

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



جامعة قاصدي مرباح - ورقلة  
UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA



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

**THESE**

Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle LMD

Spécialité : Sciences Agronomiques  
Option : Sciences du sol

Par : Bouhnik Afaf Amani

**Thème**

**Impact des résidus produits phytosanitaires sur les  
microorganismes des sols dans les agrosystèmes oasiens. Cas  
de la région de Ouargla**

Soutenue publiquement le : 21/05/2026

Devant le Jury Composé de :

BERKAL Ismaiel	MCA	UKM-Ouargla	Président
KARABI Mokhtar	MCA	UKM-Ouargla	Directeur de thèse
BENBRAHIM Fouzi	Pr	ENS-Ouargla	Examineur
KORICHI Raouf	MCA	UKM-Ouargla	Examineur
OUSTANI Mabrouka	MCA	UKM-Ouargla	Examinatrice
KHIRANI Safia	MCA	ENS-Ouargla	Examinatrice

Année universitaire : 2025/2026

## Remerciements

Après plusieurs années de recherche scientifique, je souhaite, à travers ces quelques lignes, remercier toutes les personnes qui ont contribué à rendre cette expérience enrichissante et inoubliable.

Je rends tout d'abord grâce à Dieu Tout-Puissant, pour Sa sagesse, Sa protection et la force qu'Il m'a accordée afin de mener à bien ce travail. Sans oublier, toutefois, de remercier mes chers parents, à mon père que Dieu ait son âme et à ma mère pour leur soutien, leurs conseils et leur encouragement constant.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse monsieur **KARABI Mokhtar**, Maitre de conférences « A » à l'université de Ouargla pour ses conseils avisés, sa disponibilité constante et son soutien tout au long de ce projet. Ses orientations et son accompagnement scientifique ont été essentiels à la réussite de cette recherche.

J'adresse ma profonde gratitude à monsieur **BERKAL Ismaïel**, Maitre de conférences « A » à l'université de Ouargla, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma gratitude à monsieur **BENBRAHIM Fouzi**, Professeur à l'école normale supérieur de Ouargla, monsieur **KORICHI Raouf**, Maitre de conférences « A » à l'université de Ouargla, madame **OUSTANI Mabrouka**, Maitre de conférences « A » à l'université de Ouargla et madame **KHIRANI Safia**, Maitre de conférences « A » à l'école normale supérieur de Ouargla. Votre lecture attentive et vos critiques constructives vont permettre d'affiner et d'enrichir ce manuscrit.

Je remercie vivement les membres des laboratoires de Phœniciculture et de Biogéochimie des Milieux Désertiques, ainsi que le personnel de l'exploitation SNV, pour leur accueil et les conditions de travail favorables qu'ils ont su instaurer.

Ma gratitude s'étend aux institutions (ITDAS) dont le soutien a été indispensable à la réalisation de cette thèse. Votre contribution a permis de concrétiser ce projet.

Je n'oublie pas de remercier l'ensemble du personnel administratif et technique de l'université d'Ouargla pour leur aide précieuse et leur disponibilité. Leur efficacité et leur gentillesse ont grandement facilité mon travail au quotidien.

Enfin, je remercie ma famille et mes amies pour leurs constants encouragements.

***BOUHNİK Afaf Amani***

## Dédicace

Je dédie ce travail à la mémoire de mon père **Ali**, qui a été ma source d'inspiration et de force, m'enseignant les valeurs de l'effort et de la patience, et ne manquant jamais de me guider de ses conseils sages ; son soutien a été mon pilier à chaque étape de mon parcours.

À ma mère bien-aimée **Mabrouka**, le cœur et l'âme de notre maison, dont l'amour et la tendresse m'ont appris la patience et la persévérance, et grâce à ses prières et son encouragement, l'espoir ne m'a jamais quitté.

À mes frères bien-aimés : **Nour Eddine, Toufik, Abd Elfattah, Salah**, et à mes sœurs chères : **Fouzia, Bedra, Wafa, Iman**, et à la mémoire de **Nedjia**, pour leur amour, leur soutien et leur présence dans ma vie.

À mon mari **Moustafa MAHDJOUBI**, pour son soutien constant et sa présence précieuse.

Aux enfants de mes frères : **Aicha, Mouhamed, Aya, Nidal, Haifa, Samir**, ainsi qu'à tous les autres enfants.

À toute ma famille, je vous exprime toute ma gratitude pour votre soutien constant durant mon parcours académique.

À ma chère collègue **BOUKARKAR Fatiha**, et à tous mes collègues.



## Table des matières

Remerciements	I
Dédicaces	II
Liste des abréviations	VII
Liste des tableaux	VII
Liste des figures	VIII
Liste des photos	XI
Résumé	XII
Introduction générale	1
Première partie. Synthèse bibliographique	
Chapitre I. Microorganismes du sol	
I.1. Introduction	4
I.2. Généralités sur le sol	4
I.2.1. Définition	4
I.2.2. Propriétés physico-chimiques du sol	4
I.3. Microorganismes du sol	7
I.3.1. Définition des microorganismes du sol	7
I.3.2. Diversité microbienne dans le sol	8
I.3.3. Répartition des microorganismes dans le sol	9
I.4. Conclusion	11
Chapitre II. Aperçu général sur les pesticides	
II.1. Introduction	12
II.2. Pesticides	12
II.2.1. Définition des pesticides	12
II.2.2. Classification des pesticides	12
II.2.2.1. Selon leurs caractéristiques chimiques	13
II.2.2.2. Selon les organismes vivants ciblés	13
II.2.2.3. Selon l'usage	13
II.3. Pesticides dans l'environnement.	14
II.4. Impact des pesticides sur l'environnement	15
II.5. Impact des pesticides sur les microorganismes du sol	15
II.6. Utilisation des pesticides en Algérie	17
II.7. Conclusion	17
Chapitre III. Ecosystème oasien	
III.1. Introduction	18
III.2. Ecosystème oasien	18
III.2.1. Composantes de l'écosystème oasien	18
III.2.1.1. Composantes abiotiques	19
III.2.1.2 Composantes biotiques	19
III.2.1.2.1. Végétation	19
III.2.1.2.2. Faune	20
III.2.1.2.3. Micro-organismes du sol	21
III.3. Ecosystème oasien en Algérie	21
III.3.1. Cultures oasiennes en Algérie	22

III.4. Oasis de Ouargla	23
III.4.1. Principaux systèmes de culture dans la région de Ouargla	23
III.4.1.1. Phœniciculture	23
III.4.1.2. Serriculture	23
III.4.1.3. Céréaliculture	23
III.5. Ennemis et maladies du palmier dattier	24
III.5.1. Groupe 1 : pourriture du cœur ou blaâ ( <i>Phytophthora</i> sp)	24
III.5.2. Groupe 2 : ravageurs	24
III.5.3. Groupe 3 : mauvaises herbes	25
III.6. Conclusion	25
Deuxième partie. Présentation de la région d'étude	
Chapitre IV. Présentation de la région d'étude.	
IV.1. Introduction	26
IV.12. Situation géographique	26
IV.3. Cadre climatique	27
IV.3.1. Données climatiques	27
IV.3.2. Diagramme ombrothermique de Gaussen	29
IV.3.3. Climatogramme d'Emberger	29
IV.4. Cadre géomorphologique	30
IV.5. Hydrogéologie	31
IV.6. Cadre pédologique	32
IV.7. Conclusion	33
Troisième partie. Etude expérimentale	
Chapitre V. Enquête sur l'utilisation des pesticides dans la région de Ouargla	
V.1. Introduction	34
V.2. Méthodologie de travail	34
V.2. 1. Objectif du questionnaire	34
V.2. 2. Conception du questionnaire	34
V.2. 3. Échantillon de l'étude	35
V.2. 4. Collecte des données	35
V.2. 5. Analyse des données	35
Chapitre VI. Matériel et méthodes	
VI.1. Introduction	36
VI.2. Choix des sites d'études	36
VI.2.1. Site 1 : Exploitation agricole de l'Université de Ouargla	37
VI.2.2. Site 2 : Institut Technique de Développement de l'Agronomie Saharienne (ITDAS)	37
VI.3. Choix des pesticides	38
VI.3.1. Glyphosate	39
VI.3.2. Abamectine	40
VI.3.3. Tébuconazole	41
VI.4. Approche méthodologique du travail	42
VI.4.1. Effet du glyphosate sur les microorganismes du sol	42
VI.4.2. Impact de l'Abamectine sur les microorganismes du sol	43
VI.4.3. Effet du fongicide Tébuconazole sur les microorganismes du sol	45

VI.4.4. Echantillonnage	46
VI.5. Techniques d'analyses	47
VI.5.1. Analyses physico-chimiques	47
VI.5.1.1. Humidité	47
VI.5.1.2. Granulométrie	47
VI.5.1.3. pH	48
VI.5.1.4. Conductivité électrique (CE)	48
VI.5.1.5. Calcaire total	48
VI.5.1.6. Carbone organique	48
VI.5.1.7. Dosage de l'azote total	48
VI.6.2. Analyses microbiologiques	49
VI.6.2.1. Méthode de dénombrement	49
VI.6.2.1.1. Milieux de culture utilisés	49
VI.6.2.1.2. Préparation des suspensions et dilutions	49
VI.6.2.1.3. Ensemencement et conditions d'incubation	50
VI.6.2.1.4. Méthode de comptage	50
VI.6.2.2. Isolation et purification des micro-organismes	51
VI.6.2.2.1. Chez les bactéries	51
VI.6.2.2.1.1. Coloration Gram	51
VI.6.2.2.1.2. Principe de la coloration Gram	51
VI.6.2.2.2. Chez les champignons	52
VI.6.2.3. La respiration basale du sol (SBR)	53
VI.6.2.4. Biomasse microbienne (Fumigation-extraction)	54
VI.6.3. Analyses statistiques	55
VI.7. Conclusion	55
Chapitre VII. Résultats et discussion	
VII.1. Résultats du questionnaire	56
VII.1.1. Introduction	56
VII.1.2. Utilisation des pesticides	56
VII.1.3. Modes de sélection des pesticides par les agriculteurs	57
VII.1.4. Respect de la dose et des délais entre la dernière application du produit et la récolte	58
VII.1.5. Méthodes de traitement par les pesticides	59
VII.1.6. Équipements de protection utilisés par les agriculteurs lors de l'application des pesticides	60
VII.1.7. Perception des agriculteurs sur les effets des pesticides sur la pollution et la fertilité des sols	61
VII.1.8. Conclusion	62
VII.2. Résultats des effets des produits phytosanitaires sur les propriétés physico-chimiques et microbiologiques du sol	62
VII.2.1. Introduction	62
VII.2.2. Propriétés physico-chimiques des sols étudiés	63
VII.2.3. Effets des pesticides sur les paramètres physico-chimiques des sols	64
VII.2.3.1. Variation de la conductivité électrique	64
VII.2.3.1.1. Évolution de la conductivité électrique (CE) du sol sous l'effet du glyphosate	64

VII.2.3.1.2. Évolution de la conductivité électrique (CE) du sol sous l'effet d'Abamectine	66
VII.2.3.1.3. Évolution de la conductivité électrique (CE) du sol sous l'effet Tubéconazole	68
VII.2.3.2. Variation du pH du sol	69
VII.2.3.2.1. Évolution du pH du sol sous l'effet du glyphosate	69
VII.2.3.2.2. Évolution du pH du sol sous l'effet d'abamectine	71
VII.2.3.2.3. Évolution du pH du sol sous l'effet de tébuconazole	72
VII.2.3.3. Variation de la matière organique du sol	74
VII.2.3.3.1. Evolution de la matière organique du sol sous l'effet du glyphosate	74
VII.2.3.3.2. Evolution de la matière organique du sol sous l'effet d'abamectine	75
VII.2.3.3.3. Evolution de la matière organique du sol sous l'effet du tébuconazole	77
VII.2.4. Impact des pesticides sur les paramètres microbiologiques du sol	78
VII.2.4.1. Impact des pesticides sur les populations bactériennes et fongiques du sol	78
VII.2.4.1.1. Impact de glyphosate sur les populations bactériennes et fongiques du sol	78
VII.2.4.1.2. Impact de l'abamectine sur les populations bactériennes et fongiques du sol	84
VII.2.4.1.3. Impact de tébuconazole sur les populations bactériennes et fongiques du sol	88
VII.2.4.2. Effet des pesticides sur la respiration microbienne	90
VII.2.4.2.1. Effet du glyphosate sur la respiration microbienne	90
VII.2.4.2.2. Effet du l'abamectine sur la respiration microbienne	92
VII.2.4.2.3. Effet du tébuconazole sur la respiration microbienne	93
VII.2.4.3. Effet des pesticides sur la biomasse microbienne du sol	95
VII.2.4.3.1. Evolution temporelle de la biomasse microbienne du sol sous l'effet du glyphosate	95
VII.2.4.3.2. Evolution temporelle de la biomasse microbienne du sol sous l'effet de l'Abamectine	96
VII.2.4.3.3. Evolution temporelle de la biomasse microbienne du sol sous l'effet de tébuconazole	97
VII.2.5. Statistiques inférentielles	99
VII.2.5.1. Analyse en composantes principales des paramètres physico-chimiques du sol	99
VII.2.5.2. Analyse en composantes principales des paramètres microbiologiques du sol	100
VII.2.5.3. Corrélations (Pearson) entre paramètres microbiologiques et physicochimiques du sol	101
VII.2.5.4. Effet des pesticides sur les paramètres physico-chimiques du sol (différence de moyenne)	102
VII.2.5.5. Effet des pesticides sur les paramètres microbiologiques du sol (différence de moyennes)	103

VII.2.5.6. Profils temporels des EMMs de la biomasse microbienne selon le pesticide	104
VII.2.6. Conclusion	107
Conclusion générale	109
Références bibliographiques	112
Annexes	127

## Liste des abréviations

<b>Organismes et institutions</b>	
ACTA	: Association De Coordination Technique Agricole
ANRH	: Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
APFA	: Accession à la Propriété Foncière Agricole
CDRAS	: Commissariat au Développement de l'Agriculture des Régions Sahariennes
FAO	: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
INRS	: Institut National de Recherche et de Sécurité
ITDAS	: Institut Technique de Développement de l'Agronomie Saharienne
MADR	: Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural
ONM	: Office National de Météorologie
<b>Divers</b>	
ANOVA	: Analyse de la variance
CE	: Conductivité électrique
C <sub>org</sub>	: Carbone organique
MO	: Matière Organique
PDA	: Potato Dextrose Agar
SBR	: Respiration basale du sol

## Liste des tableaux

N°	Titre	Page
1	Données climatiques de la région de Ouargla (1999-2024)	28
2	Pesticides couramment utilisés dans la région d'étude pour lutter contre les ennemis des cultures	56
3	Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés	63
4	Quelques espèces fongiques identifiées dans le sol traité par le glyphosate	83

## Liste des figures

N°	Titre	Page
1	Composition triphasique du sol	4
2	Différent Types d'interactions entre les plantes et les micro-organismes dans la rhizosphère	10
3	Cycle des pesticides dans l'environnement	15
4	Effet des pesticides sur le sol	16
5	Structure d'une oasis traditionnelle à trois étages	19
6	Situation géographique de la région de Ouargla	27
7	Diagramme ombrothermique de la région de Ouargla	29
8	Localisation de la région de Ouargla sur le climatogramme d'Emberger	30
9	Coupe géomorphologique schématique Ouest-Est de la cuvette de Ouargla	31
10	Coupe transversale des couches hydrogéologiques dans la région de ouargla	32
11	Carte des états de surface des sols à Ouargla	33
12	Localisation des sites d'étude	37
13	Les pesticides utilisés dans l'étude	39
14	Structure chimique du glyphosate	40
15	Structure chimique de l'Abamectine	40
16	Composition chimique du Tébuconazole	41
17	Site de prélèvement du sol au niveau d'un champ de betterave sucrière	44
18	Croissance des plants de tomate dans la parcelle expérimentale	46
19	Préparation des dilutions décimales de solution du sol	50
20	Dispositif de l'expérimentation de la respiration basale	54
21	Répartition des catégories des pesticides utilisés (%)	57
22	Modes de sélection des pesticides par les agriculteurs (%)	58
23	Respect de la dose des pesticides (%)	58
24	Respect des délais avant la récolte (%)	59
25	Méthodes d'application des pesticides utilisées par les agriculteurs (%)	60
26	Équipements de protection utilisés par les agriculteurs lors de l'application des pesticides	60
27	Perception des agriculteurs sur l'impact des pesticides sur la pollution des sols (%)	61

28	Perception des agriculteurs sur l'impact des pesticides sur la fertilité des sols (%)	62
29	Évolution de la conductivité électrique du sol sous Glyphosate	65
30	Effet du glyphosate sur la CE du sol (p-value < 0,05)	66
31	Évolution de la conductivité électrique du sol sous abamectine (J2–J28)	67
32	Effet de l'abamectine sur la CE (p-value < 0,05)	68
33	Evolution de la conductivité électrique du sol sous tébuconazole (J2–J28)	68
34	Effet du Tébuconazole sur la CE (p-value < 0,05)	69
35	Évolution du pH du sol Glyphosate sous glyphosate (J2–J28)	70
36	Effet du glyphosate sur le pH du sol (p-value < 0,05)	71
37	Évolution du pH du sol sous l'abamectine (J2–J28)	71
38	Effet de l'abamectine sur le pH du sol (p-value < 0,05)	72
39	Évolution du pH du sol sous tébuconazole(J2–J28)	73
40	Effet du Tébuconazole sur le pH du sol (p-value < 0,05)	73
41	Evolution de la matière organique (MO) du sol sous Glyphosate (J2–J28)	74
42	Effet du glyphosate sur la matière organique (p-value < 0,05)	75
43	Evolution de la matière organique du sol sous Abamectine (J2–J28)	76
44	Effet de l'abamectine sur la matière organique (p-value < 0,05)	77
45	Évolution de la matière organique du sol sous Tébuconazole (J2–J28)	77
46	Effet du Tébuconazole sur la matière organique (p-value < 0,05)	78
47	Evolution des bactéries du sol sous Glyphosate (J2–J28)	79
48	Effet du glyphosate sur la densité bactérienne (p-value < 0,05)	80
49	Observation par microscope optique des bactéries dans le sol.	81
50	Evolution de la biomasse fongique du sol sous Glyphosate	81
51	Effet du glyphosate sur la biomasse fongique (p-value < 0,05)	82
52	Evolution des bactéries du sol sous Abamectine(J2–J28)	85
53	Effet de l'abamectine sur la densité bactérienne (p-value < 0,05)	86
54	Evolution de la biomasse fongique du sol sous Abamectine (J2–J28)	87
55	Effet de l'abamectine sur la population fongique (p-value < 0,05)	87
56	Evolution des bactéries du sol sous Tébuconazole (J2–J28)	88
57	Effet du Tébuconazole sur la densité bactérienne du sol (p-value < 0,05)	89
58	Evolution de la biomasse fongique du sol sous Tébuconazole (J2–J28)	89
59	Effet du Tébuconazole sur la biomasse fongique (p-value < 0,05)	90

60	Evolution de dioxyde de carbone du sol avec et sans traitement par le glyphosate	91
61	Effet du glyphosate sur la respiration basale du sol (p-value < 0,05)	92
62	Evolution de dioxyde de carbone du sol avec et sans traitement par l'abamectine	92
63	Effet de l'abamectine sur la respiration basale du sol (p-value < 0,05)	93
64	Evolution de dioxyde de carbone du sol avec et sans traitement par le tébuconazole	94
65	Effet du Tébuconazole la respiration basale du sol (p-value < 0,05)	94
66	Evolution de la biomasse microbienne du sol sous Glyphosate (J2-J28)	95
67	Effet du glyphosate sur biomasse microbienne (p-value < 0,05)	96
68	Evolution de la biomasse microbienne du sol sous Abamectine (J2-J28))	97
69	Effet de l'abamectine sur la biomasse microbienne (p-value < 0,05)	97
70	Evolution de la biomasse microbienne du sol sous Tébuconazole (J2-J28)	98
71	Effet du Tébuconazole sur la biomasse microbienne du sol (p-value < 0,05)	98
72	Analyse en composantes principales (ACP) des paramètres physico-chimiques du sol	99
73	Analyse en composantes principales des paramètres microbiologiques du sol	100
74	Corrélations (Pearson) entre paramètres microbiologiques et physicochimiques du sol	101
75	Effet des pesticides sur les paramètres physico-chimiques (différence de moyenne).	103
76	Effet des pesticides sur les paramètres microbiologiques (différence de moyennes)	104
77	Profils temporels des EMMs de la biomasse microbienne selon le pesticide	105
78	Heatmap (pesticide × concentration × jour)	107

## Liste des photos

N°	Titre	Page
1	Zone choisie pour l'application du glyphosate	42
2	Pulvérisateur manuel utilisé pour l'application des traitements	43
3	Traitement du sol avec l'abamectine (expérience en pots)	44
4	Parcelle expérimentale préparée pour la culture de la tomate à l'exploitation agricole de la faculté	45
5	Compteur de colonies	50

# Résumés

## **Impact of pesticide on soil microorganisms in oasis agrosystems. Case of the Ouargla region**

### **Abstract**

This study aims to evaluate the effect of three pesticides; Glyphosate, Abamectin, and Tebuconazole on microbial biomass and the physico-chemical parameters of oasis soils in the Ouargla region. A detailed questionnaire was designed to collect information on the types of pesticides used, applied doses, application methods, and farmers' perceptions regarding the impact on soil quality. Concurrently, experiments were conducted on soil samples collected from various date palm oasis sites, monitoring microbial density, biomass, soil respiration, and physico-chemical properties such as organic matter, pH, and electrical conductivity, depending on the pesticide type, dose, and exposure time. Results show that 100% of farmers use pesticides, with a predominance of insecticides (64%), followed by herbicides (30%) and fungicides (6%), all respecting pre-harvest intervals despite 25% not strictly following recommended doses. Experimental analyses indicate that Glyphosate exhibits a dose-dependent effect: low and medium doses stimulate microbial growth and organic matter mineralization, while high doses inhibit microbial activity. Abamectin shows a temporary inhibitory effect with gradual microbial recovery, whereas Tebuconazole exerts a prolonged inhibitory effect on microbial populations. These results demonstrate that the impact of pesticides on oasis soils is multidimensional, depending on the type of pesticide, dose, and soil characteristics. They highlight the importance of sustainable agricultural practices and open avenues for future studies using molecular tools to better understand microbial dynamics and their relationship with long-term productivity.

**Keywords** : Pesticides, soils, microorganisms, physico-chemical properties, Ouargla-Algeria

# **Impact des produits phytosanitaires sur les microorganismes des sols dans les agrosystèmes oasiens. Cas de la région de Ouargla**

## **Résumé**

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de trois pesticides ; le Glyphosate, l'Abamectine et le Tébuconazole sur la biomasse microbienne et les paramètres physico-chimiques des sols oasiens (Cas de la région de Ouargla). Un questionnaire détaillé a été conçu pour recueillir des informations sur les types de pesticides utilisés, les doses appliquées, les modes d'application et la perception des agriculteurs quant à l'impact sur la qualité des sols. Parallèlement, des expériences ont été réalisées sur des échantillons de sols prélevés dans différentes palmeraies, permettant de suivre la densité microbienne, la biomasse, la respiration du sol, ainsi que les propriétés physico-chimiques telles que la matière organique, le pH et la conductivité électrique, en fonction du type de pesticide, de la dose et du temps d'exposition. Les résultats montrent que 100 % des agriculteurs utilisent des pesticides, avec une prédominance d'insecticides (64 %), suivis des herbicides (30 %) et des fongicides (6 %), tous respectant les délais avant récolte malgré que 25% ne suivent pas strictement les doses recommandées. Les analyses expérimentales indiquent que le Glyphosate exerce un effet dose-dépendant : les faibles et moyennes doses stimulent la croissance microbienne et la minéralisation de la matière organique, tandis que les fortes doses inhibent l'activité microbienne. L'Abamectine provoque un effet inhibiteur temporaire avec récupération progressive, tandis que le Tébuconazole a un effet prolongé et inhibiteur sur les populations microbiennes. Ces résultats montrent que l'impact des pesticides sur les sols oasiens est multidimensionnel, dépendant du type de pesticide, de la dose et des caractéristiques du sol. Ils soulignent l'importance de pratiques agricoles raisonnées et ouvrent la voie à des études futures utilisant des outils moléculaires pour mieux comprendre la dynamique microbienne et son lien avec la productivité à long terme.

**Mots clés :** Pesticides, sols, microorganismes, propriétés physico-chimiques, Ouargla-Algérie.

## تأثير بقايا المبيدات الزراعية على الكائنات الدقيقة في التربة ضمن الأنظمة الزراعية الواحية. حالة منطقة ورقلة

### الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير ثلاث مبيدات: الغليفوسات، الأباتكتين، والتيبوكونازول، على الكتلة الحيوية الميكروبية والخصائص الفيزيوكيميائية لتربة بساتين النخيل في منطقة ورقلة. تم تصميم استبيان مفصل لجمع المعلومات حول أنواع المبيدات المستخدمة، الجرعات المطبقة، طرق التطبيق، بالإضافة إلى تصورات المزارعين بشأن تأثير هذه المبيدات على جودة التربة. بالتوازي، أجريت تجارب على عينات تربة مأخوذة من مواقع مختلفة، حيث تم متابعة الكثافة الميكروبية، الكتلة الحيوية، تنفس التربة، وكذلك الخصائص الفيزيوكيميائية مثل المادة العضوية، الرقم الهيدروجيني والموصلية الكهربائية، اعتماداً على نوع المبيد، الجرعة ومدة التعرض له. أظهرت النتائج أن 100% من المزارعين يستخدمون المبيدات، مع هيمنة مبيد الحشرات (64%)، يليها مبيد الأعشاب (30%) ومبيد الفطريات (6%)، مع الالتزام بفترات الحصاد رغم أن 25% لا يتبعون بدقة الجرعات الموصى بها. أظهرت التحليلات أن الغليفوسات له تأثير يعتمد على الجرعة: الجرعات المنخفضة والمتوسطة تحفز النمو الميكروبي وتزيد من تحلل المادة العضوية، بينما تثبط الجرعات العالية النشاط الميكروبي. الأباتكتين يظهر تأثيراً مثبطاً مؤقتاً مع تعافي تدريجي للميكروبات، في حين أن التيبوكونازول له تأثير مثبط طويل المدى على المجتمعات الميكروبية. توضح النتائج أن تأثير المبيدات على التربة الواحية متعدد الأبعاد، ويعتمد على نوع المبيد، الجرعة، وخصائص التربة. وتؤكد على أهمية تبني ممارسات زراعية عقلانية وتفتح المجال لدراسات مستقبلية باستخدام أدوات تحليل جزيئية لفهم ديناميكيات الكائنات الدقيقة وعلاقتها بالإنتاجية على المدى الطويل.

**الكلمات المفتاحية:** المبيدات الزراعية، التربة، الكائنات الدقيقة، الخصائص الفيزيوكيميائية، ورقلة-الجزائر

# Introduction Générale

## Introduction générale

Le sol constitue la base de tous les systèmes agricoles, il ne sert pas seulement de milieu pour la croissance des plantes, mais joue également un rôle fondamental dans le cycle des éléments nutritifs, la rétention d'eau et le maintien des communautés microbiennes qui influencent directement la fertilité et la productivité des cultures (Brady et Weil, 2020).

Les propriétés physico-chimiques du sol, telles que la texture, la teneur en matière organique, le pH, la porosité et la capacité de rétention d'eau, déterminent la capacité du sol à soutenir les plantes et les organismes vivants, ainsi que sa résilience face aux pressions environnementales (Lal, 2004 ; Lal, 2020). Par exemple, les sols à texture sableuse sont souvent pauvres en matière organique et présentent une faible capacité de rétention d'eau, ce qui les rend particulièrement vulnérables à la dégradation, notamment dans les zones semi-arides.

Les communautés microbiennes du sol, comprenant les bactéries, les champignons et les actinomycètes, jouent un rôle essentiel dans la décomposition de la matière organique, la libération et le recyclage des nutriments, ainsi que dans la formation d'humus stable qui améliore la structure du sol et sa capacité de rétention d'eau (Fierer, 2021).

La diversité et l'abondance de ces communautés sont des indicateurs clés de la santé du sol, car une diminution de la diversité microbienne est souvent associée à une réduction des fonctions biologiques essentielles et à une plus faible résilience face aux perturbations. De plus, certaines populations microbiennes contribuent à l'aération du sol, à l'augmentation de sa porosité et au développement racinaire, favorisant ainsi la productivité des cultures (Walder et *al.*, 2022).

Au cours des dernières décennies, l'agriculture moderne a été marquée par une utilisation accrue des produits phytosanitaires, y compris les herbicides, insecticides et fongicides, afin de protéger les cultures contre les maladies et les ravageurs. Bien que ces substances soient efficaces, elles peuvent laisser des résidus dans le sol qui exercent une pression chimique sur les communautés microbiennes, entraînant des modifications de la biodiversité et de la composition microbienne (Swaine et *al.*, 2025).

L'effet des pesticides dépend du type de produit, de sa concentration, de la fréquence d'application, ainsi que des propriétés du sol telles que le pH, la texture et la teneur en matière organique. Certaines communautés microbiennes peuvent développer des

mécanismes de résistance ou de dégradation des pesticides, mais ces adaptations s'accompagnent souvent d'un changement dans la composition initiale du sol, pouvant affecter ses fonctions biologiques (Cycoń et Piotrowska-Seget, 2016)

Dans les zones arides, notamment les oasis algériennes telles que celles de la région de Ouargla, les sols sont soumis à des conditions environnementales extrêmes caractérisées par des températures élevées, de faibles précipitations, une évaporation intense et une texture généralement sableuse à sablo-limoneuse, associées à une faible teneur en matière organique. Des études locales ont par ailleurs montré que ces contraintes édapho-climatiques influencent fortement les communautés microbiennes, soumises au stress hydrique et thermique, ce qui accroît la vulnérabilité des systèmes agricoles oasiens (Bazzine et Hamdi-Aïssa, 2014).

Ces conditions rendent les sols très fragiles, limitent leur capacité de rétention d'eau et augmentent leur vulnérabilité à la dégradation lorsque des pratiques agricoles intensives ou l'usage de pesticides sont appliqués. Les communautés microbiennes y sont également affectées, avec une diversité et une abondance réduite, bien que certaines espèces résistantes à la sécheresse et à la chaleur, telles que les *Actinobacteria*, *Proteobacteria* et Firmicutes, assurent certaines fonctions essentielles du sol (Khan et Khan, 2020; Delgado-Baquerizo et al., 2018).

La FAO souligne l'importance d'une gestion durable de ces terres pour maintenir la fertilité du sol, la diversité microbienne et la durabilité de la production agricole (FAO, 2017). De plus, les recherches récentes indiquent que l'adoption de pratiques intégrées dans les systèmes agricoles en zones arides, telles que la réduction de l'usage de pesticides, le renforcement des populations microbiennes bénéfiques et l'amélioration de la structure du sol, peut atténuer les effets négatifs des pesticides et assurer la durabilité des cultures (Topa et al., 2025 ; Canfora et al., 2024)

Ainsi, compte tenu de la fragilité des sols des oasis de Ouargla, de leur faible teneur en matière organique, et de la sensibilité des communautés microbiennes aux stress abiotiques et à l'usage des produits phytosanitaires, il apparaît essentiel de mieux comprendre les interactions entre les sols, les microorganismes et les résidus chimiques.

L'objectif de ce travail est de mettre en lumière l'impact des résidus de pesticides sur les propriétés physico-chimiques du sol et sur la diversité et l'abondance des communautés microbiennes dans les sols oasiens.

Notre travail de recherche se structure en plusieurs parties interdépendantes.

- ✓ **La première partie** constitue une synthèse bibliographique portant sur les microorganismes du sol, les pesticides et l'écosystème oasien, afin de fournir le cadre théorique nécessaire à la compréhension de notre étude.
- ✓ **La deuxième partie** est consacrée à la présentation de la région d'étude, en détaillant ses caractéristiques environnementales, climatiques et agricoles, ce qui permet de situer notre recherche dans son contexte local.
- ✓ **La troisième partie** regroupe l'ensemble du travail expérimental. Elle comprend l'enquête relative à l'utilisation des pesticides dans la région de Ouargla, la présentation du matériel et des méthodes mis en œuvre, la description des zones d'étude et des dispositifs expérimentaux, ainsi que les résultats obtenus et leur discussion.

