chélatant le fer.
- **Renforcement de la résistance aux pathogènes** : en occupant des niches écologiques spécifiques dans la rhizosphère et en exerçant des effets amensalistes par antibiose.
- **Induction de résistance systémique (RSI)** : à large spectre, pré-immunisant ainsi la plante contre diverses attaques phytopathogènes.

Tableau 6: Classes de phytohormones et leurs effets sur les plantes.

Classe	Effet sur les plantes
Auxine	Élongation et division cellulaire, initiation de la racine, dominance apicale
Cytokinine	Inhibition de l'élongation des racines, stimulation de la division cellulaire, expansion des feuilles par élargissement des cellules, retardement de la sénescence
Gibbérelline	Germination des graines, allongement des tiges, induction florale et croissance des fruits
Acide abscissique	Fermeture des stomates, inhibition de la croissance des pousses, dormance des bourgeons, réponse aux stress abiotiques et biotiques
Éthylène	Sénescence et abscission, réponse aux stress abiotiques et biotiques

Source : Adapté de Houheche et al. (2022).

1.5.4. Bio-indicateurs microbiens de la santé des sols

1.5.4.1. Importance de la diversité microbienne en agriculture

La diversité microbienne dans les agrosystèmes est essentielle pour maintenir la qualité des sols. Elle participe à des fonctions clés telles que la décomposition de la matière organique, le recyclage des nutriments, la dégradation des polluants, la protection contre les pathogènes et la structuration du sol (Bourgeois, 2015).

Les microorganismes réagissent rapidement aux changements environnementaux, ce qui en fait de bons bioindicateurs de la santé des sols. Ces indicateurs peuvent être classés en deux grandes catégories : quantitatifs et qualitatifs.

C. Bioindicateurs microbiens quantitatifs

Les bioindicateurs microbiens quantitatifs permettent d'évaluer l'état biologique du sol de manière mesurable et comparable :

- Biomasse microbienne

La biomasse microbienne, composée d'organismes vivants et morts, est fortement corrélée à la teneur en matière organique et reflète la capacité du sol à recycler les nutriments et à transformer la matière organique. Elle est sensible aux pratiques agricoles, à la pollution, ainsi qu'aux propriétés physicochimiques du sol comme le pH, la texture et le carbone organique.

Sa mesure peut se faire par extraction et quantification de l'ADN du sol, ce qui permet d'estimer l'abondance microbienne de manière précise et reproductible.

- **Densité des populations microbiennes**

La densité des bactéries et des champignons constitue un indicateur clé de la fertilité microbienne. Une faible densité ou un déséquilibre dans le ratio champignons/bactéries peut signaler un dysfonctionnement biologique du sol. Ces densités sont généralement réduites dans les sols cultivés intensivement.

Des techniques telles que le dosage des PLFA (Phospholipid Fatty Acid) ou la qPCR (quantitative Polymerase Chain Reaction) sont utilisées pour quantifier ces populations microbiennes avec précision.

D. Bioindicateurs microbiens qualitatifs

Les bioindicateurs microbiens qualitatifs permettent de caractériser plus précisément la structure et la diversité des communautés microbiennes, au-delà des mesures globales fournies par les indicateurs quantitatifs (Laggoun et Laour, 2023).

- **Outils moléculaires**

Grâce aux outils moléculaires développés en écologie microbienne, il est maintenant possible de détecter la variabilité génétique au sein des communautés bactériennes et fongiques. Trois indicateurs principaux sont utilisés :

Structure génétique : Les techniques d'empreintes génétiques telles que la DGGE (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis), la TGGE (Temperature Gradient Gel Electrophoresis), la T-RFLP (Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism) ou la RISA (Ribosomal Intergenic Spacer Analysis) permettent de visualiser les profils spécifiques des communautés microbiennes.

Indices de diversité : Calcul de différents indices (Shannon, Simpson, etc.) pour quantifier la richesse et l'équitabilité des communautés

Composition taxonomique : Identification des groupes bactériens présents et de leur abondance relative.

- **Sensibilité aux perturbations**

Ces profils mettent en évidence des modifications de la structure microbienne en réaction aux changements des pratiques de gestion des sols ou à la contamination, faisant de ces indicateurs des outils sensibles pour évaluer les perturbations écologiques.

1.5.4.2. Activités microbiennes fonctionnelles

En complément des indicateurs structurels, plusieurs auteurs soulignent que les activités microbiennes fonctionnelles peuvent également être utilisées comme indices biologiques pertinents de la qualité des sols. Les microorganismes remplissent les critères essentiels d'un bon bioindicateur : mesure facile, sensibilité au stress, robustesse.

Toutefois, en raison de la diversité des fonctions microbiennes, il est recommandé de sélectionner des activités clés représentatives, notamment :

La respiration microbienne : reflète à la fois la biomasse active et la capacité du sol à transformer la matière organique, ce qui en fait un indicateur efficace de l'activité biologique du sol.

La dénitrification : témoigne du fonctionnement du cycle de l'azote et de la capacité du sol à gérer cet élément nutritif essentiel.

Ces activités fonctionnelles offrent une vision dynamique de l'état biologique du sol, complémentaire aux approches structurelles.

1.5.5. Vulnérabilité des communautés microbiennes aux perturbations anthropiques

1.5.5.1. Sensibilité aux produits phytosanitaires

Dans le contexte de notre étude, il est crucial de comprendre que les communautés bactériennes présentent une sensibilité variable aux produits phytosanitaires. Cette sensibilité dépend de plusieurs facteurs :

- **La nature chimique** du produit phytosanitaire ;
- **Les concentrations appliquées** et la fréquence des traitements ;
- **Les conditions environnementales** (température, humidité, pH) ;
- **La structure initiale** de la communauté microbienne ;
- **La présence d'espèces résistantes** ou de mécanismes de détoxification.

1.5.5.2. Mécanismes d'impact

Les produits phytosanitaires peuvent affecter les communautés microbiennes par plusieurs mécanismes :

Toxicité directe : certains composés exercent un effet toxique direct sur les cellules bactériennes ;

Modification de l'habitat : altération des conditions physicochimiques du sol ;

Perturbation des interactions : modification des relations trophiques entre espèces ;

Sélection d'espèces résistantes : émergence de communautés appauvries, mais résistantes.

1.5.5.3. Conséquences écologiques

Ces perturbations peuvent avoir des conséquences importantes sur :

- **La stabilité des cycles biogéochimiques** ;
- **La fertilité naturelle des sols** ;
- **La résistance aux pathogènes** ;
- **La résilience de l'écosystème** face aux stress environnementaux.

1.6. Interactions entre pratiques agricoles et microbiome du sol

1.6.1. Impact des produits phytosanitaires sur les communautés bactériennes du sol

1.6.1.1. Mécanismes généraux d'impact

Les pesticides, largement utilisés en agriculture, atteignent rarement leur cible biologique avec une efficacité de 100%, laissant la majorité des substances actives contaminer le sol environnant. Cette contamination diffuse a des effets néfastes sur la microflore du sol, essentielle au bon fonctionnement biologique, chimique et physique du compartiment tellurique (Sharma et al., 2023).

L'impact des pesticides sur les communautés microbiennes s'exerce à travers plusieurs mécanismes interconnectés :

Toxicité directe : Les substances actives peuvent exercer un effet toxique immédiat sur les cellules microbiennes, perturbant leurs processus métaboliques vitaux.

Modification de l'habitat : Les pesticides altèrent les conditions physicochimiques du sol, modifiant le pH, la disponibilité des nutriments et la structure de la matrice édaphique.

Perturbation des réseaux trophiques : Les substances phytosanitaires peuvent rompre les chaînes alimentaires microbiennes, affectant les relations prédateur-proie et les interactions symbiotiques.

Sélection de populations résistantes : L'usage répété de pesticides peut favoriser l'émergence de communautés microbiennes appauvries, mais résistantes aux substances toxiques.

Ces mécanismes d'impact des pesticides sur les communautés microbiennes prennent une dimension particulière dans le contexte algérien, où l'étude de Mebdoua et al., (2017) révèle une contamination systémique de la chaîne alimentaire. Avec 57,5% des fruits et légumes analysés contenant au moins un résidu de pesticide, cette contamination témoigne d'une pression chimique intense exercée sur les écosystèmes agricoles. La détection fréquente de pesticides persistants comme le chlorpyrifos (21,9% des échantillons) et la lambda-cyhalothrine (39,4% des échantillons) dans les produits alimentaires suggère une accumulation de ces substances dans l'environnement, incluant potentiellement les sols agricoles. Cette persistance dans la chaîne alimentaire indique que les sols, réceptacles finaux de ces applications, sont soumis à une exposition continue et cumulative aux pesticides. Le fait que 12,5% des échantillons dépassent les limites maximales de résidus témoigne d'un usage parfois excessif de ces substances, créant des conditions de sur-contamination susceptibles d'exercer une pression sélective intense sur les communautés microbiennes du sol. Cette situation est particulièrement préoccupante dans les régions arides où les mécanismes naturels de détoxification peuvent être limités par les conditions environnementales extrêmes.

1.6.1.2. Effets spécifiques sur les bactéries du sol

Les pesticides ont un impact significatif sur les bactéries du sol, car ils sont conçus pour tuer les organismes nuisibles, y compris potentiellement les bactéries bénéfiques. Selon Onwona-Kwakye et al., (2020), ces substances agissent de différentes manières sur les bactéries telluriques :

1.6.1.3. Réduction de la biodiversité bactérienne

Certains pesticides peuvent inhiber la croissance et réduire la diversité des bactéries du sol. Cette diminution de la biodiversité entraîne plusieurs conséquences :

- **Réduction de la résilience du sol** : Un sol moins diversifié biologiquement est plus vulnérable aux perturbations.
- **Vulnérabilité accrue aux maladies** : La perte de bactéries antagonistes augmente les risques d'infections fongiques et bactériennes des cultures.
- **Altération des cycles biogéochimiques** : La diminution de la diversité fonctionnelle perturbe les processus de transformation des éléments nutritifs.

1.6.1.4. Déséquilibre des populations bactériennes

Les pesticides peuvent perturber l'équilibre entre les différentes espèces de bactéries présentes dans le sol, en éliminant préférentiellement les bactéries bénéfiques qui jouent un rôle important dans :

- **La fertilisation naturelle du sol** par la fixation d'azote et la solubilisation du phosphore ;
- **La décomposition de la matière organique** et le recyclage des nutriments ;
- **La protection biologique** contre les pathogènes telluriques ;
- **La structuration du sol** par la production de substances agglomérantes.

1.6.1.5. Persistance et effets à long terme

La persistance de certains pesticides dans le sol constitue un facteur aggravant de leurs effets sur les communautés microbiennes. Des substances peuvent rester actives pendant des années, exerçant un impact continu sur la santé du sol et des plantes qui y poussent.

Les pesticides à large spectre sont généralement plus nocifs pour les bactéries du sol que les pesticides sélectifs, car ils affectent une plus grande variété d'organismes non-cibles. Cette non-sélectivité peut entraîner des perturbations profondes et durables de l'équilibre microbien.

1.6.1.6. Facteurs modulant l'impact des pesticides

Plusieurs facteurs influencent l'intensité et la durée de l'impact des pesticides sur les communautés bactériennes :

Propriétés physicochimiques des pesticides : solubilité, volatilité, persistance (DT50), coefficient d'adsorption.

Conditions environnementales : température, humidité, pH du sol, teneur en matière organique.

Fréquence et modalités d'application : dose, période d'application, méthode d'épandage.

Caractéristiques du sol : texture, structure, capacité d'échange cationique, activité biologique initiale.

Interactions avec d'autres pratiques : fertilisation, irrigation, travail du sol.

1.6.1.7. Exemples d'impacts documentés

- **Données de la région des Ziban (Algérie)**

L'étude de Bettiche et al. (2019) dans la région des Ziban fournit des exemples concrets d'impact des pesticides sur les sols agricoles. Leur analyse multi-résidus a révélé la présence systématique d'azinphos-méthyl (AZM) et de p,p'-DDE dans tous les échantillons de sol analysés, avec des concentrations variant de 5,5 à 51,1 µg/kg de poids sec pour l'AZM.

Ces concentrations, bien que relativement faibles, témoignent d'une contamination diffuse qui peut exercer des effets subtils, mais cumulatifs sur les communautés microbiennes. L'origine de cette contamination, attribuée principalement à la dérive atmosphérique depuis des régions voisines utilisant ces substances, illustre la complexité des voies de contamination des sols agricoles.

1.6.1.8. Observations sur les pratiques phytosanitaires

L'enquête de Ramdani et al., (2009) auprès de 200 serristes maraîchers dans les localités de Tolga et Sidi-Okba révèle des pratiques préoccupantes :

- **Fréquence élevée des traitements** : 36-38% des agriculteurs traitent tous les 4 à 7 jours.
- **Non-respect des délais d'attente** : 52-59% des agriculteurs ne respectent pas les délais avant récolte.
- **Absence de protection** : 59-73% des agriculteurs ne prennent aucune mesure de protection

Ces pratiques intensives créent une pression continue sur les communautés microbiennes, susceptible d'entraîner des modifications profondes de leur structure et de leur fonctionnement.

Des données plus récentes collectées par Zamoum et al., (2023) dans la région aride d'El Oued cette fois-ci confirment et amplifient ces préoccupations. Leur étude cas-témoins révèle une utilisation prédominante d'herbicides (47,5% des applications), suivis des insecticides (41,7%) et des fongicides (9,2%). Les matières actives les plus fréquemment citées incluent le Linuron (29,87%), pourtant interdit dans certains pays, l'Acétamipride (15,58%) et le Lufenuron (20,77%).

L'enquête met en évidence des pratiques d'utilisation particulièrement préoccupantes : 89,9% des agriculteurs manipulent ces produits mensuellement avec des quantités variantes entre 3 et 6 litres par mois. Plus inquiétant encore, l'étude démontre une relation statistiquement significative entre la fréquence d'utilisation et le type de matière active, ainsi qu'entre le type de pesticide utilisé et la survenue d'intoxications.

Ces résultats quantifient l'ampleur du problème dans les régions arides algériennes et suggèrent que les communautés microbiennes de ces sols sont soumises à une pression chimique intense et continue, particulièrement dans un contexte où les conditions environnementales extrêmes peuvent amplifier la toxicité et réduire la capacité de détoxification naturelle des écosystèmes.

1.6.2. Effets des pratiques culturales sur la diversité et l'activité microbienne

1.6.2.1.Principe de perturbation intermédiaire

Selon De Falleur (2024), la biodiversité des sols, notamment la biomasse et la diversité microbienne, est fortement influencée par les caractéristiques physicochimiques du sol (texture, pH, teneur en matière organique) ainsi que par les pratiques d'usage (agricoles, forestières, prairiales).

Le principe écologique de perturbation intermédiaire suggère que la diversité microbienne atteint son maximum sous un niveau de perturbation modéré. Ce principe explique pourquoi les systèmes agricoles extensifs peuvent parfois présenter une diversité microbienne supérieure à celle des prairies naturelles non perturbées, tout en restant inférieures à celle des forêts climaciques.

1.6.2.2. Impact du travail du sol

Mécanismes d'action

Le travail du sol modifie directement l'activité microbienne en perturbant l'environnement physique et chimique du sol. Cette perturbation s'exerce à travers plusieurs mécanismes (Bouthier et al., 2014) :

Fragmentation des agrégats : Le labour détruit la structure des agrégats du sol, modifiant la distribution des habitats microbiens et l'accessibilité aux substrats organiques.

Modification de la porosité : Les opérations mécaniques altèrent la porosité du sol, affectant la circulation de l'air et de l'eau, paramètres cruciaux pour l'activité microbienne.

Redistribution de la matière organique : Le travail du sol enfouit les résidus de surface et homogénéise la distribution de la matière organique, modifiant la disponibilité des nutriments pour les microorganismes.

Exposition aux conditions défavorables : Les microbes sont exposés à des conditions de sécheresse, d'oxygénation excessive ou de variations thermiques plus importantes.

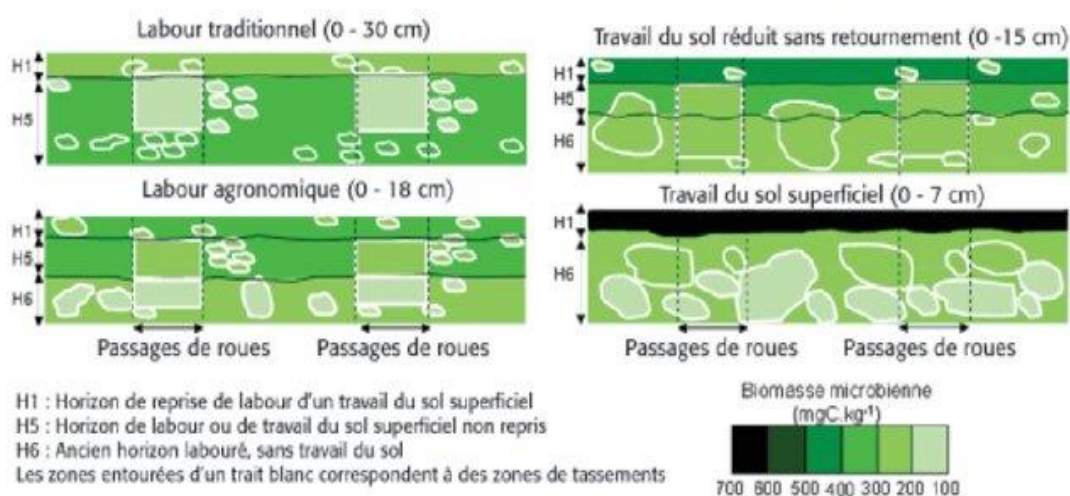
Effets différentiels selon l'intensité

L'intensité et la fréquence du travail du sol déterminent l'ampleur de ces effets :

Travail réduit : Favorise généralement une plus grande stabilité biologique et une activité microbienne plus soutenue, avec maintien de gradients verticaux de diversité microbienne.

Travail intensif : Tends à appauvrir la biomasse microbienne et à déséquilibrer les communautés, avec homogénéisation de la distribution microbienne dans le profil cultural.

Semis direct : Maintient la stratification naturelle des communautés microbiennes et préserve les réseaux mycéliens.



Source : Bouthier et al, 2014.

Figure 3: Influence de la profondeur et du type de travail du sol sur la biomasse microbienne et sa répartition au sein du profil cultural (0-30 cm).

Cette figure illustre clairement l'influence de la profondeur et du mode de travail du sol sur la biomasse microbienne. On observe une concentration plus élevée de la biomasse en surface dans les systèmes sans labour. En revanche, le labour conventionnel tend à homogénéiser la distribution de la biomasse microbienne sur l'ensemble du profil cultural (0–30 cm).

1.6.2.3.Effet de la rotation des cultures

a. Principe et bénéfices généraux

La rotation des cultures est une méthode de culture respectueuse de l'environnement et hautement durable. Une compréhension approfondie de ses effets sur les micro-organismes du sol facilite son intégration dans les systèmes agricoles modernes (Liu et al., 2023).

b. Impacts quantifiés sur les communautés microbiennes

Des travaux récents ont montré que la rotation des cultures exerce des effets bénéfiques mesurables sur les communautés microbiennes :

Augmentation de la biomasse microbienne : Les systèmes en rotation présentent une augmentation significative de la biomasse microbienne pouvant atteindre 15,8% par rapport aux monocultures.

Amélioration de la diversité bactérienne : L'indice de Shannon, indicateur de diversité, présente une hausse moyenne de 7,7% dans les systèmes de rotation.

Renforcement de la stabilité fonctionnelle : Ces changements reflètent une amélioration des fonctions écologiques du sol, notamment la décomposition de la matière organique, la fixation de l'azote et la résilience face aux stress environnementaux.

c. Mécanismes sous-jacents

L'amélioration de la diversité microbienne par la rotation s'explique par plusieurs mécanismes :

Diversification des niches écologiques : Chaque culture crée des conditions spécifiques (exsudats racinaires, résidus, rhizosphère) favorables à différents groupes microbiens.

Alternance des apports organiques : La succession de cultures aux caractéristiques contrastées stimule différentes voies métaboliques microbiennes.

Rupture des cycles pathogènes : La rotation limite l'accumulation d'agents pathogènes spécialisés, préservant les communautés microbiennes bénéfiques.

Amélioration de la structure du sol : L'alternance de cultures aux systèmes racinaires différents améliore la structure physique du sol, créant des habitats plus favorables aux microorganismes.

1.6.2.4.Impact de la jachère

a) Définition et principe

La jachère est une technique agricole consistant à laisser un champ cultivé au repos, sans culture pendant une période spécifique. Cette pratique ancestrale revêt une importance

particulière dans les régions arides et semi-arides, où elle permet la reconstitution des ressources du sol (Hamideche et al. 2023).

b) Effets sur la diversité bactérienne

La mise en œuvre de la jachère a un impact significatif sur la diversité bactérienne du sol :

Augmentation de la richesse spécifique : La jachère permet l'augmentation de la richesse et de la diversité des bactéries, favorisant le retour d'espèces moins compétitives en situation de culture intensive.

Rétablissement des populations bénéfiques : Les populations bactériennes bénéfiques peuvent se rétablir dans le sol, incluant celles impliquées dans :

- La fixation de l'azote atmosphérique ;
- La dégradation de la matière organique ;
- La détoxification des résidus phytosanitaires accumulés.

Amélioration des fonctions microbiennes : La jachère favorise l'activité enzymatique et aide les bactéries du sol à décomposer la matière organique, ce qui améliore la qualité générale du sol.

c) Implications pour la gestion des sols

La jachère contribue à :

La préservation de la biodiversité globale : En offrant un refuge aux espèces microbiennes sensibles aux perturbations agricoles.

L'augmentation de la résistance aux stress : Un sol plus diversifié biologiquement résiste mieux aux stress environnementaux (sécheresse, salinisation, contamination).

La restauration des cycles biogéochimiques : La période de repos permet la restauration des équilibres nutritionnels perturbés par l'agriculture intensive.

1.6.2.5. Effets des engrais sur la diversité et l'activité microbienne

A. Impact des amendements organiques

L'apport d'amendements organiques exerce des effets généralement positifs sur les communautés microbiennes (Bebber & Richards, 2022) :

Stimulation de la biomasse microbienne totale : incluant les biomasses bactériennes et fongiques, avec augmentation des populations de bactéries Gram-positives et Gram-négatives.

Augmentation de l'activité enzymatique : Cette stimulation reflète une croissance plus dynamique des communautés microbiennes, contribuant à améliorer les fonctions biologiques essentielles du sol.

Amélioration des fonctions écologiques : notamment la décomposition de la matière organique, la stabilisation des agrégats et l'optimisation des cycles des nutriments.

B. Effets contrastés des engrais chimiques

L'utilisation d'engrais chimiques (NPK) peut entraîner des effets contradictoires selon les modalités d'application (Yuan et al., 2023) :

Utilisation excessive : Peut entraîner une diminution marquée de la diversité bactérienne et de l'activité microbienne du sol, affectant l'équilibre des communautés microbiennes et altérant les fonctions écologiques essentielles.

Acidification du sol : Certains engrais azotés provoquent une acidification qui peut défavoriser certains groupes microbiens.

Modification des rapports nutritionnels : L'apport déséquilibré de nutriments peut favoriser certaines espèces au détriment d'autres.

Compensation par les amendements organiques : Le recours simultané aux amendements organiques permet de compenser ces effets négatifs en stimulant l'activité enzymatique, en enrichissant la matière organique et en favorisant une biodiversité fonctionnelle plus stable et résiliente.

1.6.3. Interactions complexes entre facteurs

1.6.3.1. Effets synergiques et antagonistes

Les différentes pratiques agricoles n'agissent pas de manière isolée sur les communautés microbiennes. Leurs effets peuvent être :

Synergiques : L'utilisation combinée de pesticides et d'engrais chimiques peut amplifier les effets négatifs sur la diversité microbienne.