Première partie  
Synthèse bibliographique

# Chapitre I. Microorganismes du sol

## Chapitre I. Microorganismes du sol

### I.1. Introduction

Le sol constitue un écosystème complexe abritant des milliards de micro-organismes, dont les bactéries, les champignons, les actinomycètes et les protozoaires, qui jouent un rôle crucial dans le maintien de sa fertilité et dans l'amélioration de la productivité agricole. Ces micro-organismes participent activement à des processus biologiques essentiels tels que la décomposition de la matière organique, la minéralisation, la fixation de l'azote et la solubilisation du phosphore, rendant ainsi les nutriments disponibles pour les plantes. Par leur contribution à la santé des sols, ils représentent un pilier fondamental de l'agriculture durable (van der Heijden et *al.*, 2008).

### I.2. Généralités sur le sol

#### I.2.1. Définition

Le sol est une interface entre la lithosphère et l'atmosphère. Il résulte de la désagrégation physique d'un substrat rocheux, donnant des minéraux hérités, ainsi que de l'altération chimique de ces minéraux sous l'effet de l'eau et de la matière organique, plus ou moins transformée et stabilisée dans les couches supérieures du solum (Ardouin, 2014). Selon Calvet (2003), le sol est un mélange de particules solides pulvérisées, d'eau et d'air (figure 1).

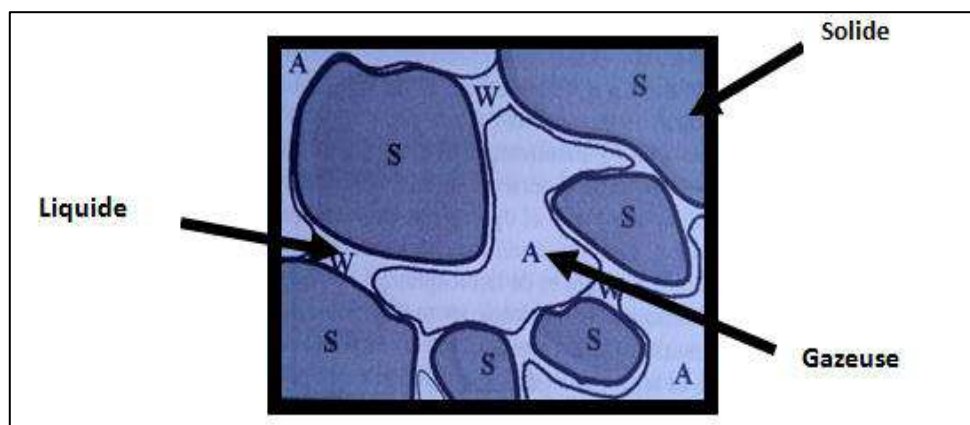


Figure 1. Composition triphasique du sol (Chossat, 2005)

#### I.2.2. Propriétés physico-chimiques

Les principales propriétés physico-chimiques du sol ont été largement étudiées dans la littérature. Parmi les contributions notables, l'étude de Kekane et *al.* (2015) et Chossat, (2005) proposent une synthèse claire de ces paramètres essentiels.

- **Structure** : se définit comme l'organisation spatiale des particules solides (argile, limon, sable) et des pores qu'elles forment. Ces pores peuvent être partiellement remplis d'eau ou contenir de l'air, selon leur taille et les conditions environnementales. Cette architecture influence de manière déterminante les propriétés physiques fondamentales du sol, notamment la perméabilité, l'aération, la rétention en eau, ainsi que la croissance et la pénétration des racines. Une bonne structure est donc essentielle à la productivité agricole et à la durabilité des écosystèmes édaphiques (Bronick et Lal, 2005).
- **Porosité** : est une propriété physique fondamentale définie comme le rapport entre le volume des vides (ou pores) et le volume total du sol. Exprimée en pourcentage, elle reflète la capacité du sol à contenir de l'eau et de l'air, jouant ainsi un rôle crucial dans la circulation des fluides, l'aération racinaire et l'activité microbienne (Hillel, 2004).
- **Texture** : est une propriété fondamentale qui exprime la composition granulométrique de la fraction fine du sol, c'est-à-dire les proportions relatives d'argile, de limon et de sable (Brady et Weil, 2016). Elle conditionne un grand nombre d'autres caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol. En effet, la texture influence la formation de la structure, la capacité de rétention en eau, l'aération, ainsi que l'activité biologique, en déterminant la disponibilité en nutriments et en eau pour les micro-organismes et les plantes (Hillel, 2004).
- **Humidité** : également appelée teneur en eau, correspond à la quantité d'eau présente dans le sol à un moment donné. Elle constitue l'une des propriétés les plus importantes du sol, car elle influence directement la disponibilité des nutriments pour les plantes, la croissance racinaire, ainsi que les activités microbiennes. Un niveau optimal d'humidité favorise l'absorption des éléments minéraux, tandis qu'un excès ou un déficit peut compromettre la santé des cultures. L'humidité du sol interagit également avec d'autres propriétés comme la texture, en affectant l'aération, la porosité et la pénétration des racines (Hillel, 2004).
- **Température** : résulte de l'équilibre entre l'énergie solaire absorbée et celle dissipée par rayonnement, conduction ou évaporation. Elle peut varier de façon significative, généralement entre -20 °C et 60 °C selon les conditions environnementales (Brady et Weil, 2016). Cette propriété joue un rôle fondamental dans la régulation des processus chimiques, physiques et biologiques du sol, tels que la décomposition de la matière organique, l'absorption des nutriments et l'activité microbienne. La température du sol

fluctue selon les saisons, le moment de la journée, la couverture végétale, et les caractéristiques climatiques locales (Hillel, 2004).

- **pH** : est une propriété chimique essentielle qui détermine l'acidité ou l'alcalinité du milieu édaphique. Il influence fortement la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes, la solubilité des minéraux, ainsi que la structure et l'activité des communautés microbiennes du sol. En général, un sol est considéré comme acide lorsque son pH est inférieur à 6, neutre entre 6 et 8,5, et alcalin au-delà de 8,5 (Brady et Weil, 2016). Le pH joue ainsi un rôle central dans la fertilité des sols et leur aptitude à soutenir la croissance végétale.
- **Conductivité électrique** : La conductivité électrique (CE) du sol est un indicateur important de la concentration en ions dissous dans la solution du sol. Elle reflète la salinité totale, qui peut être influencée par l'irrigation, la fertilisation, ou l'accumulation naturelle de sels. Une CE élevée indique souvent une salinité excessive ou un usage intensif d'engrais, ce qui peut nuire à la croissance des plantes et à l'activité biologique du sol. Ainsi, la CE est largement utilisée comme outil de diagnostic pour évaluer la qualité et l'état de santé du sol (Corwin et Lesch, 2019).
- **Matière organique** : est une composante essentielle de sa fertilité et de sa stabilité. Elle influence positivement la rétention en eau, la structure, l'activité biologique, ainsi que la disponibilité des éléments nutritifs. Un sol pauvre en matière organique est plus sujet à l'érosion, tandis qu'un sol enrichi en matière organique se prête mieux aux pratiques agricoles durables. Cette matière peut être incorporée sous forme de compost, de fumier ou d'autres amendements organiques. Par ailleurs, une teneur élevée en matière organique peut contribuer à une légère acidification du sol en diminuant son pH. On observe également une baisse progressive de la teneur en matière organique entre la couche superficielle et les horizons plus profonds, souvent liée aux pratiques de travail du sol (Lal, 2020).
- **Azote (N)** : est l'un des éléments nutritifs les plus essentiels pour la croissance des plantes, jouant un rôle déterminant dans la synthèse des protéines, des acides aminés et de la chlorophylle. Bien que l'azote gazeux ( $N_2$ ) représente environ 78 % de l'atmosphère terrestre, il n'est pas directement assimilable par les plantes (Canfield et al., 2010). Il doit d'abord être transformé en formes assimilables comme l'ammonium ( $NH_4^+$ ) ou les nitrates ( $NO_3^-$ ), notamment par des processus naturels de fixation biologique effectués par certaines bactéries du sol ou des algues cyanobactériennes dans

les milieux aquatiques. L'azote peut aussi atteindre les écosystèmes aquatiques sous forme d'azote inorganique dissous, d'ammoniac ou de nitrates, provenant du ruissellement agricole ou de dépôts atmosphériques. Ces apports multiples contribuent à une disponibilité importante en azote dans les systèmes terrestres et aquatiques, mais peuvent également causer des déséquilibres écologiques, comme l'eutrophisation.

- **Phosphore (P) :** Il joue un rôle central dans les processus énergétiques des plantes, notamment par l'intermédiaire de l'ATP, une molécule clé pour le stockage et le transfert d'énergie. Bien que classé comme macronutriment, le phosphore est requis en quantités moindres que l'azote ou le potassium, mais il demeure crucial pour la croissance racinaire, la floraison et le développement des graines. Dans les sols, le phosphore est souvent faiblement disponible pour les plantes en raison de sa forte fixation aux particules du sol, ce qui en fait un facteur limitant fréquent de la productivité agricole (Condrón *et al.*, 2013).
- **Potassium (K) :** est un macronutriment essentiel pour les plantes, indispensable à leur croissance et à leur développement. Contrairement à l'azote et au phosphore, il n'entre pas directement dans la composition des composés organiques, mais joue un rôle clé en tant que régulateur de nombreux processus physiologiques. Il intervient notamment dans la synthèse de la lignine et de la cellulose, contribuant ainsi à la solidité des parois cellulaires. Le potassium est également crucial pour la régulation de la photosynthèse, le transport des sucres, l'activation enzymatique, la résistance au stress hydrique, et l'équilibre osmotique des cellules végétales. Une carence en potassium peut fortement limiter le rendement et la qualité des cultures (Marschner, 2012).

### I.3. Microorganismes du sol

#### I.3.1. Définition des microorganismes du sol

Les micro-organismes sont des êtres vivants microscopiques, en grande majorité unicellulaires. Ils appartiennent principalement au règne des Procaryotes, regroupant les Bactéries et les Archaea, mais on en trouve également chez les Eucaryotes, notamment parmi les Protozoaires, les algues microscopiques et les champignons (fongiques). Dans les sols arides, la biomasse microbienne est dominée par les bactéries, les actinobactéries et les champignons (Karabi, 2017), qui jouent un rôle crucial dans les cycles biogéochimiques, la décomposition de la matière organique, et la résilience des écosystèmes face aux stress abiotiques (Fierer *et al.*, 2012).

Les organismes vivants dans le sol jouent un rôle crucial dans la dégradation de la matière organique, ce qui est essentiel pour maintenir la fertilité du sol. Ils interviennent dans la fragmentation des débris végétaux et leur enfouissement naturel, contribuant ainsi à la formation de l'humus (Das et Sengupta, 2024)

### I.3.2. Diversité microbienne

La diversité de la vie microbienne inclut plusieurs groupes (Adal, 2024 ; Das et Sengupta, 2024)

- **Bactéries** : jouent un rôle central dans la dynamique des écosystèmes du sol. Elles participent activement à la décomposition de la matière organique, à la transformation des éléments nutritifs, et à l'établissement de symbioses bénéfiques avec les plantes. Par exemple, les bactéries du genre *Rhizobium* fixent l'azote atmosphérique en association avec les légumineuses, fournissant ainsi une source d'azote assimilable aux plantes. De même, des espèces du genre *Pseudomonas* sont connues pour leur capacité à solubiliser le phosphore inorganique, le rendant accessible aux racines. Ces mécanismes bactériens sont essentiels pour le recyclage des nutriments, la fertilité du sol, et la promotion d'une agriculture durable (Glick, 2012 ; Bhattacharyya et Jha, 2012).
- **Champignons** : sont des acteurs clés dans la santé et la stabilité des écosystèmes pédologiques. Ils décomposent la matière organique complexe, facilitant ainsi le recyclage des nutriments essentiels. En outre, certains champignons ont la capacité d'absorber et de transformer des métaux lourds et d'autres polluants, contribuant ainsi à l'assainissement des sols. Les champignons mycorhiziens, en particulier, forment des associations symbiotiques avec les racines des plantes, améliorant leur capacité à absorber l'eau et les nutriments, en particulier le phosphore et l'azote. Ces relations renforcent la résistance des plantes aux stress abiotiques, tels que la sécheresse, et favorisent leur croissance dans des sols moins fertiles (Smith & Read, 2008; van der Heijden et al., 2015).
- **Actinomycètes** : sont des bactéries aérobies gram-positives, appartenant à l'ordre des *Actinomycetales*, et se caractérisent par leur capacité à produire des filaments mycéliens semblables à ceux des champignons. Ces micro-organismes jouent un rôle essentiel dans la dégradation de la matière organique complexe, notamment les lignines et les celluloses, contribuant ainsi au recyclage des nutriments dans le sol. De plus, certains actinomycètes sont capables de produire des antibiotiques, tels que la streptomycine et

la tétracycline, qui inhibent la croissance des agents pathogènes des plantes, offrant une défense naturelle contre les maladies du sol (Goodfellow et Fiedler, 2010 ; Liu et *al.*, 2012).

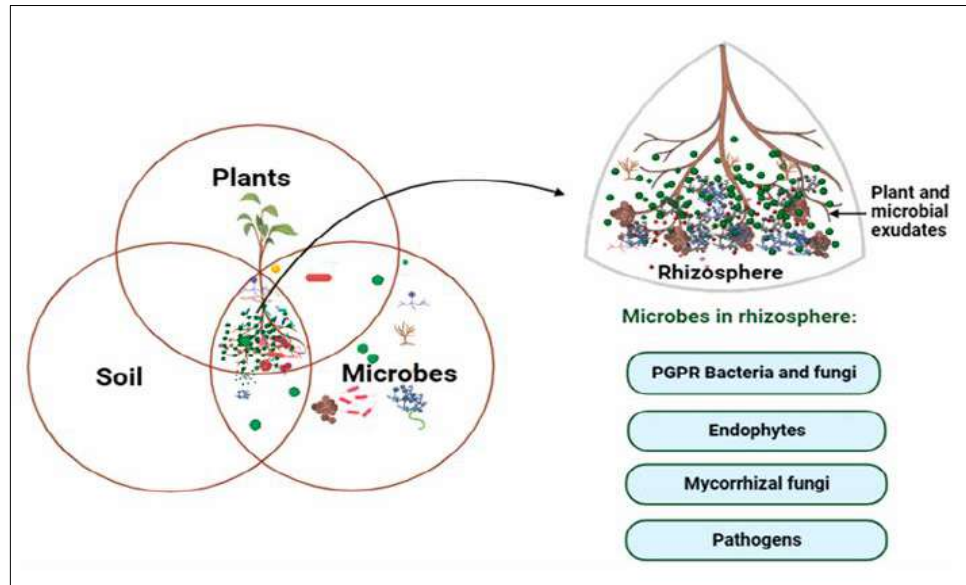
- **Algues** : en tant qu'organismes principalement autotrophes et diversifiés, jouent un rôle essentiel dans la stabilité et la vitalité des sols. Elles agissent comme des biofertilisants naturels en enrichissant le sol en éléments nutritifs tels que l'azote et le phosphore. De plus, elles améliorent des propriétés du sol telles que la texture, la rétention d'eau et l'aération. Leur présence favorise la croissance des plantes en libérant des substances bioactives, telles que des hormones végétales et des acides organiques, qui stimulent le développement racinaire. Par ailleurs, les algues contribuent à la préservation des sols en réduisant l'érosion et en formant des agrégats qui renforcent la structure du sol (Lal, 2004 ; Sharma et *al.*, 2012).

### I.3.3. Répartition des microorganismes

Le sol est l'habitat le plus complexe, abritant une abondance immense de vie microbienne, estimée à environ  $4-5 \times 10^{30}$  cellules microbiennes (Dubey et *al.*, 2019). Les communautés microbiennes du sol assurent des services écosystémiques tels que le recyclage des nutriments, la séquestration du carbone, la rétention d'eau, la promotion de la croissance des plantes et la défense (Jansson et Hofmockel, 2020).

La diversité et l'abondance des microbes sont influencées par les modes d'utilisation des terres et les compartiments du sol. On distingue deux compartiments du sol selon l'intensité de leur relation avec les racines des plantes (Vincze et *al.*, 2024).

❖ **Rhizosphère** : est considérée comme une zone biologique très active où les interactions plante-microbe (figure 2), microbe-microbe et microbe-plante façonnent la composition des communautés microbiennes. Les racines des plantes sécrètent des composés organiques qui soutiennent l'activité microbienne (Fan et *al.*, 2017). Le sol de la rhizosphère contient de  $10^8$  à  $10^{11}$  cellules cultivables par gramme de sol, ce qui correspond à environ  $10^4$  espèces microbiennes (Saleem et *al.*, 2019).



**Figure 2.** Différent Types d'interactions entre les plantes et les micro-organismes dans la rhizosphère (Chauhan *et al.*, 2023)

❖ **Sol non rhizosphérique (Bulk soil) :** la communauté microbienne du sol hors rhizosphère constitue un facteur important dans la structuration du microbiome de la rhizosphère, étant le principal réservoir à partir duquel les micro-organismes du sol sont attirés chimiotactiquement par les exsudats racinaires. Les mêmes taxons sont donc présents dans les sols de la rhizosphère et hors rhizosphère, mais différent par leur abondance relative (Bakker *et al.*, 2015).

Dans les 15 cm supérieurs du sol, les communautés microbiennes présentent une abondance et une biomasse diverses parmi différents taxons. Les bactéries dominent avec des nombres variant de  $10^8$  à  $10^9$  cellules par gramme de sol, constituant une portion importante de la biomasse microbienne du sol, qui varie de 40 à 500 g/m<sup>2</sup>. Les champignons, bien que moins abondants en termes de nombres cellulaires ( $10^5$  à  $10^6$  par gramme de sol), contribuent de manière substantielle à la biomasse du sol, allant de 100 à 1500 g/m<sup>2</sup>. Les algues, les nématodes et les protozoaires présentent une abondance numérique plus faible ( $10^2$  à  $10^5$  cellules par gramme de sol), avec une biomasse variant largement en fonction des conditions environnementales. Les actinomycètes, avec des nombres autour de  $10^7$  à  $10^8$  cellules par gramme de sol, contribuent à la biomasse de manière similaire aux bactéries, allant de 40 à 500 g/m<sup>2</sup>. Cette distribution complexe des espèces microbiennes et de leur biomasse met en lumière leurs rôles essentiels dans la fertilité du sol, le recyclage des

nutriments et le fonctionnement global de l'écosystème au sein des couches supérieures du sol (Adal, 2024).

#### **I.4. Conclusion**

Les microorganismes jouent un rôle indispensable en agriculture en contribuant à la santé des sols, à l'amélioration de la productivité des cultures et à la promotion de pratiques agricoles durables. Leur capacité à recycler les nutriments, à améliorer la structure du sol, à atténuer le stress des plantes et à réduire la dépendance aux intrants chimiques fait d'eux des acteurs clés face aux défis de la sécurité alimentaire mondiale.

# Chapitre II. Aperçu général sur les pesticides

## Chapitre II. Aperçu général sur les pesticides

### II.1. Introduction

Dans le contexte de l'agriculture moderne, l'utilisation des pesticides s'est imposée comme un levier essentiel pour limiter les pertes de récoltes engendrées par les ravageurs, les maladies et les adventices. Leur emploi croissant au cours des dernières décennies a contribué de manière significative à l'augmentation des rendements agricoles et à l'amélioration de la sécurité alimentaire mondiale (Popp et *al.*, 2013).

Toutefois, en dépit de leurs avantages agronomiques, les pesticides soulèvent d'importantes préoccupations environnementales. Leur composition chimique complexe et leur persistance dans les écosystèmes peuvent altérer les communautés microbiennes du sol, compromettant ainsi les fonctions écologiques essentielles assurées par ces microorganismes, notamment la fertilité, la décomposition de la matière organique et la régulation des cycles biogéochimiques (Lo, 2010 ; Cycoń et *al.*, 2019).

Ce chapitre vise à explorer les différents aspects liés aux pesticides : leur définition, leurs types, leurs modes de classification, ainsi que leurs effets potentiels sur la microflore du sol.

### II.2. Pesticides

#### II.2.1. Définition des pesticides

Toute substance chimique, biologique ou mélange de substances destinée à prévenir, détruire, repousser ou contrôler les organismes nuisibles est considérée comme un pesticide. Les pesticides peuvent être classés selon différents critères, notamment la nature des organismes ciblés (Kumar et *al.*, 2025).

#### II.2.2. Classification des pesticides

Les pesticides disponibles aujourd'hui sur le marché sont caractérisés par une telle variété de structure chimique, de groupes fonctionnels et d'activité que leur classification est complexe. D'une manière générale, ils peuvent être classés en fonction de la nature de l'espèce à combattre mais aussi en fonction de la nature chimique de la principale substance active qui les compose (Bourbia-Ait hamlet, 2013).

Selon Calvet et *al.* (2005), les pesticides peuvent être classés selon trois principes à savoir

1. leur caractéristique chimique
2. leur usage
3. les organismes vivants visés

### II.2.2.1. Caractéristiques chimiques

Selon Kumar et *al.* (2025) il y a quatre catégories de pesticides

- **Organochlorés** : Ce sont des substances non biodégradables qui persistent longtemps dans le sol. Exemples : DDT, BHC, Endosulfan, Aldrine.
- **Organophosphorés** : Ce sont des esters d'alcools avec l'acide phosphorique ou avec d'autres acides. Ce sont des inhibiteurs très toxiques de l'acétylcholinestérase, ce qui empêche la dégradation de l'acétylcholine. L'accumulation d'acétylcholine entraîne des convulsions, une paralysie, puis la mort. Exemple : Malathion.
- **Carbamates** : Ils sont dérivés de l'acide carbamique. Leur mode d'action est presque identique à celui des organophosphorés. Exemples : Carbaryl, Diméthilan.
- **Pyréthroïdes** : Ce sont de puissants neurotoxiques et des perturbateurs endocriniens, provoquant la paralysie. Les pyréthroïdes sont des versions synthétiques de la pyréthrine, un insecticide naturel. Exemples : Deltaméthrine, Cyperméthrine.

### II.2.2.2. Organismes vivants ciblés

**1- Insecticides** : destinés à la lutte contre les insectes, ils permettent de réduire, prévenir ou éliminer les populations d'insectes nuisibles, responsables de dommages importants aux cultures agricoles et aux produits stockés. Ils agissent en perturbant le développement, la reproduction ou le système nerveux des insectes ciblés (ACTA, 2006).

**2- Fongicides** : Ils sont destinés à traiter les maladies fongiques des plantes, également les maladies bactériennes et virales, et à éliminer les moisissures et parasites (champignons) des plantes (Mamane, 2016). En les tuant ou en empêchant leur reproduction, ce sont souvent les plus toxiques (Cotard, 2008).

**3- Herbicides** : Les herbicides sont appelés parfois désherbants, notamment en horticulture. Ce sont des matières actives ou des produits formulés ayant la propriété de tuer les végétaux (Coulibaly, 2005).

### II.2.2.3. L'usage

Selon Calvet et *al.* (2005), les pesticides sont utilisés dans plusieurs domaines d'activité pour lutter contre les organismes vivants nuisibles, d'où des usages différents. Il

existe six catégories de pesticides classés selon leurs usages, c'est-à-dire, selon la destination des traitements :

- Les cultures.
- Les bâtiments d'élevage.
- Lutter contre les ennemis des cultures (mauvaises herbes et insectes).
- Lutter contre les insectes parasites de l'Homme ou vecteurs de maladies.
- Lutter contre les insectes parasites du bétail.
- Lutter contre les insectes et acariens des produits stockés.
- Lutter contre les ennemis des forêts et espaces verts.
- Le désherbage et le débroussaillage des zones non cultivées

### II.3. Pesticides dans l'environnement.

D'après Kumar et *al.* (2025), le transfert des pesticides dans un écosystème est particulièrement complexe, car les pesticides peuvent se déplacer par des processus naturels tels que le ruissellement de surface, le lessivage et l'érosion du sol après leur application (figure 3).

**Adsorption** : Les pesticides se lient aux particules du sol, principalement aux matières organiques ou à l'argile, ce qui réduit leur mouvement dans le sol. Les pesticides fortement adsorbés peuvent être érodés par l'eau ou le vent.

**Transport** : Les pesticides peuvent se déplacer par volatilisation, ruissellement, lessivage, absorption par les plantes ou les animaux, et élimination des cultures. Ils peuvent migrer sous forme de composés dissous ou de particules de sol.

**Absorption** : L'absorption fait référence à l'absorption chimique par les plantes ou les animaux. Les pesticides peuvent rester dans ces organismes après absorption.

**Dégradation** : Les pesticides se dégradent par action microbiologique, chimique ou photodégradation. La durée de la dégradation varie selon les conditions environnementales et les propriétés chimiques des pesticides.

Les pesticides peuvent aussi se bioaccumuler dans les organismes et représenter un danger pour les chaînes trophiques. De plus, ils peuvent se volatiliser et se propager sur de longues distances avec les particules de poussière dans l'air.



**Figure 3.** Cycle des pesticides dans l'environnement (Twagirayezu et *al.*, 2024)

## II.4. Impact des pesticides sur l'environnement

L'application des pesticides a des impacts écologiques et agricoles multiples, produisant des effets à la fois à court et à long terme dans les écosystèmes. Les impacts écologiques des pesticides sont extrêmes car ils affectent la biodiversité et la santé des écosystèmes. Ils provoquent la perte d'espèces précieuses et modifient la composition de la communauté (Sarkar et *al.*, 2025).

Selon Alengebawy et *al.* (2021), les effets toxiques des résidus sur les écosystèmes agricoles et la santé humaine sont liés à la bioaccumulation ainsi qu'aux effets synergiques des pesticides avec d'autres contaminants environnementaux, notamment les métaux lourds.

## II.5. Impact des pesticides sur les microorganismes du sol

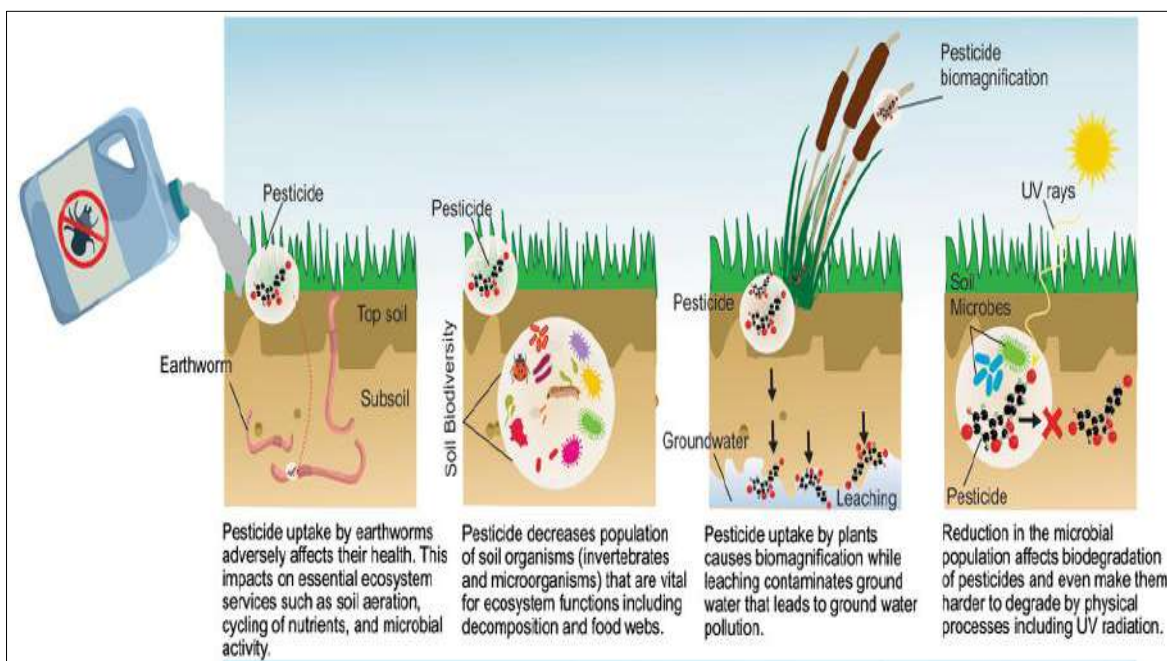
Le sol est un habitat diversifié et approprié pour différents microorganismes. Les microorganismes du sol constituent une composante essentielle des écosystèmes agricoles et urbains, car ils contribuent activement à la fertilité et à la productivité du sol. Les propriétés du sol telles que la porosité, la structure, l'aération et l'infiltration de l'eau sont régulées par la microflore du sol grâce à la formation et à la stabilisation des agrégats du sol. (Srivastava et *al.*, 2016)

Les fonctions de la microflore du sol comprennent le cycle des nutriments, la lutte biologique contre les phytopathogènes présents dans le sol, la décomposition de la matière organique, l'apport en nutriments, la détoxification des sols contaminés, ainsi que d'autres fonctions liées à la croissance des plantes telles que la production de phytohormones. (Tripathi et al., 2020).

Les pesticides peuvent avoir des effets néfastes sur les microorganismes du sol, perturbant leurs fonctions et réduisant la biodiversité globale du sol (figure 4). Cela peut entraîner une dégradation du sol, affectant la croissance des plantes et réduisant la capacité des écosystèmes à soutenir des communautés végétales diversifiées (Suwanaruang, 2024).

La réponse des microorganismes du sol à une gamme de pesticides chimiques varie et dépend de la nature des pesticides, des microorganismes présents dans le sol ainsi que des propriétés du sol. De plus, le potentiel de toxicité et les méthodes d'application des pesticides modifient la diversité structurelle et fonctionnelle des microbes du sol (Prashar et Shah, 2016).

L'utilisation des pesticides continue à modifier la diversité et la structure des rhizobactéries bénéfiques des plantes dans les systèmes agricoles (Malik et al., 2017).



**Figure 4.** Effet des pesticides sur le sol (Egamberdieva et al., 2021).

## II.6. Utilisation des pesticides en Algérie

En Algérie, comme dans d'autres pays, l'utilisation des pesticides par les agriculteurs est très répandue, et les cultures nécessitent une large variété de ces produits. Cela engendre un risque élevé de pollution des écosystèmes par les résidus de pesticides, malgré les efforts de l'agriculture pour adopter une approche plus respectueuse de l'environnement et de la qualité.

En Algérie, l'agriculture saharienne connaît une expansion rapide, soutenue par des politiques publiques telles que le programme de mise en valeur des terres sahariennes. La région de Ouargla, située au sud-est du pays, illustre particulièrement cette dynamique de développement agricole. Toutefois, cette intensification s'accompagne d'un recours croissant aux pesticides, souvent utilisé de manière non raisonnée, ce qui soulève des préoccupations environnementales et sanitaires croissantes (Aloui, 2019 ; Bouraoui et *al.*, 2020).

Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, la consommation de pesticides en Algérie est passée de 9,64 kg par hectare en 2002 à 22,32 kg en 2016, ce qui indique une augmentation importante traduisant une utilisation élevée des pesticides par rapport aux recommandations internationales. Cette hausse est principalement due à l'utilisation abusive de ces produits, à la multiplication des applications chimiques durant les stades végétatifs des cultures et au non-respect des doses et des normes. Les conséquences sont multiples : écologiques, propagation de maladies, et industrielles (Cherif, 2020).

Il devient donc crucial d'ouvrir un débat sur l'usage des pesticides en Algérie. Il ne faut pas se laisser tromper : nos produits agricoles ne sont pas biologiques. En réalité, on observe une utilisation quasiment incontrôlée de ces produits par les agriculteurs (Manseur, 2018).

## II.7. Conclusion

L'usage généralisé des pesticides dans les systèmes agricoles modernes, bien qu'il vise à améliorer les rendements et à protéger les cultures, soulève de nombreuses préoccupations environnementales. Leur diversité chimique, leur persistance et leur mobilité dans les écosystèmes entraînent des conséquences notables, notamment sur les microorganismes du sol, qui sont pourtant essentiels à la santé des sols et à la durabilité agricole. La perturbation de cette microflore affecte non seulement la fertilité des sols, mais compromet également l'équilibre écologique à long terme.

# Chapitre III. Agroécosystème oasien

## Chapitre III. Agroécosystème oasien

### III.1. Introduction

Les oasis sahariennes constituent des écosystèmes agricoles essentiels, caractérisés par la présence du palmier dattier et la disponibilité des ressources en eau.

Dans ce chapitre nous présentons les principaux caractères d'un Agroécosystème oasien et leurs composantes.

### III.2. Ecosystème oasien

Les oasis sont des écosystèmes spécifiques adaptés aux zones extrêmement arides (Vidal, 2005). Il s'agit d'un écosystème agricole dont la structure dépend principalement des composantes désert-oasis (Yang et *al.*, 2010).

Les oasis étaient traditionnellement définies comme des endroits dans le désert où des plantes et des arbres poussent grâce à la présence d'eau. On les trouve dans des régions autrement arides, caractérisées par des faibles précipitations, des températures élevées et une forte évaporation (Ait El Mokhtar et *al.*, 2019).

L'eau est donc une condition préalable à l'existence d'une oasis. Avec l'aide de deux autres ressources importantes (sol, plantes), elle peut créer des écosystèmes originaux et uniques dans les zones désertiques. Le microclimat de l'oasis favorise le développement d'une flore très diversifiée.

Les oasis sont des environnements fragiles et plus vulnérables en raison des conditions sèches et difficiles qui les entourent, ainsi que de la rareté des ressources naturelles. La croissance urbaine dans ces régions peut entraîner des changements irréversibles et des répercussions négative (Mohabey et *al.*, 2023).

#### III.2.1. Composantes de l'écosystème oasien

L'écosystème oasien se caractérise par une organisation spatiale et fonctionnelle complexe, où interagissent des éléments abiotiques, biotiques et anthropiques. La durabilité de cet écosystème repose sur l'équilibre entre ces différentes composantes (figure 5).

Le palmier dattier constitue, pour les régions sahariennes et présahariennes, l'élément essentiel de l'écosystème oasien (Sedra, 2003).

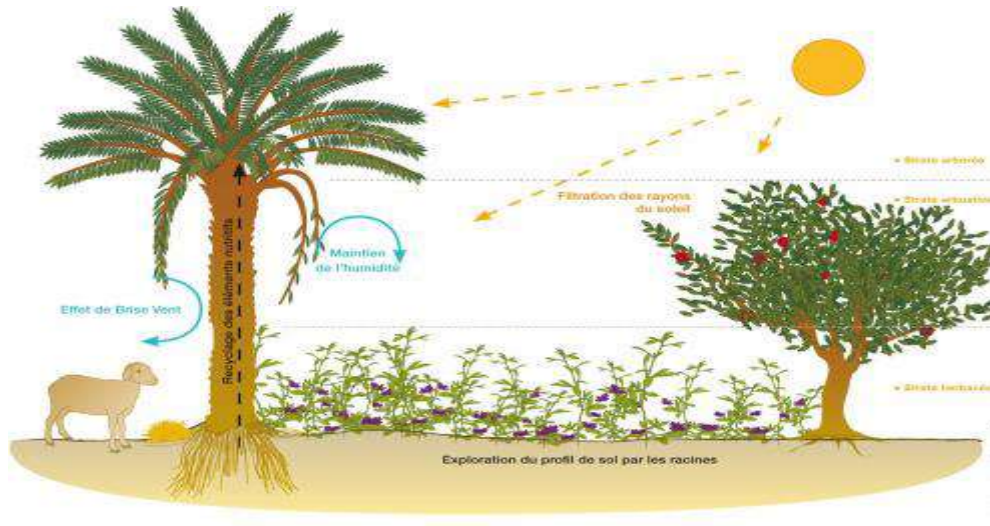


Figure 5. Structure d'une oasis traditionnelle à trois étages (Djemili et Belmahdi, 2019)

### III.2.1.1. Composantes abiotiques

- **Sol et eau**

La disponibilité des ressources en eau, combinée à la fertilité des sols, constitue un facteur clé ayant permis l'émergence et le maintien des oasis (Knight et *al.*, 2023).

L'affleurement des eaux souterraines en surface engendre des poches de productivité élevée dans un environnement généralement aride ou hyperaride, rendant possible l'émergence et la durabilité des oasis (Chen et *al.*, 2022).

- **Climat**

Les oasis ont traversé l'histoire en modérant les climats désertiques environnants. Le microclimat fait référence aux conditions atmosphériques spécifiques près du sol, influencées par la présence de végétation, qui joue un rôle essentiel dans la régulation des échanges d'énergie et de matière entre l'atmosphère et la surface terrestre. Cette modulation du microclimat est particulièrement importante dans les environnements arides, qui manquent d'autres facteurs de médiation, et constitue le facteur environnemental le plus essentiel ayant un impact majeur sur la croissance et le développement des plantes (Xue et *al.*, 2019).

### III.2.1.2 Composantes biotiques

#### III.2.1.2.1 Végétation

Le microclimat des oasis favorise une diversité végétale, ce qui génère également une diversité animale. En effet, la présence du palmier dattier permet l'implantation d'autres

cultures en agissant comme brise-vent, en fournissant de l'ombre et en réduisant le taux de sécheresse de l'air (Karabi, 2017).

La rareté des ressources en eau et l'aridité environnante ont conduit, depuis la création des oasis, à une exploitation intensive des parcelles. Cela s'est traduit dans les oasis traditionnelles par un système agricole à trois étages : au-dessus se trouvent les palmiers, en dessous les arbres fruitiers, et au niveau inférieur, complètement à l'ombre, se développent les cultures maraîchères et fourragères (Zella et Smadhi, 2006).

- ✓ **Palmier dattier (*Phoenix dactylifera*)** : constitue l'espèce végétale dominante et emblématique des écosystèmes oasiens. Il joue un rôle central, non seulement en tant que culture économique, mais aussi en tant que régulateur microclimatique qui favorise la croissance d'autres espèces végétales sous son couvert (Sedra, 2003).
- ✓ **Arbres fruitiers** : dans les palmeraies, un système de culture à étages optimise la rentabilité. Sous les palmiers dattiers poussent des arbres fruitiers comme le grenadier, l'abricotier, le figuier et la vigne de table, ainsi que d'autres espèces moins fréquentes, mais connues depuis l'Antiquité, telles que le pommier, le poirier, le pêcher et le mûrier (Zella et Smadhi, 2006 ; Ben Salah, 2014).
- ✓ **Cultures de l'étage inférieur** : Selon Toutain (1973), les agriculteurs des palmeraies cultivent des plantes vivrières sous les palmiers pour leur autoconsommation, avec des cultures comme blé, orge, fève et coriandre en hiver, et mil, sorgho, maïs et légumes maraîchers en été. Dans certaines régions, comme Reggane, des cultures rentables comme le tabac et la tomate sont privilégiées, tandis que d'autres cultures comme le coton et le henné sont également présentes dans les oasis (Rahal Bouziane et *al.*, 2010).
- ✓ **Végétation naturelle** : En raison de son emplacement aux frontières des zones arides et sèches, et grâce à la présence d'eau, l'écosystème oasien abrite une grande variété d'espèces végétales naturelles (annuelles, bisannuelles ou pérennes). Certaines de ces plantes entourent les zones de culture et sont utilisées par les habitants pour divers usages, comme les condiments et les remèdes médicinaux, tandis que d'autres sont considérées comme des mauvaises herbes que les agriculteurs luttent constamment pour éliminer, afin de limiter leur concurrence avec les cultures pour l'eau (Karabi, 2017).

### III. 2.1.2.2. Faune

La faune oasienne est étroitement liée à la palmeraie qui offre à la fois abri et nourriture. Elle se compose principalement de micromammifères, d'arthropodes de reptiles et d'oiseaux. Les palmeraies traditionnelles, grâce à leur structure étagée et leurs niches

écologiques variées, peuvent être considérées comme des espaces de biodiversité d'intérêt international. La richesse faunistique est fortement influencée par les pratiques agricoles locales et la taille de la palmeraie. Plus l'oasis est vaste et diversifiée, plus elle peut accueillir d'espèces, grâce à une charge biotique élevée. Le réseau trophique de ces écosystèmes inclut des consommateurs primaires, secondaires et des prédateurs (Selmi et Boulinier, 2003).

### III. 2.1.2.3. Micro-organismes du sol

Les micro-organismes du sol jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement écologique des oasis. Ils assurent des fonctions essentielles telles que la décomposition de la matière organique, la régulation des cycles biogéochimiques (carbone, azote, phosphore), ainsi que l'amélioration de la fertilité du sol et de la croissance des plantes. Leur diversité est considérée comme un indicateur clé de la santé des sols et de leur résilience face aux perturbations.

Selon l'étude de Tang et *al.* (2025), les changements des agroécosystèmes oasiens entraînent une modification significative de la composition et de la fonction des communautés microbiennes du sol. Ces changements sont fortement influencés par des facteurs abiotiques tels que la salinité, l'humidité du sol, le pH et la disponibilité en nutriments.

### III.3. Ecosystème oasien en Algérie

En Algérie, l'oasis constitue l'écosystème fondamental du Sahara, défini par une relation équilibrée entre trois éléments : l'eau, la palmeraie et l'espace bâti (Ahriz et *al.*, 2019). Le palmier dattier est la pierre angulaire de cet écosystème (Bouzaher et Alkama, 2013).

Les palmiers dattiers constituent l'une des principales sources économiques pour les habitants des oasis du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord. Ils sont considérés parmi les fruits les plus anciens cultivés dans cette région. En Afrique du Nord, notamment en Algérie et en Tunisie, les oasis produisent des dattes de variété Daglet Noor (DN), reconnues mondialement comme l'une des meilleures variétés. La demande pour ces dattes de haute qualité continue de croître chaque année. En Algérie, la plantation de palmiers dattiers augmente chaque année pour répondre à la demande locale et mondiale. Dans ce contexte, les autorités locales ont décidé d'augmenter la productivité en plantant un million de palmiers, portant ainsi le nombre total de palmiers à plus de 20 millions (MADR, 2019).

Actuellement, les oasis sahariennes subissent des changements causés par le changement climatique, avec une augmentation significative de la température enregistrée et une diminution des précipitations, ce qui pourrait affecter les terres agricoles et les ressources en eau, menaçant ainsi la sécurité alimentaire de ces pays (Amouzay et *al.*, 2023 ; Hamed et *al.*, 2024).

D'après Zella et Smadhi (2006), le type d'oasis dépend de la nature et de l'exploitation de la ressource en eau, de la nature du sol et de sa topographie. On distingue dans cette étude quatre types :

- ✓ L'oasis, nichée dans les dépressions de l'erg, puise son eau d'irrigation dans la nappe phréatique grâce à des puits et des forages, comme c'est le cas pour l'oasis de Ouargla.
- ✓ L'oasis située dans des Ghoûts, où l'eau d'irrigation est extraite par capillarité (comme l'oasis d'El Oued).
- ✓ L'oasis fluviale, approvisionnée en eau des oueds (Oasis du Ghoufi, du M'Zab, de Oued Bachar).
- ✓ L'oasis de dépression alimentée en eau par les foggaras (Oasis d'Adrar, Timimoun)

### III.3.1. Cultures oasiennes en Algérie

Le système oasien qui se trouve sur l'ensemble de l'espace saharien couvre une superficie totale de l'ordre de 110.262 ha constitués principalement de palmeraies localisées dans les Ziban, Oued Righ, le Souf, Ouargla, le M'Zab, El Méniä, la Saoura, le Touat, Gourrara et le Tidikelt. La superficie occupée par le palmier dattier au niveau de ces oasis est de l'ordre 92 336 ha soit environ 60% du patrimoine phoenicicole (Zenkri, 2016).

D'après la CDRAS, (2013) :

- **la phoeniculture** occupe pas moins de 187.000 ha soit près de 60 % du potentiel terre exploité,
- **l'arboriculture** avec plus de 58.000 ha soit 18 % environ, occuperait également une place non négligeable comparée à d'autres espèces bien que celles-ci sont d'un intérêt stratégique pour le pays,
- **le maraîchage** qui comprend un large éventail de produits a connu également une réelle ascension particulièrement dans certaines zones puisque sa superficie a dépassé la barre de 35.000 ha ce qui n'est pas insignifiant.

- **les céréales** bien qu'étant des cultures stratégiques et donc à promouvoir avec les 29.000 ha qui leur sont consacrés en moyenne annuellement sont loin d'offrir malheureusement des volumes de production conséquents en rapport avec les besoins de consommation.

### **III.4. Oasis de Ouargla**

Sur le plan morphologique, l'oasis de Ouargla et ses palmeraies sont installées dans une vaste cuvette sédimentaire qui constitue la basse vallée fossile de l'oued Mya qui draine le versant nord du plateau de Tadmaït, situé à 700 km au sud de Ouargla, et qui se termine à la Sebkhha de Safioune, à une vingtaine de km au nord de la ville (Hamdi-Aïssa et Girard, 2000).

#### **III.4.1. Principaux systèmes de culture dans la région de Ouargla**

L'agriculture des oasis est principalement centrée sur la culture du palmier-dattier (*Phoenix dactylifera*), accompagnée de cultures complémentaires, notamment maraîchères, arboricoles et fourragères (Ben Abdallah, 1990).

##### **III.4.1.1. Phœniciculture**

En 2003, le patrimoine phœnicicole en Algérie était estimé à 15,1 millions de palmiers-dattiers, caractérisé par une diversité remarquable tant dans les variétés cultivées que dans les techniques employées. Les trois quarts de ce patrimoine se trouvent dans le Nord-Est du Sahara, notamment dans les régions des Ziban, de l'Oued-Righ et de la cuvette de Ouargla. Dans cette dernière région, où l'agriculture repose principalement sur la culture du palmier-dattier, la phœniciculture a connu une expansion notable, particulièrement depuis l'essor des projets de mise en valeur agricole (Bouguedoura et *al.*, 2015).

##### **III.4.1.2. Serriculture**

Il s'agit de la culture en serres, qui est largement répandue dans cette région en raison de sa rentabilité élevée, de la disponibilité des matériaux comme les films plastiques, et de la petite taille des serres, permettant de les installer à proximité des palmiers et dans d'autres espaces libres au sein d'une exploitation.

##### **III.4.1.3. Céréaliculture**

La culture des céréales était pratiquée depuis longtemps dans les oasis, principalement pour la consommation locale, sous les palmiers. Toutefois, suite à l'instauration de la loi 83/18 qui facilite l'accès à la propriété foncière agricole (APFA), de grandes exploitations céréalières modernes utilisant l'irrigation par centre pivot ont émergé, principalement dans

des zones comme GassiTouil, Hassi Ben Abdellah et Ain Beida. Ce développement a été rendu possible par deux facteurs principaux : la présence d'étendues de terres riches en ressources aquifères et le fort soutien de l'État pour promouvoir des cultures stratégiques telles que les céréales (Dadda Moussa, 2007).

### **III.5. Ennemis et maladies du palmier dattier**

D'après Dakhia et *al.*, (2013), les maladies et ennemis rencontrés dans le Bas Sahara peuvent être classés en trois catégories principales :

#### **III.5.1. Groupe 1 : pourriture du cœur ou blaâ (*Phytophthora* sp) :**

Cette maladie est généralement causée par de mauvaises conditions de drainage. Elle se manifeste par un blanchissement des palmes centrales et un développement rapide d'une pourriture humide.

#### **III.5.2. Groupe 2 : ravageurs**

##### ➤ **Pyrale des dattes (*Ectomyelois ceratoniae*)**

Le ver de la datte attaque les cultivars de dattes demies molles et sèches. Les cultivars dont la maturation de dattes est précoce échappent à ces attaques.

##### ➤ **Boufaroua (*Oligonychus afrasiaticus*)**

Il attaque également tous les cultivars sauf ceux qui sont précoces. Le risque d'attaque de cet acarien est plus important en temps de sirocco et sous températures élevées.

##### ➤ **Cochenille blanche (*Parlatoria blanchardi*)**

Elle affecte préférentiellement les palmiers du cultivar Ghars, mais à défaut les autres cultivars. En cas de forte infestation, elle peut s'installer sur les dattes de tout cultivar.

##### ➤ **Foreur des palmes ou Bougassass (*Apate monachus*)**

Originaire de l'Afrique tropicale où il vit sur le caféier, le foreur des palmiers est signalé aux Ziban (Bordj Ben Azzouz / Tolga) et à Ouargla. Les dégâts sont observés sur Deglet Nour, en raison de sa prédominance. Par contre dans la région de Touggourt ce ravageur affecte la Degla Beida. Ce ravageur attaque les feuilles (Djerids) du palmier dattier et les cisaille comme son nom vernaculaire l'indique.

##### ➤ **Vers blancs cétoine (Coléoptère)**

Ils attaquent la base des palmes causant l'affaissement de la couronne externe. Ce ravageur vient d'être, également, signalé en (2010) et en (2011) dans les Ziban dans le Souf sur le cultivar Deglet Nour.

### III.5.3. Groupe 3 : mauvaises herbes

➤ **Diss (*Imperata cylindrica*)**

Mauvaise herbe caractéristique des Ziban, en plus de l'effet nutritionnellement compétitif, elle agit en tant plante hôte à tous les ravageurs et maladies, Elle entrave aussi les opérations culturales liées au palmier dattier jusque-là, identifiés sur les palmiers dattiers et sur les dattes. Le Diss envahie les palmeraies et affecte la vue paysagère de l'oasis.

➤ **Chiendent (*Cynodon dactylon*)**

Fréquente aux Ziban et à Oued Righ, cette mauvaise herbe, comme pour le Diss, fait concurrence aux palmiers pour l'eau et les éléments nutritifs, offre refuge aux maladies et ravageurs et porte atteinte à l'aspect paysager des palmeraies.

➤ **Phragmite ou roseaux (*Phragmites communis*)**

Très fréquents à Oued Righ, à Ouargla et au Souf, ces mauvaises herbes agissent en plantes hôtes pour les ravageurs notamment le Boufaroua. Elles perturbent l'accès et altèrent l'atout touristique de la palmeraie.

### III.6. Conclusion

L'écosystème oasien est une zone de végétation située en milieu désertique, caractérisée par des conditions particulières qui le distinguent des autres milieux. Il se définit principalement par un climat spécifique, la présence du palmier dattier et la disponibilité des ressources en eau, notamment les nappes phréatiques et les oueds.

Deuxième partie  
Présentation de la  
région d'étude

## Chapitre IV. Présentation de la région d'étude

### IV.1. Introduction

La région de Ouargla constitue un terrain d'étude particulièrement pertinent en raison de ses caractéristiques géographiques, climatiques, géomorphologiques, hydrogéologiques et pédologiques singulières. Située au cœur du Sahara septentrional, cette zone se distingue par un climat hyper-aride, une ressource en eau souterraine complexe et des sols faiblement évolués, fortement influencés par la salinité et l'activité éolienne.

Ce chapitre vise à décrire de manière détaillée l'ensemble des composantes naturelles de la région, afin de fournir un cadre général indispensable à la compréhension du fonctionnement des écosystèmes locaux et des dynamiques qui influencent la qualité des sols. La présentation de ces paramètres constitue, en effet, une étape essentielle pour situer les conditions environnementales dans lesquelles s'inscrit notre étude.

### IV.2. Situation géographique

La wilaya de Ouargla a été retenue comme cadre spatial de l'étude, est située dans le sud-est de l'Algérie, à environ 800 km de la capitale Alger (Figure 6). La ville de Ouargla, chef-lieu de la Wilaya du même nom, est située à une altitude de 157m, ses coordonnées géographiques sont 31° 58' latitude Nord, 5°20' longitude Est. Elle est limitée au Nord par Touggourt, au Sud par Hassi Messaoud, à l'Est par l'Erg Oriental et à l'Ouest par Ghardaïa (Maamri, 2026).

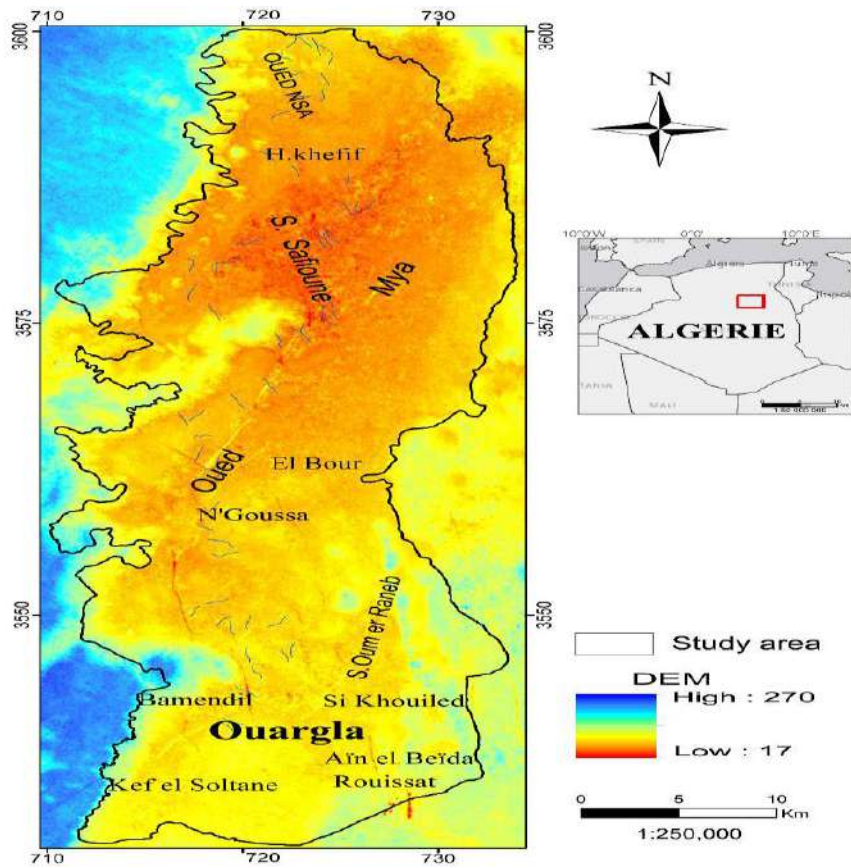


Figure 6. Situation géographique de la région de Ouargla (Slimani et al.,2024)

### IV.3. Cadre climatique

#### IV.3.1. Données climatiques

Les données climatiques issues de la station météorologique de Ouargla, couvrant la période de 1999 à 2024 (tableau 1), fournissent des informations précieuses sur les conditions climatiques locales. Ces données permettent d'évaluer les principaux paramètres tels que la température moyenne annuelle, les précipitations totales, la vitesse moyenne du vent, le taux d'évaporation ainsi que l'humidité relative. Ces éléments sont déterminants pour comprendre l'impact du climat sur les dynamiques environnementales et agricoles de la région.

**Tableau 1.** Données climatiques de la région de Ouargla (1999-2024) (ONM, 2025).

Mois	T°(°C)			Humidité %	Vitesse du vent (m/S)	Précipitation (mm)	Evaporation (mm)
	Moy	Max	Min				
<b>Janvier</b>	11,9	18,98	4,9	45,7	2,29	3,26	101,47
<b>Février</b>	14,52	21,11	7,43	38,17	3,25	1,34	131,38
<b>Mars</b>	19,26	26,13	11,35	34,85	3,43	1,91	238,66
<b>Avril</b>	22,19	29,89	15,64	29,18	4,43	2,38	308,61
<b>Mai</b>	28,33	35,21	20,76	23,85	3,98	1,88	385,79
<b>Juin</b>	34,73	41,19	26,55	17,81	4,17	0,26	452,4
<b>Juillet</b>	37,89	44,47	29,41	17,62	3,9	0,08	495,94
<b>Août</b>	35,48	41,24	28,02	18,51	3,5	0,49	481,81
<b>Septembre</b>	31,8	35,96	24,63	26,38	3,5	2,17	345,83
<b>Octobre</b>	25,55	31,77	21,28	34,43	3,14	2,63	253
<b>Novembre</b>	18,75	25,35	11,71	42,36	2,27	2,45	140,27
<b>Décembre</b>	12,87	19,6	6,7	51,39	2,64	1,87	103,74
<b>Moyenne</b>	24,43	30,90	17,36	31,68	4,93	20,72*	3438,9*

\* : cumul ; T Max : Température maximale ; T min : Température minimale. T moy : Température moyenne.

Le tableau climatique (tableau 1) montre que la région d'étude présente une très faible pluviométrie annuelle (20,72 mm) face à une évaporation extrêmement élevée (3438,9 mm), traduisant un important déficit hydrique. Les températures moyennes varient de 11,9 °C en janvier à 37,89 °C en juillet, avec des extrêmes allant de 4,9 °C en hiver à 44,47 °C en été. L'humidité relative reste généralement basse, atteignant un minimum de 17,62 % en juillet,

tandis qu'elle s'élève légèrement en hiver (51,39 % en décembre). La vitesse moyenne annuelle du vent atteint 4.93 m/s, avec des valeurs oscillantes entre 2,27 m/s et 4,43m/s.

### IV.3.2. Diagramme ombrothermique de Gaussen

La représentation ombrothermique de Gaussen (Figure 7), montre une nette prédominance de la période sèche. En effet, les précipitations mensuelles demeurent très faibles tout au long de l'année et restent largement inférieures au seuil défini par Gaussen ( $P < 2T$ ). À l'inverse, les températures connaissent une forte élévation durant la saison estivale, atteignant un maximum en juillet–août avec plus de 35 °C. Ainsi, l'ensemble de la période comprise entre avril et octobre correspond à une saison sèche marquée.

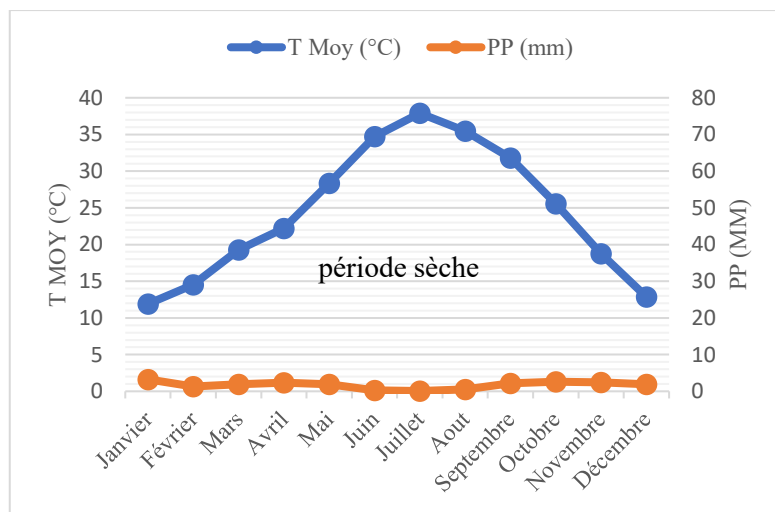


Figure 7. Diagramme ombrothermique de la région de Ouargla (1999-2024)

### IV.3.3. Climagramme d'Emberger

Le quotient pluviométrique d'Emberger (Q) est déterminé selon la formule de Stewart (1979), adaptée aux conditions climatiques de l'Algérie :

$$Q_2 = \frac{(3,43 \times P)}{(M - m)}$$

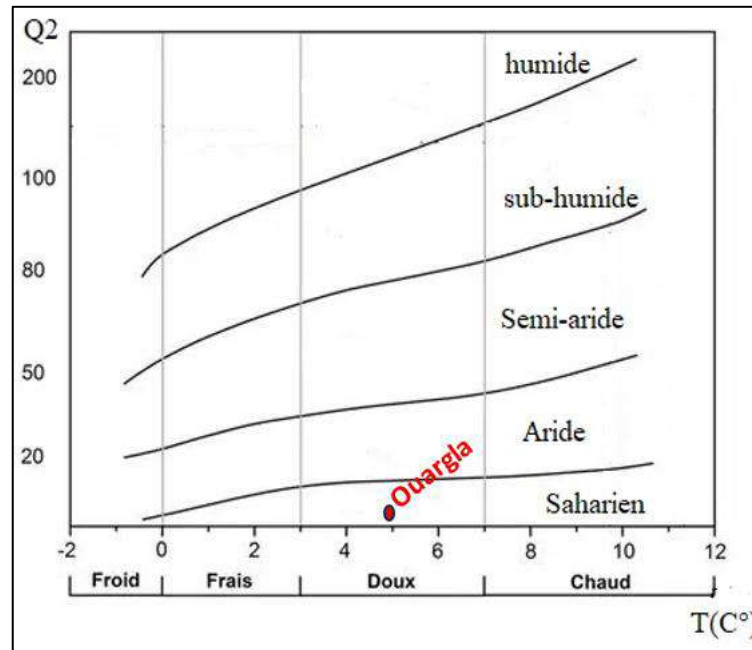
Où  $Q_2$  : le quotient pluviométrique d'Emberger ;

P : le cumul de pluviosité moyenne annuel exprimées en mm ;

M : la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud en °C ;

m : la moyenne des températures minimales du mois le plus froid en °C.

D'après le climagramme d'Emberger (figure 8), Ouargla se situe dans l'étage bioclimatique saharien à hiver doux, avec un quotient pluviothermique  $Q_2$  de 1,79 pour la période 1999-2024.



**Figure 8.** Localisation de la région de Ouargla sur le climagramme d'Emberger.

#### IV.4. Cadre géomorphologique

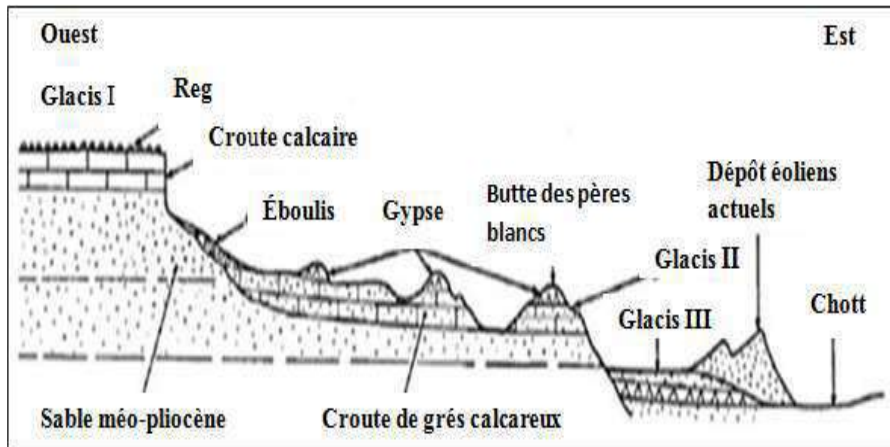
Selon Hamdi-Aïssa *et al.* (2000), la région de Ouargla s'inscrit dans la basse vallée fossile quaternaire de l'oued Mya, qui s'étire progressivement depuis le plateau de Tadmaït selon une pente douce d'environ 1 %, pour se terminer à une vingtaine de kilomètres au nord de la ville. À ce niveau, la vallée atteint une largeur d'environ 30 km.

Sur le plan géomorphologique, on distingue quatre grands ensembles disposés d'ouest en est (Figure 9) :

- **Le plateau de la Hamada pliocène**, localisé à l'ouest de Ouargla, s'abaisse légèrement vers l'est. Il surplombe la vallée fossile d'environ 220 mètres.
- **Les glacis** occupent le flanc ouest de la cuvette et forment une succession de niveaux étagés, du plus ancien au plus récent. Quatre niveaux sont observés, avec des altitudes comprises entre 140 m et 200 m, les niveaux 160 m et 180 m étant particulièrement bien marqués.
- **Le chott et la sebkha** représentent les zones les plus basses de la région. Le chott forme une bordure périphérique autour de la sebkha. Cette dépression se caractérise par la

présence d'une nappe phréatique permanente, située à faible profondeur (entre 1 et 5 mètres), qui affleure en surface au centre de la sebkha.

- **Les dunes éoliennes** récentes, disposées en cordons de faible hauteur (environ 150 mètres d'altitude), s'étendent à l'est et au nord-est de Ouargla. Elles bordent les sebkhas tout au long de la vallée de l'oued Mya, traduisant l'activité éolienne actuelle dans cette zone



**Figure 09.** Coupe géomorphologique schématique Ouest-Est de la cuvette de Ouargla (Lelievre, 1969 in Hamdi-aïssa, 2001).