Antagonistes : L'apport de matière organique peut atténuer l'impact négatif des pesticides en favorisant la détoxification microbienne.

Additifs : Certains effets se cumulent de manière linéaire, comme l'impact du travail du sol et de la fertilisation sur la distribution de la biomasse microbienne.

1.6.3.2. Facteurs de variabilité temporelle

L'impact des pratiques agricoles sur les communautés microbiennes varie selon :

La saison : Les effets sont généralement plus marqués pendant les périodes d'activité biologique intense (printemps, automne).

La fréquence d'application : Les effets cumulatifs des pratiques répétées peuvent conduire à des modifications irréversibles des communautés.

L'historique de la parcelle : Les pratiques passées conditionnent la résilience des communautés actuelles.

1.6.3.3. Spécificités des régions arides

Dans les régions arides et semi-arides, plusieurs facteurs spécifiques modulent les interactions entre pratiques agricoles et microbiome :

Faible teneur en matière organique : Réduit la capacité tampon du sol face aux perturbations chimiques.

Stress hydrique : Amplifie la sensibilité des communautés microbiennes aux perturbations additionnelles.

Températures extrêmes : Modifient la persistance et la toxicité des pesticides.

Faible diversité initiale : Réduit la résilience face aux perturbations anthropiques.

1.6.4. Conséquences écologiques et agronomiques

1.6.4.1. Altération des services écosystémiques

L'impact des pratiques agricoles sur les communautés microbiennes peut compromettre plusieurs services écosystémiques essentiels :

1.6.4.2. Fertilité naturelle du sol

Perturbation des cycles nutritionnels : L'altération des communautés microbiennes responsables de la fixation d'azote, de la solubilisation du phosphore et de la minéralisation de la matière organique peut réduire la fertilité naturelle du sol.

Diminution de la capacité de rétention : La dégradation de la structure microbienne affecte la formation d'agrégats stables, réduisant la capacité de rétention en eau et en nutriments.

1.6.4.3. Résistance aux stress biotiques

Réduction de la suppression naturelle : La diminution de la diversité microbienne peut affaiblir les mécanismes naturels de suppression des pathogènes telluriques.

Perte d'antagonisme microbien : La disparition de microorganismes antagonistes peut favoriser le développement d'agents pathogènes des cultures.

1.6.4.4. Résilience écologique

Diminution de la stabilité : Les communautés microbiennes appauvries présentent une moindre résistance aux perturbations environnementales.

Réduction de la capacité de récupération : Les écosystèmes microbiens dégradés nécessitent plus de temps pour retrouver leur fonctionnalité après une perturbation.

1.6.5. Implications pour la durabilité agricole

1.6.5.1. Dépendance accrue aux intrants

L'affaiblissement des processus biologiques naturels peut conduire à :

Augmentation des besoins en fertilisants : Pour compenser la diminution de la fertilité biologique

Intensification des traitements phytosanitaires : Pour pallier l'affaiblissement des mécanismes naturels de protection.

Spirale de dégradation : Créant un cercle vicieux de dépendance croissante aux intrants chimiques.

1.6.5.2. Vulnérabilité économique

Augmentation des coûts de production : Liée à l'accroissement des besoins en intrants.

Instabilité des rendements : Due à la plus grande sensibilité aux aléas climatiques et biotiques.

Risques de baisse de qualité : Notamment en termes de teneur en nutriments et de résistance aux maladies de conservation.

1.6.6. Perspectives d'atténuation

1.6.6.1. Approches préventives

Gestion intégrée des pratiques : Optimisation des rotations, réduction du travail du sol, intégration de légumineuses.

Utilisation raisonnée des pesticides : Application ciblée, respect des doses et des délais, alternance des matières actives.

Apports organiques réguliers : Maintien du statut organique du sol et de la diversité microbienne.

1.6.6.2. Approches correctives

Inoculation microbienne : Introduction de souches bénéfiques pour restaurer certaines fonctions.

Bioremediation : Utilisation de microorganismes pour dégrader les résidus de pesticides.

Techniques de régénération : Couverts végétaux, agroforesterie, aménagements agroécologiques.

1.6.7. Méthodes d'évaluation de l'impact

1.6.7.1. Indicateurs biologiques

L'évaluation de l'impact des pratiques agricoles sur le microbiome nécessite l'utilisation d'indicateurs appropriés :

1.6.7.2. Indicateurs quantitatifs

Biomasse microbienne : Mesure par extraction de l'ADN total ou dosage du carbone microbien.

Densité des populations : Quantification par qPCR ou numération sur milieux sélectifs.

Activité enzymatique : Mesure d'enzymes clés (phosphatase, β -glucosidase, déshydrogénase).

1.6.7.3. Indicateurs qualitatifs

Diversité taxonomique : Séquençage haut débit de l'ADNr 16S, indices de diversité (Shannon, Simpson).

Structure des communautés : Techniques d'empreintes génétiques (DGGE, T-RFLP, ARISA).

Diversité fonctionnelle : Analyse des gènes fonctionnels, métagénomique.

1.6.7.4. Indices composites

Indice de qualité biologique du sol : Intégrant plusieurs paramètres microbiens.

Scores de santé des sols : Combinant indicateurs biotiques et abiotiques.

Indices de résilience : Évaluant la capacité de récupération après perturbation.

1.6.7.5. Approches multivariées

Analyses de correspondance : Pour identifier les facteurs structurants des communautés.

Modélisation prédictive : Pour anticiper l'évolution des communautés sous différents scénarios.

Réseaux d'interactions : Pour comprendre les relations entre espèces microbiennes.

1.6.8. Cas d'étude : Régions arides méditerranéennes

1.6.8.1. Spécificités environnementales

Les régions arides et semi-arides présentent des caractéristiques particulières qui modulent les interactions entre pratiques agricoles et microbiome :

A. Contraintes climatiques

Stress hydrique chronique : Limite l'activité microbienne et réduit la capacité de détoxification des sols.

Températures extrêmes : Modifient la persistance des pesticides et la sensibilité des microorganismes.

Forte variabilité interannuelle : Crée une instabilité qui affecte l'établissement de communautés microbiennes stables.

B. Caractéristiques édaphiques

Faible teneur en matière organique : Réduit la diversité microbienne et la capacité tampon du sol.

pH souvent élevé : Influence la biodisponibilité des pesticides et des nutriments.

Structure particulière : Croûtes de battance, compaction, qui affectent la distribution des microorganismes.

1.6.8.2. Adaptations des pratiques

A. Irrigation et fertigation

Modification du régime hydrique : L'irrigation transforme radicalement l'environnement microbien du sol.

Apports concentrés de nutriments : La fertigation peut créer des déséquilibres nutritionnels localisés.

Risques de salinisation : Affectent la diversité et l'activité des communautés microbiennes.

B. Cultures sous abris

Microclimat artificiel : Modifie les conditions de température et d'humidité.

Intensification des pratiques : Augmente la fréquence d'application des pesticides.

Confinement des polluants : Peut conduire à des accumulations locales importantes.

1.6.8.3. Enjeux spécifiques

a) Vulnérabilité accrue

Faible résilience : Les écosystèmes arides sont naturellement moins résilients aux perturbations.

Risques de désertification : La dégradation microbienne peut contribuer à la dégradation des sols.

Irréversibilité potentielle : Certaines altérations peuvent être difficilement réversibles dans ces conditions.

b) Opportunités de restauration

Techniques d'économie d'eau : Goutte-à-goutte, paillage, qui peuvent favoriser l'activité microbienne.

Cultures adaptées : Sélection d'espèces résistantes nécessitant moins d'intrants.

Agroécologie : Adaptation des principes agroécologiques aux contraintes arides.

Conclusion

Cette synthèse bibliographique révèle la complexité des interactions entre agriculture conventionnelle et écologie microbienne des sols, mettant en évidence des enjeux scientifiques et agronomiques majeurs qui dépassent largement le cadre de la simple évaluation toxicologique des pesticides.

L'analyse de l'évolution des pratiques phytosanitaires démontre une intensification généralisée de leur usage, particulièrement marquée dans les régions méditerranéennes où l'Algérie illustre cette tendance avec une progression de 70% des volumes utilisés entre 2007 et 2017. Cette intensification s'accompagne de pratiques souvent inappropriées, comme en témoignent les études locales révélant des taux de non-respect des mesures de protection atteignant 73% chez les agriculteurs, et des fréquences de traitement dépassant les recommandations techniques. Ces observations soulignent l'urgence d'une approche intégrée combinant évaluation scientifique des risques et programmes de formation des utilisateurs.

L'examen des communautés microbiennes des sols révèle leur rôle central dans le maintien de la fertilité et de la résilience des agroécosystèmes. Avec une diversité exceptionnelle de 10^3 à 10^7 espèces bactériennes par gramme de sol, ces communautés assurent des fonctions irremplaçables dans les cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote et du phosphore. Leur capacité à promouvoir la croissance végétale et à protéger contre les pathogènes telluriques en fait des acteurs clés de la durabilité agricole. L'émergence des approches moléculaires, notamment le séquençage haut débit de l'ADNr 16S, ouvre des perspectives nouvelles pour caractériser cette diversité et comprendre ses relations avec les fonctions écosystémiques.

L'analyse des interactions entre pratiques agricoles et microbiome tellurique met en évidence des mécanismes multiples et interconnectés. Les pesticides exercent leurs effets à travers la toxicité directe, la modification des conditions physicochimiques du sol, et la perturbation des réseaux trophiques microbiens. Ces effets sont modulés par les propriétés intrinsèques des molécules (persistance, solubilité, spectre d'action), les conditions d'application, et les caractéristiques environnementales. Dans les régions arides, ces interactions prennent une dimension particulière du fait de la faible résilience naturelle des écosystèmes et de la modification des processus de dégradation et de détoxification.

Les conséquences écologiques et agronomiques de ces perturbations sont multiples : altération des cycles nutritionnels, réduction de la suppression naturelle des pathogènes, diminution de la stabilité structurale des sols, et affaiblissement de la résilience face aux stress environnementaux. Ces effets convergent vers une dépendance accrue aux intrants chimiques, créant une spirale de dégradation qui compromet la durabilité à long terme des systèmes agricoles.

Cependant, cette synthèse révèle également d'importantes lacunes de connaissance qui limitent notre compréhension des phénomènes étudiés. Les études quantifiant précisément l'impact des pesticides sur la diversité et les fonctions microbiennes dans les conditions méditerranéennes restent rares. Les mécanismes de résilience et de récupération des communautés microbiennes après perturbation sont mal documentés. Les interactions entre facteurs multiples (climat, sol, pratiques agricoles) nécessitent des approches expérimentales intégrées encore peu développées. Enfin, les seuils de perturbation au-delà desquels les altérations deviennent irréversibles demeurent largement inconnus.

Ces lacunes soulignent la nécessité de développer des programmes de recherche spécifiquement adaptés aux conditions méditerranéennes, combinant approches expérimentales contrôlées et études de terrain à long terme. L'intégration des outils moléculaires modernes avec les méthodes écologiques classiques devrait permettre une caractérisation plus fine des mécanismes d'interaction et de leurs conséquences fonctionnelles. Ces investigations sont d'autant plus urgentes que les changements climatiques et l'intensification agricole amplifient les pressions exercées sur ces écosystèmes fragiles.

In fine, cette synthèse souligne l'importance cruciale de développer des systèmes agricoles qui concilient productivité et préservation du patrimoine microbien des sols. Cette transition nécessite non seulement des avancées scientifiques, mais également des innovations techniques, des adaptations réglementaires, et des changements dans les pratiques agricoles. L'enjeu dépasse le cadre strictement agronomique pour toucher aux questions fondamentales de sécurité alimentaire, de santé publique, et de préservation de la biodiversité dans un contexte de changements globaux.

Chapitre II

Matériels et Méthodes

Introduction

L'évaluation de la qualité des sols agricoles constitue un enjeu scientifique et agronomique majeur dans le contexte actuel de recherche de durabilité des systèmes de production. Les approches traditionnelles, centrées sur la caractérisation séparée des propriétés physico-chimiques et biologiques des sols, montrent leurs limites face à la complexité des interactions qui régissent le fonctionnement des agrosystèmes. Cette nécessité d'une approche intégrative revêt une importance particulière dans les régions arides où les conditions pédoclimatiques extrêmes amplifient l'impact des pratiques agricoles sur la santé des sols.

Dans ce contexte, le cadre conceptuel Biofunctool®, développé par Thoumazeau et al. (2019), propose une alternative méthodologique prometteuse en privilégiant l'évaluation directe des fonctions du sol résultant des interactions entre ses compartiments physique, chimique et biologique. Cette approche systémique permet de dépasser les limites des méthodes réductionnistes en se concentrant sur le fonctionnement effectif plutôt que sur la description analytique des constituants du sol.

Le choix de la région de Laghouat comme zone d'étude s'appuie sur plusieurs considérations scientifiques et pratiques. D'une part, cette région représente un contexte aride typique des zones de transition entre agriculture méditerranéenne et saharienne, où coexistent des systèmes de production conventionnels et des initiatives agroécologiques émergentes. D'autre part, la configuration géomorphologique plane et l'homogénéité relative des conditions pédoclimatiques facilitent la comparaison entre systèmes de production en limitant les variables confondantes environnementales.

L'adaptation du protocole Biofunctool® aux contraintes techniques et pédoclimatiques locales constitue un défi méthodologique majeur de cette étude. Cette adaptation nécessite de concilier la rigueur scientifique des protocoles originaux avec les réalités pratiques des laboratoires d'analyse disponibles, tout en préservant la validité comparative des résultats. L'enjeu consiste également à développer des indicateurs pertinents pour le contexte spécifique des sols des zones arides, caractérisés par une faible teneur en matière organique, une activité biologique réduite et une vulnérabilité particulière aux perturbations anthropiques.

La stratégie d'échantillonnage adoptée vise à assurer la représentativité des systèmes conventionnels étudiés tout en respectant les contraintes opérationnelles inhérentes aux analyses microbiologiques détaillées. L'approche par réseau de contacts, bien qu'elle présente des limites en termes de représentativité statistique, s'avère particulièrement adaptée au contexte local où les structures associatives formelles restent limitées et où l'accès aux exploitations nécessite l'établissement d'une relation de confiance avec les agriculteurs. Ce chapitre présente de manière détaillée les choix méthodologiques opérés, leurs justifications scientifiques et leurs limites. Dans un premier temps, nous caractériserons la zone d'étude sous ses aspects géographiques, climatiques et agricoles, éléments déterminants pour la compréhension des conditions d'expression de l'activité microbienne des sols. Nous présenterons ensuite le protocole d'évaluation de la santé des sols adaptés du cadre

Biofunctool®, en explicitant les adaptations réalisées et leurs implications méthodologiques. La stratégie d'échantillonnage des exploitations conventionnelles sera détaillée, incluant les critères de sélection et les méthodes de validation terrain. Enfin, nous décrirons les protocoles de collecte des données et d'analyses microbiologiques, en précisant les innovations techniques développées pour répondre aux contraintes locales.

Cette démarche méthodologique vise à fournir les outils nécessaires à une évaluation comparative rigoureuse de l'impact des pratiques agricoles conventionnelles sur la qualité biologique des sols dans le contexte spécifique des zones arides algériennes, contribuant ainsi à l'avancement des connaissances sur les relations entre agriculture et fonctionnement microbien des sols.

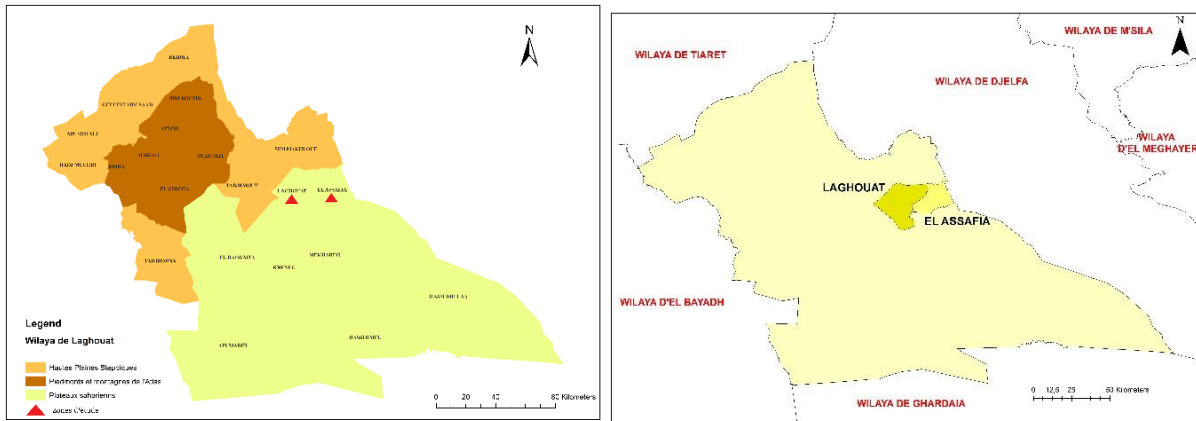
2.4. Présentation de la zone d'étude : les communes de Laghouat et El Assafia

2.1.5. Localisation et situation géographique

Les communes de Laghouat et d'El Assafia constituent la zone d'étude de notre travail que nous appelons le Living Lab de Laghouat¹. Situées à l'est de la wilaya de Laghouat, dans la région sud de l'Algérie, ces deux communes sont localisées à l'extrême nord-est du plateau saharien (PS), à la limite septentrionale du Sahara. Cette position géographique particulière confère à ces territoires le statut de limite méridionale de la culture du palmier dattier, au-delà de laquelle les dattes n'arrivent pas à maturité (Belmecheri et Moulai, 2023).

La zone d'étude (voir figure 6) s'inscrit dans l'ensemble géographique du plateau saharien (PS) qui représente 66,38% du territoire de la wilaya de Laghouat. Cet espace se caractérise par un relief plat et un climat de type aride avec une pluviométrie variant de 100 à 150 mm/an. Les deux communes sont limitrophes et présentent des caractéristiques physiques similaires, ce qui justifie leur traitement comme une unité d'analyse cohérente (Belmecheri et Moulai, 2023).

¹ Un Living Lab (LL) ou Laboratoire vivant agroécologique est un lieu d'échanges structurés sur la transition agroécologique où la co-construction des connaissances se produit grâce au dialogue organisé entre les principales parties prenantes, notamment les agriculteurs, les industries, les gouvernements, les ONG, les organisations de consommateurs, les institutions de recherche et les services de conseil locaux. L'association El Argoub Laghouat mène un projet intitulé NATAE (North African Transition to AgroEcology) au niveau du Living Lab de Laghouat regroupant les communes de Laghouat et d'El Assafia.



Source : Moulai, 2023.

Figure 4 : Les zones agroécologiques de la wilaya de Laghouat et localisation de la zone d'étude du living lab (Communes de Laghouat et El Assafia).

2.1.6. Caractéristiques géomorphologiques

2.1.6.1. Relief et topographie

Les deux communes (Laghouat et El Assafia) présentent une topographie plane favorable aux activités agricoles. Cette configuration topographique limite les risques d'érosion, avec 73,78% des terres de Laghouat et 75% de celles d'El Assafia situées dans la classe de pentes comprises entre 0% et 3% (BNEDER, 2006).

2.1.6.2. Altitude

Deux classes altitudinales modérées caractérisent le territoire d'étude : les terres situées à moins de 600 mètres d'altitude représentent 49,05% de la superficie, tandis que celles comprises entre 600 et 800 mètres constituent 50,95% des terres (BNEDER, 2006).

2.1.7. Ressources en eau

Le réseau hydrographique de la zone d'étude s'articule autour de deux oueds principaux : l'Oued M'zi et l'Oued Messaad.

Au niveau de la commune de Laghouat, le volume d'eau potentiel issu des volumes ruisselés et ceux infiltrés représentent **3,3 millions m³** alors que les volumes mobilisés de surface et souterrains représentent **26,31 millions m³**. Quant à la commune d'El Assafia, le volume d'eau potentiel issu des volumes ruisselés et ceux infiltrés représentent **1,8 million m³** alors que les volumes mobilisés de surface et souterrains représentent **6,38 millions m³**. (BNEDER, 2006).

Cependant, en raison de la faiblesse et de l'irrégularité des pluies et donc des ressources hydriques superficielles (Oued M'Zi et Oued Messad), les ressources souterraines pour les deux communes sont surexploitées par les secteurs de l'agriculture, l'AEP et l'industrie. À cette surexploitation s'ajoute une sécheresse récurrente qui impacte l'infiltration et le remplissage des nappes souterraines, ce qui fait de l'eau, une ressource de plus en plus rare et qui devient le **premier facteur limitant** pour le développement de l'agriculture et de l'élevage. Pourtant,

face à cette contrainte, l'irrigation gravitaire reste largement dominante. (BNEDER, 2006 ; Belmecheri et Moulai, 2023).

2.1.8. Systèmes de production agricole

2.1.8.1. Structure foncière et répartition territoriale

Les communes de Laghouat et d'El Assafia représentent près de 4% de la Surface Agricole Totale (SAT) de la wilaya, constituant un pôle agricole significatif dans le contexte régional aride. L'analyse de la structure foncière révèle une prédominance marquée des petites exploitations familiales, caractéristique des systèmes agricoles traditionnels des zones arides algériennes.

2.1.8.2. Caractéristiques de la structure foncière

La structure des exploitations agricoles se caractérise par une prédominance des petites exploitations où près de 70% des exploitations agricoles ont une superficie inférieure à 5 hectares. Ce système agricole familial et vivrier demeure dominant et s'oriente principalement vers l'autoconsommation et la commercialisation locale. Cette configuration traduit également une fragmentation foncière importante qui se manifeste par un morcellement des terres agricoles limitant les économies d'échelle et la modernisation des systèmes de production (DSA, 2025).

2.1.8.3. La Surface Agricole Utile (SAU)

La SAU total de la wilaya de Laghouat est de 77 732 ha. La zone d'étude concentre 12,32% de la SAU totale de la wilaya, avec une répartition inégale entre les deux communes. Laghouat représente 7,97% de la SAU totale de la wilaya (soit 6 201 ha) tandis qu'El Assafia en constitue 4,35% (soit 3 389 ha). Pour la SAU irriguée, la wilaya de Laghouat compte plus de la moitié de cette superficie (52,32%) est irriguée, avec 40 686 ha de SAU irriguée. L'irrigation par aspersion et l'irrigation goutte à goutte représentent 98,33% des systèmes d'irrigation. Pour notre zone d'étude, Laghouat a 93,68% de sa SAU est irriguée (soit 5 809,09 ha). Pour El Assafia, la SAU irriguée représente 100% de la SAU de la commune (soit 3 389 ha).

Cette concentration relativement importante de la SAU irriguée dans ces deux communes témoigne de leur importance stratégique dans le système agricole régional, particulièrement dans un contexte de rareté hydrique (DSA, 2025).

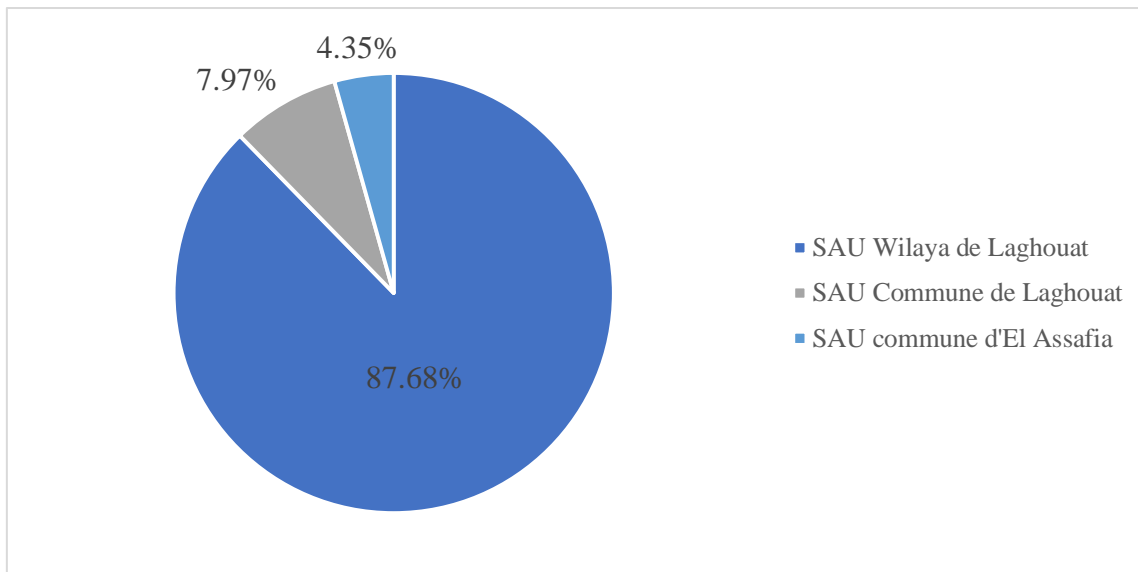


Figure 5 : Part de la SAU des communes de Laghouat et d'El Assafia dans le total Wilaya.