## IV.5. Hydrogéologie

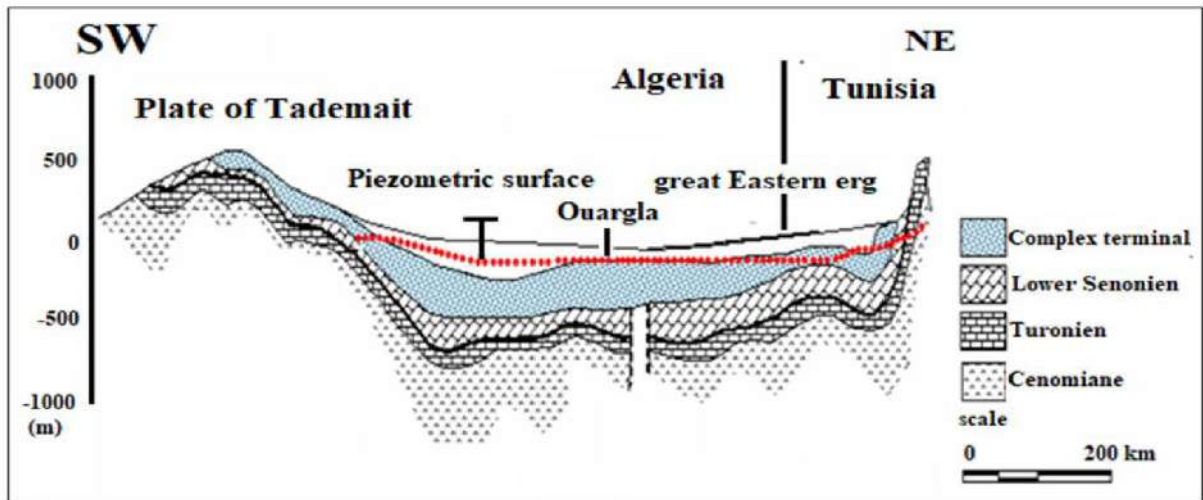
Il existe trois grands ensembles aquifères dans le sous-sol des régions de Ouargla et Touggourt, décrits du bas vers le haut (Cornet, 1961; Bonnard et Gardel, 2003 ; Bouselsal et Kherici, 2014) :

L'ensemble aquifère du Continental Intercalaire (CI), aussi appelé nappe de l'Albien, qui est fortement artésien. Il se situe à une profondeur de 1100 à 1200 m. Il est constitué de sables gréseux ou argileux. Du point de vue lithologique, cet aquifère se compose de couches successives de sables, grès, grès argileux et argile. L'eau du Continental Intercalaire est généralement de bonne qualité.

L'ensemble aquifère du Complexe Terminal (CT), composé de trois nappes distinctes, qui sont, de haut en bas : le Mio-Pliocène, le Sénonien et le Turonien, avec une profondeur variante entre 200 et 500 m. Lithologiquement, ces nappes sont constituées, de haut en bas, de nappes de sables, nappes de sables et grès, et nappes de calcaires.

La nappe phréatique, dont le niveau est souvent proche de la surface, généralement entre 1 et 2 m, mais peut atteindre jusqu'à 18 m au sud de Ouargla. Elle affleure à divers

endroits (figure 10). Elle est constituée de sables ou de sables argileux avec du gypse. L'eau de cette nappe est généralement très salée et fortement chargée dans les zones mal drainées. Elle est rarement exploitée.



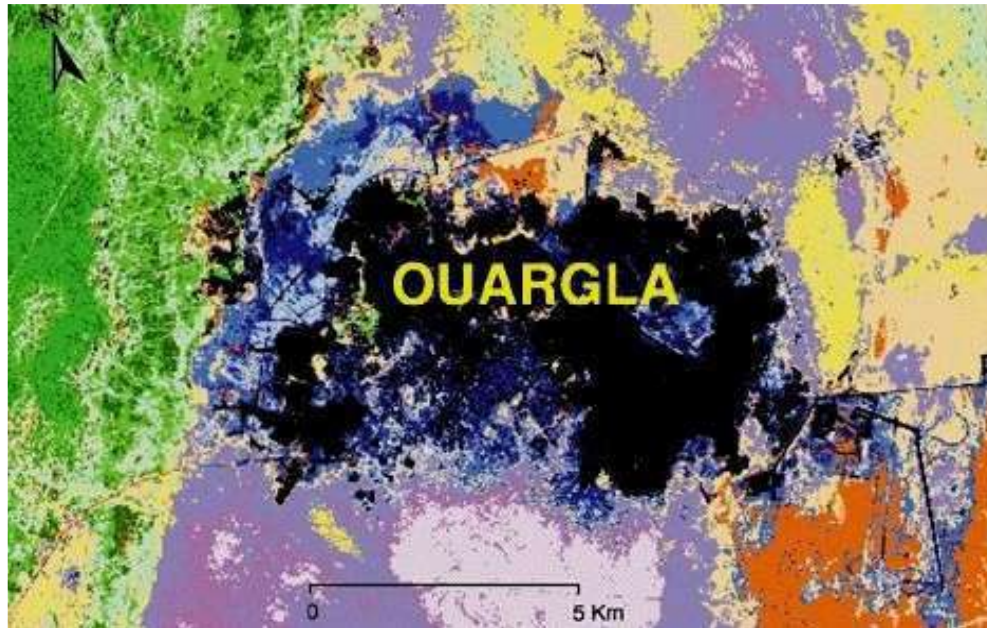
**Figure 10.** Coupe transversale des couches hydrogéologiques dans la région de Ouargla (Bouselsal et Kherici, 2014).

#### IV.6. Cadre pédologique

Dans le Sahara, le vent constitue le principal facteur de formation des sols accentué par de fortes variations thermiques journalières (Dutil, 1971 ; Dubost, 1991). Les sols sahariens sont peu évolués, pauvres en humus et présentent une faible teneur en matière organique, souvent inférieure à 1 %, en lien avec la rareté de la végétation et la faible biomasse (Halitim, 1985 ; Rognon, 1994).

Les sols de la région présentent des caractéristiques d'halomorphie et d'hydromorphie, en raison des conditions géologiques et climatiques spécifiques. La salinité dans les horizons de surface peut atteindre jusqu'à 5000 mS/m, surtout pendant la saison estivale, en raison de la remontée capillaire des eaux de la nappe phréatique très salée, dont la conductivité dépasse les 7000 mS/m. Ces phénomènes sont influencés par des conditions géologiques et climatiques défavorables (Idder et *al.*, 2014).

Hamdi-Aïssa (2001) a identifié cinq types principaux de sols dans la cuvette de Ouargla : un plateau avec croûtes calcaires et gypseuses, des glacis et versants alluviaux, des bordures de glacis avec affleurements rocheux, une zone gypseuse et saline, et enfin, un centre de cuvette salin avec des croûtes salines en surface (figure 11).



- (1) Efflorescences salines blanchâtres : « *SelBlanc* »
- (3) Croûtes salines moyennement brunes, + structure soufflée : « *SelBeige* »
- (2) Croûtes salines brunes, + structure soufflée : « *SelBrun* »
- (5) Croûtes salines fragiles + structure non soufflée, plus ou moins battante : « *CroûtLiss* »
- (7) Croûte gypseuse épaisse affleurante : « *CroûtGyps* »
- (6) Croûte gypseuse polygonale de surface et nebkhas + sable plus ou moins gypseux : « *Gypse* »
- (13) Affleurement de grès + sable rouge et argiles rouges du mio-pliocène : « *Grès* »
- (12) Glacis + surface graveleuse (pseudo-reg) : « *Glacis* »
- (11) Reg + graviers et cailloux gypso-calcaires : « *RegGravier* »
- (10) Reg + cailloux et blocs gréseux et gypso-calcaires : « *RegPierre* »
- (14) Glacis sableux + sable grossier et graviers : « *SableGros* »
- (8) Cordons et massifs dunaires + sable fin siliceux : « *MassDune* »
- (9) Voiles éoliens + sable fin siliceux : « *DuneVoil* »
- (4) Végétation, eaux de surface, ombres, agglomération, etc. : « *Veg + Eau* »
- Zones non classées

**Figure 11.** Carte des états de surface des sols à Ouargla (Hamdi-Aïssa, 2001)

## IV.7. Conclusion

Ce chapitre a présenté les principales caractéristiques naturelles de la région de Ouargla, notamment son contexte géographique, climatique, géomorphologique, hydrogéologique et pédologique. Ces éléments offrent un cadre général indispensable pour situer l'environnement dans lequel s'inscrit notre étude. Cette présentation constitue ainsi une base de référence pour la compréhension des chapitres suivants.

Troisième partie  
Etude expérimentale

Chapitre V. Enquête sur  
l'utilisation des pesticides  
dans la région de Ouargla

## **Chapitre V. Enquête sur l'utilisation des pesticides dans la région de Ouargla**

### **V.1. Introduction**

L'utilisation des pesticides est devenue une pratique courante en agriculture pour protéger les cultures contre les ravageurs et améliorer les rendements. Cependant, leur impact sur la santé humaine, l'environnement et la durabilité de l'agriculture soulève de nombreuses questions.

Afin de mieux comprendre leur utilisation, il est essentiel d'identifier les types les plus répandus ainsi que les pratiques associées chez les agriculteurs. Cette étude se concentre sur l'identification des pesticides les plus utilisés dans la région de Ouargla. À travers un questionnaire détaillé, elle vise à analyser les habitudes des agriculteurs et les facteurs qui influencent leurs choix, puis à estimer leur influence sur le sol.

### **V.2. Méthodologie de travail**

L'absence d'une base de données sur l'utilisation des pesticides agricoles dans la région de Ouargla a motivé la réalisation d'enquêtes ciblées auprès des agriculteurs. Nous avons adopté une approche combinée visant à recueillir des informations détaillées sur l'utilisation des pesticides par les agriculteurs, à travers l'élaboration d'un questionnaire spécifique.

#### **V.2.1. Objectif du questionnaire**

Le questionnaire a été conçu dans le but de collecter des informations sur les types de pesticides les plus utilisés dans la région de Ouargla, et de comprendre les méthodes et pratiques d'utilisation des agriculteurs locaux.

#### **V.2.2. Conception du questionnaire**

Après une phase d'étude approfondie, incluant des recherches bibliographiques, des discussions et des observations continues, nous avons élaboré un questionnaire axé principalement sur les types de pesticides les plus utilisés ainsi que sur les habitudes des agriculteurs dans leur utilisation (Annexe 1). Le questionnaire est composé de trois sections principales :

- Informations personnelles : Recueillir des données de base sur les agriculteurs, telles que l'âge, le sexe et l'expérience dans le domaine agricole.
- Utilisation des pesticides : Cette section concerne les types de pesticides utilisés.

- **Impacts environnementaux :** Cette section se concentre sur l'impact environnemental de l'utilisation des pesticides, notamment la pollution possible des sols.

Les questions ont été formulées de manière fermée (oui/non) et ouverte (pour recueillir des avis et suggestions des répondants) afin de faciliter la collecte et l'analyse des données.

### **V.2.3. Échantillon de l'étude**

Dans le cadre de notre étude, nous avons concentré nos efforts sur les zones de la wilaya de Ouargla. Les enquêtes ont été menées dans les régions suivantes : Sidi Khouiled, N'goussa, Hassi Ben Abdallah, Ain Moussa, Ain El Beida, Bamendil. Un échantillon d'agriculteurs de ces régions a été sélectionné afin d'étudier les pratiques agricoles, en particulier celles liées à l'utilisation des produits phytosanitaires pour la gestion des cultures. La méthode d'échantillonnage aléatoire a été adoptée pour garantir une diversité géographique, et la taille de l'échantillon a été fixée à 100 agriculteurs.

### **V.2.4. Collecte des données**

Le questionnaire a été distribué de manière manuelle et électronique. Des copies papier ont été remises aux agriculteurs lors de visites de terrain, tandis que les copies électroniques ont été envoyées par e-mail ou via des plateformes de réseaux sociaux. La période de collecte des données a duré trois mois, et les principaux défis rencontrés ont été liés à la coopération des agriculteurs en raison de leur emploi du temps chargé.

### **V.2.5. Analyse des données**

Après la collecte des données, elles ont été saisies dans le logiciel SPSS pour être analysées de manière descriptive. L'analyse a porté sur les tendances concernant les types de pesticides utilisés et les impacts environnementaux observés

# Chapitre VI. Matériel et méthodes

## Chapitre VI. Matériel et méthodes

### VI.1. Introduction

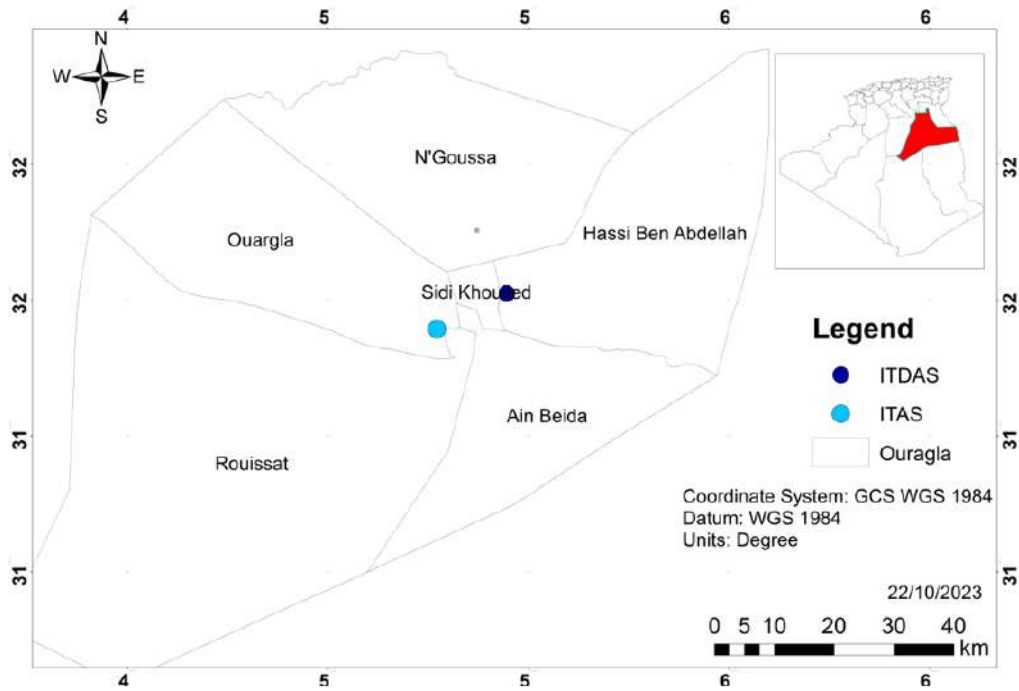
Le présent chapitre décrit la méthodologie adoptée pour évaluer l'impact de certains pesticides couramment utilisés dans la région de Ouargla sur les communautés microbiennes des sols oasiens. L'étude a été menée sur deux sites expérimentaux distincts, l'exploitation agricole de l'Université de Ouargla et la station de l'Institut Technique de Développement de l'Agronomie Saharienne (ITDAS), choisis pour leur représentativité des conditions pédologiques locales et la disponibilité de données antérieures.

Trois types de pesticides ont été sélectionnés : le glyphosate (herbicide), l'abamectine (insecticide) et le tébuconazole (fongicide), en tenant compte de leur fréquence d'utilisation et de leur nature chimique. Les expérimentations combinent des essais en pots et des essais *in situ*, afin de suivre les effets des traitements sur la densité microbienne, la biomasse microbienne et la respiration du sol, parallèlement aux analyses physico-chimiques des sols.

Les méthodes employées incluent le dénombrement des micro-organismes sur milieux solides, la fumigation-extraction pour la biomasse microbienne, la mesure de la respiration basale, ainsi que des analyses physico-chimiques telles que la détermination de l'humidité, du pH, de la conductivité électrique, de la matière organique, du gypse et du calcaire. Cette approche permet d'établir un lien entre l'utilisation des pesticides et les modifications potentielles des propriétés biologiques et physico-chimiques des sols oasiens.

### VI.2. Choix des sites d'études

Dans le but d'évaluer l'impact des pesticides sur les microorganismes du sol, l'étude a été réalisée sur deux sites distincts (figure 12), afin d'analyser l'effet des traitements phytosanitaires sur les communautés microbiennes.



**Figure 12.** Localisation des sites d'étude (élaborée par l'auteure, 2026).

### VI.2.1. Site 1 : l'exploitation agricole de l'Université de Ouargla

Le premier site d'étude est localisé dans l'exploitation agricole de l'Université de Ouargla (anciennement ITAS), implantée à environ six kilomètres au sud-ouest du centre-ville de Ouargla. À une altitude comprise autour de 246 m, une latitude de  $31^{\circ}56'$  Nord et une longitude de  $5^{\circ}17'$  Est.

L'exploitation aménagés en quatre secteurs (A, B, C, D), chacun de 3,6 hectares. Les cultures principales comprenaient le palmier dattier, avec une attention particulière à la diversité variétale, ainsi que des cultures fourragères. Des serres ont également été utilisées pour la production de légumes tels que la tomate, le piment et la laitue. Le reste de l'exploitation demeure inexploité, représentant l'extension de l'exploitation sous forme de secteurs nus (E, F, G, et H).

### VI.2.2. Site 2 : l'Institut Technique de Développement de l'Agronomie Saharienne (ITDAS)

Le second site d'étude est la station de l'Institut Technique de Développement de l'Agronomie Saharienne (ITDAS), située dans le secteur sud-est de la palmeraie de Hassi

Ben Abdallah, à 26 km du chef-lieu de la wilaya de Ouargla. Elle est localisée à une altitude de 157 m, avec des coordonnées géographiques de 32°5' Nord et 5°26' Est. Créée en 1978 par l'Institut de Développement des Cultures Maraîchères dans le Sud, la station est devenue, en 1990, l'ITDAS. Elle couvre une superficie de 21 hectares et comprend une palmeraie moderne composée de 154 palmiers dattiers, dont 80 % sont de la variété Deglet Nour et 20 % de la variété Ghars, avec des écartements de 12 m × 12 m.

En complément de la palmeraie, un hectare est consacré à la plasticulture, aménagé sous serres de type tunnel (50 m × 8 m chacune), équipées d'un système d'irrigation goutte-à-goutte délivrant un débit de 2 L/h par goutteur. Cette activité de plasticulture est pratiquée en dehors de la palmeraie, avec une protection assurée par un brise-vent constitué d'acacia, de tamaris et de casuarina.

La station mène également des travaux sur les différents systèmes d'irrigation et sur la valorisation des ressources naturelles locales. En plus de la palmeraie, plusieurs autres cultures sont pratiquées sur le site, notamment des arbres fruitiers comme le grenadier (*Punica granatum*), ainsi que des cultures telles que la betterave sucrière (*Beta vulgaris*), le colza (*Brassica napus*), le blé (*Triticum aestivum*), et le quinoa (*Chenopodium quinoa*).

Le choix de ces deux sites comme zones d'étude s'explique par plusieurs avantages majeurs :

- Une homogénéité texturale marquée des sols, facilitant la comparaison entre les deux sites
- La disponibilité de données pédologiques antérieures exploitables pour chaque site, permettant un suivi approfondi des conditions de sol ;
- Une surveillance continue des deux sites, garantissant un suivi rigoureux et précis des conditions expérimentales tout au long de l'étude.

### **VI.3. Choix des pesticides**

Les pesticides sélectionnés pour cette étude ont été choisis en fonction de leur utilisation la plus courante dans la région de Ouargla, basée sur les résultats du questionnaire distribué aux agriculteurs. Le choix a été fait en tenant compte de leur fréquence d'utilisation et de la nature de la substance active. Les produits phytosanitaires sélectionnés pour cette

étude sont Tiller, à base de glyphosate, Metry, contenant de l'abamectine, et Akorus, formulé avec du tébuconazole. Ces produits représentent respectivement un herbicide, un insecticide et un fongicide couramment utilisés dans la région de Ouargla (figure 13).

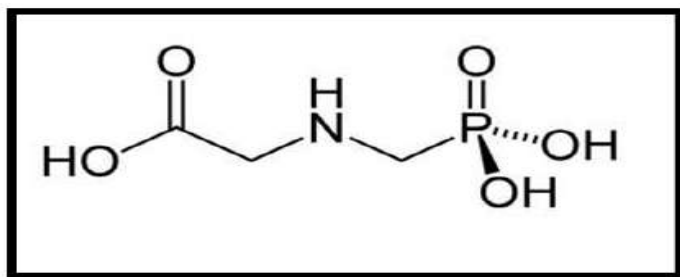


**Figure 13.** Les pesticides utilisés dans l'étude (A : Glyphosate, B : Tébuconazole, C : Abamectine)

### VI.3.1. Glyphosate

Le glyphosate est un herbicide à large spectre, non sélectif, capable d'éliminer la majorité des espèces végétales, contrairement aux herbicides sélectifs qui ciblent des plantes spécifiques. Il agit comme un herbicide systémique, étant absorbé par les feuilles puis transporté à travers l'ensemble de la plante (Torretta et *al.*, 2018). En raison de son efficacité et de sa polyvalence, il est aujourd'hui considéré comme l'herbicide le plus utilisé au niveau mondial (Al Radjab, 2007).

Le glyphosate, un composé organophosphoré ayant la formule  $C_3H_8NO_3P$  et un groupement phosphonate ( $C_3PO_3(OH)_2$ ) (figure 14), est modérément soluble dans l'eau (10 à 12 g/L à 20°C et pH 2), mais insoluble dans la plupart des solvants organiques, tandis que le sel d'isopropylamine, utilisé dans les formulations commerciales, est très soluble dans l'eau (1050 g/L à 25°C). Bien que le glyphosate et son sel soient généralement stables, il réagit violemment avec des bases fortes, libérant de l'hydrogène et attaquant le fer et l'acier galvanisé. En cas de combustion, il se décompose en émettant des fumées toxiques contenant des oxydes d'azote, des oxydes de phosphore et des oxydes de carbone (INRS, 2017).

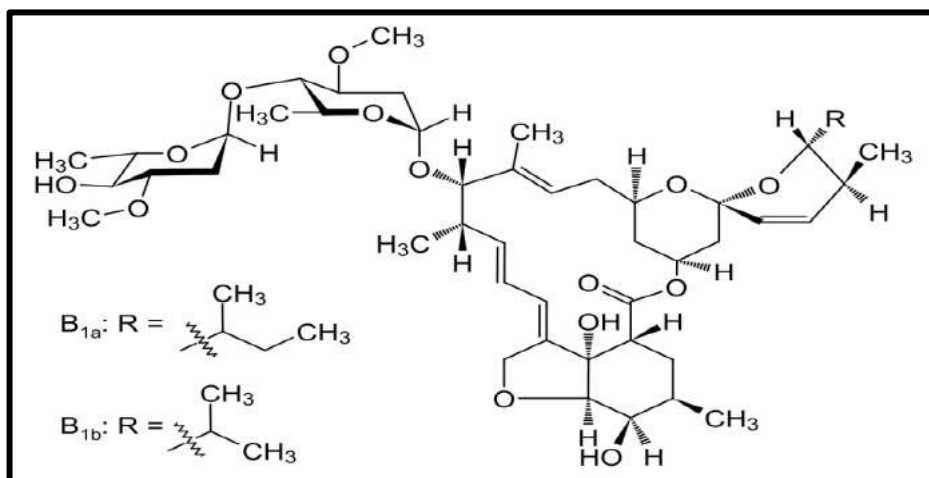


**Figure 14.** Structure chimique du glyphosate

### VI.3.2. Abamectine

L'abamectine est un composé appartenant au groupe des avermectines. Il s'agit d'une lactone macrocyclique naturelle issue de la fermentation de la bactérie *Streptomyces avermitilis*, découverte en 1979 grâce à une collaboration entre l'Institut de Kitasato (Japon) et la société pharmaceutique Merck Sharp et Dohme (Ōmura, 2008). Elle se présente sous forme d'un mélange de deux homologues : l'ivermectine B1a, majoritaire à plus de 80 %, et l'ivermectine B1b, représentant moins de 20 % (INRS, 2013).

Sous forme de poudre solide blanchâtre à jaunâtre, inodore et lipophile, l'abamectine présente une pureté d'environ 75 %. Sa formule brute est  $C_{48}H_{72}O_{14}$  pour l'ivermectine B1a et  $C_{47}H_{70}O_{14}$  pour l'ivermectine B1b. Elle est peu soluble dans l'eau, mais bien soluble dans les solvants organiques. De plus, elle se montre stable à l'hydrolyse dans des solutions aqueuses à pH 5, 7 et 9 à une température de 25 °C, ce qui traduit une bonne stabilité environnementale (figure 15).



**Figure 15.** Structure chimique de l'Abamectine

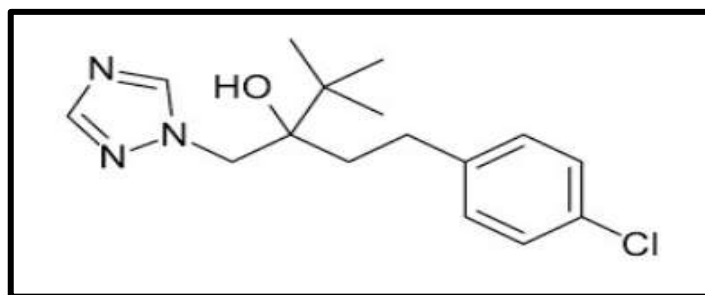
Selon Ali et *al.* (2010), l'abamectine possède une puissante activité anthelminthique et insecticide. Elle est largement utilisée pour lutter contre divers endo- et ectoparasites chez les animaux, ainsi que contre de nombreux parasites phytophages touchant les grandes cultures, les plantes ornementales, les légumes et les fruits. Elle est également utilisée dans le contrôle de certaines espèces envahissantes telles que les fourmis rouges.

Les avermectines agissent comme neurotoxines, ciblant principalement les canaux chlorure activés par le glutamate (GluCl) et les récepteurs GABA, provoquant un afflux d'ions chlorure dans les cellules nerveuses des parasites, entraînant leur paralysie et leur mort. Toutefois, ce mode d'action peut également affecter d'autres organismes non ciblés dans l'environnement (Martin et *al.*, 2002 ; Bai et Ogbourne, 2016 ; McKellar, 1997).

### VI.3.3. Tébuconazole

Le tébuconazole est un composé chimique de la famille des triazoles, dont la structure chimique est [(RS)-1-p-chlorophényl-4,4-diméthyl-3-(1H-1,2,4-triazol-1-ylméthyl)-pentan-3-ol] (figure 16). Ce fongicide systémique, peu soluble dans l'eau, se distingue par sa capacité à pénétrer rapidement les feuilles des plantes, suivie d'une migration régulière à l'intérieur. Sa faible volatilité et sa stabilité face à l'hydrolyse et à la photolyse augmentent son efficacité et sa longévité dans la protection contre les champignons. Couramment utilisé à l'échelle mondiale, le tébuconazole est une des substances actives les plus répandues dans les produits phytosanitaires et biocides, occupant une part importante du marché mondial des fongicides (Leroux, 2003).

Le tébuconazole se présente sous forme de cristaux blancs, avec une faible solubilité dans l'eau, estimée entre 32 et 36 mg/L à 20 °C. Il possède un point de fusion de 104 °C et une densité de 1,25 g/mL. Son coefficient de partage n-octanol/eau (log Pow) est de 3,7, indiquant une lipophilie modérée.



**Figure 16.** Composition chimique du Tébuconazole

## VI.4. Approche méthodologique du travail

L'approche méthodologique consiste à évaluer l'impact de quelques pesticides sur la communauté microbienne des sols oasiens (cas de la région de Ouargla). Cette étude comprend des essais en pots ainsi que des essais in situ, afin d'observer directement les effets des traitements sur les communautés microbiennes en parallèle aux déterminations physico-chimiques de ces sols.

### VI.4.1. Effet du glyphosate sur les microorganismes du sol

#### Site expérimental

Cette expérience a été réalisée dans l'exploitation agricole de l'université de Ouargla, un site expérimental caractérisé par la présence de palmiers dattiers et envahi par *Phragmites australis* (roseau commun) (photo 1), une mauvaise herbe vivace particulièrement envahissante et difficile à éradiquer. Ce contexte justifie l'utilisation du glyphosate comme herbicide spécifique pour son contrôle.



**Photo 1.** Zone choisie pour l'application du glyphosate (photo prise par l'auteure, 2026).

#### Traitements appliqués

L'objectif de cette expérimentation était d'évaluer l'impact de différentes concentrations de glyphosate sur la densité microbienne du sol dans un contexte réel. Trois doses ont été testées : C1 (4 L/ha – dose réduite), C2 (8 L/ha – dose recommandée) et C3 (16 L/ha – dose élevée), en plus d'un témoin non traité. Chaque traitement a été appliqué une seule fois sur des parcelles de 2 m<sup>2</sup>, à l'aide d'un volume précis de produit pur de (0,8 mL, 1,6 mL et 3,2 mL respectivement), dilués dans un volume d'eau constant.

L'application a été réalisée manuellement à l'aide d'un pulvérisateur à main (photo 2), de manière homogène. Chaque traitement a été répété cinq fois afin d'assurer la reproductibilité des résultats. Aucun travail du sol n'a été effectué après l'application pour préserver la répartition du produit et garantir une évaluation précise de ses effets sur la communauté microbienne du sol.



**Photo 2.** Pulvérisateur manuel utilisé pour l'application des traitements (photo prise par l'auteure, 2026).

## VI.4.2. Impact de l'Abamectine sur les microorganismes du sol

### Préparation du sol et des pots

Le sol utilisé dans l'expérience a été prélevé dans un champ cultivé avec de la betterave sucrière (*Beta vulgaris*) appartenant à l'ITDAS à Ouargla (figure 17). Le sol a été tamisé pour éliminer les cailloux et les résidus végétaux, puis réparti dans des pots en plastique propres, à raison de 1 kg de sol par pot. Cette préparation visait à obtenir un substrat homogène et représentatif des conditions du terrain pour l'étude des effets de l'abamectine.



**Figure 17.** Site de prélèvement du sol au niveau d'un champ de betterave sucrière (*Beta vulgaris*) à l'ITDAS (Ouargla) (élaborée par l'auteure, 2026).

### Traitement par l'abamectine

Une seule concentration d'abamectine a été appliquée (0.75 ml/l). La quantité appropriée d'abamectine a été dissoute dans de l'eau distillée, puis pulvérisée uniformément à la surface du sol dans chaque pot. Un léger mélange a ensuite été effectué afin d'assurer une répartition homogène du produit. Un lot témoin, non traité à l'abamectine, a été maintenu comme référence (photo 3).



**Photo 3.** Traitement du sol avec l'abamectine (expérience en pots) (photo prise par l'auteure, 2026).

L'essai a comporté deux modalités : Témoin (sans abamectine), Abamectine à 0,75ml/l. Chaque modalité a été réalisée avec cinq répétitions, soit un total de 10 pots. Les pots ont été placés dans le champ expérimental de l'ITDAS à Ouargla, exposés aux conditions environnementales naturelles. L'humidité du sol a été maintenue à 60 % de la capacité au champ tout au long de l'expérience.

### VI.4.3. Effet du fongicide Tébuconazole sur les microorganismes du sol

#### Préparation et plantation des tomates

La parcelle expérimentale, située dans la serre de l'exploitation agricole de l'Université de Ouargla, a été soigneusement préparée avant la plantation. Le sol a été labouré en profondeur et nivelé pour garantir une bonne aération ainsi qu'une répartition homogène des nutriments essentiels à la croissance des tomates (photo 4).



**Photo 4.** Parcelle expérimentale préparée pour la culture de la tomate dans l'exploitation de l'université (photo prise par l'auteure, 2026).

Des semences de tomate (*Solanum lycopersicum*) ont été utilisées pour la plantation. Les plants ont été repiqués à des espacements réguliers afin de permettre un développement optimal des racines et un accès suffisant aux nutriments (figure 18).



**Figure 18.** Croissance des plants de tomate dans la parcelle expérimentale (élaborée par l'auteure, 2026)

### Application du fongicide

Le fongicide Tébuconazole a été appliqué une seule fois sur les plants de tomate après la plantation, à une concentration de  $0.1\text{ml/m}^2$ . La pulvérisation a été réalisée de manière uniforme, assurant une couverture complète de la surface des plants afin de garantir l'efficacité du traitement.

L'essai a été mené avec un total de cinq répétitions, chaque traitement ayant été appliqué à cinq lots distincts. Un groupe témoin, non traité au Tébuconazole, a été maintenu pour comparaison avec les autres groupes traités.

### VI.4.4. Echantillonnage

Les échantillons de sol ont été prélevés dans la couche superficielle (0-30 cm), car c'est la profondeur où les micro-organismes du sol sont principalement concentrés, et où leur activité biologique est la plus intense (Fierer et *al.*, 2003 ; Zhang et *al.*, 2007). De plus, bien que certains pesticides comme le glyphosate aient une faible mobilité verticale, leur persistance et leur distribution dans le sol peuvent atteindre cette profondeur, surtout dans les sols sablo-limoneux à faible teneur en matière organique (Borggaard et Gimsing, 2008 ; Suwardji et *al.*, 2021). Par conséquent, cette profondeur est considérée comme représentative pour évaluer l'impact potentiel des pesticides sur la biomasse et la diversité microbienne du sol.

Les échantillons ont été collectés à différents moments après l'application des pesticides, notamment les jours 2, 7, 14, 21 et 28 après le traitement, afin de suivre l'évolution de leur effet sur la densité microbienne du sol au fil du temps. Les échantillons ont été transportés au laboratoire dans des glacières pour des analyses microbiologiques et physico-chimiques, afin de mieux comprendre les changements dans la communauté microbienne et les propriétés du sol.