2.5. Synthèse climatique de la zone d'étude (communes de Laghouat et d'El assafia) et impact potentiel sur l'activité microbienne du sol

L'analyse des données climatiques de notre zone d'étude sur une période de près de 44 années (1981 à avril 2025) issue des données de la NASA (2025) révèle des caractéristiques climatiques particulièrement contraignantes qui influencent fortement l'activité microbienne des sols.

2.5.1. Températures

Le régime thermique de la région se caractérise par une température annuelle moyenne de 17.7°C avec des variations saisonnières marquées. Le mois de juillet enregistre les températures les plus élevées avec une moyenne de 30.7°C, tandis que janvier présente les valeurs les plus basses à 6.5°C. Cette variation thermique génère une amplitude importante de 24.2°C qui constitue un facteur de stress significatif pour les communautés microbiennes du sol. Les températures estivales élevées peuvent induire des mécanismes de protection chez les microorganismes, notamment la formation de spores de résistance, tandis que les températures hivernales plus modérées offrent des conditions plus favorables à l'activité métabolique microbienne.

2.5.2. Précipitations

Le régime pluviométrique révèle des conditions particulièrement arides avec une précipitation annuelle moyenne de 165.9 mm. La distribution temporelle des précipitations est extrêmement irrégulière, le mois de septembre constituant la période la plus humide avec seulement 21.4 mm, tandis que juillet ne reçoit que 4.4 mm en moyenne. Cette variabilité très élevée, caractérisée par un coefficient de variation supérieur à 80%, témoigne de l'imprévisibilité du régime hydrique régional. Cette irrégularité pluviométrique constitue un défi majeur pour les microorganismes du sol qui dépendent de la disponibilité en eau pour leurs processus physiologiques et leurs activités enzymatiques.

2.5.3. Période sèche

Le diagramme ombrothermique de Bangouls et Gausson permet de visualiser la relation critique entre température et précipitation au cours de l'année. Cette analyse révèle que les précipitations demeurent faibles tout au long de l'année avec des pics très modestes, tandis que les températures restent élevées, particulièrement durant la période estivale. La coïncidence entre les mois les plus chauds (juin à septembre) et les mois les plus secs accentue considérablement le stress hydrique environnemental. Les précipitations s'avèrent insuffisantes pour compenser l'évaporation induite par les températures élevées.

L'analyse révèle une période sèche quasi-permanente s'étendant de février à décembre, soit 11 mois sur 12. Seul le mois de janvier échappe à cette classification avec des précipitations de 14,9 mm légèrement supérieures au seuil critique de 13,0 mm selon le critère $P > 2T$. Le déficit hydrique atteint son maximum en juillet où les précipitations de 4,4 mm contrastent dramatiquement avec le seuil théorique de 61,3 mm. La sécheresse se révèle particulièrement marquée de mai à août, période durant laquelle les conditions deviennent extrêmement contraignantes pour toute activité biologique.

Cette situation climatique confirme le caractère aride prononcé du climat régional, typique des zones désertiques ou semi-désertiques, imposant des contraintes majeures pour l'agriculture sans irrigation et favorisant une végétation spécialement adaptée aux conditions d'aridité.

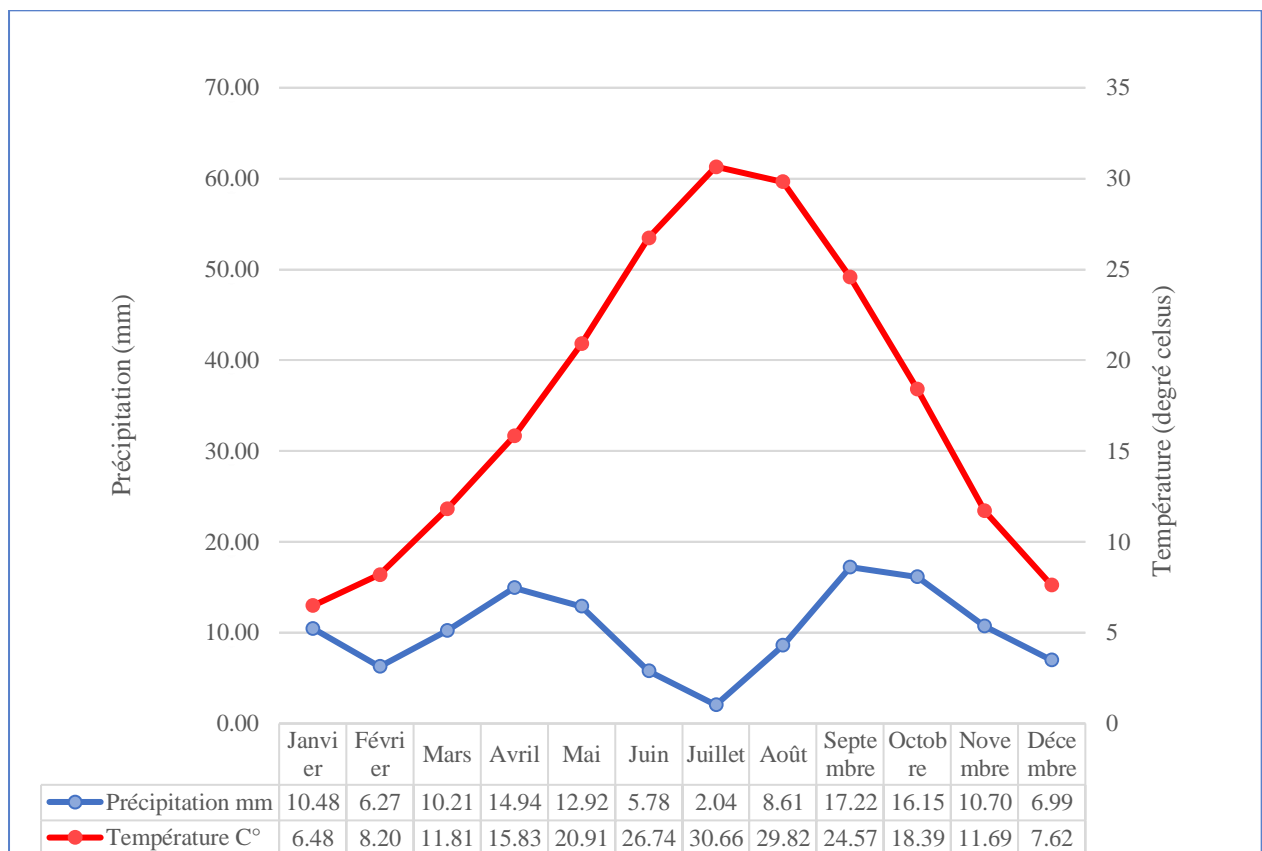


Figure 6 : Diagramme ombrothermique de Bangouls et Gausson (Station de Laghouat 1981-2025).

2.5.4. Indice de Marton

L'indice de Martonne, calculé selon la formule $Aa = P/(T+10)$ où **P** représente la pluviosité annuelle moyenne (165,19 mm) et **T** la température annuelle moyenne (18,81°C) sur la période 1981-2025, donne un résultat de 5,73. Cette valeur classe définitivement la région dans la catégorie des **climats arides**.

Ce faible indice résulte de la combinaison particulièrement défavorable entre de faibles précipitations et des températures élevées, accentuant le déficit hydrique tout au long de l'année.

La classification climatique basée sur cet indice de De Martonne de 5,73 confirme le caractère aride du climat régional. Cette classification se justifie par des précipitations très faibles et irrégulières limitées à 165,6 mm annuels, une sécheresse quasi-permanente affectant 11 mois sur 12, un stress hydrique extrême persistant de février à décembre, une variabilité interannuelle très importante, et un déficit chronique de précipitation par rapport aux besoins évapotranspiratoires.

2.5.5. Vent

La vitesse du vent mesurée à 2 mètres d'altitude sur la période 1981-2025 présente une variabilité saisonnière notable. Les valeurs mensuelles moyennes oscillent généralement entre 2 et 4 m/s (voir figure 9), avec des maxima observés en hiver et au printemps, et des minima en automne. Cette dynamique éolienne influence significativement l'évaporation, la dispersion des polluants atmosphériques et le confort thermique régional.

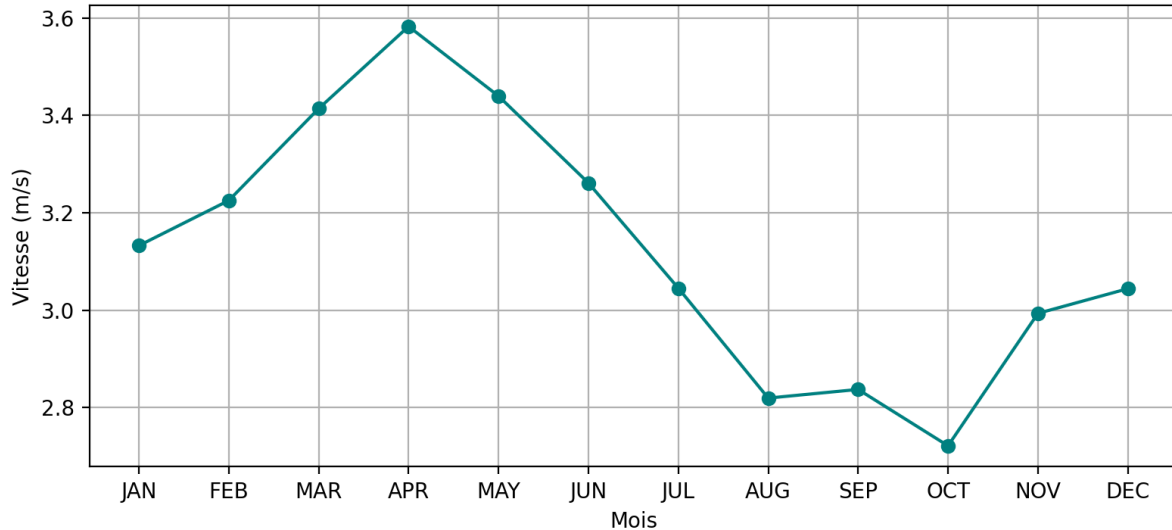


Figure 7 : Vitesse moyenne du vent à 2 m (1981-2025).

L'analyse directionnelle (voir figure 10) révèle une nette prédominance des vents provenant du secteur 300-330° (nord-ouest), suivis par les secteurs 330-360° (nord) et 270-300° (ouest). Les autres directions présentent une représentation nettement moins importante. Cette répartition directionnelle indique que les vents dominants soufflent principalement du nord-ouest et de l'ouest, influençant le climat local, la dispersion des polluants et les processus d'érosion éolienne.

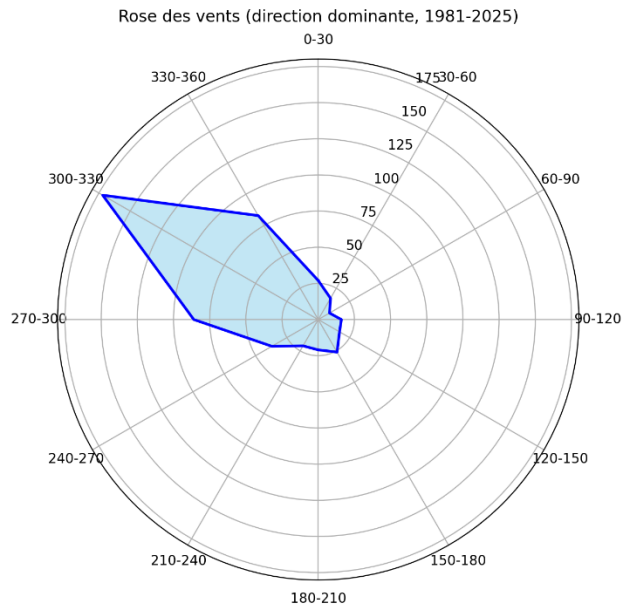


Figure 8. Rose des vents (direction dominante entre 1981 et 2025).

2.5.6. L'humidité relative et spécifique de l'air

L'humidité relative à 2 mètres (%): Mesure le taux d'humidité de l'air, qui influence la sensation de chaleur, la transpiration des plantes et le risque de sécheresse.

L'humidité spécifique à 2 mètres (g/kg): Représente la quantité de vapeur d'eau dans l'air, utile pour caractériser le potentiel d'évaporation et la formation de nuages.

L'humidité relative à 2 mètres d'altitude varie considérablement au cours de l'année (voir figure 11), atteignant des valeurs maximales en hiver (jusqu'à 70%) et des minima marqués en été (parfois inférieurs à 20%). Cette faible humidité estivale accentue la sensation de sécheresse et intensifie le risque de stress hydrique pour les plantes et les microorganismes. L'humidité spécifique, qui quantifie la vapeur d'eau atmosphérique, suit une évolution similaire avec des valeurs plus élevées durant les périodes chaudes, reflétant le potentiel d'évaporation et les conditions de formation nuageuse.

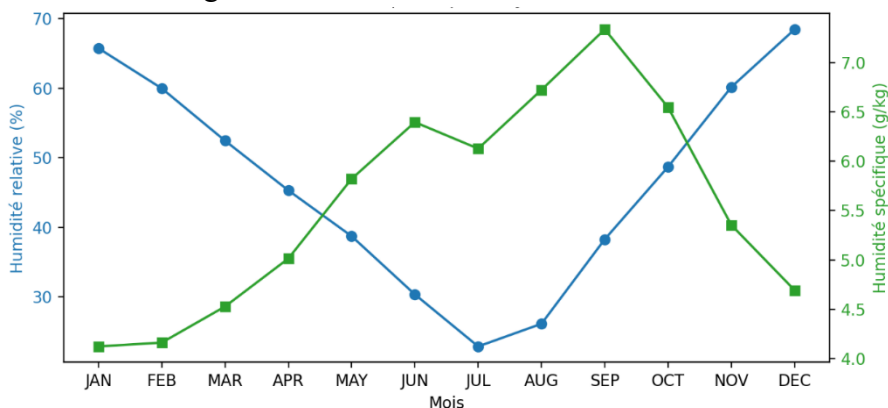


Figure 9. Humidité relative et spécifique moyenne (1981-2025).

2.6. Protocole d'évaluation de la santé du sol

2.6.1. Cadre conceptuel et adaptation de la méthode Biofunctool®

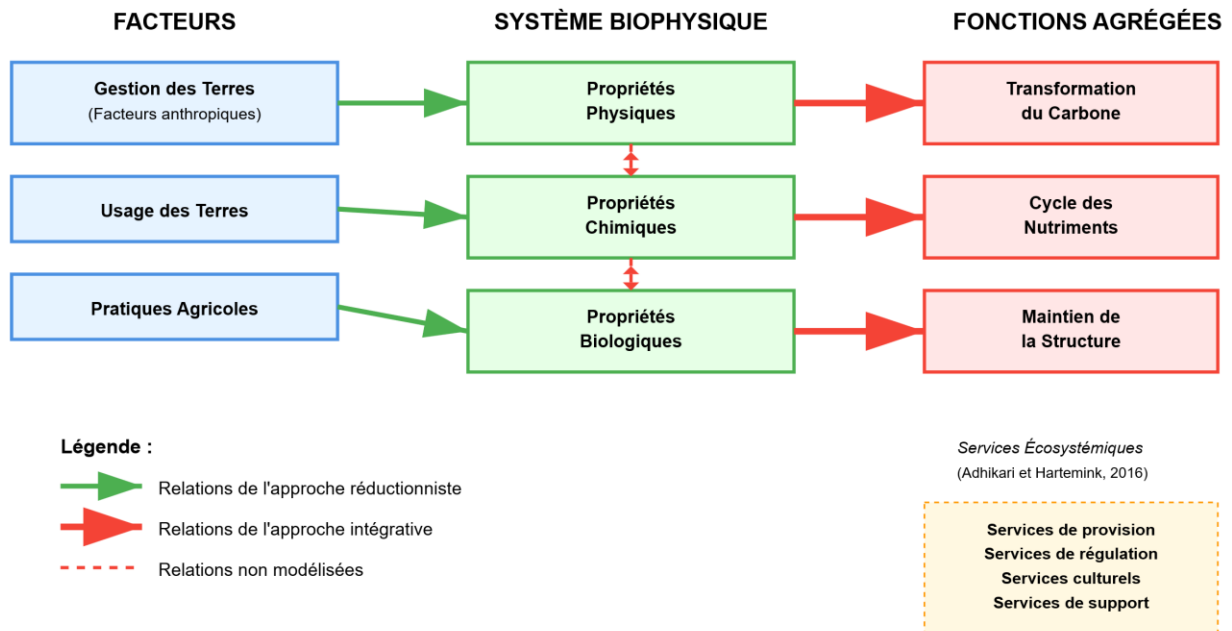
Cette étude s'appuie sur le cadre conceptuel Biofunctool® développé par Thoumazeau et al., (2019), qui propose une approche intégrée pour évaluer la qualité des sols basée sur l'interaction entre les propriétés physico-chimiques et l'activité biologique des sols. Le Biofunctool® constitue un outil d'évaluation du fonctionnement biologique des sols qui se distingue des approches réductionnistes traditionnelles en privilégiant une vision systémique du sol. Cette méthode évalue trois fonctions principales du sol définies par Kibblewhite et al. (2008) : la transformation du carbone, le cycle des nutriments et le maintien de la structure.

Le cadre original du Biofunctool® a été adapté aux conditions spécifiques des exploitations agricoles familiales de polyculture en transition agroécologique de la région de Laghouat, caractérisées principalement par l'arboriculture avec le palmier dattier conduite selon les principes agroécologiques. Cette adaptation s'est révélée nécessaire pour tenir compte des contraintes techniques locales, des spécificités pédoclimatiques de la région aride et des moyens disponibles au niveau des laboratoires du département d'Agronomie de l'Université de Laghouat.

Selon Thoumazeau et al. (2019), les indicateurs sélectionnés dans le cadre Biofunctool® doivent répondre à trois critères principaux. Premièrement, ils doivent être le résultat d'interactions entre les propriétés physico-chimiques du sol et les assemblages biologiques, reflétant ainsi le fonctionnement intégré du système sol. Deuxièmement, ils doivent être mesurables directement sur le terrain ou sur des échantillons frais avec une perturbation minimale du système étudié. Troisièmement, ils doivent être techniquement simples et économiquement viables pour permettre leur application à grande échelle par les agriculteurs et les conseillers techniques.

L'approche intégrative adoptée dans cette étude se base sur le cadre conceptuel développé par Kibblewhite et al. (2008) qui distingue deux paradigmes d'évaluation de la qualité des sols (Figure 12). L'approche réductionniste traditionnelle consiste à décrire séparément les trois compartiments du sol (physique, chimique et biologique), tandis que l'approche intégrative privilégie l'évaluation directe des fonctions du sol résultant des interactions entre ces compartiments.

Cadre conceptuel d'évaluation de la qualité des sols
selon les approches réductionniste ou intégrative (adapté de Kibblewhite et al., 2008)



Source : adapté de Kibblewhite et al., 2008.

Figure 10. Cadre conceptuel d'évaluation de la qualité des sols selon les approches réductionniste ou intégrative.

Les **flèches vertes** et les cadres représentent l'évaluation classique de la qualité des sols basée sur une approche réductionniste qui décrit les trois compartiments des propriétés du sol : physique, chimique et biologique. Les **éléments rouges** représentent les relations suivies pour évaluer la qualité des sols avec une approche intégrative, évaluant directement les fonctions du sol à partir des interactions entre les compartiments du sol.

2.6.1.1. Avantages et limites de la méthode Biofunctool®

A. Avantages de l'approche adoptée

L'adaptation du cadre Biofunctool® présente plusieurs avantages significatifs pour l'évaluation de la qualité des sols dans le contexte agroécologique algérien. L'approche intégrative permet de dépasser les limites des méthodes réductionnistes traditionnelles en évaluant directement le fonctionnement du sol plutôt que ses constituants isolés (Thoumazeau et al., 2019). Cette vision systémique correspond mieux à la complexité des interactions sol-plante-microorganismes dans les agrosystèmes.

La simplicité technique et le coût relativement faible des analyses microbiologiques développées constituent un atout majeur pour leur application dans un contexte de laboratoire aux moyens limités. L'utilisation de milieux de culture sélectifs permet d'évaluer des fonctions microbiennes spécifiques directement liées aux cycles biogéochimiques cruciaux pour la fertilité des sols. La combinaison d'observations de terrain, d'enquêtes auprès des agriculteurs et d'analyses de laboratoire assure une validation croisée des résultats et une meilleure compréhension des mécanismes en jeu.

L'adaptation aux conditions locales, notamment la prise en compte des spécificités des systèmes oasiens et des contraintes climatiques arides, renforce la pertinence des résultats pour le contexte d'étude. L'implication directe des agriculteurs dans le processus d'évaluation favorise l'appropriation des résultats et facilite le transfert des connaissances vers les praticiens.

B. Limites et contraintes méthodologiques

Plusieurs limites doivent être considérées dans l'interprétation des résultats. La culture sur milieux artificiels ne permet d'évaluer qu'une fraction des communautés microbiennes du sol, estimée généralement entre 1 et 10% de la diversité microbienne totale (Torsvik et al., 1990). Cette approche culturo-dépendante peut conduire à une sous-estimation de la diversité réelle et à un biais vers les micro-organismes à croissance rapide sur milieux riches.

L'adaptation des protocoles originaux du Biofunctool® aux contraintes locales peut limiter la comparabilité directe avec d'autres études utilisant le cadre complet. Le nombre limité d'exploitations étudiées restreint la généralisation des résultats à l'ensemble des systèmes agroécologiques de la région. Les variations saisonnières de l'activité microbienne ne sont pas prises en compte dans cette étude transversale.

La subjectivité inhérente aux observations de terrain et aux réponses des enquêtes peut introduire des biais dans l'évaluation. Les interactions complexes entre facteurs pédoclimatiques, pratiques agricoles et activité microbienne rendent difficile l'identification des relations de causalité directe. Enfin, l'absence de sites de référence non cultivés limite l'évaluation de l'impact réel des pratiques agricoles par rapport à un état naturel du sol.

Malgré ces limites, l'approche développée constitue un outil pertinent et accessible pour l'évaluation de la qualité biologique des sols dans le contexte des systèmes agroécologiques des zones arides, contribuant ainsi à l'amélioration des pratiques agricoles durables.

2.6.2. Stratégie d'échantillonnage des exploitations en agriculture conventionnelle

2.6.2.1. Identification de la population d'étude conventionnelle

L'identification des exploitations agricoles en agriculture conventionnelle s'est opérée sur une population cible constituée d'agriculteurs pratiquant la céréaliculture et la production fourragère selon les méthodes conventionnelles, bénéficiant du dispositif public de soutien à la production céréalière.

Ce dispositif public, géré par la Coopérative des Céréales et des Légumineuses Secs (CCLS), constitue le principal mécanisme public d'encadrement de la production céréalière conventionnelle dans la wilaya de Laghouat. Il comprend la mise à disposition d'intrants chimiques subventionnés (engrais et pesticides), la fourniture de semences certifiées et l'achat garanti de la production à des prix soutenus par l'État. Ce système d'encadrement public assure une certaine homogénéité dans les pratiques agricoles conventionnelles et constitue un cadre de référence fiable pour l'identification de la population d'étude.

2.6.2.2. Justification de la taille d'échantillon et du design comparatif

La sélection de 5 exploitations conventionnelles correspond à un design d'étude comparative (matched-pair design) avec les 5 exploitations agroécologiques menée également dans le cadre d'un mémoire de Master. Cette approche méthodologique est largement utilisée en sciences agricoles pour évaluer l'impact de différents systèmes de production sur des variables environnementales (Seufert et al., 2012).

Aussi, le choix de 5 exploitations conventionnelles a étudié répond aux impératifs suivants :

Contraintes opérationnelles documentées : La limitation à 5 exploitations s'appuie sur plusieurs contraintes méthodologiques et pratiques. Les analyses microbiologiques détaillées nécessitent des protocoles chronophages (incubation de 14 jours pour certains milieux) et des ressources de laboratoire importantes. La durée des enquêtes approfondies (2 à 3 heures par exploitation) et les prélèvements de sol selon la méthode des 5 points diagonaux représentent un investissement temporel considérable. Enfin, les capacités analytiques du laboratoire de microbiologie de l'Université de Laghouat constituent un facteur limitant pour le traitement simultané d'un nombre plus important d'échantillons.

Puissance statistique et design expérimental : Bien que la taille d'échantillon soit réduite, le design comparatif apparié permet de maximiser la puissance statistique en contrôlant les variables confondantes liées au contexte pédoclimatique (Ruxton & Neuhäuser, 2010). Les études comparatives en agroécologie utilisent fréquemment des échantillons de taille similaire : Mäder et al. (2002) ont comparé 5 paires d'exploitations biologiques et conventionnelles, tandis que Reganold et al. (2010) ont analysé 4 exploitations par système de production.

2.6.2.3. Critères de sélection et processus de validation

La sélection des exploitations conventionnelles a été réalisée selon des critères standardisés permettant d'assurer la comparabilité avec les exploitations agroécologiques (mené par un autre étudiant) tout en respectant les spécificités des systèmes conventionnels.

Critères d'inclusion spécifiques : Les exploitations retenues devaient être bénéficiaires du dispositif public CCLS depuis au moins 5 ans, garantissant ainsi une pratique stabilisée de l'agriculture conventionnelle. La dominance des cultures céréalières et fourragères (blé, orge, légumineuses) constituait un critère essentiel pour assurer l'homogénéité du groupe d'étude. La taille minimale de 5 hectares correspondait au seuil retenu pour les exploitations agroécologiques, permettant un échantillonnage pédologique représentatif. La localisation dans le périmètre du living lab de Laghouat assurait la comparabilité des conditions pédoclimatiques.

Critères d'exclusion : Les exploitations ayant connu une transition vers l'agriculture biologique ou agroécologique, même partielle, ont été exclues pour maintenir l'homogénéité du groupe "conventionnel". Les exploitations spécialisées uniquement en arboriculture ont été écartées pour assurer la comparabilité avec le groupe agroécologique dominé par les systèmes mixtes céréales-palmier dattier. Les exploitations ayant subi des perturbations majeures récentes (changement de propriétaire, sinistres climatiques) ont également été exclues.

Processus de validation terrain : Chaque exploitation pré-sélectionnée a fait l'objet d'une visite de reconnaissance permettant de vérifier *in situ* le respect des critères de sélection. Cette validation a inclus la confirmation des pratiques conventionnelles déclarées (utilisation d'intrants chimiques, semences certifiées), l'évaluation de l'accessibilité des parcelles pour l'échantillonnage et l'obtention du consentement éclairé de l'agriculteur pour sa participation à l'étude.

2.6.2.4. Limites méthodologiques et biais potentiels

Biais de sélection : La méthode d'échantillonnage par réseau de contacts peut introduire un biais vers les agriculteurs les mieux intégrés socialement et potentiellement les plus performants techniquement. Ce biais est partiellement contrôlé par la diversité des profils d'exploitation retenus.

Représentativité limitée : L'absence de base de sondage exhaustive des agriculteurs conventionnels limite la généralisation statistique des résultats. Cependant, l'objectif d'étude comparative exploratoire justifie cette approche méthodologique.

Contrôle des variables confondantes : Bien que la localisation géographique soit contrôlée, les différences inhérentes entre systèmes conventionnels et agroécologiques (ancienneté, philosophie de production, niveau de formation) constituent des variables confondantes difficiles à maîtriser.

2.6.2.5. Période de collecte et protocole harmonisé

L'ensemble des prélèvements et observations dans les exploitations conventionnelles ont été réalisés entre le 23 et le 27 mars 2025. Cette continuité temporelle minimise les biais liés aux variations climatiques saisonnières et assure des conditions d'observation comparables.

Le protocole d'échantillonnage et d'enquête a été rigoureusement identique à celui appliqué aux exploitations agroécologiques : méthode des 5 points diagonaux pour l'échantillonnage pédologique, utilisation de la même fiche technique de terrain, application du questionnaire socio-technique adapté aux pratiques conventionnelles, et mise en œuvre du protocole microbiologique standardisé.

Cette stratégie d'échantillonnage des exploitations conventionnelles, bien qu'elle présente des limites méthodologiques inhérentes aux contraintes de terrain, assure une base comparative solide pour l'évaluation différentielle de l'impact des pratiques agricoles sur la qualité des sols dans le contexte des zones arides algériennes.

2.6.3. Collecte des données

2.6.3.1. Enquêtes auprès des agriculteurs

La collecte d'informations sur les pratiques agricoles et la perception des agriculteurs concernant la santé des sols a été réalisée à travers deux outils complémentaires développés en adaptation du cadre Biofunctool® original.

Le questionnaire socio-technique, adapté du cadre Biofunctool®, constitue un outil d'enquête approfondi qui explore de manière systématique les différentes dimensions des pratiques agricoles. Ce questionnaire investigate l'historique et les pratiques actuelles de l'exploitation, permettant de comprendre l'évolution des techniques culturales et leur impact potentiel sur la santé des sols. Les techniques de travail du sol sont analysées en détail, incluant la fréquence, l'intensité et les outils utilisés. Les pratiques d'apports organiques et de fertilisation font l'objet d'un examen particulier, incluant les types d'amendements, les quantités appliquées et les fréquences d'application. Les stratégies de protection des cultures sont documentées, notamment l'utilisation de produits phytosanitaires et les méthodes alternatives de biocontrôle.

La gestion de l'eau et de l'irrigation revêt une importance particulière dans le contexte aride de l'étude. Les aménagements agroécologiques présents sur l'exploitation sont recensés et caractérisés. Les observations des agriculteurs sur la vie du sol constituent un élément crucial permettant d'évaluer leur perception de l'évolution de la qualité biologique de leurs sols. L'utilisation d'intrants microbiens est également documentée. Enfin, les perceptions et connaissances des agriculteurs concernant la microbiologie des sols sont explorées pour comprendre leur niveau de sensibilisation à ces enjeux.

La fiche technique de terrain, développée spécifiquement pour l'évaluation in situ de la santé des sols, constitue un outil d'observation directe permettant une caractérisation immédiate des conditions pédologiques. Cette fiche documente les propriétés physiques du sol à travers plusieurs tests simples réalisables directement au champ, incluant l'évaluation de la compaction de surface, les tests d'infiltration de l'eau, l'analyse de la structure du sol selon la méthode VESS (Visual Evaluation of Soil Structure) et l'évaluation de la stabilité des agrégats. Les indicateurs chimiques sont appréciés notamment à travers l'indice de coloration des plantes qui renseigne sur le statut nutritionnel. La diversité au niveau de l'exploitation est caractérisée par le recensement des espèces cultivées, des variétés présentes et des éléments d'habitat. Les observations au niveau paysager permettent d'appréhender l'impact de l'exploitation dans son contexte territorial. L'évaluation du cycle des nutriments se base sur des observations visuelles et des tests de terrain. Enfin, l'analyse sensorielle du sol, incluant l'odeur et la texture, complète cette approche d'évaluation intégrée.

2.6.3.2. Échantillonnage du sol

L'échantillonnage a été réalisé selon la méthode des points diagonaux, avec cinq points de prélèvement par exploitation agricole, conformément aux recommandations de Thoumazeau et al. (2019) qui préconisent un échantillonnage représentatif tenant compte de l'hétérogénéité spatiale intrinsèque des sols agricoles. Cette méthode permet de capturer la variabilité spatiale tout en limitant le nombre d'échantillons nécessaires.

La procédure d'échantillonnage a été standardisée pour assurer la reproductibilité et la comparabilité des résultats. La profondeur de prélèvement a été fixée à 5-25 cm, correspondant à l'horizon de surface où se concentre l'activité biologique maximale et où l'impact des pratiques agricoles est le plus marqué. Le volume prélevé d'environ 500 grammes par point s'est révélé suffisant pour réaliser l'ensemble des analyses prévues tout en préservant l'intégrité du sol prélevé. Les échantillons ont été transportés au laboratoire dans les 24 heures suivant le

prélèvement pour préserver l'activité microbienne, puis stockés à 4°C avant analyse pour maintenir la viabilité des micro-organismes.

2.6.4. Mesures et indicateurs effectués sur terrain et au niveau du laboratoire

Plusieurs mesures et indicateurs de terrain ont été effectués selon la méthode Biofunctool®. Ci-joint un résumé dans le tableau 7.

Tableau 7. Tableau récapitulatif des mesures et des indicateurs effectués sur terrain et en laboratoire.

N°	Paramètres	Mesures	Mesures effectuées	Descriptions
01	Propriétés physiques du sol	Test de stylo	Sur terrain	Mesure la compaction des couches superficielles du sol. Elle permet de quantifier la résistance du sol à la pénétration de l'eau.
		Infiltration de l'eau (test du cylindre)	Sur terrain	L'évaluation de la capacité d'infiltration du sol est essentielle pour comprendre sa structure, sa porosité et sa santé globale
		Structure du sol (VESS)	Sur terrain	Évaluation visuelle de la structure du sol (VESS - Visual Evaluation of Soil Structure) pour caractériser la qualité structurale du sol en examinant un bloc extrait du terrain.
		Stabilité des agrégats	Sur terrain	Mesure la résistance du sol à l'érosion et de sa capacité à maintenir une bonne structure.
		Température du sol	Sur terrain	La température du sol est un paramètre clé qui influence de nombreux processus biologiques, chimiques et physiques dans le sol.
		Capacité de rétention de l'eau	Sur terrain	Mesure qualitative de la capacité de rétention d'eau (disponibilité en eau pour les plantes, l'activité biologique et de nombreux processus physico-chimiques).
		Texture (test manuel)	Sur terrain	Détermine la composition granulométrique du sol (sable, limon, argile) par manipulation tactile, permettant d'évaluer la capacité de rétention d'eau et la structure du sol.
		Test du ruban	Sur terrain	Test quantitatif de la plasticité du sol permettant d'apprécier le taux d'argile en formant un ruban avec un échantillon humide.
02	Indicateurs chimiques	Indice de couleur de plantes	Sur terrain	La coloration des feuilles fournit des informations précieuses sur l'état nutritionnel des plantes et, indirectement, sur la disponibilité des nutriments dans le sol.
		pH	En laboratoire	Indicateur fondamental qui influence la disponibilité des nutriments et l'activité biologique.
		Conductivité électrique (CE)	En laboratoire	Mesure la concentration en sels solubles dans la solution du sol, indiquant la disponibilité potentielle des nutriments et les risques de salinité.
		Calcaire actif	En laboratoire	Détermine la fraction de carbonate de calcium facilement soluble, influençant directement le pH du sol et la disponibilité des nutriments, particulièrement le phosphore et les oligoéléments.

		L'Azote	En laboratoire	Mesure l'azote total disponible pour les plantes et indicateur de la fertilité du sol et de l'activité microbienne.
		Carbone	En laboratoire	Quantification du carbone organique total, indicateur clé de la matière organique du sol, de sa fertilité et de sa capacité à stocker le carbone atmosphérique.
03	Diversité au niveau de l'exploitation	Diversité des cultures	Sur terrain	Évaluation du nombre d'espèces et variétés cultivées, de la rotation culturale et de la présence de légumineuses, indicateur de la durabilité et de la résilience du système agricole.
		Éléments d'habitat	Sur terrain	Inventaire des structures paysagères (haies, bandes enherbées, zones boisées) favorisant la biodiversité fonctionnelle et les auxiliaires des cultures.
04	Niveau paysage	Connectivité des habitats	Sur terrain	Évaluation du degré de connexion entre les différents éléments naturels du paysage, permettant les flux de biodiversité et les services écosystémiques.
		Diversité des paysages	Sur terrain	Caractérisation de la mosaïque paysagère dans un rayon de 1 km, incluant les proportions de cultures, prairies, zones bâties et espaces naturels.
		Impacts au niveau territorial	Sur terrain	Observation des effets des pratiques agricoles sur l'environnement adjacent : érosion, pollution des eaux, impact sur les zones naturelles.
05	Cycle des nutriments (SMAF)	Évaluation visuelle du cycle de l'azote	Sur terrain	Observation de la présence et de la qualité des nodosités sur légumineuses, indicateur de l'activité de fixation biologique de l'azote.
		Taux de sodium et ratio d'absorption (SAR)	Sur terrain	Évaluation visuelle des signes d'accumulation de sels (croûtes blanches) pour détecter les problèmes de salinité affectant la structure du sol et la croissance des plantes.
		Services écosystémiques observés	Sur terrain	Évaluation de la capacité du sol à assurer ses fonctions de régulation hydrique (absence d'érosion, infiltration) et de cycle des nutriments (décomposition de la MO).
06	Observations complémentaires	Analyse sensorielle du sol	Sur terrain	Évaluation qualitative par les sens (odeur, texture, couleur) permettant une appréciation rapide de l'état biologique et chimique du sol.
		Pratiques agroécologiques observées	Sur terrain	Inventaire des techniques durables mises en œuvre (couverture du sol, compostage, absence de pesticides, agroforesterie) favorisant la santé des sols.

2.6.5. Analyses microbiologiques

2.6.5.1. Préparation des échantillons

Les analyses microbiologiques ont été conduites au laboratoire du département d'Agronomie de l'Université de Laghouat selon un protocole standardisé adapté aux contraintes techniques locales. La préparation des échantillons a suivi une procédure rigoureuse commençant par un séchage à l'air libre pendant 48 heures pour éliminer l'excès d'humidité tout

en préservant la viabilité microbienne. Un tamisage à 2 mm a ensuite été effectué pour éliminer les éléments grossiers et homogénéiser la granulométrie. Une étape d'homogénéisation manuelle minutieuse a assuré la représentativité des échantillons. Enfin, des suspensions mères ont été préparées en mélangeant 10 grammes de sol dans 90 ml d'eau stérile, constituant la dilution mère à partir de laquelle les dilutions sériées ont été réalisées.

2.6.5.2. Milieux de culture et dilutions

Sept milieux de culture spécifiques ont été préparés pour évaluer la diversité microbienne fonctionnelle du sol, en adaptation des protocoles décrits par Thoumazeau et al., (2019) et ajustés aux capacités techniques du laboratoire d'accueil.

Le milieu LPGA (Levure peptone Glucose Agar) a été développé pour l'évaluation de la diversité globale des colonies bactériennes du sol. Ce milieu permet la croissance d'un large spectre de bactéries hétérotrophes présentes dans le sol, offrant ainsi une estimation de la diversité bactérienne cultivable totale.

Le milieu NBRIP (National Botanical Research Institute's Phosphate growth medium) a été spécifiquement formulé pour la détection des bactéries responsables de la solubilisation du phosphore, fonction cruciale dans les sols agricoles où cet élément constitue souvent un facteur limitant. Ce milieu permet de sélectionner spécifiquement les bactéries capables de solubiliser le phosphore minéral.

Les milieux YMA (Yeast Extract Mannitol medium) et le milieu Ashby Glucose Agar (modifié) ont été développés pour l'identification des bactéries symbiotiques diazotrophes impliquées dans la fixation de l'azote atmosphérique, processus fondamental du cycle de l'azote dans les agrosystèmes.

Les milieux de Winogradsky modifié, milieu nitritique minéral et le milieu de dénitrification (nitrate + source de carbone) ont été conçus pour la comptabilisation des bactéries dénitrifiantes responsables de la transformation des nitrates, processus clé dans la disponibilité de l'azote pour les plantes. Ces trois milieux permettent d'identifier différents groupes de bactéries dénitrifiantes selon leurs préférences métaboliques.

Le protocole de dilution a consisté en la réalisation de cinq dilutions décimales pour chaque échantillon. Ces dilutions permettent d'obtenir des densités de colonies dénombrables sur les boîtes de Petri tout en couvrant une gamme large de concentrations microbiennes.

Tableau 8 : Clés de lecture des abréviations des milieux de culture utilisés.

Milieux de culture	Abréviations utilisées	Rôles
Levure peptone Glucose Agar	LPGA	Estimation de la diversité bactérienne cultivable totale.
NBRIP	P	Sélectionner spécifiquement les bactéries capables de solubiliser le phosphore minéral.
Yeast Extract Mannitol medium	YMA	Identification des bactéries symbiotiques diazotrophes.
Ashby Glucose Agar (modifié)	A	Identification des bactéries libres.
Winogradsky modifié	AN	Identifier différents groupes de bactéries dénitrifiâtes selon leurs préférences métaboliques.
Nitritique minéral	N	
Dénitrification (nitrate + source de carbone)	D	

2.6.5.3. Incubation et dénombrement

Les conditions d'incubation ont été standardisées à une température de $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, température optimale pour la plupart des bactéries telluriques de la région d'étude. La durée d'incubation a été adaptée selon le milieu de culture et les cinétiques de croissance observée.

Le protocole de lecture a été organisé en deux temps pour optimiser la détection des colonies à croissance rapide et lente. Une première lecture a été effectuée 24 heures après ensemencement pour tous les milieux, permettant de détecter les bactéries à croissance rapide. Une seconde lecture a été réalisée 48 heures après ensemencement pour les milieux LGPA, YMA, A, AN, N et D, tandis que pour le milieu NBRIP (phosphore), cette seconde lecture a été effectuée 14 jours après ensemencement, compte tenu de la croissance plus lente des bactéries solubilisatrices de phosphore.

Le dénombrement a été réalisé par comptage manuel des colonies viables en respectant les critères de morphologie coloniale distinctive. Trois répétitions ont été effectuées par dilution pour assurer la fiabilité statistique des résultats. Les résultats ont été exprimés en CFU/g de sol sec (Unités Formatrices de Colonies par gramme de sol sec), unité standard permettant la comparaison avec la littérature scientifique.

Pour obtenir le nombre total de bactéries à partir de la colonie, nous avons utilisé la formule de dénombrement suivante :

$\text{Nombre total de bactéries (CFU/g de sol)} = (\text{Nbr de colonie} \times \text{facteurs de dilution}) / \text{Masse inoculée}$
--

2.6.5.4. Indices de diversité fonctionnelle microbienne : fondements théoriques

La caractérisation de la diversité des communautés microbiennes constitue un enjeu majeur en écologie microbienne, particulièrement dans l'évaluation de l'impact des pratiques agricoles sur la fonctionnalité des agroécosystèmes. Les indices de diversité développés

initialement pour les macroorganismes trouvent une application particulièrement pertinente dans l'analyse des communautés microbiennes, où la quantification des fonctions métaboliques remplace souvent l'identification taxonomique (Fierer, 2017).

- **Standardisation et abondances relatives**

La conversion en abondances relatives constitue l'étape préliminaire indispensable :

$$p_i = N_i / \sum N_j$$

Où N_i représente les unités formant colonies (CFU) du milieu fonctionnel i spécifique et N_j représente les CFU du milieu fonctionnel j . Cette standardisation permet de s'affranchir des variations quantitatives absolues entre échantillons et de se concentrer sur les proportions relatives des différentes fonctions métaboliques, approche fondamentale en écologie microbienne (Prosser et al., 2007).

- **Indice de Shannon-Weaver : sensibilité aux fonctions rares**

L'indice de Shannon-Weaver $H' = -\sum p_i \ln(p_i)$, où $\sum p_i$ représentent la somme des abondances relatives et $\ln(p_i)$ = logarithme naturel de chaque abondance relative p_i .

L'indice de Shannon-Weaver quantifie l'incertitude associée à l'identification d'une fonction tirée aléatoirement dans la communauté. Sa sensibilité particulière aux groupes fonctionnels rares en fait un indicateur privilégié pour détecter les perturbations affectant les fonctions métaboliques minoritaires, mais écologiquement cruciales. Dans le contexte agricole, H' permet d'évaluer l'impact des pratiques intensives (herbicides, fertilisation minérale) sur les fonctions spécialisées comme la dénitrification ou la solubilisation du phosphore, souvent portées par des populations microbiennes numériquement minoritaires, mais fonctionnellement essentielles (Griffiths et al., 2013).

- **Indice de Simpson : dominance fonctionnelle**

L'indice de Simpson $\lambda = \sum p_i^2$, où $\sum p_i^2$ représente la somme de chaque abondance relative élevée au carré.

L'indice de Simpson généralement exprimé sous la forme $1-\lambda$, quantifie la probabilité que deux unités fonctionnelles tirées aléatoirement appartiennent à des groupes différents. Cet indice privilégie les groupes dominants et détecte efficacement les déséquilibres fonctionnels. En microbiologie des sols, $1-\lambda$ révèle les situations de sur-représentation d'une fonction particulière, signalant souvent une spécialisation de la communauté en réponse à des apports spécifiques (azote, carbone labile) ou des stress environnementaux.

- **Richesse fonctionnelle et diversité effective**

La richesse fonctionnelle S (nombre de milieux avec $N_i > 0$) fournit une mesure qualitative simple de la variété métabolique présente. Sa robustesse aux erreurs de quantification en fait un indicateur fiable pour les comparaisons inter-sites. La diversité globale de Hill $N_1 = e^{(H')}$ où $e^{(H')}$ représente l'exponentielle de l'indice de Shannon, convertit l'indice de Shannon en "nombre effectif" de fonctions équivalentes, facilitant l'interprétation écologique directe : N_1 représente le nombre de fonctions équitablement réparties qui produiraient la même valeur de Shannon que la communauté observée.

Conclusion

Ce chapitre méthodologique présente un dispositif expérimental adapté à l'évaluation comparative de la qualité biologique des sols dans les agrosystèmes des zones arides, en s'appuyant sur une adaptation innovante du cadre conceptuel Biofunctool® aux conditions spécifiques de la région de Laghouat.

L'analyse détaillée des caractéristiques pédoclimatiques de la zone d'étude révèle des conditions environnementales particulièrement contraignantes pour l'activité microbienne des sols. L'indice de De Martonne de 5,73 confirme le caractère aride prononcé du climat régional, avec une période sèche s'étendant sur 11 mois et des déficits hydriques extrêmes qui constituent des facteurs de stress majeurs pour les communautés microbiennes. Ces conditions environnementales spécifiques justifient pleinement l'adaptation des protocoles d'évaluation standard aux réalités locales et soulignent l'importance de développer des indicateurs pertinents pour ces écosystèmes fragiles.

L'adaptation du cadre Biofunctool® constitue l'innovation méthodologique centrale de cette étude. Cette adaptation réussit à concilier la rigueur scientifique de l'approche intégrative originale avec les contraintes techniques des laboratoires locaux, tout en préservant la validité comparative des résultats. Le développement de sept milieux de culture spécifiques permet une évaluation fonctionnelle de la diversité microbienne couvrant les processus biogéochimiques essentiels : solubilisation du phosphore, fixation de l'azote, dénitrification et diversité bactérienne globale. Cette approche culturo-dépendante, bien qu'elle ne révèle qu'une fraction de la diversité microbienne totale, offre l'avantage d'être directement liée aux fonctions écologiques et d'être techniquement accessible dans le contexte d'étude.