## **VI.5. Techniques d'analyses**

Les échantillons de sol collectés à chaque intervalle, pour l'ensemble des essais menés avec les différents pesticides (glyphosate, abamectine et tébuconazole), ont été analysés en laboratoire afin d'évaluer leurs effets respectifs sur la communauté microbienne ainsi que sur les propriétés physico-chimiques du sol. Trois types d'analyses microbiologiques ont été effectués : le dénombrement des micro-organismes (bactéries et champignons) par la méthode de dilution en série sur gélose, la mesure de la biomasse microbienne du sol, et l'évaluation de l'activité biologique globale à travers le test de respiration basé sur la production de CO<sub>2</sub>.

En parallèle, des analyses physico-chimiques ont été réalisées pour déterminer le pH du sol, la conductivité électrique (CE) et la teneur en matière organique (MO).

### **VI.5.1. Analyses physico-chimiques**

#### **VI.5.1.1. Humidité**

L'humidité du sol correspond à la quantité d'eau qu'il contient. Elle est déterminée selon la méthode de Bouyoucos, basée sur la perte de masse après un séchage à 105 °C. L'échantillon de sol est pesé avant et après séchage dans une étuve pendant une durée suffisante, et la différence de poids obtenue correspond à la teneur en eau. Celle-ci a été calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Humidité du sol \%} = [(Masse humide - Masse sèche) / Masse sèche] \times 100$$

#### **VI.5.1.2. Granulométrie**

L'analyse granulométrique permet de déterminer la texture du sol en se basant sur la vitesse de sédimentation des particules en suspension. Celles-ci sont isolées après dispersion, rendue possible par l'élimination préalable de la matière organique à l'aide d'une oxydation par l'eau oxygénée. La séparation des différentes fractions se fait par la méthode de la pipette

de Robinson, qui permet d'estimer les teneurs en argile et en limon fin. Quant aux fractions sableuses, elles sont quantifiées par un tamisage mécanique (Urbanski et *al.*, 2011).

#### **VI.5.1.3. pH**

Le pH du sol a été déterminé à partir d'un extrait à 1/5, en utilisant la méthode électrométrique à l'aide d'un pH-mètre de laboratoire, conformément à la procédure décrite par Mathieu et Pieltain (2009).

#### **VI.5.1.4. Conductivité électrique (CE)**

La conductivité électrique a été déterminée à l'aide d'un conductimètre, à partir d'un extrait de sol dilué au 1/5. Les résultats sont exprimés en déci-siemens par mètre (dS/m) (Baize, 2000).

#### **VI.5.1.5. Calcaire total**

La teneur en calcaire total a été déterminée par la méthode gazométrique du calcimètre de Bernard, basée sur la mesure du volume de CO<sub>2</sub> libéré lors de la réaction des carbonates du sol avec l'acide chlorhydrique, ce volume étant proportionnel à la quantité de carbonate de calcium.

#### **VI.5.1.6. Carbone organique**

Le carbone organique a été dosé selon la méthode de Walkley et Black, basée sur l'oxydation de la matière organique par le bichromate de potassium.

**La matière organique** du sol a ensuite été estimée à partir des résultats du dosage du carbone organique. Selon Duchaufour (2001), elle correspond approximativement au double de la teneur en carbone organique dans les sols non cultivés, et à 1,73 fois cette teneur dans les sols cultivés.

#### **VI.5.1.7. Dosage de l'azote total**

L'azote total a été déterminé par la méthode de Kjeldahl (Aubert, 1967), qui consiste à détruire la matière organique à chaud avec de l'acide sulfurique concentré en présence d'un catalyseur, suivie d'un entraînement à la vapeur, d'un piégeage de l'ammoniac dans l'acide borique (40 %) et d'un titrage à l'acide sulfurique (0,05 N).

## **VI.6.2. Analyses microbiologiques**

### **VI.6.2.1. Méthode de dénombrement**

L'évaluation de la population microbienne des sols a été réalisée à l'aide de la méthode classique de dénombrement sur milieu solide, également connue sous le nom de méthode des boîtes de Pétri. Cette approche consiste à ensemercer des suspensions de sol diluées sur des milieux de culture spécifiques, afin de permettre la croissance des micro-organismes viables sous forme de colonies isolées. Le nombre de colonies obtenues après incubation permet d'estimer la densité microbienne présente dans l'échantillon analysé.

#### **VI.6.2.1.1. Milieux de culture utilisés**

Deux types de micro-organismes ont été ciblés dans cette étude :

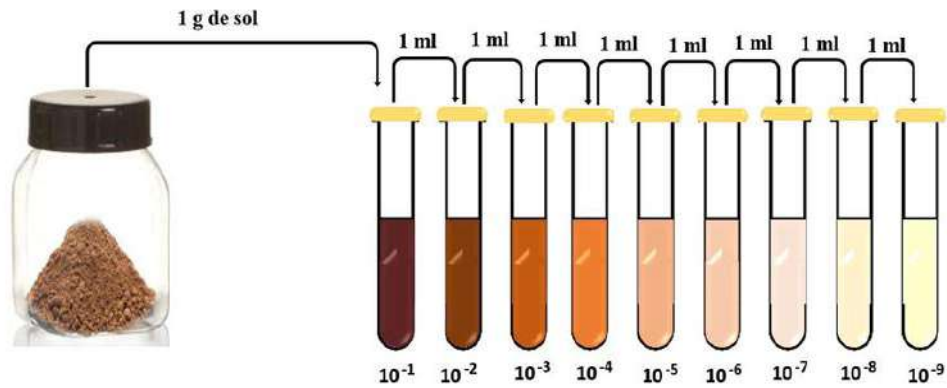
- ✓ Les bactéries ont été dénombrées sur gélose nutritive, un milieu de culture standard qui favorise la croissance de la majorité des bactéries.
- ✓ Les champignons dénombrés sur *Potato Dextrose Agar* (PDA), un milieu riche en amidon et en sucres, adapté à la croissance des champignons.

Les milieux ont été préparés selon les recommandations des fournisseurs, stérilisés à l'autoclave (121 °C), puis versés dans des boîtes de Pétri stériles.

#### **VI.6.2.1.2. Préparation des suspensions et dilutions**

Pour chaque échantillon, 1 gramme de sol a été transféré dans un tube à essai contenant 9 ml d'eau distillée stérile. Cette suspension a été bien homogénéisée par agitation manuelle pendant quelques secondes.

Ensuite, des dilutions décimales successives ont été réalisées jusqu'au facteur  $10^{-9}$ , en transférant à chaque étape 1 ml de la dilution précédente dans 9 ml de diluant stérile. Chaque tube a été agité avant prélèvement pour garantir une répartition homogène des micro-organismes (Figure 19).



**Figure 19.** Préparation des dilutions décimales de solution du sol

#### VI.6.2.1.3. Ensemencement et conditions d'incubation

À partir des dilutions appropriées, un volume de 1 ml a été prélevé à l'aide d'une pipette stérile, puis ensemencé dans une boîte de Pétri stérile contenant le milieu de culture adapté. Les boîtes ont ensuite été incubées en position inversée (couvercle vers le bas) afin de limiter la condensation sur la surface du milieu et d'assurer une croissance homogène des colonies.

Les conditions d'incubation ont été les suivantes :

- ✓ Bactéries sur gélose nutritive (Annexe 2) : incubation à 37 °C pendant 48 heures,
- ✓ Champignons sur PDA (Annexe 2) : incubation à 28 °C pendant 7 jours.

#### VI.6.2.1.4. Méthode de comptage

Le comptage des colonies a été effectué à l'aide d'un compteur de colonies (photo 5), et les résultats ont été exprimés en unités formant colonie par gramme de sol sec (UFC/g.s.s).



**Photo 5.** Compteur de colonies (photo prise par l'auteure, 2026).

### **VI.6.2.2. Isolation et purification des micro-organismes**

Après le dénombrement, des colonies présentant une morphologie distincte ont été sélectionnées et repiquées sur un milieu frais (gélose nutritive pour les bactéries, PDA pour les champignons) à l'aide d'une anse stérile, afin d'obtenir des cultures pures.

Cette opération a été répétée plusieurs fois jusqu'à l'obtention de colonies homogènes, témoignant de la pureté de la souche isolée. Les souches pures ont ensuite été conservées à 4 °C pour des analyses ultérieures.

#### **VI.6.2.2.1. Chez les bactéries**

##### **VI.6.2.2.1.1. Coloration Gram (Larpen et Larpen, 1990)**

La coloration de Gram est une méthode classique et fondamentale en microbiologie, utilisée pour différencier les bactéries en deux grands groupes : Gram positif (G<sup>+</sup>) et Gram négatif (G<sup>-</sup>). Cette distinction repose principalement sur la structure de la paroi cellulaire.

Les bactéries Gram positives possèdent une épaisse couche de peptidoglycane, ce qui leur permet de retenir le cristal violet, donnant une coloration violette. En revanche, les bactéries Gram négatives présentent une couche de peptidoglycane plus fine, ainsi qu'une membrane externe, et ne retiennent pas le cristal violet après la décoloration ; elles prennent alors la couleur du colorant secondaire (fuchsine), apparaissant en rose ou rouge au microscope.

##### **VI.6.2.2.1.2. Principe de la coloration Gram**

La réalisation de la coloration de Gram suit plusieurs étapes successives :

- **Préparation du frottis**

À partir d'une culture jeune développée sur un milieu solide, une suspension est préparée dans de l'eau physiologique stérile. Une goutte de cette suspension est prélevée à l'aide d'une anse de platine stérile ou d'une pipette, puis étalée en un mouvement circulaire sur une lame de verre sur une surface d'environ 1 à 2 cm.

- **Fixation du frottis**

Après séchage à l'air libre, la lame est fixée par la chaleur en la passant rapidement à plusieurs reprises dans la flamme d'un bec Bunsen. Cette étape permet de tuer les bactéries, préserver leur structure cellulaire et les faire adhérer à la lame.

- **Coloration primaire**

Le frottis fixé est recouvert de quelques gouttes de violet de gentiane pendant une minute, puis rincé à l'eau distillée. On applique ensuite du lugol (solution aqueuse d'iode et d'iodure de potassium) pendant 30 secondes, afin de former un complexe avec le colorant initial.

- **Décoloration**

La lame est plongée brièvement dans de l'alcool à 90°, ce qui entraîne la décoloration des bactéries Gram négatives, dont la paroi perméable permet l'élimination du complexe violet-iodé. Les bactéries Gram positives, ayant une paroi plus épaisse, conservent le colorant. Un rinçage à l'eau distillée est ensuite effectué.

- **Contre-coloration**

Enfin, quelques gouttes de fuchsine de Ziehl sont déposées sur la lame pendant une minute. Ce colorant secondaire recoloré en rose les bactéries décolorées (Gram -) sans altérer la teinte violette des bactéries Gram +. Après un dernier rinçage à l'eau distillée et séchage, la lame est prête pour l'observation microscopique.

#### **VI.6.2.2.2. Chez les champignons**

- **Observation microscopique chez les champignons**

Pour les champignons, l'examen microscopique repose essentiellement sur l'étude des caractères morphologiques. L'identification s'appuie sur l'observation des structures de fructification, du type de spores, de l'aspect du thalle, ainsi que sur la forme, la taille, la couleur et la disposition des spores. Ces critères morphologiques permettent une classification préliminaire des genres fongiques isolés à partir des échantillons de sol.

- **Préparation des lames pour l'observation**

La préparation des échantillons fongiques pour l'observation microscopique à l'état frais a été réalisée dans des conditions rigoureuses d'asepsie. Un fragment du thalle mycélien a été prélevé à l'aide d'une anse de platine stérilisée par flambage, à partir d'une colonie isolée en boîte de Pétri. Ce fragment a été déposé sur une lame stérile contenant une goutte d'eau physiologique.

À l'aide de la même anse, le mycélium a été délicatement fragmenté afin d'obtenir une préparation homogène, facilitant l'observation sans endommager les structures fongiques. Dans certaines préparations, un colorant simple tel que le bleu de méthylène a été ajouté pour améliorer la visibilité des éléments microscopiques.

La lame a ensuite été recouverte d'une lamelle, puis brièvement passée au-dessus d'une flamme douce pour éliminer les bulles d'air. L'observation a été effectuée à l'aide d'un microscope optique binoculaire, permettant d'analyser les caractères morphologiques utiles à l'identification des champignons : type de spores, disposition, forme, taille, couleur, ainsi que les structures de fructification et l'aspect du thalle.

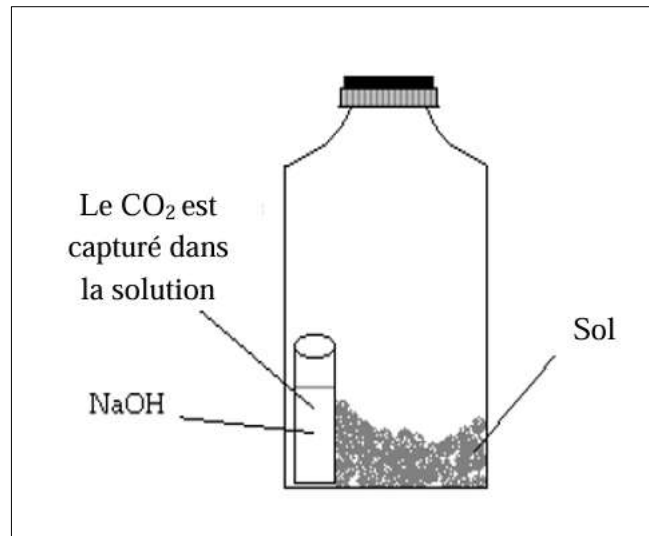
### VI.6.2.3. Respiration basale du sol (SBR)

La mesure de la respiration microbienne basale ( $\text{CO}_2\text{-C } \mu\text{g g}^{-1} \text{ sol}$ ) a été réalisée selon Anderson (1982), en prélevant 20 g de sol frais à partir de chaque échantillon, puis en introduisant le sol dans un flacon en verre propre et sec d'une capacité de 500 ml. Un petit bécher contenant 2 ml de NaOH 0,1 M a été placé au fond du flacon, sans qu'il touche le sol, et le flacon a été fermé hermétiquement. Deux flacons témoins ont été préparés sans sol mais contenant le même volume de NaOH pour servir de témoins. Tous les flacons ont été incubés pendant 24 heures à une température constante de 22 °C. Après incubation, les béchers contenant le NaOH ont été retirés pour le dosage du  $\text{CO}_2$  absorbé. Chaque condition expérimentale a été réalisée en triplicata. Le contenu en NaOH du petit bécher placé dans le flacon d'incubation a été transféré dans un bécher propre destiné à la titration, puis 4 mL de  $\text{BaCl}_2$  0,05 M ont été ajoutés afin de précipiter le  $\text{CO}_2$  absorbé sous forme de carbonate de baryum ( $\text{BaCO}_3$ ) (figure 20). Quelques gouttes de phénolphtaléine ont été ajoutées comme indicateur de pH, puis la solution a été titrée lentement avec HCl 0,05 M sous agitation magnétique. La titration a été arrêtée lorsque la couleur rose a disparu, indiquant l'atteinte d'un pH de 8,3, et le volume d'HCl consommé a permis de calculer indirectement la quantité de  $\text{CO}_2$  produite par respiration.

$$SBR = \frac{Mc \times (Vb - Vs) \times 0,05}{S \times T \times 2} \times 10^3$$

Où Mc représente la masse molaire du carbone ( $Mc = 12,01$ ) ; les volumes Vb et Vs correspondent respectivement aux volumes moyens (en ml) d'acide chlorhydrique en 0,05 M de HCl nécessaires à la titration du blanc et de l'échantillon (moyenne de trois mesures);

S indique la masse de sol analysée (en grammes); T la durée d'incubation (en heures); Le facteur 2 reflète la neutralisation de deux ions hydroxydes par molécule de CO<sub>2</sub> fixé.



**Figure 20.** Dispositif de l'expérience de la respiration basale

#### VI.6.2.4. Biomasse microbienne (Fumigation-extraction)

La fumigation a été réalisée dans un dessiccateur tapissé de papier filtre humidifié. Trois échantillons de sol humide, correspondant à 25–50 g de sol sec, ont été disposés dans des béchers en verre, accompagnés d'un récipient contenant du chloroforme. Après mise sous vide jusqu'à ébullition du chloroforme ( $\approx 2$  min), les échantillons ont été incubés à l'obscurité à  $25 \pm 2$  °C pendant 22–24 h. Les vapeurs résiduelles ont été éliminées par plusieurs évacuations successives.

En parallèle, trois échantillons témoins non fumigés ont été préparés et immédiatement extraits. Pour l'extraction, chaque échantillon a été transféré dans un flacon en polyéthylène, mélangé à 200 mL de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5 M, puis agité sur agitateur horizontal (200 tr/min, 30 min). Les extraits ont été filtrés sur papier plissé et conservés à  $-20$  °C jusqu'à analyse.

La teneur en carbone microbien a été déterminée par oxydation au dichromate en milieu acide, suivie d'un titrage au sel de Mohr avec 1,10-phénanthroline comme indicateur.

La biomasse microbienne en carbone (BC) a été calculée conformément à l'équation de la norme ISO 14240-2 :1997 :

$$BC = (C \text{ fumigé} - C \text{ non-fumigé}) / k_{EC}$$

Où C fumigé et C non-fumigé représentent respectivement la concentration en carbone extrait du sol fumigé et non fumigé, et  $k_{EC}$  est le facteur de conversion de l'extraction au carbone microbien ( $k_{EC}=0,38$ ).

### **VI.6.3. Analyse statistique**

Les données ont été analysées à l'aide de modèles linéaires mixtes afin d'évaluer les effets du traitement (pesticide vs témoin), du temps d'incubation ainsi que leur interaction sur les différents paramètres étudiés. Les hypothèses de normalité et d'homogénéité des variances ont été vérifiées préalablement à l'analyse. Les tests de significativité ont été réalisés sur la base d'une analyse de variance de type III, avec l'approximation des degrés de liberté selon les méthodes de Satterthwaite/Kenward–Roger. Lorsque des différences significatives étaient observées, les comparaisons multiples des moyennes ont été effectuées à l'aide du test de Tukey appliqué aux moyennes marginales estimées (EMMs).

Par ailleurs, une analyse de corrélation de Pearson a été réalisée afin d'examiner les relations entre les paramètres physico-chimiques et microbiologiques du sol. Une analyse en composantes principales (ACP) a également été effectuée afin de visualiser les relations entre les variables étudiées et de mettre en évidence les effets globaux des traitements. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées sous RStudio (version 2025.09.1+401).

### **VI.7. Conclusion**

Ce chapitre a présenté la conception expérimentale et les méthodes employées pour évaluer l'impact des pesticides sur les sols oasiens de la région de Ouargla. Les deux sites d'étude, choisis pour leur homogénéité texturale et la disponibilité de données pédologiques historiques, ont permis de réaliser des analyses fiables et comparables.

L'application du glyphosate, de l'abamectine et du tébuconazole a été réalisée selon des protocoles rigoureux, en tenant compte des doses usuelles et des conditions naturelles du terrain. Les échantillons de sol ont été analysés à différentes dates post-traitement afin de suivre l'évolution temporelle des communautés microbiennes et des propriétés physico-chimiques.

L'ensemble des méthodes mises en œuvre, combinant analyses microbiologiques et physico-chimiques, fournit une base solide pour interpréter l'effet des pesticides sur la biomasse, la diversité et l'activité microbienne des sols.

# Chapitre VII. Résultats et discussion

## Chapitre VII. Résultats et discussion

### VII.1. Résultats du questionnaire

#### VII.1.1. Introduction

Dans cette partie, nous présentons les résultats des enquêtes spécifiquement conçues pour les agriculteurs de la région de Ouargla, portant sur l'usage des produits phytosanitaires.

#### VII.1.2. Utilisation des pesticides

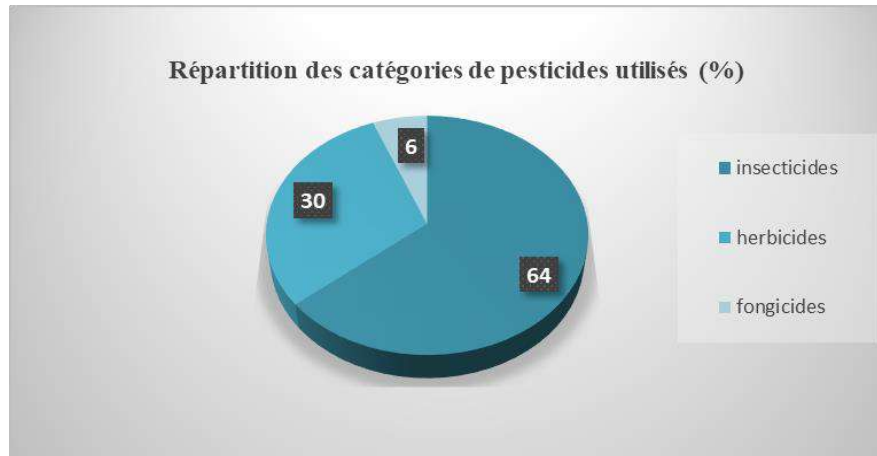
Les résultats obtenus révèlent que, dans la zone d'étude, la totalité des agriculteurs interrogés (100 %) ont affirmé recourir à l'utilisation de pesticides dans leurs pratiques agricoles. Ce recours généralisé témoigne de l'importance des traitements phytosanitaires dans la protection des cultures contre divers agents nuisibles.

Le tableau ci-dessous présente les principales catégories de pesticides employés :

**Tableau 2.** Pesticides couramment utilisés dans la région d'étude pour lutter contre les ennemis des cultures.

	<b>Nom commercial</b>	<b>Matières actives (Teneur)</b>	<b>Dose recommandée</b>
<b>Herbicides</b>	Tiller 410	Glyphosate 48%	4 à 8 l/ha
	Apyros mç	Sulfo-sulfuron	26,5 g/ha
	Granstar 75 DF	Tribenuron-Methyl	12 g/ha
	Clomate	Clomazone	0,75 L/ha
<b>Insecticides</b>	Picador 20 SL	Imidaclopride 200g/l	35ml/hl
	Ampligo 150 ZC	100 g/l de Chlorantraniliprole + 50 g/l de Lambda-Cyhalothrine.	0.2 – 0.3 l/ha
	Astard	Acetamiprid 20 %	100 – 300 g/ha
	Axam	Thiamethoxam 25%	50 g/hl
	Metry	Abamectine (18g/l)	50-75ml /hL
	Karatika 50 EC	Lambda-Cyhalothrin (5%)	35 – 50 ml / 100 L
	Lamdoc 50 EC		
	Engeo 247 SC	141 g/l de Thiamethoxame + 106 g/l de Lambda-cyhalothrine	75 ml/ha
Grand	Lufenuron 5%	0,8 – 1,2 L/ha	
<b>Fongicides</b>	Horizon 250 EW	Tébuconazole	1L/ha
	Strimach 25 SC	Azoxystrobine (250g/l)	70ml/hl
	Akorus 250 EC	Tebuconazole (250g/l)	300ml à 1l/ha
	Aliette Flash	Fosétyl-Aluminium	250 g/hL

Les pesticides utilisés dans les exploitations agricoles se répartissent principalement en trois grandes catégories (figure 21). Les insecticides dominent largement avec un taux d'utilisation de 64%, jouant un rôle clé dans la lutte contre les ravageurs des cultures. Parmi les plus courants, on trouve l'Abamectine, la Lambda-cyhalothrine et Thiaméthoxame, utilisés pour combattre des nuisibles comme les pucerons, les chenilles, les coléoptères et l'acarien du palmier dattier. Les herbicides, quant à eux, représentent environ 30 % des produits employés, leur rôle étant d'éliminer les mauvaises herbes qui concurrencent les cultures, le glyphosate se distingue comme l'herbicide le plus largement utilisé, dépassant les autres produits tels que le Clomazone et le Tribenuron-Methyl. L'usage des fongicides demeure limité, avec seulement 6 % des agriculteurs concernés. Ces derniers les appliquent principalement pour lutter contre les maladies fongiques, avec des substances comme l'Azoxystrobine, le Tebuconazole.



**Figure 21.** Répartition des catégories des pesticides utilisés (%) dans la région de Ouargla

L'application de ces pesticides ne se fait pas de manière aléatoire, mais suit des règles strictes basées sur des conditions bien définies., mais suit des règles strictes basées sur des conditions bien définies. Chaque pesticide possède des caractéristiques spécifiques, notamment la dose à utiliser, la période d'application optimale ainsi que le délai de sécurité à respecter avant la récolte. Ces paramètres sont essentiels pour garantir une efficacité maximale du traitement tout en minimisant les risques pour l'environnement et la santé des consommateurs.

### VII.1.3. Modes de sélection des pesticides par les agriculteurs

La majorité des agriculteurs (55 %) se fient aux vendeurs spécialisés pour choisir leurs produits, tandis que 15 % consultent les vulgarisateurs agricoles. Environ 22 % préfèrent

s'appuyer sur leur propre expérience, tandis que l'échange avec les agriculteurs voisins reste marginal (8 %) (figure 22).

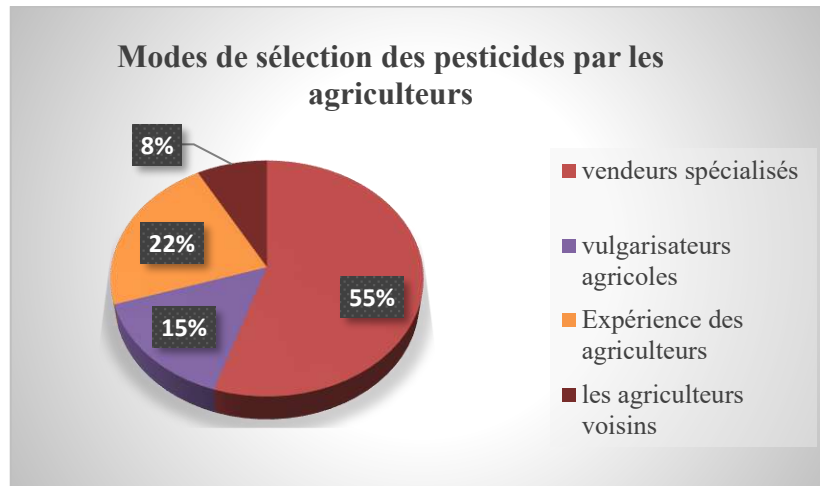


Figure 22. Modes de sélection des pesticides par les agriculteurs (%)

#### VII.1. 4. Respect de la dose et des délais entre la dernière application du produit et la récolte

Les doses de pesticides utilisées par les agriculteurs de la région de Ouargla varient en fonction des ravageurs ciblés, du type de culture et de la nature du pesticide employé (figure 23). Toutefois, 25 % des agriculteurs appliquent ces produits de manière aléatoire, avouant ne pas respecter les doses prescrites. Cette pratique résulte soit d'un doute quant à l'efficacité des pesticides, soit de la périssabilité des produits disponibles sur le marché local, les incitant ainsi à dépasser les quantités recommandées pour garantir de meilleurs résultats. À l'inverse, 75 % des agriculteurs déclarent suivre scrupuleusement les doses conseillées (généralement indiquées sur l'étiquette).

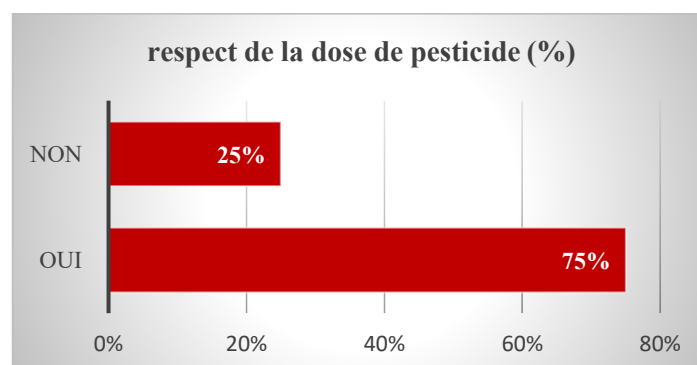


Figure 23. Respect de la dose des pesticides

Malgré ces variations dans l'application des doses, il est à noter que les agriculteurs respectent à 100 % les délais de récolte après l'application du pesticide (figure 24),

garantissant ainsi la conformité des cultures aux normes sanitaires et la sécurité des consommateurs.

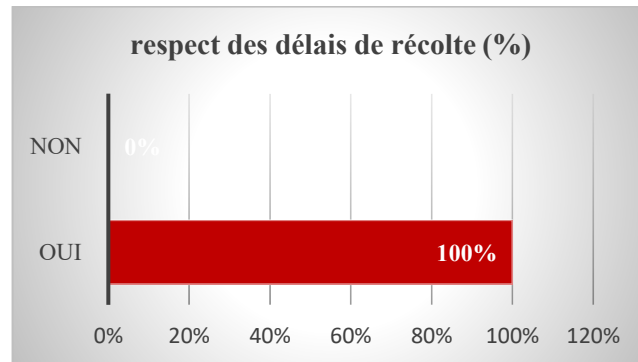


Figure 24. Respect des délais avant la récolte (%)

### VII.1. 5. Méthodes de traitement par les pesticides

L'enquête a permis d'identifier plusieurs types d'équipements en fonction des pratiques agricoles et de la taille des exploitations (figure 25).

- ✓ Pulvérisateur à dos : utilisé par 45 % des agriculteurs, notamment ceux travaillant dans la plasticulture et les petites exploitations. Cet équipement, bien que de capacité limitée, est apprécié pour sa maniabilité et son accessibilité.
- ✓ Citernes avec moteurs de pompage : adoptées par 25 % des agriculteurs, principalement ceux disposant de moyennes et grandes exploitations. Ce système permet un traitement plus rapide et efficace des cultures sur de vastes superficies.
- ✓ Traitement intégré au système d'irrigation : utilisé par 14 % des exploitants. Cette méthode permet une application ciblée et optimisée des pesticides en les incorporant directement à l'eau d'irrigation.
- ✓ Combinaison de plusieurs moyens de traitement : environ 16 % des agriculteurs adoptent une approche mixte, combinant plusieurs types d'équipements en fonction des besoins spécifiques de leurs cultures et de l'accessibilité aux ressources.

Ces résultats montrent une diversité des pratiques en matière d'application des pesticides, influencée par la taille des exploitations et les techniques de culture adoptées.

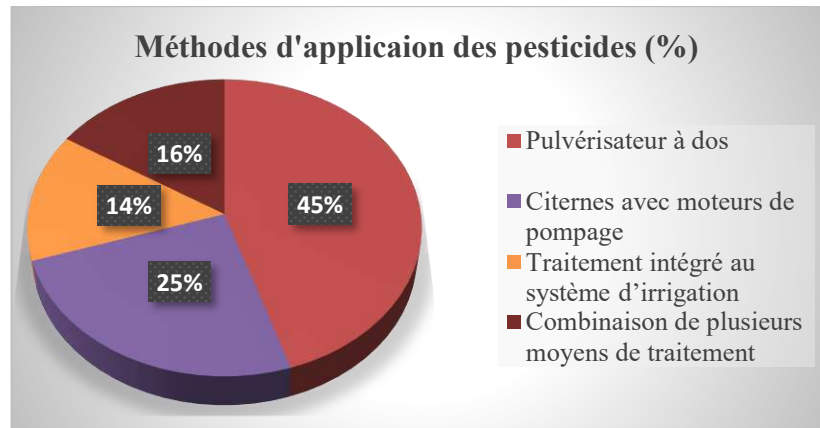


Figure 25. Méthodes d'application des pesticides utilisées par les agriculteurs (%)

### VII.1.6. Équipements de protection utilisés par les agriculteurs lors de l'application des pesticides

Les résultats de l'enquête montrent une utilisation variable des équipements de protection individuelle par les agriculteurs lors de l'application des pesticides (figure 26).