La stratégie d'échantillonnage développée, basée sur une approche par réseau de contacts, répond efficacement aux contraintes du terrain tout en assurant la sélection d'exploitations représentatives des pratiques conventionnelles locales. Le design comparatif apparié avec 5 exploitations par système de production, bien qu'il présente des limites en termes de puissance statistique, permet de maximiser le contrôle des variables confondantes et constitue une base solide pour une étude exploratoire approfondie. L'harmonisation des protocoles de terrain et des périodes de collecte garantit la comparabilité des résultats entre les systèmes étudiés.

L'intégration d'approches multiples – enquêtes approfondies, observations de terrain et analyses microbiologiques – assure une validation croisée des résultats et permet une compréhension holistique des relations entre pratiques agricoles et fonctionnement biologique des sols. L'implication directe des agriculteurs dans le processus d'évaluation, à travers les questionnaires socio-techniques et les observations participatives, favorise l'appropriation des résultats et facilite le transfert des connaissances vers les praticiens.

Les innovations techniques développées, notamment l'adaptation des conditions d'incubation et des protocoles de lecture aux spécificités climatiques locales, constituent des contributions méthodologiques transférables à d'autres contextes arides similaires. La

standardisation rigoureuse des procédures analytiques et la mise en place de contrôles qualité garantissent la reproductibilité des résultats et leur comparabilité avec la littérature scientifique internationale.

Cependant, plusieurs limites méthodologiques doivent être considérées dans l'interprétation des résultats futurs. L'approche culturo-dépendante sous-estime nécessairement la diversité microbienne réelle et peut introduire des biais vers les micro-organismes à croissance rapide. La taille limitée de l'échantillon restreint la généralisation statistique des résultats, bien que l'objectif exploratoire de l'étude justifie cette limitation. L'absence de sites de référence non cultivés limite l'évaluation de l'impact absolu des pratiques agricoles par rapport à un état naturel du sol.

L'approche temporelle transversale ne permet pas de saisir les variations saisonnières de l'activité microbienne, particulièrement importante dans le contexte aride étudié. L'interaction complexe entre facteurs climatiques, édaphiques et techniques rend difficile l'identification des relations de causalité directe, nécessitant une interprétation prudente des corrélations observées. Malgré ces limites, le dispositif méthodologique développé constitue un outil pertinent et innovant pour l'évaluation de la qualité biologique des sols dans les agrosystèmes arides. Cette approche méthodologique hybride, combinant rigueur scientifique et faisabilité technique, ouvre des perspectives prometteuses pour l'évaluation comparative des systèmes de production dans les contextes de ressources limitées.

Les résultats attendus de cette investigation devraient fournir des éléments nouveaux sur l'impact différentiel des pratiques conventionnelles et agroécologiques sur le fonctionnement microbien des sols arides, contribuant ainsi à l'orientation des politiques agricoles vers une plus grande durabilité des systèmes de production dans les régions vulnérables aux changements climatiques. Cette contribution méthodologique s'inscrit dans une démarche plus large de développement d'outils d'évaluation adaptés aux spécificités des agrosystèmes méditerranéens et arides, répondant aux enjeux actuels de la recherche agronomique dans ces écosystèmes fragiles.

Chapitre III

Résultats et Discussions

Introduction

Les communautés microbiennes du sol constituent le cœur fonctionnel des agroécosystèmes, orchestrant les cycles biogéochimiques essentiels qui soutiennent la productivité agricole et la durabilité environnementale. Dans les exploitations conventionnelles, l'intensification des pratiques agricoles exerce des pressions sélectives majeures sur ces communautés, modifiant leur structure, leur diversité et leur capacité à fournir les services écosystémiques fondamentaux (Fierer et al., 2007 ; Philippot et al., 2013). Cette transformation des communautés microbiennes représente un enjeu critique pour la durabilité à long terme des systèmes de production intensive, particulièrement dans les contextes pédoclimatiques contraignants où la résilience écologique est déjà fragilisée.

L'évaluation de la diversité microbienne fonctionnelle dans les sols agricoles nécessite des approches méthodologiques robustes capables de révéler les mécanismes complexes qui régissent les interactions entre pratiques de gestion et communautés microbiennes. Le cadre conceptuel Biofunctool®, développé par Thoumazeau et al. (2018), offre une approche intégrative privilégiant l'évaluation des fonctions résultant des interactions entre les compartiments physico-chimiques et biologiques du sol. Cette approche fonctionnelle, initialement validée en conditions tropicales, présente un potentiel d'adaptation considérable pour l'évaluation des sols agricoles dans d'autres contextes pédoclimatiques.

Le contexte aride algérien, caractérisé par des contraintes hydriques sévères et des sols soumis à des stress multiples, constitue un terrain d'investigation particulièrement pertinent pour tester la robustesse du cadre Biofunctool® et comprendre les adaptations des communautés microbiennes aux conditions d'agriculture intensive en milieu contraignant. Cette étude représente la première application systématique de cette approche aux sols d'exploitations conventionnelles en contexte aride, étendant significativement le domaine d'application de cet outil d'évaluation.

Ce chapitre vise à caractériser la diversité microbienne fonctionnelle dans cinq exploitations conventionnelles de la région de Laghouat, en Algérie, et à élucider les relations complexes entre pratiques agricoles et structuration des communautés microbiennes. L'investigation s'articule autour de trois objectifs principaux : (i) évaluer la diversité et la structure des communautés microbiennes fonctionnelles en utilisant une gamme d'indices complémentaires, (ii) identifier les mécanismes par lesquels les pratiques agricoles conventionnelles influencent la composition et l'activité des guildes microbiennes spécialisées, et (iii) révéler les syndromes fonctionnels émergents qui caractérisent l'adaptation des communautés microbiennes aux conditions pédologiques.

L'analyse intègre une approche multidimensionnelle combinant l'évaluation quantitative de la diversité par les indices de Shannon-Weaver, Simpson et Hill N_1 , la caractérisation spécifique des fonctions clés du cycle de l'azote et du phosphore, et l'identification des corrélations entre pratiques agricoles, conditions pédologiques et diversité/richeesse microbienne. Cette démarche permet de révéler les mécanismes écologiques fondamentaux qui régissent les réponses des communautés microbiennes aux pratiques de fertilisation, d'amendement organique et de protection phytosanitaire, contribuant ainsi à l'optimisation des stratégies de gestion pour la préservation des services écosystémiques microbiens.

3.5. Évaluation de la diversité microbienne fonctionnelle dans les sols d'exploitations conventionnelles

3.5.1. Caractéristiques générales de la diversité microbienne

3.5.1.1. Diversité globale et richesse fonctionnelle

L'analyse de la **diversité globale** par l'indice Hill N_1 révèle des variations significatives entre exploitations (de 2,295 à 2,549), reflétant des différences dans la structuration des communautés microbiennes cultivables (Tableau 9). Cet indice représente le nombre effectif d'espèces microbiennes co-dominantes. L'exploitation agricole **EC3** présente la diversité effective élevée (Hill $N_1 = 2,549$), caractéristique de communautés microbiennes bien équilibrées, tandis que l'exploitation agricole **EC5** montre une diversité réduite (Hill $N_1 = 2,295$) suggérant un appauvrissement fonctionnel des communautés. Cette amplitude de variation (11,1%) témoigne de l'impact différentiel des pratiques agricoles et/ou condition pédologique sur la diversité microbienne cultivable.

Concernant la **richesse fonctionnelle**, les résultats révèlent une constance remarquable avec 7 groupes microbiens détectés (Tableau 9) sur l'ensemble des cinq exploitations (de EC1 à EC5). Cette uniformité dans la richesse suggère une stabilité structurelle des communautés microbiennes cultivables, conforme aux principes du cadre Biofunctool® qui privilégie l'évaluation des fonctions résultant des interactions entre les compartiments physico-chimiques et biologiques du sol (Thoumazeau et al. 2018). Malgré cette richesse taxonomique apparemment stable, l'indice Hill N_1 révèle que la diversité effective varie considérablement entre exploitations, soulignant l'importance de considérer non seulement la présence des groupes microbiens, mais également leur distribution relative.

Le milieu LPGA, indicateur de la diversité bactérienne hétérotrophique globale, présente les densités les plus élevées avec une moyenne de 307 000 CFU/g de sol sec. Cette abondance témoigne d'une activité métabolique importante des communautés bactériennes générales, probablement soutenue par les apports de matière organique liés aux résidus de culture céréalière et aux pratiques de fertilisation minérale. Ces résultats s'inscrivent dans l'approche intégrative de Biofunctool® qui évalue la capacité du sol à fonctionner plutôt que ses constituants isolés (Thoumazeau et al., 2018).

3.5.1.2. Indices de diversité et équitabilité

Les indices de **Shannon-Weaver** ($H = 0,831$ à $0,936$) et de **Simpson** ($1-D = 0,403$ à $0,539$) indiquent une diversité modérée avec une variabilité entre exploitations relativement faible. L'exploitation agricole **EC3** présente une diversité globale élevée ($H = 0,936$, Simpson = $0,525$), tandis que l'exploitation **EC5** montre les valeurs les plus faibles ($H = 0,831$, Simpson = $0,403$). Cette variation pourrait refléter des différences dans l'historique des pratiques culturales, l'intensité des pratiques agricoles ou les conditions pédologiques du sol.

L'analyse combinée des trois indices (Shannon-Weaver et Hill N_1) confirme un gradient de diversité cohérent : $EC3 > EC2 > EC1 > EC4 > EC5$. La convergence de ces mesures renforce la validité de l'évaluation de la diversité microbienne et suggère que les différences observées sont biologiquement significatives plutôt que liées à des variations méthodologiques. L'indice Hill N_1 , particulièrement sensible aux espèces dominantes, complète efficacement l'information

fournie par les indices classiques en révélant la structure fonctionnelle effective des communautés microbiennes.

Tableau 9: Statistiques descriptives des densités microbiennes par fonction écologique dans les sols d'exploitations conventionnelles (CFU/g de sol sec).

Codes	Richesse	Shannon_H	Simpson_1-D	Diversité globale Hill N ₁
EC1	7	0.924	0.539	2.519
EC2	7	0.934	0.473	2.544
EC3	7	0.936	0.525	2.549
EC4	7	0.885	0.479	2.422
EC5	7	0.831	0.403	2.295

3.5.2. Analyse des fonctions microbiennes spécifiques

3.5.2.1. Cycle de l'azote : Fixation biologique à travers des bactéries diazotrophes (milieux A et YMA) :

L'analyse des bactéries diazotrophes révèle des différences significatives selon le milieu de culture utilisé. Le milieu **YMA** présente une moyenne exceptionnellement élevée de 142 067 CFU/g avec une médiane de 79 833 CFU/g, tandis que le milieu **A** affiche une moyenne nettement inférieure de 10 160 CFU/g pour une médiane de 9 900 CFU/g (Figure 14).

Cette forte différence entre les deux milieux spécifiques à la fixation d'azote s'explique par leurs compositions différentes. Le milieu **YMA**, enrichi en extrait de levure et mannitol, favorise la croissance de rhizobactéries plus exigeantes nutritionnellement, tandis que le milieu **A** (Ashby Glucose Agar) sélectionne des diazotrophes plus spécialisés et adaptés aux conditions oligotrophes (environnement pauvre en nutriments).

La forte variabilité observée sur **YMA**, avec un coefficient de variation d'environ 68%, suggère une hétérogénéité importante des populations diazotrophes entre exploitations, potentiellement liée aux pratiques de fertilisation azotée qui peuvent inhiber la fixation biologique.

3.5.2.2. Cycle de l'azote : Populations dénitrifiantes (milieux AN, N, D)

L'analyse des bactéries dénitrifiantes montre des variations selon les milieux de culture utilisés. Le **milieu N** présente une moyenne de 11 670 CFU/g avec une forte variabilité caractérisée par un coefficient de variation d'environ 91%, tandis que le **milieu D** affiche une moyenne de 6 270 CFU/g avec une stabilité nettement supérieure (CV = 25%). Le **milieu AN** révèle quant à lui une moyenne de 5 333 CFU/g et demeure relativement stable avec un coefficient de variation d'environ 30% (Figure 14). La population dénitrifiante totale représente environ 3 à 4% de la microflore cultivable globale, proportion cohérente avec les données de la littérature pour les sols agricoles. La forte variabilité observée sur le milieu **N**, notamment avec l'exploitation **EC4** qui atteint 30 000 CFU/g, pourrait indiquer des conditions particulières favorisant l'oxydation des nitrites dans cette exploitation.

3.5.2.3. Cycle du phosphore : Bactéries solubilisatrices du phosphore (milieu P-NBRIP)

L'analyse des bactéries solubilisatrices du phosphore révèle une densité remarquablement faible avec une moyenne de 660 CFU/g et une médiane de seulement 100 CFU/g (Figure 13).

Cette population ne représente que 0,2% de la microflore cultivable totale, constituant un résultat préoccupant dans le contexte de l'agriculture conventionnelle. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette observation : l'utilisation intensive d'engrais phosphatés solubles pourrait réduire la pression sélective favorisant ces populations, tandis que les pratiques de fertilisation minérale pourraient altérer les conditions physico-chimiques nécessaires à l'activité de solubilisation. De plus, le pH et la disponibilité en phosphore soluble pourraient inhiber l'expression des gènes de solubilisation, compromettant ainsi le développement de ces bactéries bénéfiques pour la mobilisation du phosphore dans les sols agricoles.

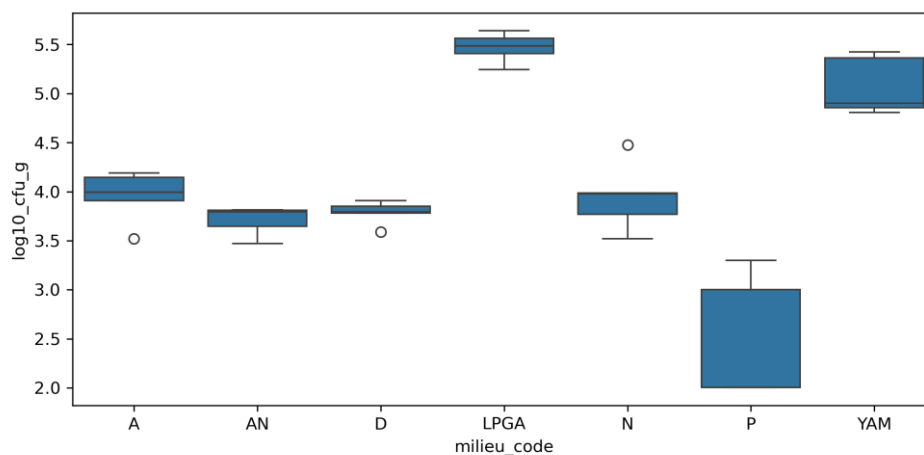


Figure 11: Distribution des densités microbiennes par fonction écologique dans les sols d'exploitations conventionnelles.

3.5.3. Profil microbien des sols

Le profil microbien des sols des exploitations agricoles enquêtées est représenté par des barres empilées (Tableau 10 et Figure 14) illustrant la répartition relative (en pourcentage) des différents groupes bactériens isolés sur les milieux de culture (A, AN, D, LPGA, N, P, YMA).

L'exploitation agricole **EC1** présente un profil microbien fortement orienté vers la fixation symbiotique avec YMA dominant à 88,33%, suggérant un sol particulièrement favorable aux bactéries symbiotiques diazotrophes. Cependant, les fonctions de dénitrification restent modérées (AN+D+N = 6,67%) et la solubilisation du phosphore est faible (P = 0,33%). Cette exploitation semble optimisée pour la fixation biologique, mais pourrait bénéficier d'un renforcement des autres fonctions.

L'exploitation agricole **EC2** se distingue par un équilibre plus diversifié avec le YMA le plus faible (70,13%), mais compensé par une activité dénitrifiante remarquable (AN+D+N = 21,09%), particulièrement sur les milieux AN et N. Cette exploitation montre une capacité de régulation du cycle de l'azote plus complète, suggérant des pratiques favorisant la diversité fonctionnelle.

L'exploitation agricole **EC3** révèle un profil intermédiaire (YMA = 81,89%) avec un pic notable de dénitrification nitritique (N = 10,68%), indiquant des conditions spécifiques favorisant l'oxydation des nitrites. La solubilisation du phosphore demeure critiqueusement faible (P = 0,04%).

L'exploitation agricole **EC4** constitue un cas particulier avec la plus forte population de bactéries solubilisatrices du phosphore (P = 2,30%), soit 4 fois la moyenne générale. Cette spécificité pourrait refléter des amendements particuliers ou des conditions pédologiques favorables à cette fonction cruciale.

L'exploitation agricole **EC5** présente le profil le plus diversifié fonctionnellement avec le taux de diazotrophes libres le plus élevé (A = 15,63%) et le YMA le plus faible (64,55%). Cette répartition suggère un écosystème microbien moins dépendant de la symbiose et plus autonome pour la fixation d'azote.

Les variations significatives entre exploitations révèlent des potentiels d'optimisation distincts : EC1 pourrait diversifier ses fonctions dénitrifiantes, EC2 maintenir son équilibre fonctionnel exemplaire, EC4 valoriser sa capacité unique de solubilisation du phosphore, et EC5 exploiter sa diversité fonctionnelle pour réduire la dépendance aux intrants externes.

Tableau 10: Profils microbiens fonctionnels par exploitation agricole (%).

Code	A (%)	AN (%)	D (%)	N (%)	P (%)	YMA (%)
EC1	4,67	1,48	2,02	3,17	0,33	88,33
EC2	8,70	5,49	7,12	8,48	0,09	70,13
EC3	2,88	2,30	2,21	10,68	0,04	81,89
EC4	3,79	3,41	4,48	3,79	2,30	82,22
EC5	15,63	6,61	7,16	5,95	0,10	64,55
Moyenne	7,14	3,86	4,60	6,41	0,57	77,42

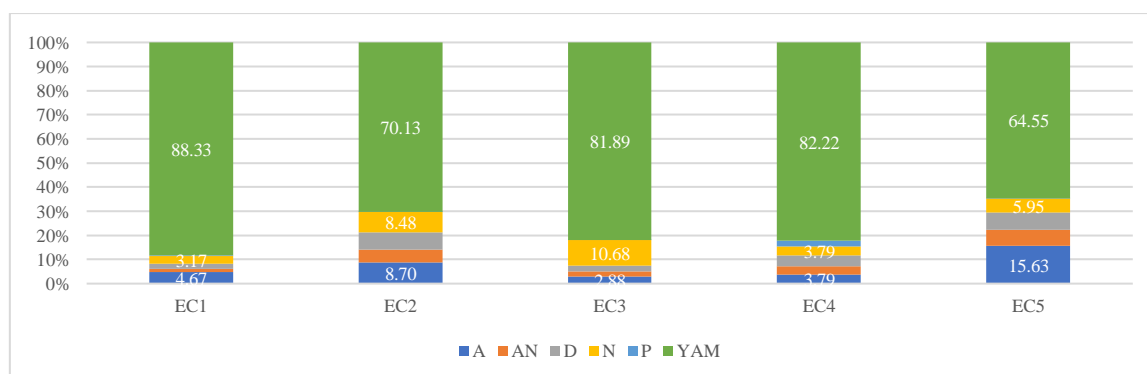


Figure 12: Répartition relative des groupes bactériens fonctionnels par exploitation agricole (%).

3.6. Relations entre pratiques agricoles et communautés microbiennes

L'analyse des enquêtes de terrains auprès des agriculteurs enquêtés montrent que toutes les exploitations pratiquent les grandes cultures céréalières (blé/orge dominant) avec des surfaces variant de 5,5 à 15 ha. Les systèmes de cultures sont irrigués avec labour profond annuel.

La diversification culturale varie considérablement entre exploitations. L'exploitation EC1 présente le système le plus diversifié avec 4 espèces dans une rotation triennale incluant des légumineuses (luzerne et fève représentant 50% de l'assolement). Les exploitations EC2 et EC3 développent des systèmes intermédiaires avec 3 espèces en rotation triennale complétée par du maraîchage, mais sans légumineuses. Les exploitations EC4 et EC5 exploitent les systèmes les plus simplifiés avec seulement 2 espèces en rotation biennale blé/orge, également sans légumineuses.

La fertilisation révèle des pratiques contrastées selon les exploitations. Concernant les amendements organiques, seule l'exploitation EC1 utilise du fumier ovin à raison de 5 t/ha/an, tandis que les autres exploitations n'apportent aucun amendement organique. La fertilisation minérale suit un gradient d'intensité avec les exploitations EC2 et EC3 appliquant 200 kg N/ha, EC5 utilisant 100 kg N/ha, et EC4 adoptant l'approche la plus extensive avec seulement 50 kg N/ha.

La protection phytosanitaire diffère également entre exploitations. Les exploitations EC1, EC4 et EC5 n'utilisent aucun traitement chimique, alors que l'exploitation EC2 applique 1 herbicide par an (Cossak), tandis que l'exploitation EC3 présente l'intensité la plus élevée avec 1 herbicide par an (Glyphosate) et 1 insecticide par an.

Les aménagements agroécologiques restent très limités puisque seule l'exploitation EC3 a mis en place des brise-vent sur 1000 mètres linéaires, les autres exploitations ne possédant aucun aménagement agroécologique. Aucune exploitation n'utilise de couverts végétaux ni d'intrants microbiens.

3.6.1. Analyse des corrélations : mécanismes et implications écologiques

L'analyse des corrélations de Spearman révèle des associations significatives entre les pratiques agricoles et la structure des communautés microbiennes, mettant en évidence des processus biogéochimiques fondamentaux qui régissent le fonctionnement des sols agricoles (Figure 15).

La matrice des corrélations de Spearman montre que les pratiques agricoles exercent une influence déterminante sur la structuration des communautés microbiennes fonctionnelles. **La diversification culturale** (diversité des cultures) émerge comme le facteur le plus favorable au maintien de la diversité microbienne, tandis que **l'intensification chimique** (utilisation des herbicides et engrais minéraux) tend à simplifier les communautés vers des populations généralistes.

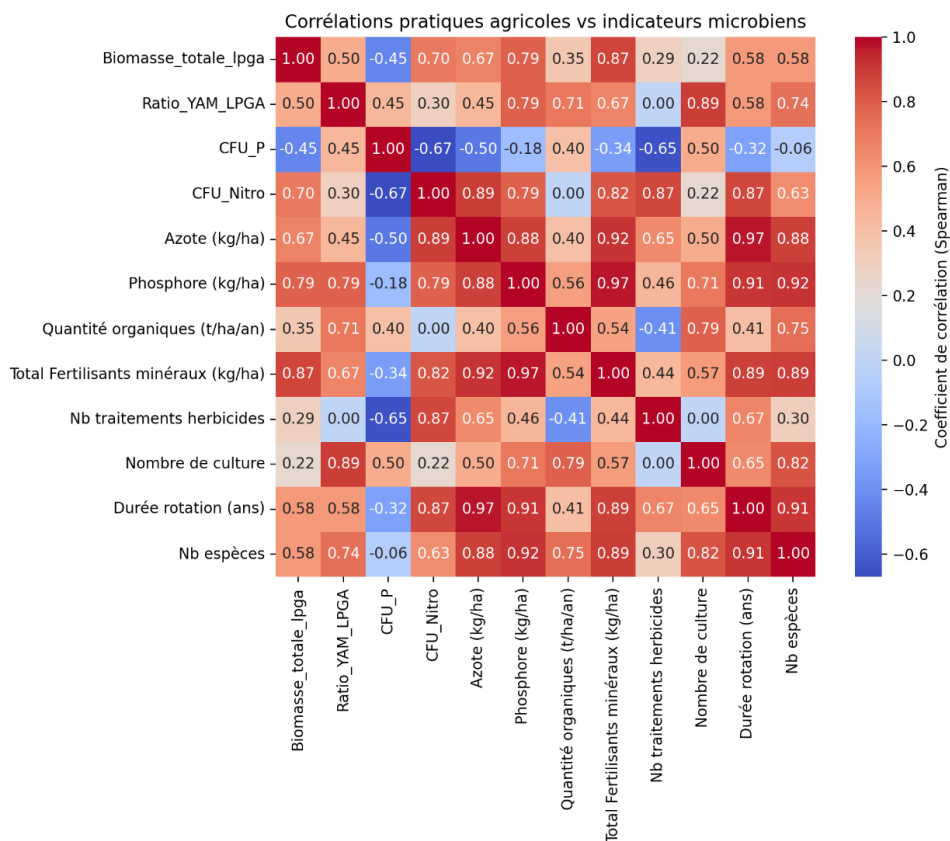


Figure 13: Matrice des corrélations de Spearman entre pratiques agricoles et communautés microbiennes fonctionnelles.

Plus spécifiquement, l'analyse de la corrélation de Spearman montre :

- e. **Un impact différentiel de la fertilisation azotée minérale :** La fertilisation azotée minérale exerce un contrôle répressif sélectif sur les communautés microbiennes fonctionnelles, révélant des mécanismes de régulation métabolique contrastés :
 - **Inhibition de la solubilisation du phosphore ($\rho = -0,50$) :** Cette corrélation négative témoigne d'un mécanisme de répression croisée entre les cycles de l'azote et du phosphore. L'excès d'azote minéral réduit l'expression des gènes de solubilisation phosphatée, les bactéries privilégiant l'assimilation directe de nutriments disponibles plutôt que d'investir dans des processus métaboliquement coûteux. Ce phénomène, documenté chez les *Pseudomonas solubilisatrices*, constitue une adaptation évolutive d'économie énergétique (Peoples et al., 1995).
 - **Stimulation de la dénitrification (CFU_Nitro : $\rho = 0,89$) :** La forte corrélation positive reflète l'augmentation du substrat nitré disponible pour les bactéries dénitrifiantes. Cette stimulation de la voie respiratoire anaérobie peut cependant représenter un risque environnemental par les émissions de N_2O et le lessivage de nitrates, nécessitant une gestion précise des doses et du fractionnement.

Cette régulation différentielle s'explique par un mécanisme de **compétition nutritionnelle et régulation métabolique** où l'inhibition de la solubilisation du phosphore par la fertilisation azotée reflète un mécanisme d'économie énergétique microbienne. Lorsque l'azote minéral est abondant, les bactéries réorientent leur métabolisme vers l'assimilation directe de nutriments plutôt que d'investir dans la production d'enzymes phosphatases et d'acides organiques. Ce

principe d'économie énergétique, documenté chez *Azotobacter* (Postgate, 1998), suggère une plasticité métabolique adaptative aux conditions de fertilité du sol.

- f. **Effet structurant de la diversification des cultures au sein de l'exploitation agricole :**
- **Promotion de la fixation symbiotique (Ratio_YMA_LPGA : $\rho = 0,89$) :** Cette corrélation remarquable révèle l'importance cruciale de la diversification des systèmes de culture pour maintenir les populations diazotrophes. La présence de légumineuses dans les rotations favorise non seulement le développement des rhizobactéries spécifiques, mais crée également un environnement rhizosphérique propice aux associations symbiotiques. Ce résultat corrobore les travaux montrant que la complexité des rotations est un facteur déterminant de la diversité microbienne fonctionnelle (Fierer et al., 2007).
 - **Stimulation de la diversité globale (Nombre d'espèces : $\rho = 0,82$) :** La corrélation positive avec la richesse microbienne s'explique par l'augmentation de la diversité des niches écologiques créées par les différentes espèces végétales. Chaque culture sécrète des exsudats racinaires spécifiques qui sélectionnent des communautés microbiennes adaptées, créant une mosaïque d'habitats favorisant la coexistence de guildes fonctionnelles spécialisées.

Ces **effets rhizosphériques et sélections d'habitats** montrent que la diversification culturale favorise l'établissement de niches écologiques multiples, chaque espèce végétale créant des conditions rhizosphériques spécifiques. Cette mosaïque d'habitats contribue au maintien de la diversité fonctionnelle et à la résilience du système face aux perturbations environnementales.

- g. **Impact négatif des traitements herbicides :**
- **Toxicité sélective sur la solubilisation du phosphore ($\rho = -0,65$) :** Cette forte corrélation négative révèle un effet non-cible préoccupant des herbicides sur les bactéries solubilisatrices. La sensibilité particulière de ces populations pourrait s'expliquer par des mécanismes métaboliques partagés avec les plantes cibles, notamment dans les voies de biosynthèse des acides organiques impliqués dans la solubilisation. Cette observation souligne la vulnérabilité des fonctions microbiennes spécialisées aux molécules phytosanitaires.

- h. **Régulation par les amendements organiques :**
- **Stimulation modérée de la fixation symbiotique (Ratio_YMA_LPGA : $\rho = 0,71$) :** Cette corrélation positive s'explique par l'amélioration des conditions physico-chimiques du sol (pH, capacité d'échange cationique) favorables aux interactions symbiotiques. Cependant, l'effet reste modéré, suggérant un mécanisme complexe où les apports organiques peuvent simultanément stimuler les populations symbiotiques tout en fournissant de l'azote minéralisé susceptible d'inhiber la fixation biologique.

Afin de remédier et optimiser la santé microbienne des sols, nous recommandons les pratiques agricoles suivantes dans les exploitations conventionnelles :

- **Diversification des systèmes de culture :** L'intégration de légumineuses dans des rotations longues apparaît comme le levier le plus efficace ($\rho = 0,89$) pour restaurer les populations diazotrophes et réduire progressivement la dépendance aux fertilisants azotés.

- **Gestion raisonnée de la fertilisation azotée** : L'adoption d'une fertilisation fractionnée et adaptée aux besoins des cultures pourrait préserver les fonctions de solubilisation du phosphore tout en maintenant la productivité.
- **Réduction de la pression herbicide** : Le développement d'approches intégrées de gestion des adventices constitue un enjeu majeur pour préserver les populations microbiennes spécialisées.

3.6.2. Ordination multivariée : révélation des syndromes fonctionnels

L'analyse en composantes principales (ACP) révèle une structuration remarquablement claire des données avec 86.8% de variance expliquée par les deux premiers axes (Figure 16), témoignant d'une forte cohérence dans les relations pratiques-microbiome. Cette performance exceptionnelle suggère que les variables sélectionnées capturent efficacement les mécanismes déterminants de la diversité microbienne fonctionnelle.

3.6.2.1. Interprétation biologique des gradients principaux

L'axe PC1 (50,9% de variance) matérialise un **gradient d'intensification minérale** révélant un antagonisme fondamental entre biomasse microbienne totale et spécialisation fonctionnelle. La forte association positive entre fertilisation azotée-phosphatée, biomasse LPGA et populations dénitrifiantes (CFU_Nitro) confirme que l'intensification chimique stimule les populations généralistes tout en réprimant les fonctions spécialisées, particulièrement la solubilisation du phosphore (CFU_P en opposition). Ce mécanisme traduit l'effet de **facilitation nutritionnelle** où l'abondance en nutriments solubles réduit la pression sélective favorisant les microorganismes investissant dans des processus métaboliquement coûteux.

L'axe PC2 (35,9% de variance) caractérise un **gradient de complexité agroécologique** opposant diversification culturale et simplification herbicide. La forte corrélation entre nombre de cultures, durée de rotation et ratio YMA/LPGA confirme que la complexité végétale structure positivement la spécialisation microbienne, particulièrement vers la fixation symbiotique. L'opposition avec les traitements herbicides révèle l'incompatibilité entre diversification fonctionnelle et intensification chimique.

3.6.2.2. Typologie des exploitations et stratégies agronomiques

La distribution des exploitations révèle **quatre archétypes de gestion** :

- **EC2 et EC3** illustre le **modèle optimal** combinant forte diversification (légumineuses) et fertilisation modérée, maximisant la spécialisation fonctionnelle sans compromettre la productivité. Cette position confirme la viabilité d'une approche intégrée privilégiant les processus biologiques.
- **EC5** représente un **modèle de transition contradictoire** associant diversification culturale et intensification minérale. Cette combinaison génère une biomasse microbienne élevée, mais limite l'expression des fonctions spécialisées, illustrant les limites d'une approche hybride.
- **EC4** développe un **modèle extensif spécialisé** caractérisé par une faible fertilisation minimale favorisant exceptionnellement les bactéries solubilisatrices du phosphore. Cette stratégie de niche révèle le potentiel de valorisation biologique des ressources minérales en conditions d'input réduit.

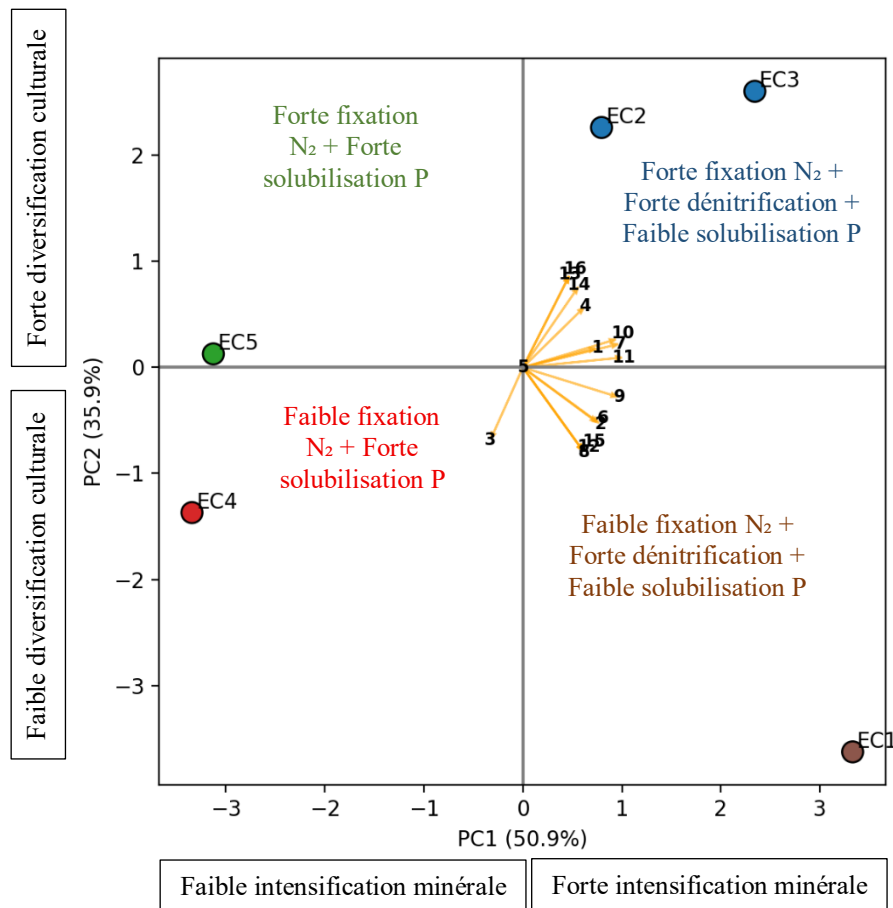
- **EC1** constitue le **modèle conventionnel simplifié** associant rotation courte et spécialisation fonctionnelle minimale, illustrant l'appauvrissement microbien des systèmes intensifs standardisés.

3.6.2.3. Implications agronomiques et leviers d'optimisation

L'ACP confirme quantitativement deux **leviers synergiques majeurs** pour l'optimisation microbienne :

La réduction progressive de l'intensification minérale émerge comme priorité pour restaurer les fonctions de solubilisation du phosphore. Le gradient PC1 suggère qu'une fertilisation raisonnée peut maintenir la biomasse microbienne tout en préservant la spécialisation fonctionnelle.

La diversification culturale et rotations avec intégration systématique de légumineuses constitue le levier le plus puissant d'amélioration du ratio YMA/LPGA. Le gradient PC2 démontre que cette stratégie permet simultanément de réduire la dépendance herbicide et d'accroître l'autonomie azotée.



1= Biomasse totale LPGA, 2= Ratio YMA/ LPGA, 3= CFU_P, 4=CFU_Nitro, 5 =Richesse microbienne, 6= Nombre de culture, 7=Durée de rotation (ans), 8=Légumineuses, 9=Nombre d'espèces, 10=Azote (kg / ha), 11=Phosphore (kg / ha), 12=Quantité d'amendements organiques (t / ha / an), 13=Nombre de traitements herbicides, 14=Ancienneté de l'exploitation (ans), 15=Apport organique (0 / 1), 16=Utilisation d'herbicides (0 / 1).

Figure 14: Position des exploitations conventionnelles dans l'espace fonctionnel défini par l'ACP.

3.7. Analyse des interactions sol-microbiologie en agriculture conventionnelle : synthèse des résultats et implications éco systémiques

Les mesures sur terrain et les analyses en laboratoires des échantillons de sol des exploitations conventionnelles enquêtés montrent que les cinq exploitations étudiées présentent des sols aux caractéristiques édaphiques globalement homogènes (Figure 17), mais avec des variations significatives impactant la diversité microbienne.

Toutes les exploitations ont des sols alcalins modérés à élevés (pH 7,47 à 7,87) à texture dominante sablo-argileuse (4/5 exploitations), non salins (conductivité < 0,3 dS/m) et présentant une infiltration rapide caractéristique d'une structure grumeleuse. Cependant, des variations pédologiques importantes différencient les sites : le carbone organique varie exceptionnellement de 1,2% à 3,2% avec des ratios C/N s'échelonnant de 14 à 25 et le calcaire actif oscille entre 2,6% et 20,8%. La qualité structurale (VESS 2,0 à 3,8) et la vitesse d'infiltration (103 à 1000 mm/h) révèlent également des contrastes majeurs entre exploitations.

L'exploitation **EC1** présente le profil édaphique le plus équilibré avec un pH modérément alcalin (7,47), une teneur en carbone organique **optimale (3,2%)** la plus élevée de l'étude associée à un ratio C/N favorable (21), témoignant de l'effet bénéfique des amendements organiques et de l'intégration des légumineuses, un taux de calcaire actif modéré (12,1%) et une excellente structure du sol (VESS 2,2). Cette exploitation se distingue également par une infiltration équilibrée (240 mm/h), conditions particulièrement favorables à la diversité microbienne.

L'exploitation **EC2** se caractérise par une teneur en carbone organique **modérée (1,8%)** associée à un ratio C/N relativement bas (18) et un taux de calcaire actif élevé (20,8%) et un taux de calcaire actif élevé (20,8%). La structure du sol apparaît plus dégradée (VESS 3,4) avec une infiltration modérée (140 mm/h), suggérant un déséquilibre dans la gestion de la matière organique malgré des apports importants.

L'exploitation **EC3** présente une teneur en carbone organique **réduite (1,2%)**, révélant l'impact de l'intensification chimique sur la dégradation de la matière organique, associé au ratio C/N équilibré (19), favorable à la minéralisation contrôlée, témoignant de l'impact de l'intensification sur la dégradation de la matière organique, indiquant une minéralisation rapide de la matière organique. EC3 révèle une structure du sol équilibrée (VESS 2,4) avec une infiltration modérée (180 mm/h)

L'exploitation **EC4** se distingue par le taux de calcaire actif le plus faible (2,6%) et un taux de carbone organique équilibré (2,1%) associé au ratio C/N le plus élevé (25), associés à une excellente structure du sol (VESS 2,0) et une texture sablo-limono-argileuse unique. Cette exploitation présente cependant une infiltration très élevée (533 mm/h) pouvant favoriser le lessivage des nutriments.

L'exploitation **EC5** combine plusieurs contraintes édaphiques avec une infiltration excessive (1000 mm/h) et un pH très alcalin (7,87), et un taux de carbone organique faible (1,4%) malgré un ratio C/N correct (20) conditions particulièrement défavorables à la diversité microbienne.

Ces variations édaphiques révèlent une hiérarchie claire liée aux pratiques agricoles. Cette hiérarchie reflète parfaitement l'impact des pratiques agricoles : **EC1** (3,2% C org.) bénéficie des amendements organiques réguliers et de l'intégration des légumineuses, **EC4** (2,1% C org.)

maintient un équilibre par une fertilisation extensive, **EC2** (1,8% C org.) présente des valeurs modérées cohérentes avec l'absence d'amendements organiques, **EC5** (1,4% C org.) subit l'impact des conditions alcalines et du drainage excessif, tandis que **EC3** (1,2% C org.) subit la dégradation la plus marquée liée à l'intensification chimique et aux traitements phytosanitaires intensifs.

Ces variations édaphiques, particulièrement la structure et l'équilibre C/N, se révèlent déterminantes pour expliquer les différences de richesse et diversité microbienne fonctionnelle observées entre les systèmes de culture étudiés.

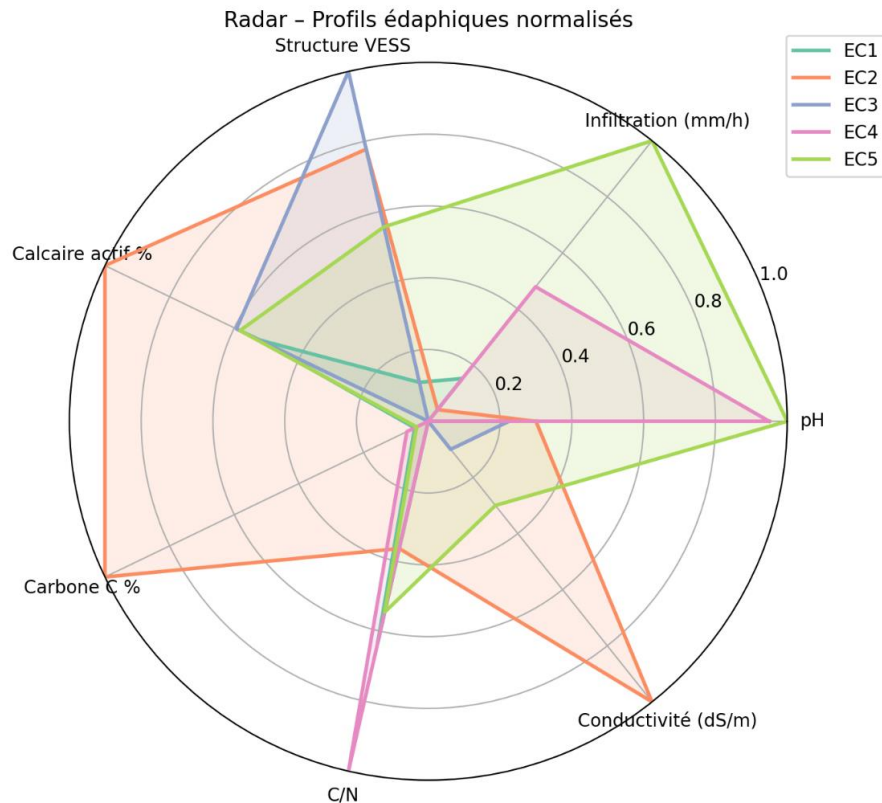


Figure 15: Profils édaphiques des exploitations agricoles conventionnelles.

3.7.1. Matrice des corrélations : révélation des mécanismes biogéochimiques

L'analyse de corrélation de Spearman révèle des associations statistiquement significatives entre les propriétés édaphiques et la structuration des communautés microbiennes, mettant en évidence des mécanismes écophysologiques complexes d'adaptation aux contraintes pédologiques (Figure 18).

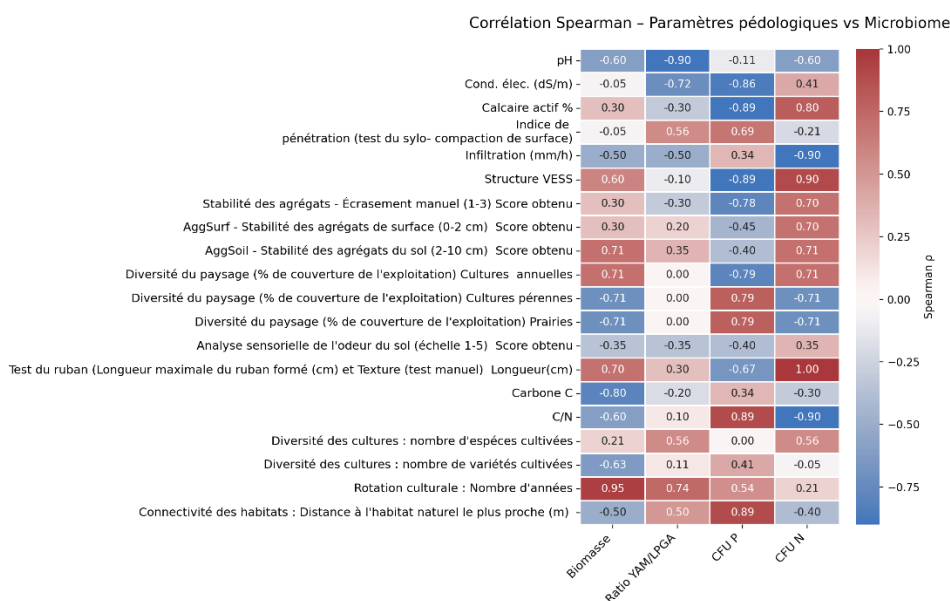


Figure 16: Matrice des corrélations de Spearman entre pratiques agricoles et communautés microbiennes fonctionnelles.

La matrice de corrélation met en évidence plusieurs paramètres édaphiques limitant à la richesse et diversité des microbismes, à savoir :

- **L'alcalinité excessive comme facteur limitant majeur :** Les corrélations négatives remarquables entre le pH, la conductivité électrique, le calcaire actif et le ratio YMA/LPGA ($\rho \leq -0,60$ à $-0,90$) révèlent un effet répressif sévère de l'**alcalinité** sur la spécialisation fonctionnelle microbienne. Cette relation s'explique par les mécanismes de précipitation des phosphates en conditions très alcalines ($\text{pH} > 7,8$), réduisant la biodisponibilité du phosphore et inhibant l'expression des gènes de fixation symbiotique chez les rhizobactéries (Hinsinger, 2001). L'excès de calcaire actif ($> 20\%$) intensifie ce phénomène par la formation de complexes Ca-P insolubles, défavorisant particulièrement les associations symbiotiques exigeantes en phosphore.
- **Paradoxe du compactage et solubilisation du phosphore :** La corrélation positive inattendue entre l'indice de pénétration et les populations solubilisatrices du phosphore (CFU_P, $\rho = 0,69$) constitue un résultat contre-intuitif révélant un mécanisme adaptatif spécifique. Ce phénomène suggère que les bactéries solubilisatrices développent une **stratégie de niche écologique** dans les microsites compactés où l'immobilisation du phosphore est maximale. La contrainte physique pourrait paradoxalement favoriser la sélection de souches hautement spécialisées capables de produire des acides organiques puissants (acides citriques, oxaliques) pour mobiliser le phosphore dans ces conditions limitantes (Richardson & Simpson, 2011).

La matrice de corrélation met également en évidence l'impact du régime hydrique sur l'écologie microbienne, à savoir :

- **Drainage excessif et lessivage des communautés :** Les corrélations négatives exceptionnelles entre la vitesse d'infiltration et les populations nitrifiantes ($\rho = -0,90$) ainsi que la biomasse totale ($\rho = -0,50$) illustrent l'effet délétère du drainage excessif sur

la stabilité des communautés microbiennes. Une infiltration > 800 mm/h induit un **lessivage chronique des nutriments** et une **instabilité hydrique** défavorable aux populations microbiennes sessiles, particulièrement les bactéries nitrifiantes nécessitant des conditions hydriques stables pour leur développement optimal (Prosser et al., 2020).

- **Équilibre hydro-structural optimal** : Les corrélations positives entre la structure du sol (VESS) et divers paramètres microbiens ($\rho = 0,60$ à $0,90$) confirment l'importance cruciale de l'architecture poreuse pour la colonisation microbienne. Une structure équilibrée (VESS 2,0-2,5) optimise simultanément l'aération, la rétention hydrique et la connectivité spatiale nécessaires aux interactions microbiennes complexes (Kravchenko et al., 2019).