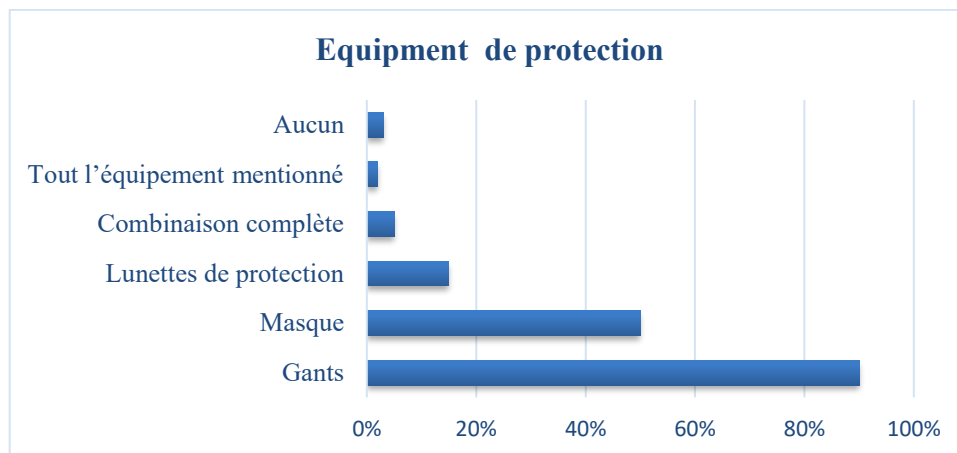


Figure 26. Équipements de protection utilisés par les agriculteurs lors de l'application des pesticides

Les gants sont les plus utilisés, avec 90 % des agriculteurs les portant pour éviter le contact direct avec les produits chimiques. Cependant, seulement 50 % utilisent un masque, ce qui laisse une partie significative exposée aux inhalations toxiques.

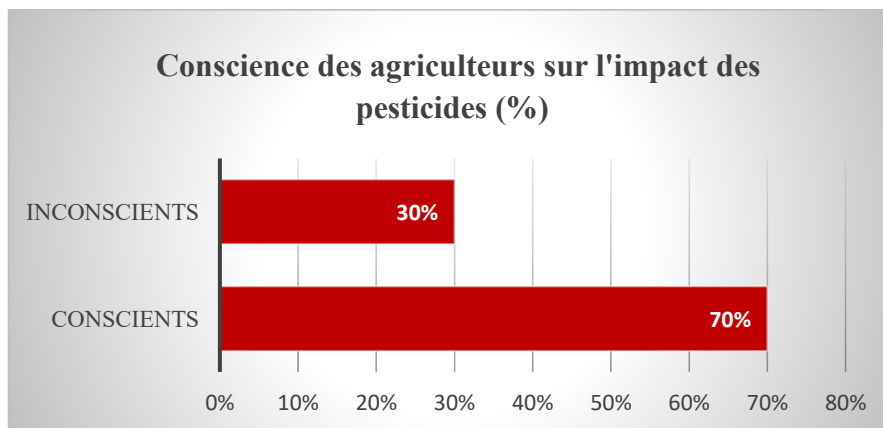
Concernant la protection oculaire, l'usage des lunettes de protection est très limité, avec seulement 15 % des agriculteurs qui y ont recours. De même, le port de la combinaison complète, qui assure une protection optimale du corps, n'est observé que chez 5 % des répondants.

Un constat encourageant est que 2 % des agriculteurs adoptent l'ensemble complet des équipements de protection, mais il reste insuffisant face aux risques encourus. D'un autre côté, 3 % des agriculteurs déclarent ne porter aucun équipement, ce qui les expose directement aux dangers des pesticides.

Ces chiffres indiquent un besoin urgent de renforcer la sensibilisation et la formation sur l'importance du port des équipements de protection pour garantir la sécurité des agriculteurs et réduire les risques sanitaires liés aux pesticides.

### VII.1.7. Perception des agriculteurs sur les effets des pesticides sur la pollution et la fertilité des sols

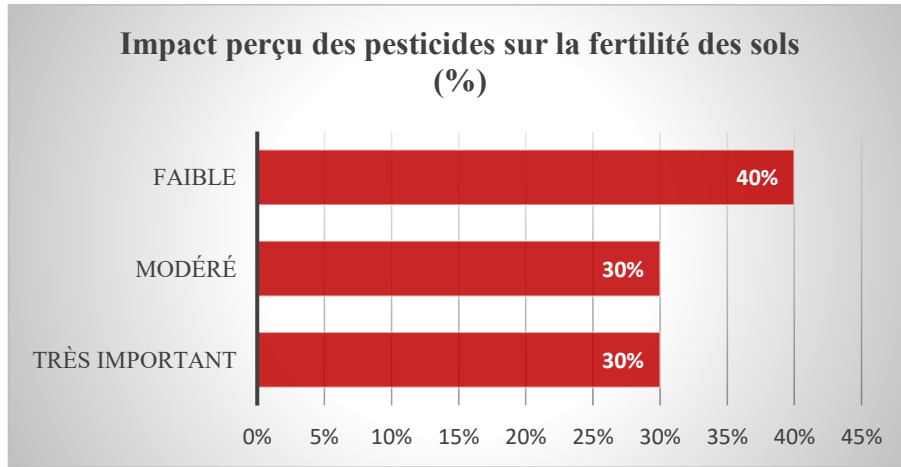
Les résultats de l'enquête indiquent que la majorité des agriculteurs, soit 70 %, sont conscients que l'utilisation des pesticides joue un rôle dans la pollution des sols. Ils reconnaissent que ces produits chimiques, bien qu'efficaces pour la protection des cultures, peuvent avoir des effets négatifs sur l'environnement, notamment en altérant la qualité des sols à long terme. En revanche, 30 % des agriculteurs ne perçoivent pas pleinement ces risques et restent moins sensibilisés aux conséquences écologiques de l'usage des pesticides (Figure 27).



**Figure 27.** Perception des agriculteurs sur l'impact des pesticides sur la pollution des sols (%)

En ce qui concerne l'impact des pesticides sur la fertilité des sols, les avis des agriculteurs sont partagés. En effet, 30 % des répondants considèrent que cet impact est très important, soulignant ainsi une altération significative de la qualité des sols due à l'usage répété de ces produits. De leur côté, 30 % estiment que l'effet des pesticides sur la fertilité des sols reste modéré, suggérant une influence perceptible mais non alarmante. Enfin, 40 %

des agriculteurs jugent que cet impact est faible, voire inexistant, indiquant ainsi une perception minimisée des effets de ces substances sur la santé des sols (figure 28).



**Figure 28.** Perception des agriculteurs sur l'impact des pesticides sur la fertilité des sols (%)

### VII.1.8. Conclusion

L'enquête menée dans la région de Ouargla montre que l'utilisation des pesticides est généralisée chez les agriculteurs, avec une dominance des insecticides. Le choix et l'application des produits reposent principalement sur les commerçants agricoles et les pulvérisateurs restent les méthodes les plus utilisées. Bien que les doses et les délais avant récolte soient globalement respectés, les pratiques de protection restent insuffisantes chez une partie des agriculteurs. Les résultats mettent en évidence une prise de conscience partielle des impacts environnementaux et sanitaires, soulignant la nécessité de renforcer la sensibilisation.

## VII.2. Résultats des effets des produits phytosanitaires sur les propriétés physico-chimiques et microbiologiques du sol

### VII.2.1. Introduction

Ce chapitre examine les effets du Glyphosate, de l'Abamectine et du Tébuconazole sur les microorganismes et les propriétés physico-chimiques du sol. L'objectif principal est d'évaluer comment ces pesticides influencent la densité et la diversité microbienne, ainsi que les caractéristiques physico-chimiques du sol. Les résultats présentés permettent de mieux comprendre la relation entre l'application de chaque pesticide et les changements observés dans la communauté microbienne et les propriétés du sol.

### VII.2.2. Propriétés physico-chimiques des sols étudiés

Les caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés sont représentées dans le tableau 3.

**Tableau 3.** Caractéristiques physico-chimiques des échantillons des sols étudiés.

Paramètres	S1	S2	S3	
Classe texturale	SL	SL	SL	
Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.45	1.61	1.72	
Humidité du sol	11.4	10.7	10.33	
pH (1:5)	8.29	7.6	7.8	
CE at 25°C (dS/m) 1/5	2.5	2.21	1.11	
Calcaire total %	5.3	4.32	6.79	
Caractéristiques biochimiques	C organique (%)	0.44	0.27	0.3
	Azote total (N) %	0.38	0.22	0.12
	M.O (%)	0.75	0.46	0.51
	C/N	1.13	1.22	2.5

- S1 : Sol ITAS – expérience Glyphosate,
- S2 : Sol ITAS – expérience Tubéconazole,
- S3 : Sol ITDAS – expérience Abamectine.

Les analyses physico-chimiques réalisées sur les sols étudiés (S1, S2 et S3) à Ouargla révèlent une variabilité significative, reflétant à la fois l'impact des pratiques culturales et les caractéristiques naturelles des sols oasiens. Tous les sols présentent une texture sablo-limoneuse (SL), typique des zones arides et semi-arides du Sahara algérien, ce qui confère aux sols une forte porosité et une faible capacité de rétention en eau (El Fergougui et *al.*, 2023; Benslama et *al.*, 2024).

La densité apparente montre une progression de S1 (1,45 g/cm<sup>3</sup>) vers S3 (1,72 g/cm<sup>3</sup>), indiquant une augmentation du compactage du sol et une diminution probable de la porosité et de la matière organique. Cette tendance est conforme à ce qui a été observé dans les sols sableux exploités intensivement, où l'activité agricole et l'utilisation répétée des machines entraînent un tassement progressif des horizons superficiels (Hillel, 2004).

Le pH est globalement alcalin, avec une valeur plus élevée pour S1 (8,29), ce qui est courant dans les sols calcaires des zones arides (Richards, 1954). Les différences de pH entre S1, S2 et S3 peuvent être liées à la variabilité de l'apport en calcaire et aux traitements chimiques appliqués, y compris les produits phytosanitaires, qui peuvent modifier légèrement la réaction du sol. Par ailleurs, la conductivité électrique (CE) varie de 1,11 dS/m (S3) à 2,5 dS/m (S1), indiquant une salinité modérée dans les sols cultivés selon Aubert (1978). Cette variation traduit l'influence de l'irrigation, de l'évaporation intense et de l'accumulation de sels solubles dans les couches superficielles (Berkal *et al.*, 2014).

Les teneurs en calcaire total oscillent entre 4,32 % et 6,79 %, ce qui correspond à des sols peu à moyennement calcaires selon Baize (2000).

Les sols étudiés présentent de faibles teneurs en matière organique et en azote. Le sol S1 (0,75 % M.O, 0,38 % N, C/N = 1,13) présente néanmoins des teneurs légèrement plus élevées que S2 (0,46 % M.O, 0,22 % N, C/N = 1,22) et S3 (0,51 % M.O, 0,12 % N, C/N = 2,5). Le faible rapport C/N indique une dégradation rapide de la matière organique, favorisée par l'aridité du climat, la texture sableuse et les pratiques culturales (Benslama *et al.*, 2024; Six *et al.*, 2002).

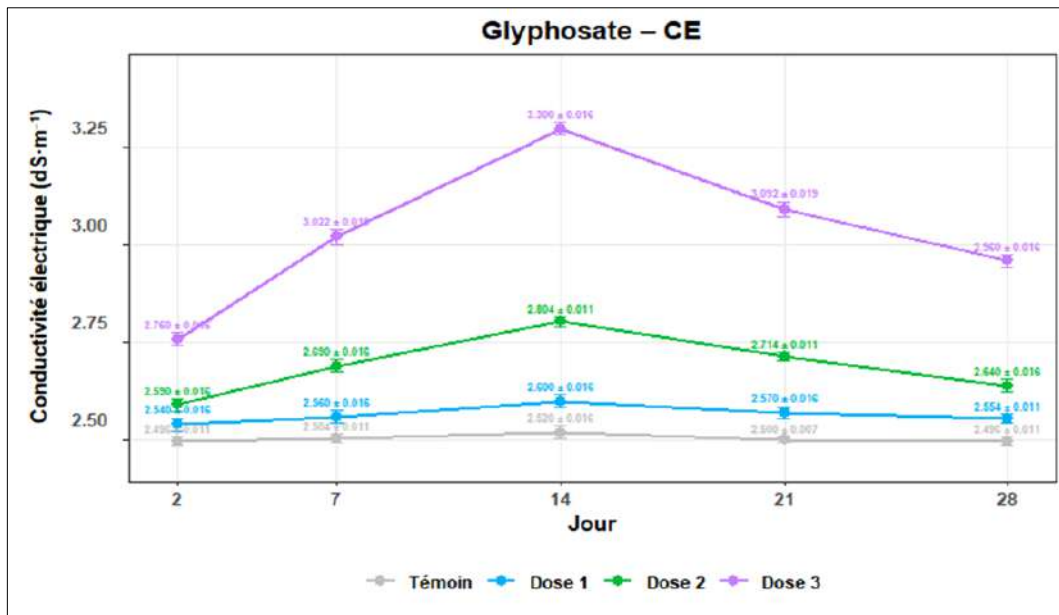
La comparaison des résultats obtenus avec d'autres études menées dans les oasis algériennes confirme que les sols sableux et peu fertilisés sont caractérisés par une faible matière organique et des niveaux d'azote limitants, ce qui peut affecter la productivité et la stabilité microbienne (El Fergougui *et al.*, 2023; Benslama *et al.*, 2024).

### **VII.2.3. Effets des pesticides sur les paramètres physico-chimiques des sols**

#### **VII.2.3.1. Variation de la conductivité électrique**

##### **VII.2.3.1.1. Évolution de la conductivité électrique (CE) du sol sous l'effet du glyphosate**

L'évolution de la conductivité électrique (CE) du sol montre des différences nettes selon la dose de glyphosate appliquée et la durée d'incubation (figure 29).



**Figure 29.** Évolution de la conductivité électrique du sol sous Glyphosate (J2–J28)

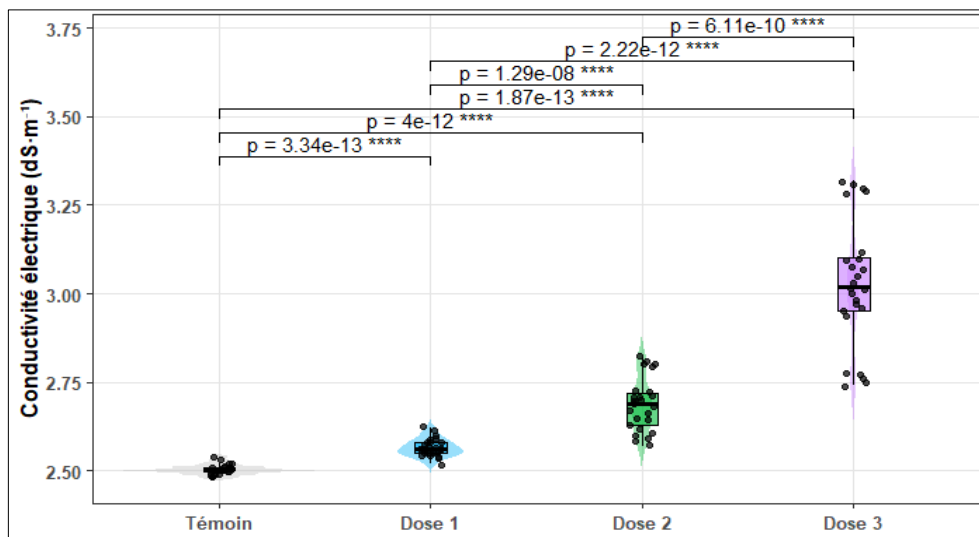
Le sol témoin reste remarquablement stable pendant toute la période expérimentale, avec des valeurs comprises entre  $2.496 \pm 0.011$  et  $2.520 \pm 0.016$   $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , ce qui indique l'absence de perturbation ionique majeure en absence de traitement, situation généralement observée dans les sols non soumis à un stress chimique (Berkal *et al.*, 2014).

Sous dose 1, une augmentation modérée de la CE apparaît dans les premiers jours, passant de  $2.540 \pm 0.016$  au jour 2 à  $2.560 \pm 0.016$  au jour 7 puis atteignant  $2.600 \pm 0.016$  au jour 14. Cette légère hausse pourrait refléter une libération accrue d'ions solubles en réponse au traitement, phénomène souvent associé à la dégradation initiale du glyphosate et à la stimulation transitoire de l'activité microbienne (Haney *et al.*, 2000). Toutefois, la CE diminue ensuite légèrement jusqu'à  $2.554 \pm 0.016$  au jour 28, suggérant un retour progressif à un état d'équilibre ionique du sol.

La dose 2 amplifie cette dynamique, avec une augmentation plus marquée au cours des 14 premiers jours, les valeurs passant de  $2.59 \pm 0.016$  au jour 2 à  $2.69 \pm 0.016$  au jour 7 puis culminant à  $2.804 \pm 0.011$  au jour 14. Une baisse est ensuite observée, atteignant  $2.640 \pm 0.011$  au jour 28. Cette évolution traduit une réponse ionique forte mais transitoire, probablement liée à une minéralisation accrue des composés organophosphorés et à une modification temporaire de la disponibilité des nutriments après application du glyphosate (Duke *et al.*, 2012).

La dose 3 provoque la réponse la plus marquée, avec une augmentation rapide de la CE dès les premiers jours, atteignant un maximum de  $3.3 \pm 0.016$  au jour 14. Cette forte élévation initiale de la CE indique une perturbation ionique importante, pouvant résulter d'une libération massive d'ions solubles et d'une intensification de l'activité microbienne liée aux processus de dégradation du glyphosate dans le sol (Imfeld et *al.*, 2013).

La figure 30 montre une augmentation progressive de la conductivité électrique du sol en fonction des doses de glyphosate. Le témoin présente les valeurs les plus faibles, tandis que la dose 3 affiche la CE la plus élevée. Les analyses statistiques confirment que les différences entre le témoin et toutes les doses sont significatives, et particulièrement marquées pour les doses 2 et 3, où les p-values extrêmement faibles révèlent un effet très fort.

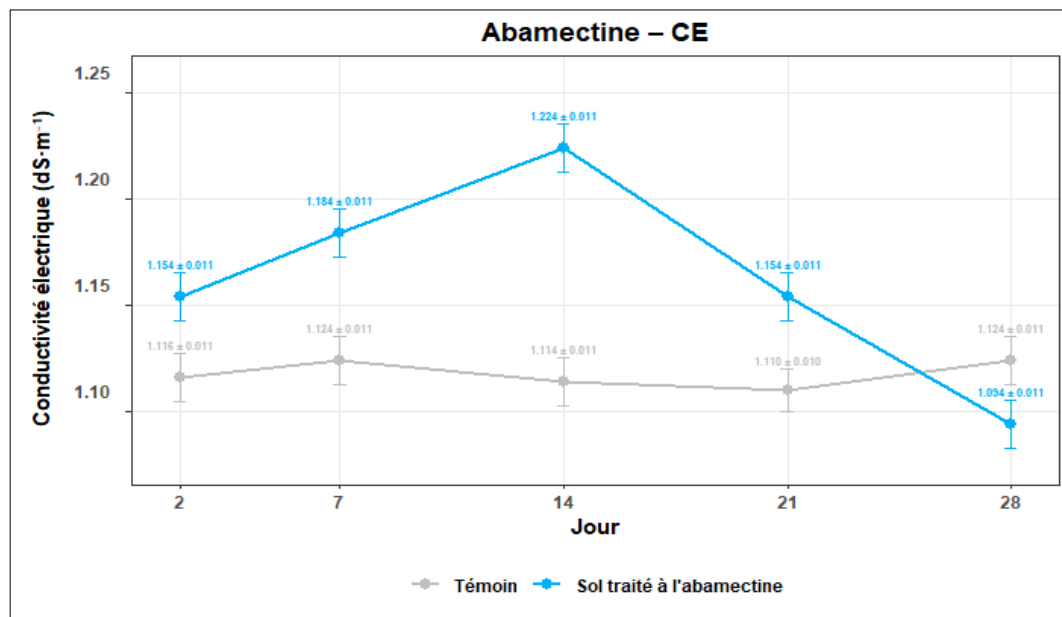


**Figure 30.** Effet du glyphosate sur la CE du sol (p-value < 0,05)

### VII.2.3.1.2. Évolution de la conductivité électrique (CE) du sol sous l'effet d'Abamectine

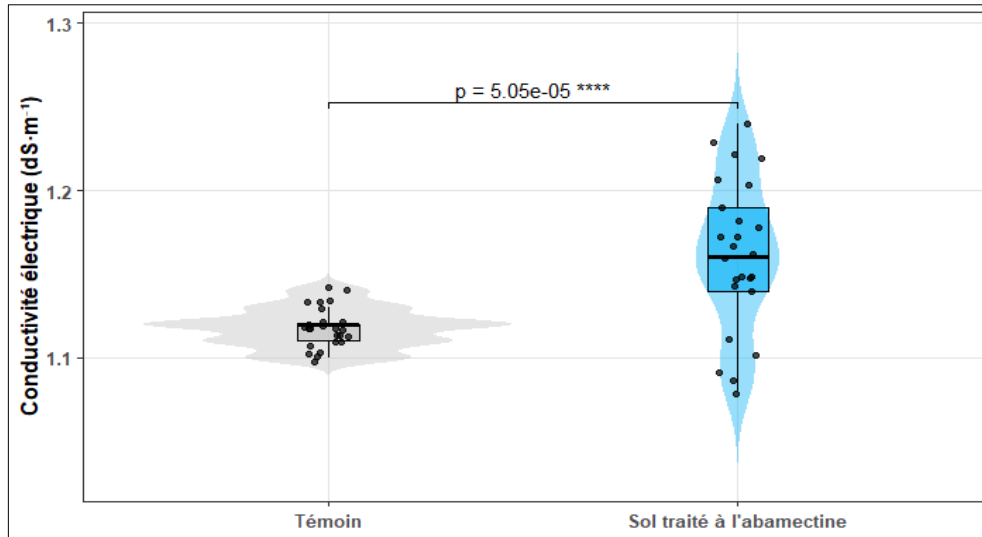
L'évolution de la conductivité électrique (CE) du sol en réaction à l'abamectine révèle une grande différence entre le sol témoin et le sol traité (figure 31). Dans le sol témoin, la CE demeure relativement stable, avec des fluctuations limitées autour de  $1,116 \pm 0.011$   $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  au jour 2,  $1,124 \pm 0.011$   $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  au jour 7 puis  $1,114 \pm 0.011$   $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  au jour 14. Une légère baisse est observée au jour 21 ( $1,110 \pm 0.010$   $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ), suivie d'un retour à  $1,124 \pm 0.011$   $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  au jour 28, ces variations modestes reflétant la stabilité ionique naturelle du sol en l'absence d'apport de pesticide.

En revanche, le sol traité à l'abamectine montre une réponse ionique beaucoup plus marquée. Dès le jour 2, la CE atteint  $1,154 \pm 0,011 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , valeur déjà supérieure à celle du témoin, et cette augmentation se poursuit au jour 7 ( $1,184 \pm 0,011 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ) puis au jour 14 ( $1,224 \pm 0,011 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ), traduisant une libération accrue d'ions dans la solution du sol. Cette augmentation peut être associée aux processus d'adsorption, de dissipation et de dégradation de l'abamectine dans le sol, susceptibles de modifier temporairement l'équilibre ionique (Dionisio et Rath, 2016), ainsi qu'aux perturbations induites sur l'activité microbienne du sol, pouvant influencer la minéralisation et la disponibilité des éléments solubles (Qiu *et al.*, 2022). À partir du jour 14, une diminution progressive de la CE est observée, avec des valeurs de  $1,154 \pm 0,011 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$  au jour 21 puis  $1,094 \pm 0,011 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$  au jour 28. Ce retour vers des valeurs proches de celles du témoin suggère une dissipation progressive de l'abamectine et une réorganisation du complexe adsorbant du sol, conduisant à une réduction des ions solubles dans la solution du sol.



**Figure 31.** Évolution de la conductivité électrique du sol sous abamectine (J2–J28)

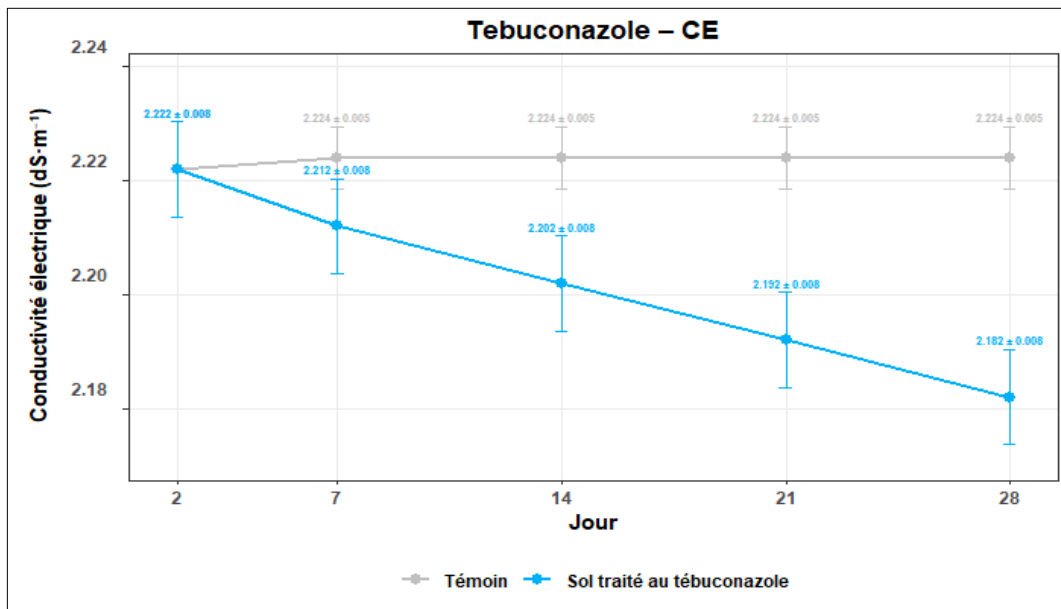
Dans les conditions de notre étude, la conductivité électrique du sol augmente de manière significative après l'application de l'abamectine. Le témoin présente des valeurs proches de 1,12 ds/m alors que les valeurs du sol traité se situent autour de 1,2 à 1,25 ds/m. La p-value de 0,00245 indique une différence significative entre les deux groupes (figure 32).



**Figure 32.** Effet de l'abamectine sur la CE (p-value < 0,05)

### VII.2.3.1.3. Évolution de la conductivité électrique (CE) du sol sous l'effet Tubéconazole

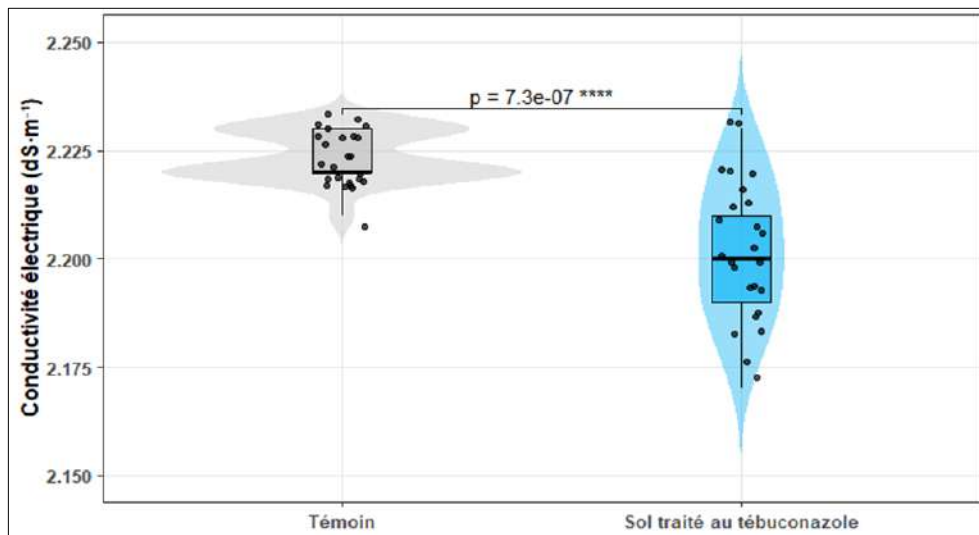
La conductivité électrique (CE) témoigne de la quantité totale d'ions dissous dans le sol et constitue un bon indicateur des transformations biochimiques et des processus de minéralisation. Dans le cadre de ce suivi, les variations observées diffèrent nettement entre le sol témoin et le sol traité au tébuconazole (figure 33).



**Figure 33.** Évolution de la conductivité électrique du sol sous tébuconazole (J2–J28)

Dans le sol témoin, les valeurs varient autour de  $2.224 \pm 0.005 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$  quel que soit le jour de mesure (2, 7, 14, 21 ou 28). À l'inverse, dans le sol traité au tébuconazole, la conductivité électrique suit une tendance décroissante au fil du temps, allant de  $2.222 \pm 0.008 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$  au jour 2, la CE diminue graduellement à  $2.212 \pm 0.008$  (jour 7), puis  $2.202 \pm 0.008$  (jour 14),  $2.192 \pm 0.008$  (jour 21), pour atteindre  $2.182 \pm 0.008 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$  au jour 28. Cette diminution régulière et cumulée suggère que le tébuconazole réduit la concentration en ions solubles, probablement en inhibant certaines activités microbiennes et enzymatiques responsables de la minéralisation des nutriments dans le sol, comme l'ont montré plusieurs études sur l'effet des fongicides sur la chimie et la biologie du sol (Singh *et al.*, 2018).

La figure 34 montre que le témoin présente une CE stable autour de 2,23 dS/m, tandis que le sol traité affiche des valeurs légèrement inférieures, centrées autour de 2,20 dS/m. Le test statistique révèle une p-value très faible ( $p = 0,00000304$ ), indiquant une différence hautement significative.



**Figure 34.** Effet du Tébuconazole sur la CE ( $p$ -value  $< 0,05$ )

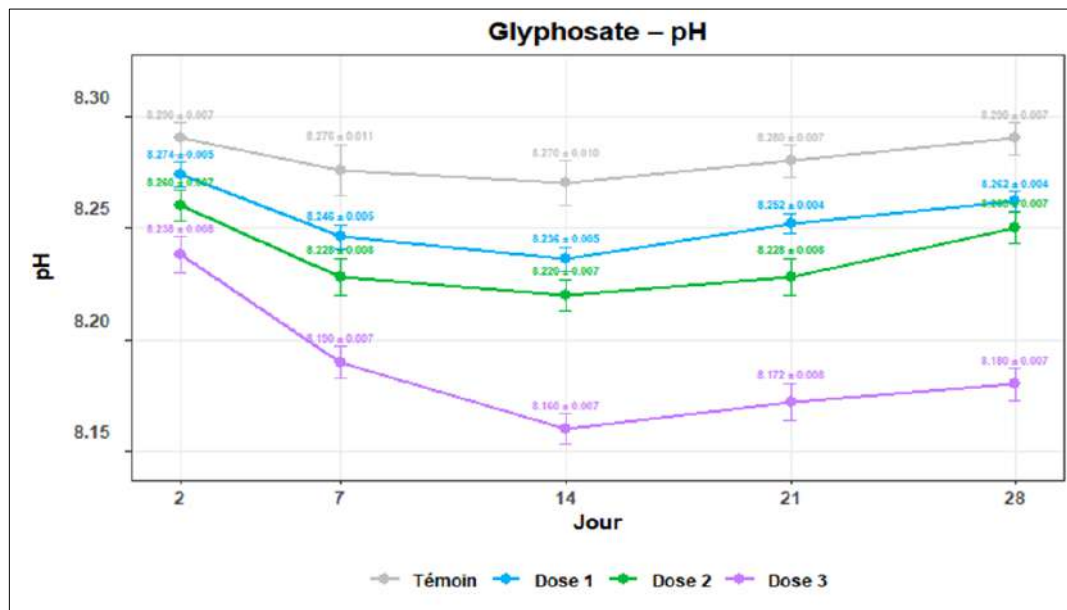
## VII.2.3.2. Variation du pH du sol

### VII.2.3.2.1. Évolution du pH du sol sous l'effet du glyphosate

L'évolution du pH montre clairement un effet du glyphosate dépendant de la dose appliquée. Le sol témoin reste stable tout au long de l'expérimentation, avec des valeurs comprises entre  $8,276 \pm 0,011$  et  $8,290 \pm 0,007$ , indiquant l'absence de fluctuation notable en conditions non traitées, contrairement aux sols traités qui présentent une acidification progressive d'ampleur croissante avec la dose. Pour la Dose 1, le pH passe de  $8,274 \pm 0,005$

au jour 2 à  $8,236 \pm 0,005$  au jour 14, avant de remonter à  $8,262 \pm 0,004$  au jour 28. La Dose 2 amplifie cette dynamique avec une diminution de  $8,260 \pm 0,007$  à  $8,220 \pm 0,007$  entre les jours 2 et 14 suivie d'un léger redressement jusqu'à  $8,258 \pm 0,006$  au jour 28. La réponse la plus marquée est observée pour la Dose 3, où le pH chute de  $8,238 \pm 0,008$  au jour 2 à  $8,160 \pm 0,007$  au jour 14, soit la baisse la plus importante enregistrée avant de remonter légèrement jusqu'à  $8,180 \pm 0,007$  à la fin du suivi (figure 35).