Enfin, la matrice de corrélation met en lumière les relations carbone-azote et une spécialisation fonctionnelle, à savoir :

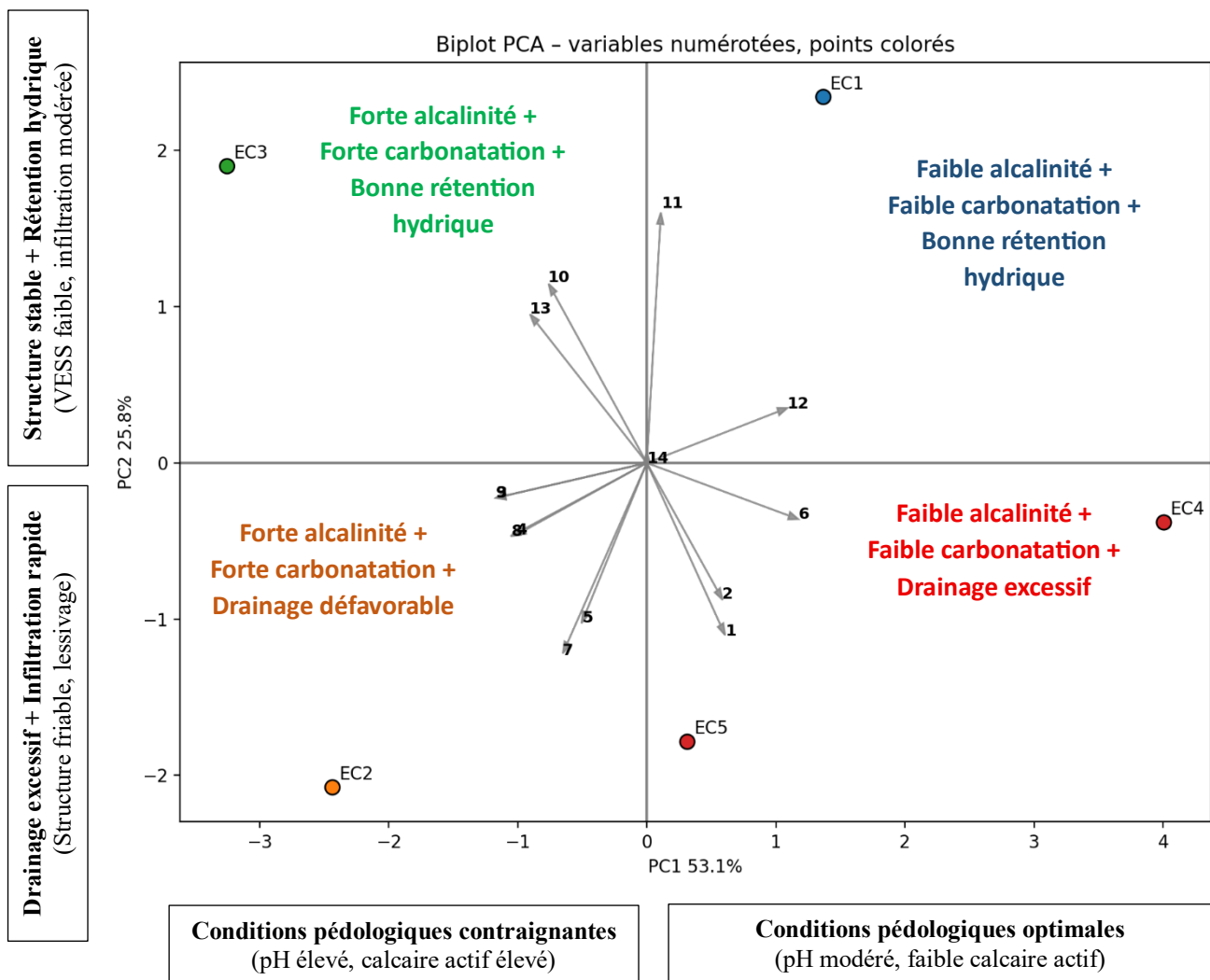
- **Ratio C/N comme déterminant métabolique** : La forte corrélation positive entre le ratio C/N et certains paramètres microbiens ($\rho = 0,89$) révèle l'importance de l'équilibre nutritionnel pour la spécialisation fonctionnelle. Un ratio C/N optimal (20 à 25) favorise une minéralisation contrôlée libérant progressivement l'azote tout en maintenant un pool carboné suffisant pour soutenir la diversité métabolique microbienne (Cotrufo et al., 2013).

À partir de ces données, nous pouvons établir des seuils pédologiques critiques pour l'optimisation microbienne. Ainsi, le pH doit être < 7,8, calcaire actif < 15%, infiltration 200-600 mm/h, et VESS < 2,5. Ces valeurs constituent des **indicateurs de diagnostic** pour l'évaluation de la santé microbienne des sols.

Les corrélations négatives avec l'alcalinité suggèrent des leviers d'amélioration par **acidification modérée** (amendements organiques, soufre), tandis que la gestion de la structure par **réduction du travail du sol** et **augmentation des apports organiques** apparaît prioritaire pour optimiser la porosité.

3.7.2. Structure de la variance édaphique : analyse en composantes principales

L'ACP (Figure 19) révèle une structuration remarquablement claire des relations pédologie-microbiome avec **78,9% de variance expliquée** par les deux premiers axes (PC1 : 53,1% ; PC2 : 25,8%). Cette performance exceptionnelle témoigne de l'existence de **gradients pédologiques structurants** qui déterminent de manière déterministe la diversité microbienne fonctionnelle, validant l'approche intégrée conditions édaphiques-communautés microbiennes.



1=pH, 2=Vitesse infiltration (mm/h), 3=Structure V.E.S.S, 4=Calcaire actif %, 5=Carbone C %, 6=C/N, 7=Indice pénétration, 8=Conductivité électrique, 9=Stabilité des agrégats, 10=Température sol (10 cm), 11=Biomasse_totale_LPGA, 12=Ratio YMA/LPGA, 13=CFU_P, 14=CFU_Nitro, 15=Richesse microbienne.

Figure 17: Position des exploitations dans l'espace pédoclimatique défini par l'ACP.

3.7.2.1. Interprétation des gradients principaux

L'axe **PC1 (53,1% de variance)** matérialise un **gradient d'alcalinité-carbonatation** opposant les conditions physico-chimiques contraignantes aux indicateurs de diversité microbienne. La colinéarité remarquable entre pH (variable 1) et calcaire actif (variable 4) confirme leur effet synergique sur la structuration des communautés microbiennes. Cette opposition fondamentale avec la biomasse totale (variable 11) et la richesse microbienne (variable 15) révèle un **mécanisme de répression chimique** où l'alcalinité excessive (pH > 7,8) et la carbonatation ($\text{CaCO}_3 > 20\%$) créent des conditions défavorables à la diversité fonctionnelle par immobilisation du phosphore et précipitation des microéléments essentiels.

L'axe **PC2 (25,8% de variance)** caractérise un **gradient hydro-structural** différenciant les régimes de drainage et la qualité physique des sols. L'opposition entre la vitesse d'infiltration (variable 2) et les paramètres de stabilité structurale illustre le paradoxe entre drainage excessif et rétention hydrique optimale. Ce gradient révèle l'importance critique de

l'équilibre hydro-aérique pour le maintien des communautés microbiennes, particulièrement sensibles aux stress hydriques.

3.7.2.2. Typologie des niches pédoclimatiques

La distribution spatiale des exploitations révèle **quatre archétypes de niches pédologiques** aux implications microbiologiques distinctes :

L'exploitation **EC1** (quadrant supérieur droit) occupe la niche pédologique optimale combinant des conditions physico-chimiques favorables (pH modéré, faible calcaire actif) avec une excellente structure du sol et une rétention hydrique équilibrée. Cette position explique le profil microbien exceptionnel observé précédemment, validant son statut de modèle de référence pour l'optimisation de la diversité microbienne fonctionnelle.

L'exploitation **EC3** (quadrant supérieur gauche) développe une niche alcaline-carbonatée structurée caractérisée par des contraintes physico-chimiques (pH élevé, calcaire actif important) compensées partiellement par une structure du sol stable et une bonne rétention hydrique. Cette position révèle un potentiel d'amélioration significatif par correction des déséquilibres chimiques tout en préservant les qualités structurales existantes.

L'exploitation **EC2** (quadrant inférieur gauche) représente la niche la plus contraignante cumulant alcalinité excessive, forte carbonatation et drainage défavorable. Cette combinaison délétère explique la biomasse microbienne particulièrement réduite et confirme l'effet synergique négatif des stress physico-chimiques et hydro-structuraux sur la diversité fonctionnelle.

Les exploitations **EC4** et **EC5** (quadrant inférieur droit) occupent des niches spécialisées à drainage excessif du sol bénéficiant de conditions chimiques moins contraignantes, mais soumises à un lessivage intensif. EC4 développe une adaptation fonctionnelle remarquable avec des performances exceptionnelles en solubilisation du phosphore, tandis que EC5 présente une niche de transition limitée par des contraintes spécifiques malgré des conditions chimiques correctes.

Cette typologie révèle des trajectoires d'amélioration différenciées : correction chimique prioritaire pour EC3, amélioration globale pour EC2, optimisation hydrique pour EC4-EC5, et maintien de l'équilibre pour EC1.

3.7.2.3. Implications agronomiques

Face aux niches pédologiques révélées par l'ACP, nous recommandons les améliorations suivantes pour chaque niche. Ainsi, Les exploitations du quadrant alcalin (EC2, EC3) nécessitent prioritairement une acidification modérée par amendements organiques et une décarbonatation progressive. Le drainage excessif du sol (EC4, EC5) requièrent une amélioration de la rétention hydrique du sol par augmentation de la matière organique et restructuration physique.

3.8. Synthèse des résultats : Évaluation de la diversité microbienne fonctionnelle dans les sols d'exploitations conventionnelles

3.8.1. Adaptation du cadre Biofunctool® en contexte aride

Cette étude constitue la première application du cadre conceptuel Biofunctool® aux sols d'exploitations conventionnelles en contexte aride algérien, étendant significativement le domaine d'application de cet outil initialement développé et validé en conditions tropicales par Thoumazeau et al. (2018). L'investigation menée sur cinq exploitations conventionnelles dans la région de Laghouat révèle la robustesse et la flexibilité du cadre conceptuel face aux conditions climatiques arides sévères (pluviométrie annuelle de 165 mm, indice de Martonne de 5,73), ouvrant la voie à son application dans d'autres contextes semi-arides et méditerranéens.

3.8.2. Adaptation réussie du cadre Biofunctool® en contexte aride

L'analyse par l'indice Hill N_1 révèle des variations notables entre exploitations (2,295 à 2,549), indiquant que les communautés fonctionnent comme si elles étaient composées de 2,3 à 2,5 groupes microbiens principaux co-dominants. Cette amplitude de variation de 11,1% témoigne de l'impact différentiel des pratiques agricoles sur la diversité microbienne cultivable. L'exploitation EC3 présente la diversité effective la plus élevée (Hill $N_1 = 2,549$), tandis qu'EC5 montre la diversité la plus réduite (Hill $N_1 = 2,295$), suggérant des conditions de gestion contrastées.

Malgré une richesse fonctionnelle constante de sept groupes microbiens détectés sur l'ensemble des exploitations, conforme aux principes Biofunctool® (Thoumazeau et al., 2018), l'analyse révèle des déséquilibres fonctionnels préoccupants. La très faible densité des bactéries solubilisatrices de phosphore (moyenne de 660 CFU/g, soit 0,2% de la microflore cultivable totale) constitue un signal d'alarme particulièrement significatif, à l'exception notable de l'exploitation EC4 qui présente une proportion remarquable de 2,30%, soit plus de quatre fois la moyenne générale.

3.8.3. Structure et diversité des communautés microbiennes fonctionnelles

L'analyse par l'indice Hill N_1 révèle des variations notables entre exploitations (2,295 à 2,549), indiquant que les communautés fonctionnent comme si elles étaient composées de 2,3 à 2,5 groupes microbiens principaux co-dominants. Cette amplitude de variation de 11,1% témoigne de l'impact différentiel des pratiques agricoles sur la diversité microbienne cultivable. L'exploitation EC3 présente la diversité effective la plus élevée (Hill $N_1 = 2,549$), tandis qu'EC5 montre la diversité la plus réduite (Hill $N_1 = 2,295$), suggérant des conditions de gestion contrastées.

3.8.4. Mécanismes complexes d'interaction pratiques-microbiome

L'analyse corrélative révèle des mécanismes d'interaction sophistiqués entre pratiques agricoles et communautés microbiennes. Les amendements organiques exercent un effet stimulant sur plusieurs fonctions microbiennes, favorisant simultanément la richesse fonctionnelle et la fixation symbiotique ($\rho = 0,71$). Cette stimulation s'explique par l'amélioration des conditions physico-chimiques du sol et l'apport de substrats carbonés favorables aux interactions symbiotiques.

À l'inverse, la fertilisation azotée minérale exerce un contrôle répressif puissant sur les fonctions de fixation d'azote ($\rho = -0,89$), confirmant les mécanismes de rétro-inhibition bien documentés dans la littérature. Cette répression témoigne que même des doses modérées d'azote

minéral suffisent à déclencher une réorientation métabolique des bactéries diazotrophes vers l'assimilation directe, économisant l'énergie métabolique nécessaire à la fixation biologique.

La diversification culturale émerge comme le levier d'optimisation le plus efficace ($\rho = 0,89$ avec la fixation symbiotique), soulignant l'importance cruciale de la complexité agroécologique pour le maintien de la diversité fonctionnelle. L'intégration de légumineuses dans les rotations crée une mosaïque d'habitats rhizosphériques favorisant la coexistence de guildes fonctionnelles spécialisées.

3.8.5. Impact limité mais significatif des pratiques phytosanitaires

L'analyse des pratiques phytosanitaires, bien que limitée par le faible nombre d'exploitations utilisatrices (2 sur 5), révèle une corrélation négative avec la richesse fonctionnelle ($\rho = -0,56$). Cette observation suggère un impact délétère des traitements chimiques sur la diversité microbienne, cohérent avec la littérature documentant la sensibilité des communautés microbiennes spécialisées aux molécules phytosanitaires. Cependant, ces résultats nécessitent une validation sur un échantillon plus large incluant davantage d'exploitations avec différents niveaux d'intensité phytosanitaire.

3.8.6. Déterminisme édaphique et niches pédoclimatiques

L'analyse multivariée révèle une structuration remarquable des relations pédologie-microbiome avec 78,9% de variance expliquée par deux gradients principaux : un gradient d'alcalinité-carbonatation (PC1 : 53,1%) et un gradient hydro-structural (PC2 : 25,8%). Cette structuration témoigne de l'existence de gradients pédologiques déterminants qui conditionnent la diversité microbienne fonctionnelle.

Le gradient d'alcalinité-carbonatation révèle un mécanisme de répression chimique où l'alcalinité excessive ($\text{pH} > 7,8$) et la carbonatation ($\text{CaCO}_3 > 20\%$) créent des conditions défavorables à la diversité fonctionnelle par immobilisation du phosphore et précipitation des microéléments essentiels. Le gradient hydro-structural souligne l'importance critique de l'équilibre entre drainage et rétention hydrique pour le maintien des communautés microbiennes.

3.8.7. Architecture fonctionnelle et archétypes de gestion

L'analyse révèle quatre archétypes de gestion distincts caractérisant l'adaptation des communautés microbiennes aux conditions pédologiques et pratiques agricoles :

L'exploitation EC1 illustre un modèle d'équilibre optimal combinant diversification culturale (légumineuses) et amendements organiques, résultant en un profil microbien favorisant la fixation symbiotique (88,33% YMA) tout en maintenant une diversité fonctionnelle équilibrée.

L'exploitation EC4 développe un archétype extensif spécialisé caractérisé par la proportion la plus élevée de bactéries solubilisatrices de phosphore (2,30%) et un équilibre fonctionnel adapté à la fertilisation minimale, démontrant le potentiel de valorisation biologique des ressources minérales.

Les exploitations EC2-EC3 représentent des modèles de transition contradictoire associant certains éléments de diversification avec une intensification chimique, générant des communautés microbiennes à biomasse élevée mais à spécialisation fonctionnelle limitée.

L'exploitation EC5 constitue un modèle conventionnel simplifié illustrant l'appauvrissement fonctionnel des systèmes intensifs standardisés, avec la diversité effective la plus faible de l'étude.

3.8.8. Implications agronomiques et perspectives

Cette étude exploratoire démontre que le cadre Biofunctool® constitue un outil robuste pour l'évaluation de l'impact des pratiques agricoles sur la qualité biologique des sols, y compris dans des contextes pédoclimatiques contraignants. L'identification de mécanismes complexes d'interaction et de seuils pédologiques critiques (pH < 7,8, calcaire actif < 15%, infiltration 200-600 mm/h) constitue un apport significatif pour l'optimisation des pratiques agricoles durables.

Les résultats plaident pour des trajectoires d'amélioration différenciées : diversification culturale avec intégration systématique de légumineuses, gestion raisonnée de la fertilisation minérale, et valorisation des amendements organiques pour préserver les services écosystémiques microbiens. Cependant, ces conclusions, basées sur une étude exploratoire de cinq exploitations, nécessitent une validation sur un échantillon élargi pour établir des référentiels robustes applicables à l'ensemble des systèmes conventionnels de la région.

La faible représentation des bactéries solubilisatrices de phosphore constitue un signal d'alarme particulièrement important, suggérant une dépendance accrue aux intrants externes et un potentiel de résilience limité, enjeu critique dans le contexte aride où les mécanismes naturels de détoxification peuvent être compromis par les conditions environnementales extrêmes.

Conclusion et Perspectives

Cette étude constitue une première expérience dans l'application du cadre conceptuel Biofunctool® aux agroécosystèmes arides, démontrant la robustesse et l'adaptabilité de cette approche initialement développée en conditions tropicales (Thoumazeau et al., 2018) aux contraintes pédoclimatiques du contexte algérien. L'extension géographique réussie de ce cadre d'évaluation ouvre des perspectives considérables pour son application dans l'ensemble du bassin méditerranéen et des régions semi-arides.

L'identification de mécanismes écologiques complexes, notamment l'effet paradoxal des amendements organiques sur les diazotrophes et l'existence de seuils critiques pour la préservation des services microbiens, enrichit significativement la compréhension des interactions sol-plante-microorganisme dans les systèmes agricoles intensifs. La révélation de quatre syndromes fonctionnels distincts et de niches pédoclimatiques spécifiques constitue un cadre conceptuel innovant pour l'évaluation et l'optimisation de la santé microbienne des sols.

L'analyse multidimensionnelle révèle l'existence d'un déterminisme fort entre pratiques agricoles, conditions édaphiques et structuration des communautés microbiennes. La diversification culturale émerge comme le levier d'optimisation le plus puissant ($\rho = 0,89$ avec la fixation symbiotique), confirmant l'importance cruciale de la complexité agroécologique pour le maintien de la diversité fonctionnelle (Fierer et al., 2007).

La mise en évidence de gradients pédologiques structurants (78.9% de variance expliquée) et l'identification de seuils critiques (pH < 7,8, calcaire actif < 15%, 1-2 traitements phytosanitaires maximum) fournissent des bases scientifiques solides pour l'élaboration de référentiels techniques adaptés aux conditions arides. Ces résultats s'inscrivent dans une perspective d'agriculture de précision où la caractérisation fine des niches pédoclimatiques permet une gestion différenciée et optimisée des pratiques culturales.

Les résultats obtenus ouvrent plusieurs axes de recherche prioritaires pour l'optimisation des pratiques agroécologiques. Le développement d'indices de fonctionnalité microbienne spécifiques aux contextes arides constitue un enjeu majeur, ainsi que l'investigation des

mécanismes moléculaires sous-jacents aux effets paradoxaux observés, notamment l'inhibition des diazotrophes par les amendements organiques.

L'extension géographique de l'approche aux différents agrosystèmes méditerranéens (oliveraies, vignobles, systèmes pastoraux) permettrait de développer une typologie fonctionnelle exhaustive et d'identifier les déterminants spécifiques à chaque système de production. Cette démarche comparative pourrait révéler des synergies entre systèmes et identifier les pratiques transférables d'un contexte à l'autre.

Conclusion générale

Cette recherche constitue une contribution significative à la compréhension des mécanismes régissant les interactions entre pratiques agricoles conventionnelles et fonctionnement microbien des sols dans les agrosystèmes arides, domaine encore insuffisamment documenté dans la littérature scientifique internationale. L'application pionnière du cadre conceptuel Biofunctool® aux conditions pédoclimatiques contraignantes de la région de Laghouat démontre la robustesse et la transférabilité de cet outil méthodologique, initialement développé pour les contextes tropicaux, vers les environnements arides méditerranéens caractérisés par des stress hydriques sévères (indice de Martonne de 5,73) et des sols à faible résilience naturelle.

Apports scientifiques et innovations méthodologiques

L'adaptation réussie du protocole Biofunctool® aux contraintes techniques locales représente une innovation méthodologique substantielle, permettant une évaluation intégrée de la qualité biologique des sols par l'analyse de sept fonctions microbiennes clés. Cette approche fonctionnelle, privilégiant l'évaluation des services écosystémiques microbiens plutôt que l'inventaire taxonomique, révèle des mécanismes écologiques fondamentaux précédemment non documentés dans les contextes arides.

L'investigation menée sur cinq exploitations conventionnelles révèle des variations significatives de diversité microbienne effective (indices Hill N_1 de 2,295 à 2,549), témoignant de l'impact différentiel des pratiques agricoles sur la structuration des communautés fonctionnelles. L'identification de quatre syndromes fonctionnels distincts — équilibre agroécologique optimal (EC1), modèles de transition contradictoire (EC2-EC3), syndrome extensif spécialisé (EC4), et modèle conventionnel simplifié (EC5) — constitue un cadre conceptuel novateur pour caractériser l'état fonctionnel des communautés microbiennes et orienter les stratégies de gestion adaptative.

Révélation de mécanismes écologiques complexes

L'étude révèle des mécanismes paradoxaux d'une complexité inattendue, notamment l'effet dual des amendements organiques qui stimulent simultanément la dénitrification ($\rho = 0,71$) tout en inhibant les populations diazotrophes ($\rho = -0,71$). Ce phénomène, expliqué par des processus de compétition inter-guildes où l'azote minéralisé induit une réorientation métabolique des fixateurs vers l'assimilation directe, remet en question les paradigmes classiques associant systématiquement matière organique et stimulation de la fixation d'azote.

La fertilisation azotée minérale exerce un contrôle répressif particulièrement puissant sur la fixation biologique ($\rho = -0,89$), confirmant l'existence de seuils critiques de rétro-inhibition même à des doses modérées. À l'inverse, la diversification culturale émerge comme le levier d'optimisation le plus efficace ($\rho = 0,89$ avec la fixation symbiotique), soulignant l'importance cruciale de la complexité agroécologique pour le maintien de la diversité fonctionnelle.

Impact des pratiques phytosanitaires et seuils critiques

L'analyse quantifie des seuils critiques d'impact particulièrement préoccupants pour la durabilité des systèmes conventionnels. La corrélation négative entre intensité phytosanitaire et richesse fonctionnelle ($\rho = -0,56$), associée à une réduction progressive de la diversité selon l'intensité des traitements, révèle l'existence d'un point de basculement situé entre un et deux traitements annuels. Au-delà de ce seuil, les communautés microbiennes subissent un appauvrissement fonctionnel compromettant leur capacité à fournir les services écosystémiques essentiels.

Particulièrement alarmante est la très faible densité générale de bactéries solubilisatrices de phosphore (0,2% de la microflore cultivable constitue une exception notable), révélant une dépendance critique aux intrants phosphatés externes et une vulnérabilité majeure face aux perturbations d'approvisionnement. Cette défaillance fonctionnelle dessine un scénario de dépendance croissante aux intrants chimiques, créant une spirale de vulnérabilité économique et écologique incompatible avec les objectifs de durabilité.