Ces résultats confirment que l'acidification du sol est proportionnelle à la concentration de glyphosate appliquée. Cette variation est liée à l'adsorption du glyphosate par les particules d'argile et la matière organique, ainsi qu'aux interactions avec les ions  $H^+$  du sol, limitant sa dissociation directe (Borggaard et Gimsing, 2008; Battaglin *et al.*, 2005). À la fin de l'expérimentation, les valeurs tendent à se rapprocher, suggérant une stabilisation chimique rapide et un impact modéré du glyphosate sur ce paramètre physico-chimique.



**Figure 35.** Évolution du pH du sol Glyphosate sous glyphosate (J2–J28)

Les tests statistiques indiquent que les différences entre le témoin et les trois doses sont significatives, avec des p-values particulièrement faibles pour les doses 2 et 3, traduisant un effet très marqué et hautement significatif (figure 36).

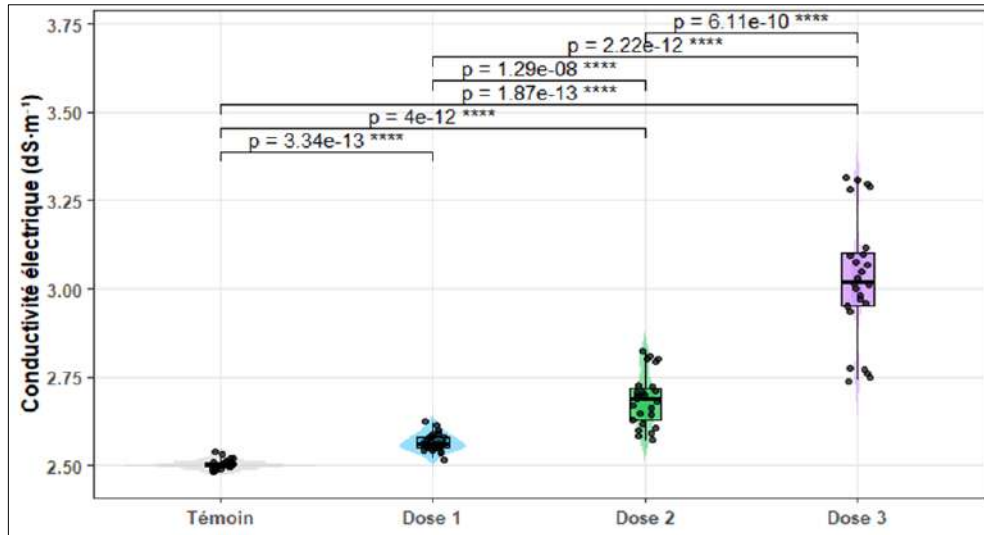


Figure 36. Effet du glyphosate sur le pH du sol ( $p$ -value  $< 0,05$ )

### VII.2.3.2.2. Évolution du pH du sol sous l'effet d'abamectine

L'évolution du pH du sol en présence d'abamectine met en évidence un effet transitoire et modéré du pesticide au cours des quatre semaines de suivi (figure 37).

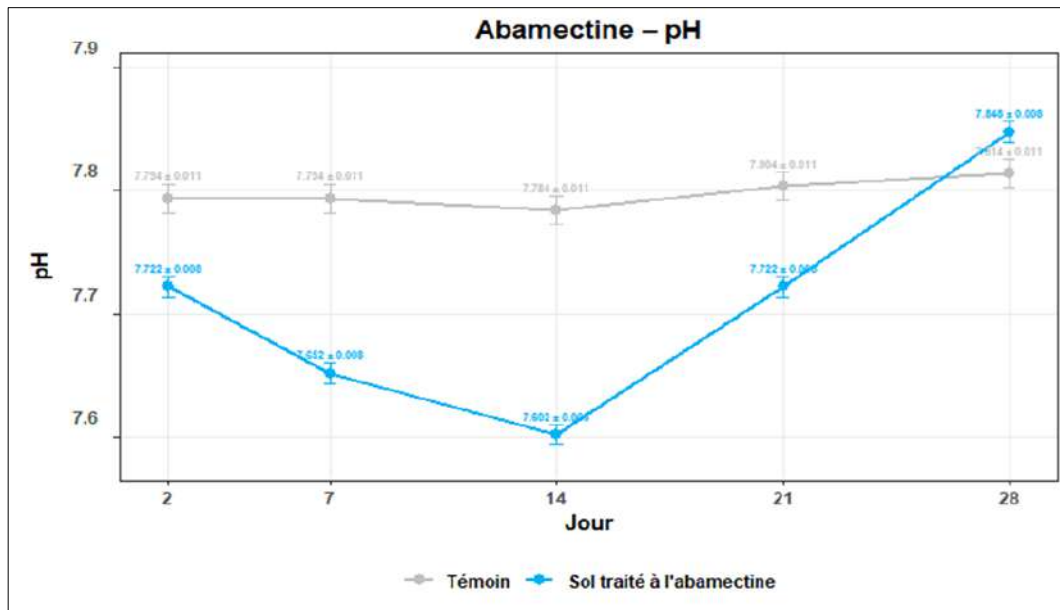


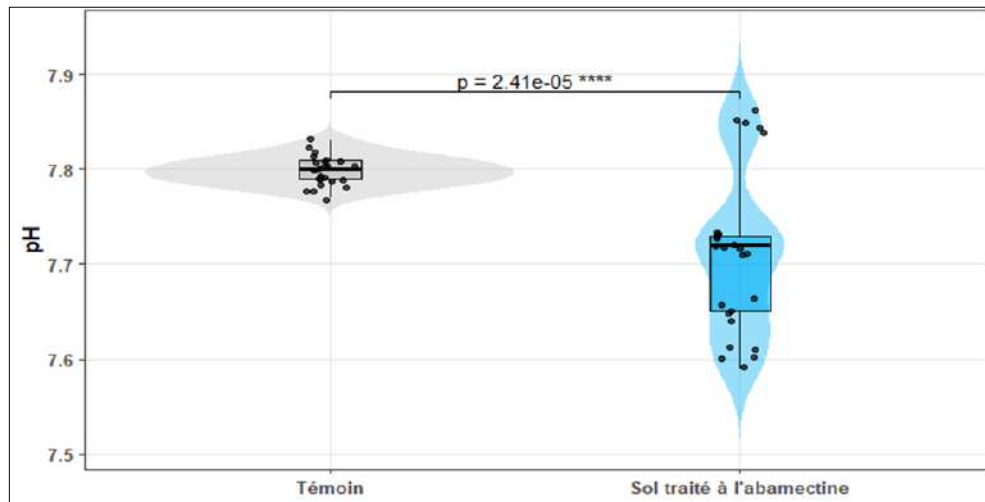
Figure 37. Évolution du pH du sol sous l'abamectine (J2–J28)

Le sol témoin conserve une stabilité remarquable avec des valeurs comprises entre  $7,794 \pm 0,011$  au jour 2 et  $7,814 \pm 0,011$  au jour 28 ce qui confirme l'absence de variations naturelles. En revanche, le sol traité à l'abamectine présente une diminution initiale du pH suivie d'une remontée progressive, les valeurs passent de  $7,722 \pm 0,008$  au jour 2 à  $7,652 \pm 0,008$  au jour 7 puis atteignent un minimum de  $7,602 \pm 0,008$  au jour 14, cette chute

transitoire suggère une acidification légère du milieu. À partir du jour 14 une inversion de tendance est observée, le pH augmente de manière continue pour atteindre  $7,722 \pm 0,008$  au jour 21 puis  $7,848 \pm 0,008$  au jour 28

Cette légère baisse du pH peut être attribuée à la dégradation de l'abamectine et à la production de métabolites légèrement acides. Des études expérimentales ont montré que les avermectines peuvent provoquer de faibles variations du pH en modifiant temporairement les équilibres ioniques et les processus biogéochimiques du sol. De plus, les interactions entre l'abamectine et la matière organique peuvent entraîner une libération limitée de protons  $H^+$  au cours de la dégradation (Dionisio et Rath, 2016 ; Qiu et al., 2022).

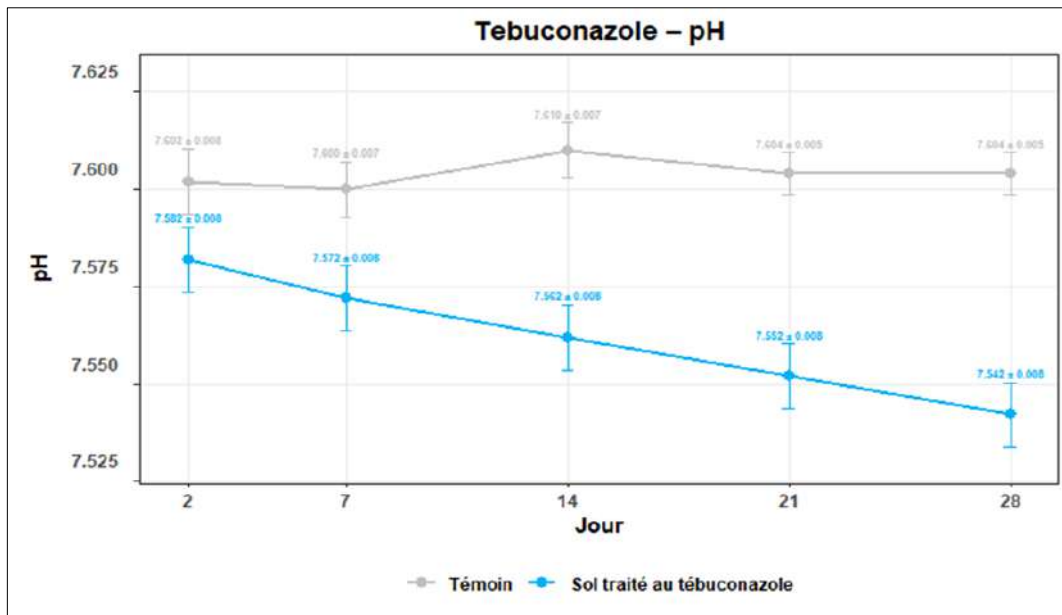
Le test statistique associé révèle une p-value de 0,00437, indiquant que la différence entre le témoin et le sol traité est statistiquement significative (figure 38).



**Figure 38.** Effet de l'abamectine sur le pH du sol ( $p$ -value  $< 0,05$ )

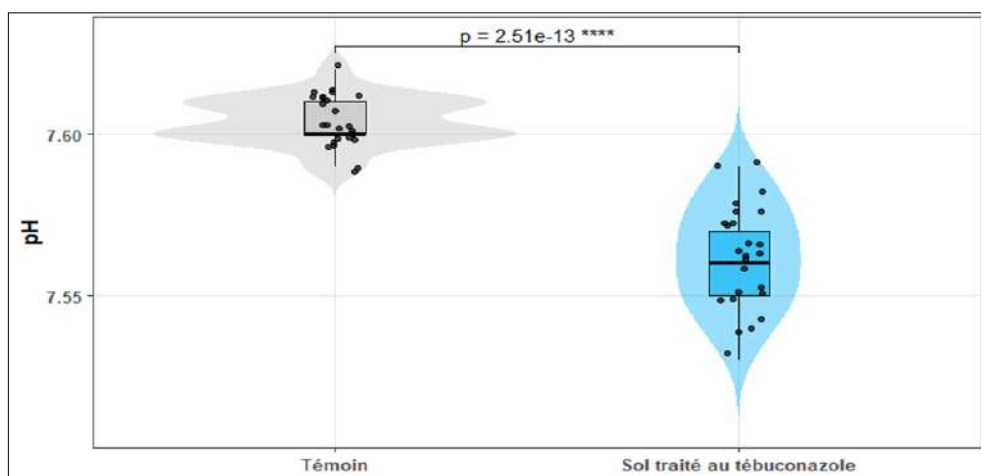
#### VII.2.3.2.3. Évolution du pH du sol sous l'effet de tébuconazole

L'évolution du pH du sol en présence de tébuconazole montre une réponse relativement modérée mais néanmoins progressive comparée au sol témoin. Dans le sol témoin, le pH reste stable,  $7,602 \pm 0,008$  au jour 2,  $7,600 \pm 0,007$  au jour 7 puis une légère hausse à  $7,610 \pm 0,007$  au jour 14 avant un retour à  $7,604 \pm 0,005-0,004$  aux jours 21 et 28. En revanche, le sol traité au tébuconazole présente une diminution continue du pH, signe d'une acidification progressive du milieu. Le pH passe de  $7,582 \pm 0,008$  au jour 2 à  $7,572 \pm 0,008$  au jour 7, puis à  $7,562 \pm 0,008$  au jour 14. Cette baisse se poursuit jusqu'à  $7,552 \pm 0,008$  au jour 21, pour atteindre un minimum de  $7,542 \pm 0,008$  au jour 28 (figure 39).



**Figure 39.** Évolution du pH du sol sous tébuconazole(J2–J28)

Cette baisse modérée du pH peut être expliquée par l'intégration du tébuconazole dans la phase solide du sol et par ses effets indirects sur les processus microbiens et biochimiques. Les fongicides triazolés, tels que le tébuconazole, modifient la structure des communautés microbiennes et l'activité des enzymes du sol, ce qui peut influencer l'équilibre ionique et, par conséquent, le pH, notamment dans les sols alcalins (Ferreira *et al.*, 2009; Gan *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2021). De plus, les interactions entre les molécules fongicides et les colloïdes du sol peuvent induire de légères variations de l'acidité en raison de la libération partielle de protons ( $H^+$ ) au cours de la dégradation du composé (Ferreira *et al.*, 2009). Le test statistique associé indique une p-value extrêmement faible ( $p = 0.0000000176$ ), démontrant une différence hautement significative entre les deux groupes (figure 40).

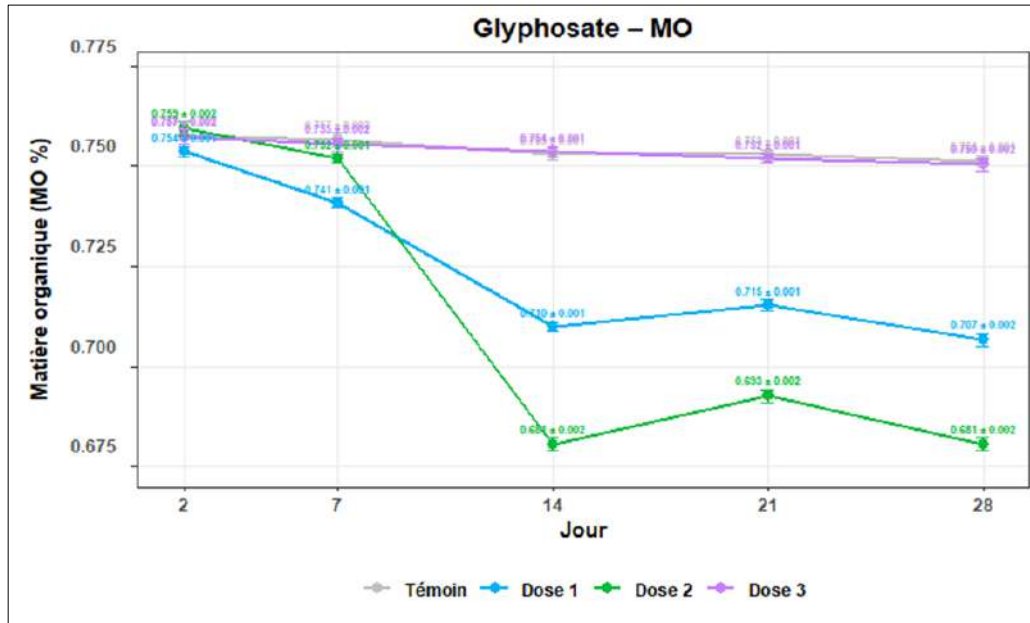


**Figure 40.** Effet du Tébuconazole sur le pH du sol ( $p$ -value < 0,05)

### VII.2.3.3. Variation de la matière organique du sol

#### VII.2.3.3.1. Evolution de la MO du sol sous l'effet du glyphosate

L'évolution de la matière organique du sol (MO %) montre des variations marquées selon la dose de glyphosate appliquée et le temps d'incubation (figure 41).



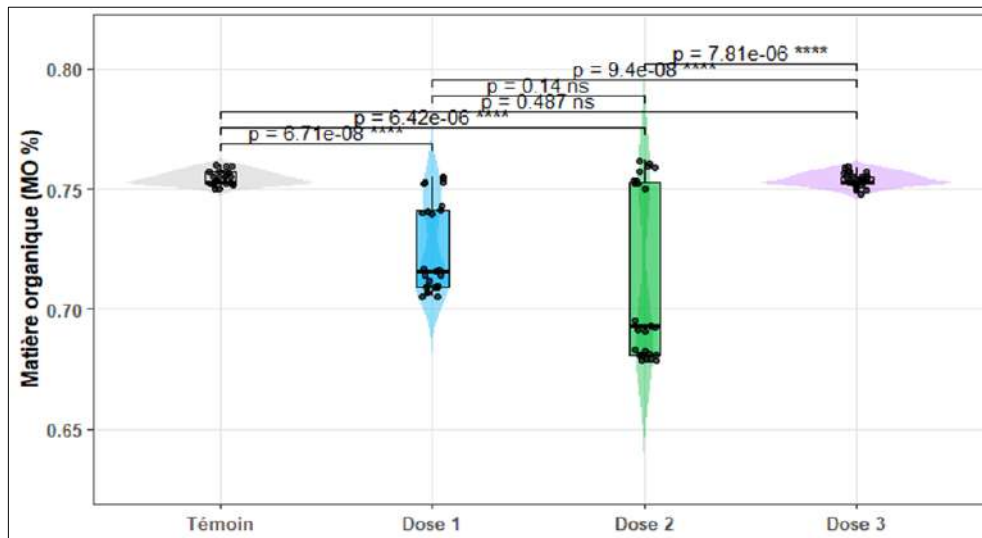
**Figure 41.** Evolution de la matière organique (MO) du sol sous Glyphosate (J2–J28)

Le sol témoin reste globalement stable tout au long de l'expérimentation, avec des valeurs comprises entre  $0,754 \pm 0,001$  et  $0,752 \pm 0,001$ , ce qui confirme l'absence de fluctuations naturelles importantes en conditions non traitées. En revanche, sous dose 1, la MO diminue progressivement durant les deux premières semaines, passant de  $0,751 \pm 0,001$  au jour 2 à  $0,741 \pm 0,001$  au jour 7, puis atteignant  $0,710 \pm 0,001$  au jour 14. Une remontée modérée est observée au jour 21 ( $0,715 \pm 0,001$ ), suivie d'une stabilisation autour de  $0,707 \pm 0,001$  au jour 28. L'effet est nettement plus marqué sous dose 2 où la matière organique chute fortement entre les jours 2 et 14, les valeurs passent de  $0,759 \pm 0,002$  au jour 2 à  $0,752 \pm 0,001$  au jour 7 puis atteignent un minimum à  $0,681 \pm 0,002$  au jour 14 représentant la baisse la plus importante observée dans cette étude. Une remontée partielle survient au jour 21 ( $0,693 \pm 0,002$ ) mais la valeur retombe ensuite à  $0,681 \pm 0,002$  au jour 28. La dose 2 apparaît ainsi comme la concentration ayant l'impact le plus significatif sur la dégradation de la matière organique, particulièrement durant la phase initiale d'exposition. À l'inverse, la dose 3 ne provoque presque aucune perturbation notable, les valeurs se maintiennent entre  $0,759 \pm 0,002$  et  $0,750 \pm 0,001$  du jour 2 au jour 28, indiquant une absence d'effet à

concentration élevée. Cette stabilité inattendue par rapport à la dose 2 suggère une réponse non linéaire du sol au glyphosate, probablement liée à des modifications de la dynamique microbienne, de la biodégradabilité du pesticide ou de la disponibilité du substrat organique.

Ces résultats suggèrent que le glyphosate peut provoquer une minéralisation accrue de la matière organique à la dose recommandée, probablement en raison d'une stimulation temporaire de l'activité microbienne. En revanche, l'augmentation de la dose jusqu'à la 3<sup>ème</sup> dose semble induire un effet inhibiteur, réduisant l'activité microbienne et limitant ainsi la dégradation de la matière organique (Zabaloy et al., 2012 ; Nguyen et al., 2016).

Les tests statistiques montrent que les réductions observées aux doses 1 et 2 sont significatives par rapport au témoin, alors qu'aucune différence n'est détectée pour la dose 3 (figure 42).



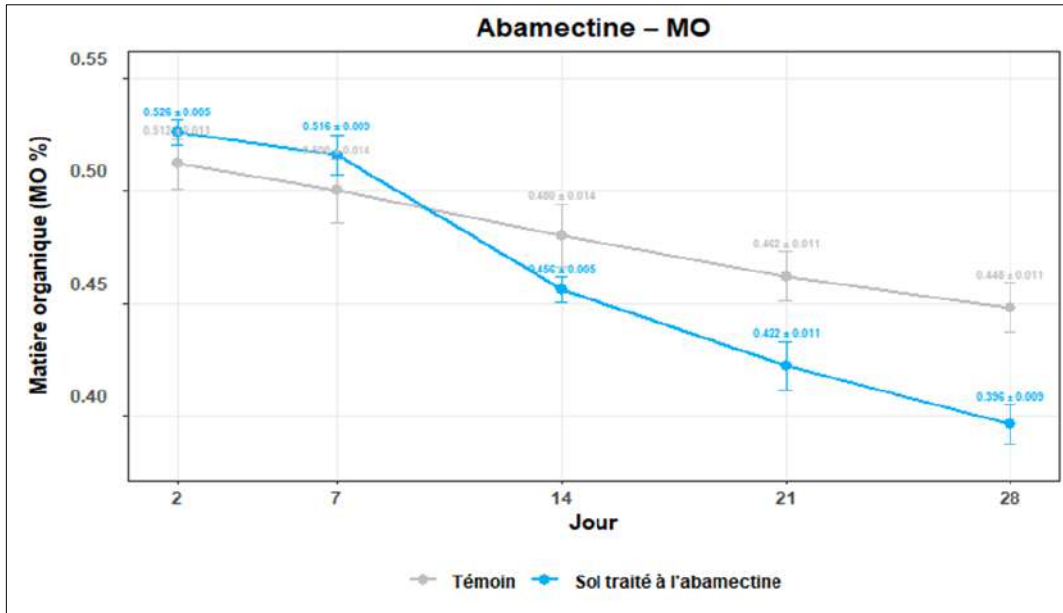
**Figure 42.** Effet du glyphosate sur la matière organique (p-value < 0,05)

#### VII.2.3.3.2. Evolution de la MO du sol sous l'effet d'abamectine

L'évolution de la matière organique (MO %) du sol en présence d'abamectine révèle une réduction progressive et continue, le sol témoin présente une baisse modérée mais régulière de la MO %, passant de  $0,512 \pm 0,011$  % au jour 2 à  $0,498 \pm 0,014$  % au jour 7 puis à  $0,480 \pm 0,014$  % au jour 14, cette diminution se poursuit jusqu'à  $0,448 \pm 0,014$  % au jour 28, correspondant au comportement naturel du sol en absence de pesticides.

En revanche, le sol traité à l'abamectine montre une diminution plus rapide et plus prononcée de la MO %, les valeurs chutent de  $0,526 \pm 0,005$  % au jour 2 à  $0,516 \pm 0,009$  % au jour 7 puis atteignent  $0,456 \pm 0,005$  % au jour 14, cette diminution marquée se poursuit

avec  $0,422 \pm 0,011$  % au jour 21 pour atteindre un minimum de  $0,396 \pm 0,011$  % au jour 28, soit une réduction presque deux fois plus importante que celle observée dans le témoin (figure 43).



**Figure 43.** Évolution de la matière organique du sol sous Abamectine (J2–J28)

En effet, l'abamectine modifie la structure et la diversité des communautés microbiennes du sol, en particulier à court terme, ce qui peut influencer les processus biologiques et biochimiques du sol (Qiu et al., 2022). Par ailleurs, cette molécule présente un fort potentiel d'adsorption sur la matière organique et les particules minérales, ce qui conditionne sa biodisponibilité et son devenir dans le sol (Dionisio et Rath, 2016). Nos observations suggèrent ainsi une minéralisation accrue de la matière organique, mettant en évidence l'influence directe de l'abamectine sur la dynamique de la MO du sol.

Le test statistique indique une p-value égale à 1, ce qui révèle l'absence totale de différence significative entre les deux conditions (figure 44).

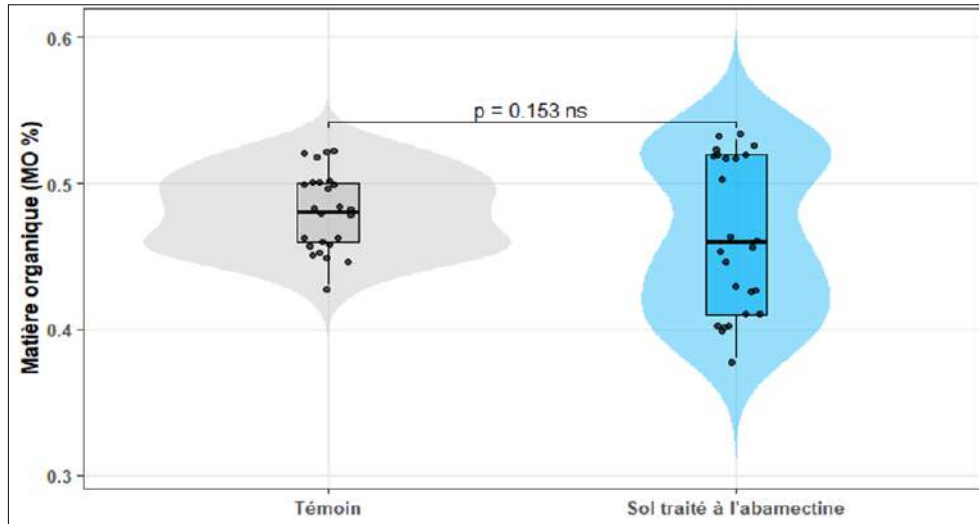


Figure 44. Effet de l'abamectine sur la matière organique ( $p$ -value  $< 0,05$ )

### VII.2.3.3.3. Evolution de la MO du sol sous l'effet du tébuconazole

La figure 45 montre l'évolution de la teneur en matière organique (MO%) du sol sur une période de 28 jours, comparant le sol traité avec le Tébuconazole et le témoin.

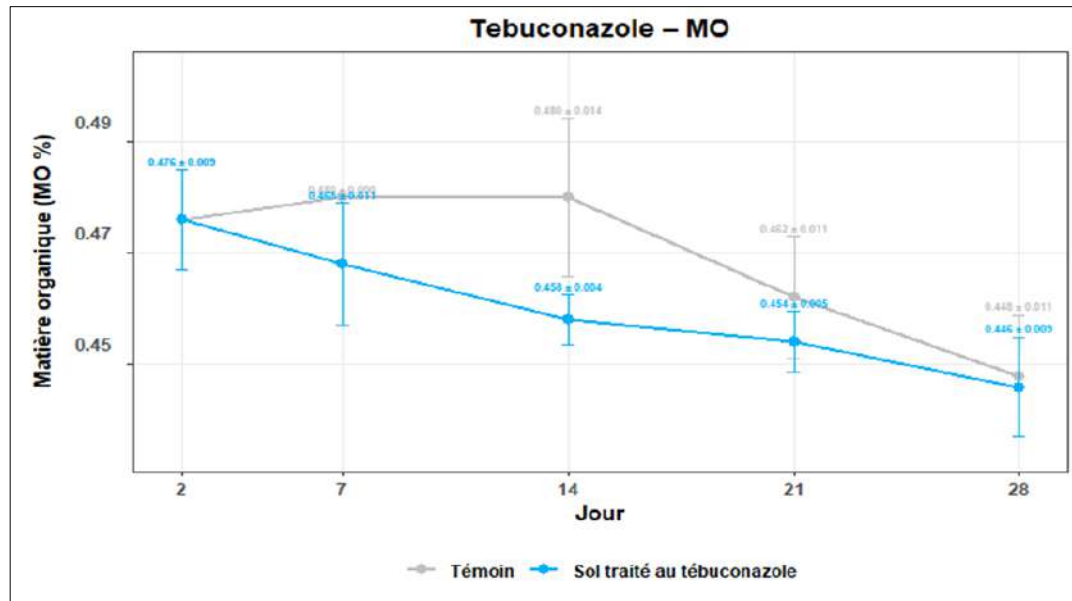


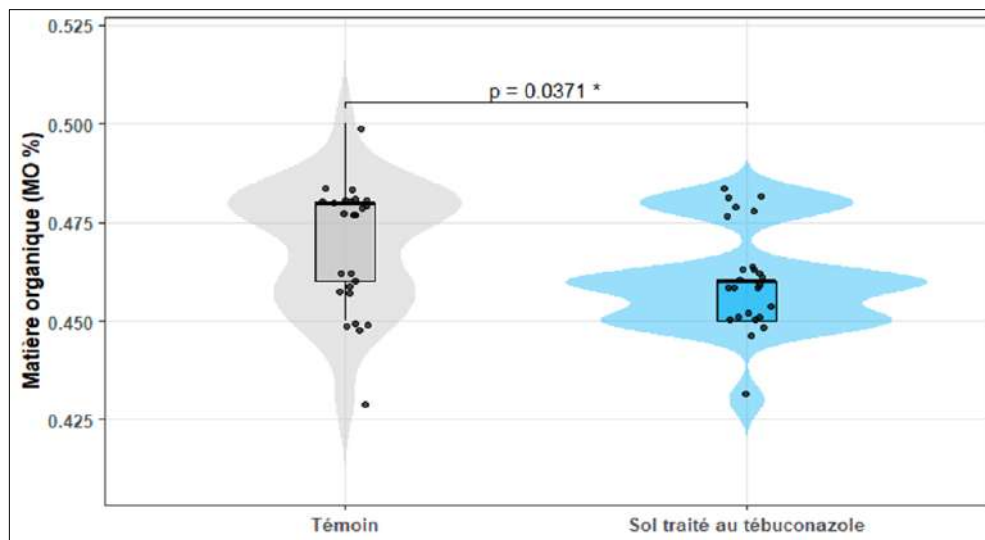
Figure 45. Évolution de la matière organique du sol sous Tébuconazole (J2–J28)

L'application de tébuconazole entraîne une diminution progressive de la matière organique (MO %) du sol plus marquée que celle observée dans le sol témoin. Dans le sol témoin, la MO reste globalement élevée et assez stable au début de l'essai, les valeurs se situent autour de 0,47–0,48 % avec par exemple 0,480 ± 0,014 % au jour 14. Ensuite, une baisse modérée est observée, la MO passant à 0,462 ± 0,011 % au jour 21 puis à 0,448 ±

0,010 % au jour 28. Cette diminution tardive reflète surtout une évolution naturelle du stock organique du sol au cours du temps. En revanche, dans le sol traité au tébuconazole, la MO diminue de façon continue, à partir d'une valeur proche de  $0,476 \pm 0,009$  % au jour 2, la matière organique diminue à environ 0,468 % au jour 7, puis  $0,458 \pm 0,004$  % au jour 14. La tendance se poursuit avec  $0,454 \pm 0,005$  % au jour 21 et atteint  $0,446 \pm 0,008$  % au jour 28. Sur l'ensemble de la période, la perte de MO est donc plus importante et plus régulière dans le sol traité que dans le témoin.

Ce résultat concorde avec des études précédentes montrant que l'exposition au tébuconazole peut réduire la biomasse microbienne et modifier la diversité des communautés bactériennes, affectant ainsi la dégradation organique du sol (Muñoz-Leoz et al., 2011 ; Han et al., 2021).

Le test statistique affiche une p-value de 0.574, indiquant l'absence de différence significative (figure 46).