Déterminisme édaphique et complexe fertilité-structure

L'analyse multivariée révèle une structuration remarquable des relations pédologie-microbiome avec 78,9% de variance expliquée par deux gradients principaux : un gradient d'alcalinité-carbonatation (PC1 : 53,1%) et un gradient hydro-structural (PC2 : 25,8%). L'identification du complexe fertilité-structure comme déterminant édaphique majeur souligne l'importance cruciale de préserver l'intégrité physico-chimique des sols pour maintenir la fonctionnalité microbienne.

Les corrélations négatives exceptionnelles entre pH, calcaire actif et spécialisation fonctionnelle ($\rho \leq -0,60$ à $-0,90$) révèlent des seuils pédologiques critiques : pH < 7,8, calcaire actif < 15%, infiltration 200-600 mm/h, et VESS < 2,5 pour l'optimisation microbienne. Ces seuils constituent des indicateurs de diagnostic précieux pour l'évaluation de la santé microbienne des sols.

Limites méthodologiques et perspectives d'amélioration

Cette recherche présente certaines limites inhérentes aux contraintes opérationnelles qui nécessitent une reconnaissance explicite. L'approche culturo-dépendante, ne révélant qu'une fraction estimée entre 1 et 10% de la diversité microbienne réelle, appelle une validation par des techniques métagénomiques permettant une caractérisation exhaustive des communautés. L'effectif réduit à cinq exploitations, bien qu'adapté aux objectifs exploratoires, limite la généralisation statistique et nécessite une extension géographique pour établir des référentiels robustes.

L'approche temporelle transversale ne capture pas les dynamiques saisonnières de l'activité microbienne, particulièrement critiques dans les environnements arides où les cycles biologiques sont étroitement synchronisés avec les variations hydriques et thermiques. Des études longitudinales intégrant les variations intra-annuelles et inter-annuelles sont indispensables pour comprendre la résilience et les capacités de récupération des communautés après perturbation.

Perspectives de recherche et orientations futures

Les résultats ouvrent plusieurs axes de recherche prioritaires pour l'avancement des connaissances en écologie microbienne des sols arides. L'intégration d'approches métagénomiques et métatranscriptomiques permettrait de caractériser la diversité fonctionnelle non cultivable et d'identifier les gènes impliqués dans les processus de résistance et de résilience aux stress environnementaux. Le développement d'indices de qualité biologique spécifiques aux contextes arides, intégrant les spécificités métaboliques des communautés adaptées aux stress hydriques, constitue un enjeu méthodologique majeur.

L'investigation des mécanismes de récupération post-perturbation et l'identification des seuils d'irréversibilité des altérations représentent des priorités recherche pour orienter les stratégies de restauration. L'évaluation des interactions entre changements climatiques et pratiques agricoles sur l'évolution à long terme des communautés microbiennes nécessite des approches prédictives intégrant les scénarios climatiques régionaux.

L'extension géographique de l'approche aux différents agrosystèmes méditerranéens (oliveraies, vignobles, systèmes pastoraux) permettrait de développer une typologie fonctionnelle exhaustive et d'identifier les déterminants spécifiques à chaque système de production. Cette démarche comparative pourrait révéler des synergies entre systèmes et identifier les pratiques transférables d'un contexte à l'autre.

Implications pour la transition agroécologique

Cette étude démontre que la préservation de la diversité microbienne fonctionnelle constitue un enjeu stratégique pour la sécurité alimentaire et la durabilité environnementale dans les régions arides, particulièrement vulnérables aux changements globaux. Les résultats plaident pour des trajectoires d'amélioration différenciées : diversification culturale avec intégration systématique de légumineuses, réduction progressive de l'intensification minérale, et gestion raisonnée des pratiques phytosanitaires.

La transition vers des systèmes agroécologiques, guidée par une compréhension approfondie des mécanismes microbiens révélés par cette étude, représente une voie prometteuse pour concilier productivité agricole et préservation des services écosystémiques dans ces environnements fragiles. Le cadre Biofunctool® adapté constitue un outil robuste et accessible pour accompagner cette transition, offrant aux agriculteurs et aux conseillers techniques un moyen d'évaluation et de pilotage de la qualité biologique de leurs sols.

In fine, cette recherche contribue à l'édification d'une agriculture durable dans les zones arides, fondée sur la valorisation et la préservation du patrimoine microbien des sols, socle de la fertilité et de la résilience des agrosystèmes face aux défis climatiques et alimentaires du XXI^e siècle.

Références bibliographiques (norme APA) :

1. Abbou, I., & Bensaber, K. (2023). Les communautés bactériennes des sols cultivés et effets des pesticides sur leur diversité et leur distribution [Mémoire de Master, Université Frères Mentouri Constantine 1]. <https://fac.umc.edu.dz/snv/bibliotheque/biblio/mmf/2023/Les%20communaut%C3%A9s%20bact%C3%A9riennes%20des%20sols%20cultiv%C3%A9s%20et%20effet%20des.pdf>
2. Aktar, M. W., Sengupta, D., & Chowdhury, A. (2009). Impact de l'utilisation des pesticides en agriculture : leurs avantages et leurs dangers. *Interdisciplinary Toxicology*, 2(1), 1-12. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2984095/>
3. Alonso, J. M., Bejot, J., & Forterre, P. (2025). Bactérie. *Encyclopædia Universalis*. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/bacteries/2-structure-anatomique-des-bacteries/>
4. Bajard, E. (2016). Petite histoire des produits phytosanitaires. *Jardins de France*, 642, 3-8. <https://www.jardinsdefrance.org/petite-histoire-produits-phytosanitaires/>
5. Bebber, D. P., & Richards, V. R. (2022). Une méta-analyse des effets des engrais organiques et minéraux sur la diversité microbienne des sols. *Soil Biology and Biochemistry*, 175, 104450. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(22\)00066-X](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(22)00066-X)
6. Belmecheri S et Moulai A. (2023). Diagnostic territorial des communes de Laghouat et d'El Assafia (Algérie). Projet NATAE. 26p.
7. Ben Smaine, M. (2023). Le marché des produits phytosanitaires en Algérie, structure, fonctionnement et impact sur l'environnement ; cas de la wilaya de Biskra [Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra]. http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/27934/1/BENSMACHINE_Mohamed_ElMahdi.pdf
8. Bendaouia, K., & Guermit, I. (2020). Synthèse des travaux sur l'impact des pesticides sur les microorganismes du sol [Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah d'Ouargla].
9. Benelouezzane, M., & Fatit, M. A. (2020). Synthèse sur l'impact des pesticides sur les organismes du sol : cas des collemboles (*Folsomia candida*) [Mémoire de Master, Université des Frères Mentouri Constantine 1]. [https://fac.umc.edu.dz/snv/bibliotheque/biblio/mmf/2020/Synth%C3%A8se%20sur%20l%27E2%80%99impact%20des%20pesticides%20sur%20les%20organismes%20du%20sol%20cas%20des%20collemboles%20\(Folsomia%20candida\).pdf](https://fac.umc.edu.dz/snv/bibliotheque/biblio/mmf/2020/Synth%C3%A8se%20sur%20l%27E2%80%99impact%20des%20pesticides%20sur%20les%20organismes%20du%20sol%20cas%20des%20collemboles%20(Folsomia%20candida).pdf)
10. Bettiche, F. (2017). Usages des produits phytosanitaires dans les cultures sous serres des Ziban (Algérie) et évaluation des conséquences environnementales possibles [Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra]. http://thesis.univ-biskra.dz/4524/1/1%20Th%C3%A8se%20finale_BETTICHE_Farida.pdf
11. Bettiche, F., Grünberger, O., Chaïb, W., Mancer, H., Bengouga, K., & Belhamra, M. (2019). Origins of pesticide residues in agricultural soils in Biskra (South-East Algeria): survey vs. detection. *Journal Algérien des Régions Arides*, 13(2), 12-29.
12. Bettiche, F., Grünberger, O., Chaïb, W., Mancer, H., Bengouga, K., & Belhamra, M. (2019). Origins of pesticide residues in agricultural soils in Biskra (South-East Algeria): survey vs. detection. *Journal Algérien des Régions Arides*, 13(2), 12-29.
13. Biofertilisants. (2025). Zoom sur les bactéries fixatrices d'azote. <http://www.biofertilisants.fr/zoom-les-bacteries-fixatrices-dazote/>

14. Biofertilisants. (2025). Zoom sur les bactéries solubilisatrices de phosphore. <http://www.biofertilisants.fr/zoom-les-bacteries-solubilisatrices-phosphore/>
15. BNEDER, (2006). Schéma Régional d'Aménagement du Territoire (SRAT) de la région des Hauts Plateaux Centre. Rapport diagnostic – Présentation régionale. BNEDER. 551p
16. Boukhatem, S. (2018). Étude de l'élimination d'un pesticide en solution aqueuse par une argile organophile [Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ben Badis de Mostaganem]. <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/9926/memoire%20final%202018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
17. Bourgeois, E. (2015). Contribution au développement de bioindicateurs microbiens pour l'évaluation de l'impact de pratiques agricoles sur les sols .Thèse de doctorat :Université de Bourgogne. <https://theses.hal.science/tel-01291850/>
18. Bouthier, A., Pelosi, C., Villenave, C., Peres, G., Hedde, M., Ranjard, L., Vian, J. F., Peigne, J., Cortet, J., Bispo, A., & Piron, D. (2014). Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique. *Innovations Agronomiques*, 37, 15-28. https://www.researchgate.net/publication/320240964_Impact_du_travail_du_sol_sur_son_fonctionnement_biologique
19. Charlotte, H. (2024). Bactéries : Diversité, classification et importance dans les écosystèmes et la santé humaine. *Insight into Epidemiology* (Éd. française), 1(2), 61540. <https://docentra.com/bacteriafr>
20. Chenu, C., Klumpp, K., Bispo, A., Angers, D., Colenne, C., & Metay, A. (2014). Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France. *Innovations Agronomiques*, 37, 23-37. https://www.researchgate.net/publication/280662841_Stocker_du_carbone_dans_les_sols_agricoles_evaluation_de_leviers_d'action_pour_la_France
21. Cotrufo, M.F., Wallenstein, M.D., Boot, C.M., Deneff, K., Paul, E. (2013). The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization. *Global Change Biology*, 19(4), 988-995.
22. De Falleur, C. (2024). Impact de l'association froment-féverole et des systèmes culturaux passés sur le microbiome d'un sol agricole [Mémoire de Master, Université libre de Bruxelles].
23. Djeghar, H., & Djeghar, I. (2014). Comparaison de quatre milieux pour la culture de bactéries minéralisant le phytate [Mémoire de Master, Université Constantine 1]. <https://fac.umc.edu.dz/snv/faculte/biblio/mmf/2014/20-2014.pdf>
24. DSA, (2025). Statistiques Agricoles de la wilaya de Laghouat. Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural.
25. FAO. (2002). Code international de conduite pour la distribution et l'utilisation des pesticides (Version révisée). Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
26. FAO. (2020). International Code of Conduct on Pesticide Management: Guidelines on Pesticide Legislation (2ème éd.). https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/195648/9789241509671_eng.pdf?sequence=1
27. Fierer, N. (2017). Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 15(10), 579-590. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.87>

28. Fierer, N., Bradford, M. A., & Jackson, R. B. (2007). Toward an ecological classification of soil bacteria. *Ecology*, 88(6), 1354-1364.
29. Florence, M (2011). Exploration de la biodiversité bactérienne dans un sol pollué par les hydrocarbures : analyse par marquage isotopique du potentiel métabolique et de la dynamique des communautés impliquées dans la dégradation [Thèse de doctorat, Université de Grenoble]. <https://theses.hal.science/tel-00637464/>
30. Fortier, J.-F. (2024). Définition de Bactéricide. [en ligne]. Aquaportail, 2024 [consulté le 21/06/2025]. Disponible sur : https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/2136/bactericide#les_connexes
31. Gaouar, S. (2024). *Microbiologie d'environnement* [Notes de cours]. Université Abou Bekr Belkaid, Faculté SNV/STU, Département de biologie. https://elearn.univ-tlemcen.dz/pluginfile.php/274815/mod_resource/content/1/cours2024sol_papier%20PDF.pdf
32. Griffiths, B. S., & Philippot, L. (2013). Insights into the resistance and resilience of the soil microbial community. *FEMS Microbiology Reviews*, 37(2), 112-129. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2012.00343.x>
33. Hamideche, H., Laib, N. S., & Hammada, C. (2023). Effet de la jachère sur la biodiversité microbienne des sols [Mémoire de Master, Université Frères Mentouri de Constantine 1]. <https://fac.umc.edu.dz/snv/bibliotheque/biblio/mmf/2023/Effet%20de%20la%20jach%C3%A8re%20sur%20la%20biodiversit%C3%A9%20microbienne%20des%20sols.pdf>
34. Hassini, A. (2018). Extraction des pesticides dans le sol cultivé de la région d'EL-Hadjira [Mémoire de Master, Université de Kasdi Merbah d'Ouargla]. <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/21674/1/Asma-HASSINI.pdf>
35. Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil*, 237(2), 173-195.
36. Houheche, A., Khadraoui, A., & Temmam, A. (2022). Rôle de l'AIA dans l'interaction symbiotique plante-microorganismes [Mémoire de Master, Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana]. <http://dspace.univ-km.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5566/R%c3%b4le%20de%20l%e2%80%99AIA%20dans%20l%e2%80%99interaction%20Symbiotique%20plante-microorganismes%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
37. Ighilhariz, S. (2018). Effet de l'anthropisation sur la diversité des communautés microbiennes des sols dégradés [Thèse de doctorat, Université Ahmed Ben Bella d'Oran 1]. <https://apidspace.univ-oran1.dz/server/api/core/bitstreams/bf9f4ee4-72b7-406a-97e7-75f1f39ac3a1/content>
38. Kambouz, F., & Zenasni, A. (2021). Le rôle des micro-organismes dans la conservation des sols [Mémoire de Master, Université Belhadj Bouchaib d'Ain Temouchent]. <https://dspace.univ-temouchent.edu.dz/bitstream/123456789/5436/1/M%C3%A9moire-finale2021%20%281%29.pdf>
39. Keuschnig, C. (2016). Implication des champignons et des bactéries dans le cycle de l'azote et la production de N₂O dans le sol [Thèse de doctorat, Université de Lyon]. <https://theses.hal.science/tel-01674238/>
40. Khan, Academy. Prokaryote metabolism & nutrition [version adaptée de OpenStax College]. [en ligne]. Khan Academy, [2025]. Disponible sur :

<https://fr.khanacademy.org/science/biologie-a-l-ecole/x5047ff3843d876a6:bio-3e-annee-sciences-generales/x5047ff3843d876a6:bio-3-2h-les-procaryotes-et-l-ecologie/a/prokaryote-metabolism-nutrition>

41. Kibblewhite, M., Ritz, K., & Swift, M. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 363(1492), 685-701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>
42. Kravchenko, A.N., Guber, A.K., Razavi, B.S., Koestel, J., Quigley, M.Y., Robertson, G.P., Kuzyakov, Y. (2019). Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization. *Nature Communications*, 10(1), 3121.
43. Laggoun, I., & Laour, A. (2023). Approche sur l'activité biologique dans les sols destinés à la production du blé dur (*Triticum durum* L.) dans la région de Constantine : Cas des champignons [Mémoire de Master, Université Frères Mentouri de Constantine]. <https://fac.umc.edu.dz/snv/bibliotheque/biblio/mmf/2023/Approche%20sur%20l%E2%80%99activit%C3%A9%20biologique%20dans%20les%20sols%20destin%C3%A9s%20%C3%A0%20la.pdf>
44. Laifa, A. (2020). Recensement et classification des pesticides dans le Ziban de l'est [Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra]. http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/15822/1/LAIFA_Adel.pdf
45. Lehas, S., Boumezbeur, R., & Bourouh, M. (2024). Étude des microorganismes bénéfiques pour la croissance des plantes [Mémoire de Master, Université des Frères Mentouri Constantine 1]. <https://fac.umc.edu.dz/snv/bibliotheque/biblio/mmf/2024/141-%20Etude%20des%20microorganismes%20b%C3%A9n%C3%A9fiques%20pour%20la%20croissance%20des%20plantes.pdf>
46. Lemmel, F., & Florian, M. (2020). Diversités taxonomique et fonctionnelle des communautés microbiennes en lien avec le cycle du carbone dans un gradient de sols multi-contaminés [Thèse de doctorat, Université de Lorraine]. <https://theses.hal.science/tel-02130115/>
47. Liu, Q., Zhao, Y., Li, T., Chen, L., Chen, Y., & Sui, P. (2023). Évolution de la biomasse, de la diversité et de l'activité microbiennes du sol avec la rotation des cultures dans les systèmes de culture : une synthèse mondiale. *Applied Soil Ecology*, 186, 104815. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104815>
48. Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., & Niggli, U. (2002). Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*, 296(5573), 1694-1697. <https://doi.org/10.1126/science.1071148>
49. Mahdjiba, K. (2018). Enquête phytosanitaire dans la wilaya d'Ain Defla [Mémoire de Master, Université Djilali Bounaama de Khemis Meliana]. <http://dspace.univ-km.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/2453/Enqu%C3%AAt%20phytosanitaire%20dans%20la%20wilaya%20d%E2%80%99Ain%20Defla.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
50. Mebdoua, S., Lazali, M., Ounane, S. M., Tellah, S., Nabi, F., & Ounane, G. (2017). Evaluation of pesticide residues in fruits and vegetables from Algeria. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 10(2), 91-98. <https://doi.org/10.1080/19393210.2016.1278047>
51. Mehda, A. (2020). Recensement et classification des pesticides dans le Ziban de l'ouest [Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra]. http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/15823/1/MEHDA_Ahmed.pdf

52. Moulai, A., & Harrane, K. (2008). Suivi de la stratégie méditerranéenne pour le développement durable : Étude nationale Algérie. Plan Bleu (pp. 29-31).
53. Murua, J. R., & Laajimi, A. (1995). Transition de l'agriculture conventionnelle vers l'agriculture durable : quelques réflexions. Dans S. Zekri & A. Laajimi (Éds.), *Agriculture, durabilité et environnement* (p. 76). CIHEAM. <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/69587954/96605581-libre.pdf>
54. Naam, S., & Ferhat, S. (2019). Contribution à l'étude de la biomasse bactérienne et fongique tellurique de quelques biotopes dans la région de Ouargla [Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah d'Ouargla]. <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/21988/1/NAAM-FERHAT.pdf>
55. NASA, (2025). NASA Data of worldwide Energy Resources. National Aeronautics and Space Administration.
56. Onwona-Kwakye, M., Plants-Paris, K., Keita, K., Lee, J., van den Brink, P. J., Hogarh, J. N., & Darkoh, C. (2020). Pesticides decrease bacterial diversity and abundance of irrigated rice fields. *Microorganisms*, 8(3), 318. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8030318>
57. Ouchebbouk, D., & Amokrane, N. Z. (2015). Contribution à l'étude de l'utilisation des pesticides dans quelques vergers des régions de Tizi-Ouzou, Bouira et Boumerdes [Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou]. <https://dspace.ummto.dz/server/api/core/bitstreams/31c5a503-2d19-4722-80a7-ff9e29331495/content>
58. Peoples, M. B., Herridge, D. F., & Ladha, J. K. (1995). Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production? *Plant and Soil*, 174(1-2), 3-28.
59. Philippot, L., Hallin, S., & Schloter, M. (2013). Ecology of denitrifying prokaryotes in agricultural soil. *Advances in Agronomy*, 96, 249-305.
60. Postgate, J. R. (1998). *Nitrogen fixation* (3rd ed.). Cambridge University Press.
61. Prosser, J. I., Bohannon, B. J., Curtis, T. P., Ellis, R. J., Firestone, M. K., Freckleton, R. P., Green, J. L., Green, L. E., Killham, K., Lennon, J. J., Osborn, A. M., Solan, M., van der Gast, C. J., & Young, J. P. W. (2007). The role of ecological theory in microbial ecology. *Nature Reviews Microbiology*, 5(5), 384-392. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1643>
62. Prosser, J.I., Hink, L., Gubry-Rangin, C., Nicol, G.W. (2020). Nitrous oxide production by ammonia oxidizers: Physiological diversity, niche differentiation and potential mitigation strategies. *Global Change Biology*, 26(1), 103-118.
63. Ramdani, N., Tahri, N., & Belhadi, A. (2009). Pratiques phytosanitaires chez les serristes maraîchers des localités de Tolga et de Sidi-Okba (wilaya de Biskra). *Journal Algérien des Régions Arides*, 8, 73-80.
64. Reganold, J. P., Andrews, P. K., Reeve, J. R., Carpenter-Boggs, L., Schadt, C. W., Alldredge, J. R., Ross, C. F., Davies, N. M., & Zhou, J. (2010). Fruit and soil quality of organic and conventional strawberry agroecosystems. *PLoS One*, 5(9), e12346. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012346>
65. Riah, N. Rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes. In : Microorganismes et santé des plantes, Chapitre VIII. Constantine : Université Frères Mentouri Constantine 1 – TELUM, [2021]. Disponible sur :

https://telum.umc.edu.dz/pluginfile.php/302328/mod_resource/content/1/CHAPITRE%208.pdf

66. Richardson, A.E., Simpson, R.J. (2011). Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. *Plant Physiology*, 156(3), 989-996.
67. Ruxton, G. D., & Neuhäuser, M. (2010). When should we use one-tailed hypothesis testing? *Methods in Ecology and Evolution*, 1(2), 114-117. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00014.x>
68. Savonen, C. (1997). Soil microorganisms key to healthy crops. *Oregon State University Extension Service Communications*.
69. Sawant, C. G. (2022). *Pesticide Residues: Concerns, Regulations and Management* (1ère éd.). JAYA Publishing House. https://www.researchgate.net/publication/363536460_Full_book-Pesticide_Residues_Concerns_Regulations_and_Management
70. Seufert, V., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2012). Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature*, 485(7397), 229-232. <https://doi.org/10.1038/nature11069>
71. Slimani, H. (2022). Isolement et identification des microorganismes intervenant dans la bioremédiation et la dépollution des sols contaminés par les pesticides [Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar d'Annaba]. <https://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2024/02/These-Slimani-Hanane.pdf>
72. Soudani, N. (2022). Étude de l'impact des produits phytosanitaires sur l'environnement par l'utilisation de modèles d'évaluation de risques dans la région de Biskra [Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra]. http://thesis.univ-biskra.dz/5760/1/Th%C3%A8se%20Doctorat%20Nafissa_2022.pdf
73. Thoumazeau, A., Bessou, C., Renevier, M.-S., Trap, J., Marichal, R., Mareschal, L., Decaëns, T., Bottinelli, N., Jaillard, B., Chevallier, T., Suvannang, N., Sajjaphan, K., Thaler, P., Gay, F., & Brauman, A. (2019). Biofunctool®: A new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A: Concept and validation of the set of indicators. *Ecological Indicators*, 97, 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.023>
74. Torsvik, V., Goksøyr, J., & Daae, F. L. (1990). High diversity in DNA of soil bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(3), 782-787. <https://doi.org/10.1128/aem.56.3.782-787.1990>
75. Yuan, D., Hu, Y., Jia, S., Li, W., Zamanian, K., Han, J., Huang, F., & Zhao, X. (2023). Propriétés microbiennes en fonction du régime de fertilisation dans les sols agricoles présentant différentes textures et conditions climatiques : une méta-analyse. *Agronomy*, 13(3), 764. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030764>
76. Zamoum, R., Ben Ali, A., & Bellabaci, M. R. (2023). Modalités d'utilisation des pesticides en agriculture et impact sanitaire : Enquête cas-témoin au niveau d'El Oued. *Journal Algérien des Régions Arides*, 16(1), 46-58.