**Figure 46.** Effet du Tébuconazole sur la matière organique (p-value < 0,05)

## VII.2.4. Impact des pesticides sur les paramètres microbiologiques du sol

### VII.2.4.1. Impact des pesticides sur les populations bactériennes et fongiques du sol

#### VII.2.4.1.1. Impact de glyphosate sur les populations bactériennes et fongiques du sol

L'évolution des populations bactériennes du sol met en évidence des réponses contrastées selon la dose de glyphosate appliquée et le temps. Dans le sol témoin, les valeurs demeurent très stables, comprises entre  $40 \pm 0,707 \times 10^6$  cfu·g<sup>-1</sup> et  $41 \pm 0,707 \times 10^6$  cfu·g<sup>-1</sup>,

indiquant une communauté bactérienne relativement constante en l'absence de perturbation chimique. Sous dose 1, une stimulation légère mais progressive de la biomasse bactérienne est observée au cours des trois premières semaines, les valeurs passent de  $45,8 \pm 0,837 \times 10^6$  au jour 2 à  $47,8 \pm 0,837 \times 10^6$  au jour 7 puis atteignent un maximum de  $50,8 \pm 0,837 \times 10^6$  au jour 14, une baisse modérée est ensuite enregistrée avec  $48,8 \pm 0,837 \times 10^6$  au jour 21 et  $46,8 \pm 0,837 \times 10^6$  au jour 28. Cette dynamique indique une réponse transitoirement stimulée probablement liée à un apport en substrats carbonés dérivés de la dégradation du glyphosate. La dose 2 induit la réponse la plus marquée, les populations bactériennes augmentent fortement passant de  $50 \pm 0,707 \times 10^6$  au jour 2 à  $55,8 \pm 0,837 \times 10^6$  au jour 7 puis à  $63 \pm 0,707 \times 10^6$  au jour 14. Cette hausse remarquable suggère une stimulation bactérienne importante. Après ce pic, une diminution graduelle survient avec  $60 \pm 0,707 \times 10^6$  au jour 21 et  $57 \pm 0,707 \times 10^6$  au jour 28 tout en restant largement supérieure aux autres traitements. À l'opposé, la dose 3 présente un effet inhibiteur sur les populations bactériennes, les valeurs diminuent de manière quasi linéaire passant de  $40 \pm 0,707 \times 10^6$  au jour 2 à  $37,8 \pm 0,837 \times 10^6$  au jour 7, puis à  $35,8 \pm 0,837 \times 10^6$  au jour 14, la baisse se poursuit au jour 21 ( $33,800 \pm 0,837 \times 10^6$ ) et atteint  $31,800 \pm 0,837 \times 10^6$  au jour 28. Ce profil suggère que des doses élevées de glyphosate peuvent exercer un stress toxique sur la communauté bactérienne réduisant sa densité de manière progressive (figure 47).

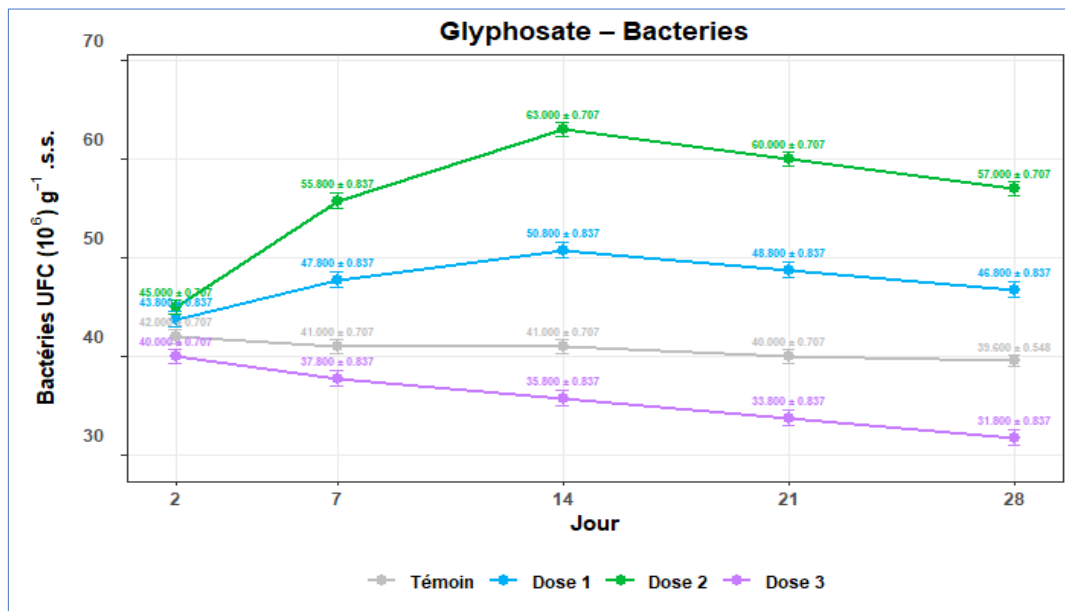
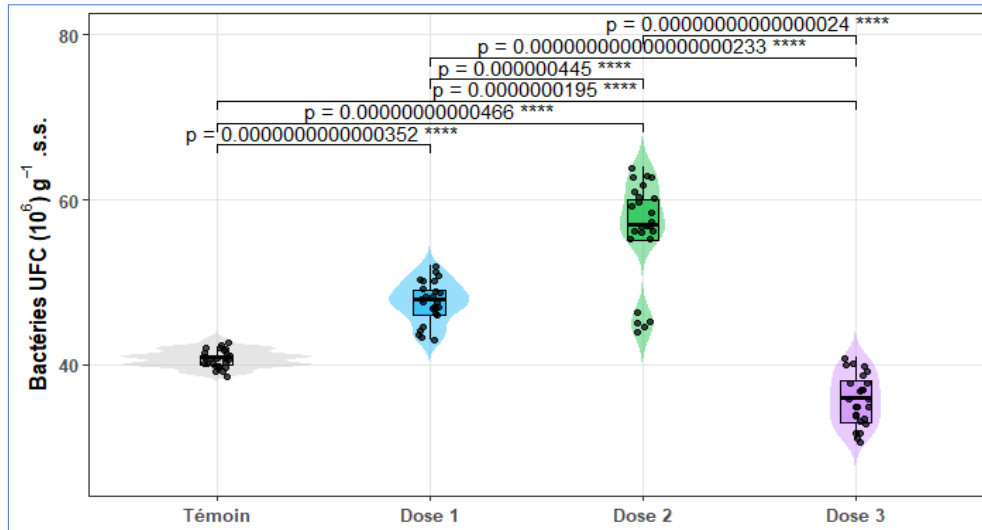


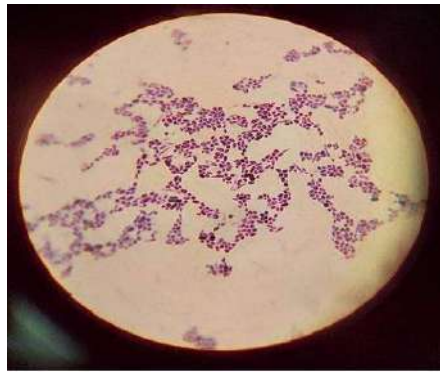
Figure 47. Évolution des bactéries du sol sous Glyphosate (J2-J28)

Les tests statistiques montrent que les différences entre le témoin et les deux premières doses sont significatives, ce qui indique que le glyphosate stimule l'activité et la croissance bactérienne aux faibles et moyennes doses (figure 48).

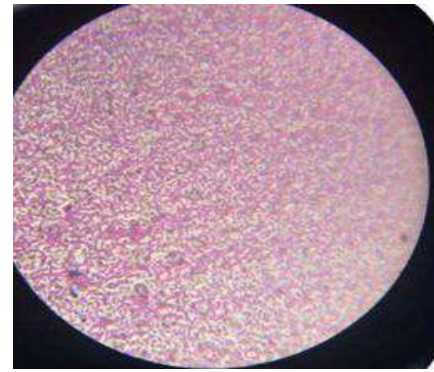


**Figure 48.** Effet du glyphosate sur la densité bactérienne (p-value < 0,05)

L'observation microscopique a montré la présence des bactéries Gram-positives et Gram-négatives dans les échantillons de sols traités par le glyphosate (dose 2) (figure 49), indiquant que les deux types peuvent persister après application de l'herbicide, bien que des modifications dans leur proportion ou leur distribution aient été observées. Cette constatation est soutenue par des études récentes : par exemple, une souche récemment isolée de *Bacillus albus* (Gram-positif) a montré sa capacité à dégrader le glyphosate dans des systèmes sols et sédiments (Chen et al., 2025), tandis que des souches de *Pseudomonas spp.* (Gram-négatives) issues de sols contaminés ont également démontré leur aptitude à utiliser le glyphosate comme source de carbone, entraînant sa dégradation (Zhao et al., 2015). Ces résultats suggèrent que la communauté bactérienne du sol possède différents mécanismes permettant la survie ou la transformation du glyphosate.



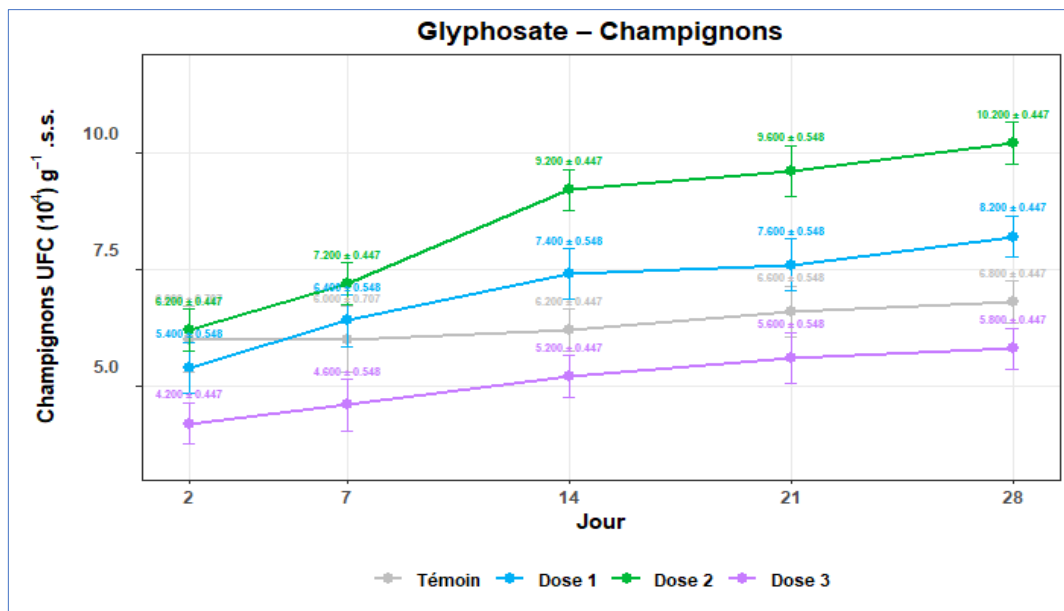
A. Bactéries à Gram (+)



B. Bactéries à Gram (-)

**Figure 49.** Observation par microscope optique des bactéries dans le sol (Gross x 40) (élaborée par l’auteure, 2026).

Pour les champignons, la figure 50 montre une augmentation progressive du nombre de colonies au cours de l’expérimentation, avec des différences marquées selon la dose de glyphosate appliquée.

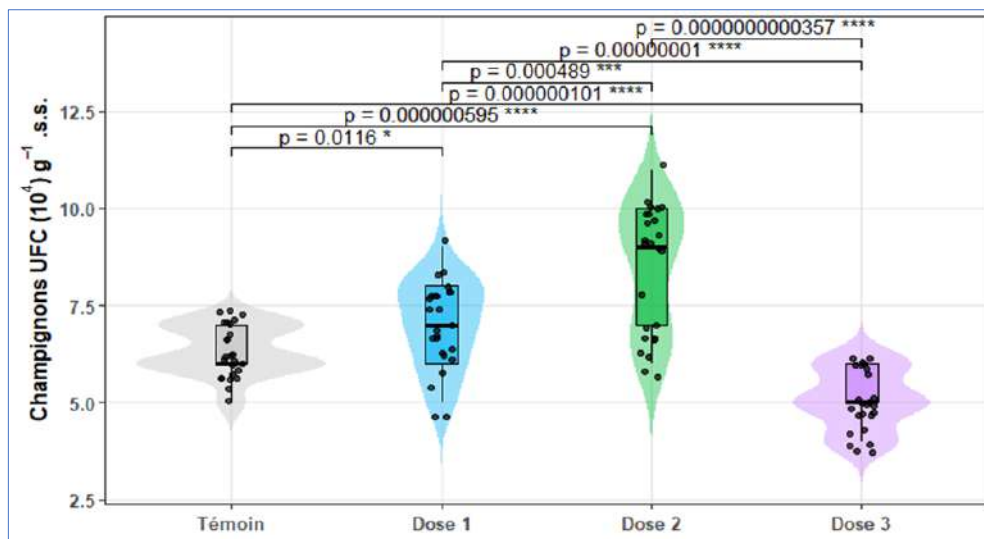


**Figure 50.** Évolution de la biomasse fongique du sol sous Glyphosate (J2–J28)

Chez le témoin, les valeurs augmentent régulièrement, passant de  $6,200 \pm 0,548 \times 10^4$  cfu·g<sup>-1</sup> au jour 2 à  $6,800 \pm 0,447 \times 10^4$  cfu·g<sup>-1</sup> au jour 28, traduisant une évolution naturelle de la biomasse fongique dans un sol non perturbé. Sous Dose 1, la croissance fongique est plus importante que dans le témoin, les valeurs passent de  $6,400 \pm 0,548 \times 10^4$  cfu·g<sup>-1</sup> au jour 2 à  $7,200 \pm 0,447 \times 10^4$  au jour 7 puis atteignent  $7,400 \pm 0,548 \times 10^4$  au jour 14 et  $7,600 \pm 0,548 \times 10^4$  au jour 21. À la fin de l’expérience, les populations fongiques culminent à

$8,200 \pm 0,447 \times 10^4$  au jour 28. Ces résultats suggèrent que la dose 1 stimule légèrement la croissance fongique, possiblement en augmentant la disponibilité en substrats issus de la dégradation du glyphosate. La Dose 2 induit la réponse la plus marquée, les concentrations fongiques augmentent fortement dès le début passant de  $7,200 \pm 0,447 \times 10^4$  au jour 2 à  $9,200 \pm 0,447 \times 10^4$  au jour 14, puis à  $9,600 \pm 0,548 \times 10^4$  au jour 21 et atteignant un maximum de  $10,200 \pm 0,447 \times 10^4$  au jour 28. Cette dynamique témoigne d'une stimulation fongique très importante, indiquant que cette dose pourrait favoriser les champignons en modifiant l'environnement nutritif ou en réduisant la compétition microbienne. À l'inverse, la dose 3 présente les valeurs les plus faibles, les populations croissent lentement de  $5,200 \pm 0,447 \times 10^4$  au jour 2 à  $5,800 \pm 0,447 \times 10^4$  au jour 28. Comparée aux autres traitements, la dose 3 semble inhiber la croissance fongique, probablement en raison d'un stress toxique élevé ou d'une perturbation excessive de la communauté microbienne.

Les tests statistiques indiquent que les différences entre le témoin et ces deux doses sont significatives, ce qui confirme que les champignons du sol réagissent positivement aux faibles et moyennes doses de glyphosate (figure 51).



**Figure 51.** Effet du glyphosate sur la biomasse fongique (p-value < 0,05)




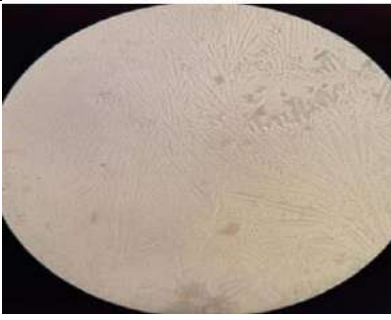
Les microorganismes du sol réagissent différemment selon la concentration de glyphosate appliquée. À faibles concentrations, certaines communautés microbiennes peuvent présenter des changements transitoires dans l'activité métabolique ou respiratoire, bien que ces effets soient généralement faibles et temporaires. En revanche, des doses élevées de glyphosate ont été associées à une réduction de la biomasse fongique et à une

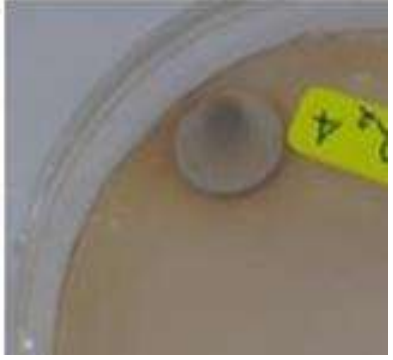
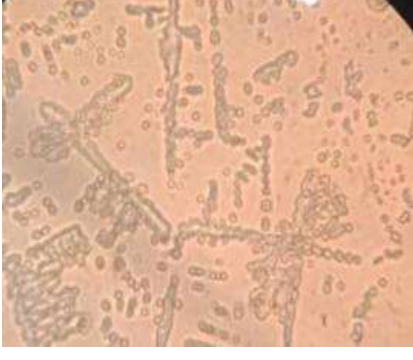

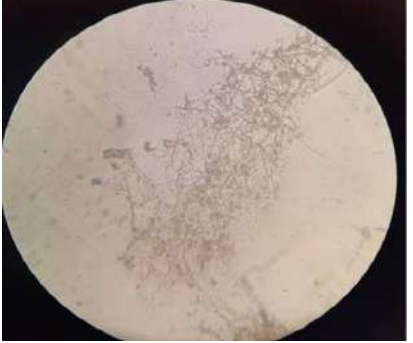

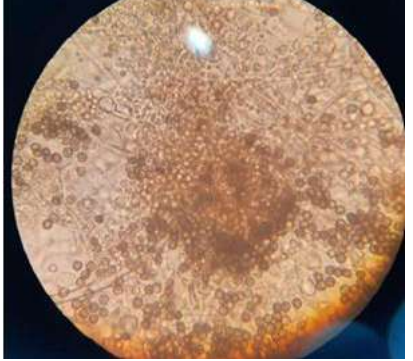
diminution de la richesse de certaines populations, traduisant un effet dépendant de la dose sur la structure de la communauté microbienne.

Ces observations sont cohérentes avec des études expérimentales montrant que l'activité microbienne peut être transitoirement stimulée à faibles doses avant de revenir à l'équilibre ou de décliner sous des concentrations plus élevées (Vázquez et al., 2021).

En ce qui concerne la communauté fongique, certains genres tels que *Fusarium* sp, *Aspergillus niger*, *Trichoderma viride*, *Scopulariopsis* sp et *Penicillium notatum* ont été isolés dans des sols traités par le glyphosate (Tableau 4). Ces micro-organismes sont capables de tolérer la présence de l'herbicide, et dans certaines conditions expérimentales, de le métaboliser afin d'en extraire des nutriments essentiels, ce qui reflète des mécanismes adaptatifs favorisant leur survie malgré le stress chimique (Spinelli et al., 2021).

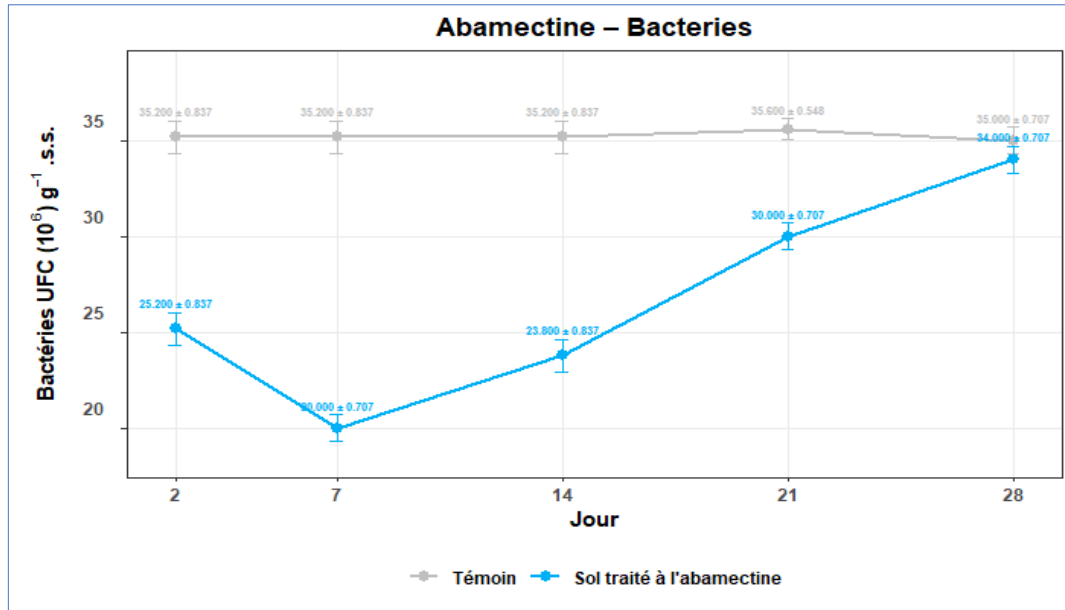
**Tableau 4.** Quelques espèces fongiques identifiées dans le sol traité par le glyphosate.

Nom scientifique	Observation macroscopique	Observation microscopique (Gross x 40)
<i>Fusarium</i> sp		
<i>Trichoderma viride</i>		

<p><i>Scopulariopsis</i> sp</p>		
<p><i>Aspergillus niger</i></p>		
<p><i>Penicillium notatum</i></p>		

#### VII.2.4.1.2. Impact de l'abamectine sur les populations bactériennes et fongiques du sol

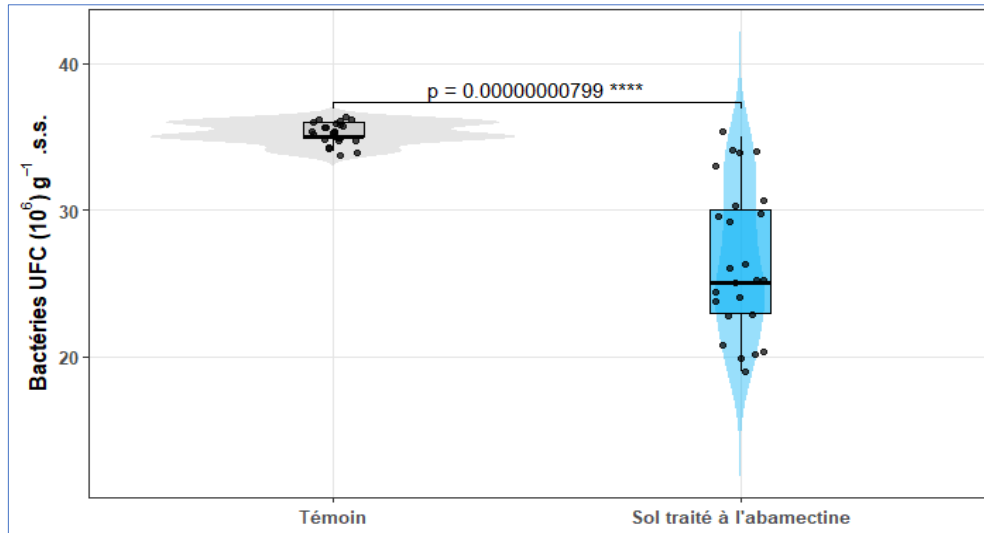
Sous traitement à l'Abamectine, l'évolution des populations bactériennes du sol révèle des réponses différentes entre le sol témoin et le sol traité (figure 52).



**Figure 52.** Évolution des bactéries du sol sous Abamectine (J2–J28)

Dans le sol témoin, les bactéries restent remarquablement stables au cours du suivi : les valeurs varient très légèrement de  $35,200 \pm 0,837 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$  au jour 2 à  $35,600 \pm 0,548 \times 10^6$  au jour 21 avant de revenir à  $35,000 \pm 0,837 \times 10^6$  au jour 28. Cette constance traduit un système microbien non perturbé et bien équilibré. En revanche, le sol traité à l'abamectine présente une dynamique très différente marquée par une forte inhibition initiale suivie d'un rétablissement progressif, au jour 2, la population atteignait  $27,200 \pm 0,837 \times 10^6$  mais chute brutalement à  $20,000 \pm 0,707 \times 10^6$  au jour 7, à partir du jour 7, une recolonisation progressive est observée : la population bactérienne augmente à  $23,800 \pm 0,837 \times 10^6$  au jour 14, puis atteint  $30,000 \pm 0,707 \times 10^6$  au jour 21. Au jour 28, les bactéries du sol traité atteignent  $34,000 \pm 0,837 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$  se rapprochant très fortement des valeurs du sol témoin, ce qui suggère que l'abamectine, bien que fortement perturbatrice dans un premier temps, n'exerce pas d'effet durable sur les communautés bactériennes, qui parviennent à restaurer leur densité initiale à moyen terme.

La figure 53 montre une diminution nette et significative de la population bactérienne du sol après l'application de l'abamectine. La p-value extrêmement faible ( $p = 0.0000000904$ ) confirme que la différence entre les deux groupes est hautement significative. Ces résultats montrent que l'abamectine exerce un effet inhibiteur marqué sur les bactéries du sol.



**Figure 53.** Effet de l'abamectine sur la densité bactérienne ( $p$ -value  $< 0,05$ )

De manière similaire, les populations fongiques du sol montrent des dynamiques distinctes entre le sol témoin et le sol traité à l'abamectine. Dans le sol témoin, les valeurs restent relativement stables, oscillant entre  $6,000 \pm 0,447 \times 10^4$  cfu·g<sup>-1</sup> au jour 2 et  $6,200 \pm 0,447 \times 10^4$  cfu·g<sup>-1</sup> au jour 28. Cette stabilité reflète une dynamique microbienne naturelle non perturbée et caractéristique des sols conservant une activité fongique équilibrée. En revanche, le sol traité à l'abamectine présente une évolution plus contrastée. Une diminution nette des champignons est observée entre les jours 2 et 7 passant de  $5,000 \pm 0,548 \times 10^4$  à  $3,400 \pm 0,548 \times 10^4$  cfu·g<sup>-1</sup> indiquant une inhibition initiale de la croissance fongique. À partir du jour 7, une reprise progressive de l'activité fongique est observée, les valeurs augmentent à  $4,600 \pm 0,548 \times 10^4$  au jour 14, puis à  $5,400 \pm 0,548 \times 10^4$  au jour 21, pour atteindre  $6,200 \pm 0,447 \times 10^4$  au jour 28. Enfin, les niveaux fongiques du sol traité rejoignent ceux du témoin suggérant que l'effet de l'abamectine est principalement transitoire pour ce paramètre microbiologique (figure 54). La  $p$ -value ( $p = 0.00000378$ ) confirme une différence statistiquement très significative. Cette diminution indique que les champignons sont sensibles à l'abamectine (figure 55).

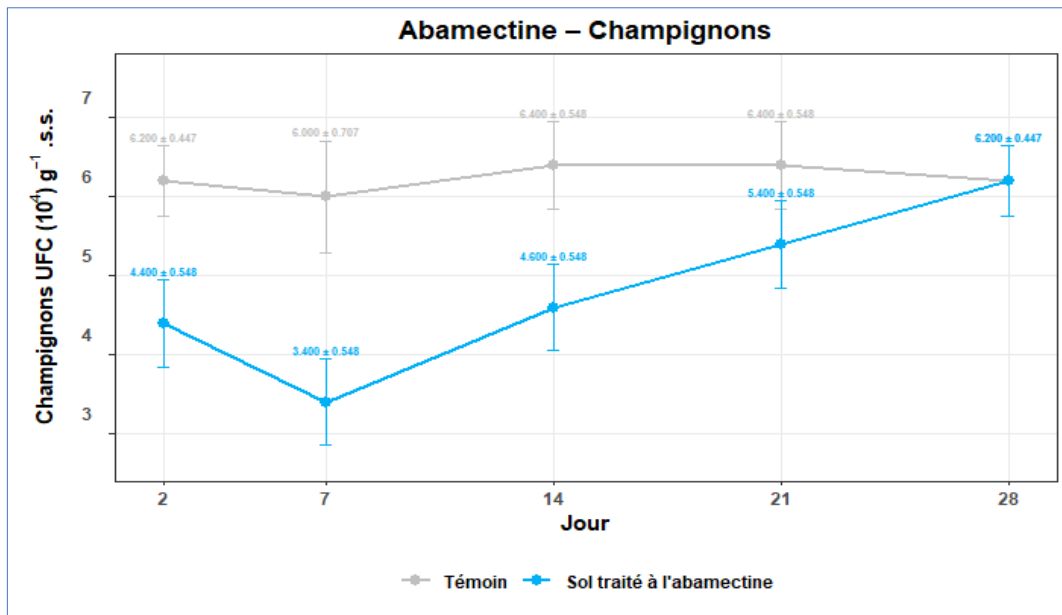


Figure 54. Évolution de la biomasse fongique du sol sous Abamectine (J2–J28)

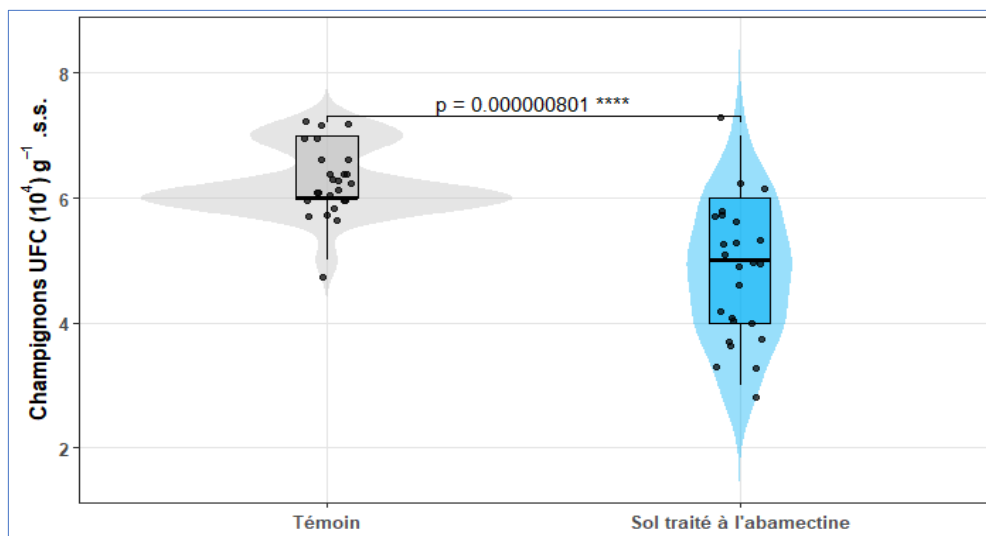
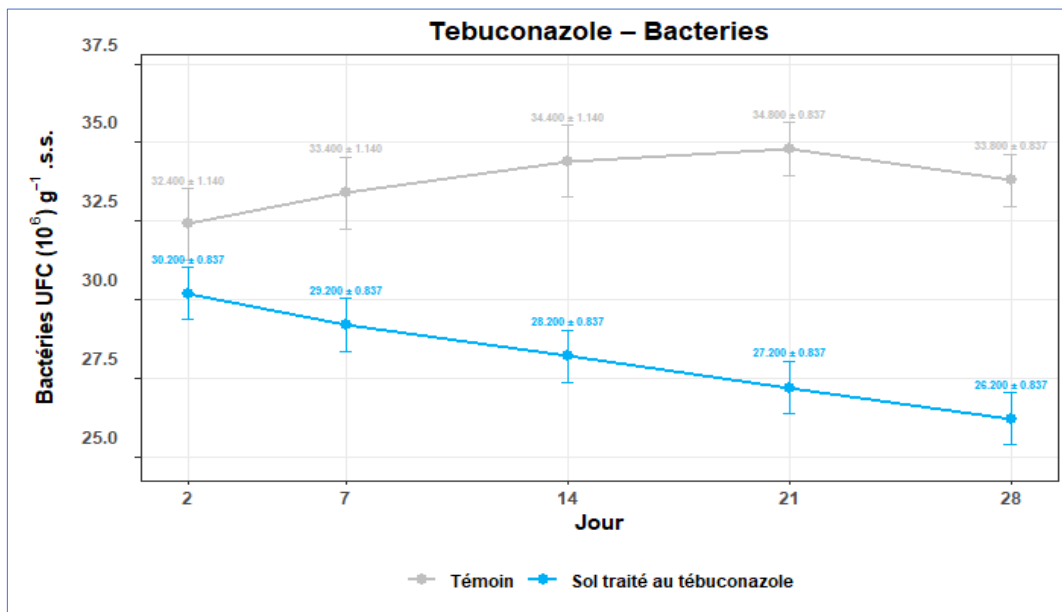


Figure 55. Effet de l'abamectine sur la biomasse fongique ( $p$ -value < 0,05)

Cette dynamique met en évidence un effet inhibiteur temporaire de l'abamectine sur la microflore du sol, suivi d'une phase de récupération progressive, probablement liée à la résilience écologique des communautés microbiennes et à la capacité de certains microorganismes à métaboliser ou tolérer partiellement le pesticide. Ces observations sont cohérentes avec les résultats rapportés par Qiu *et al.* (2022), qui ont montré que l'abamectine modifie la composition et la stabilité des communautés microbiennes du sol à court terme, entraînant une diminution des fonctions métaboliques au début de l'exposition puis une récupération partielle de ces fonctions après une période plus longue.

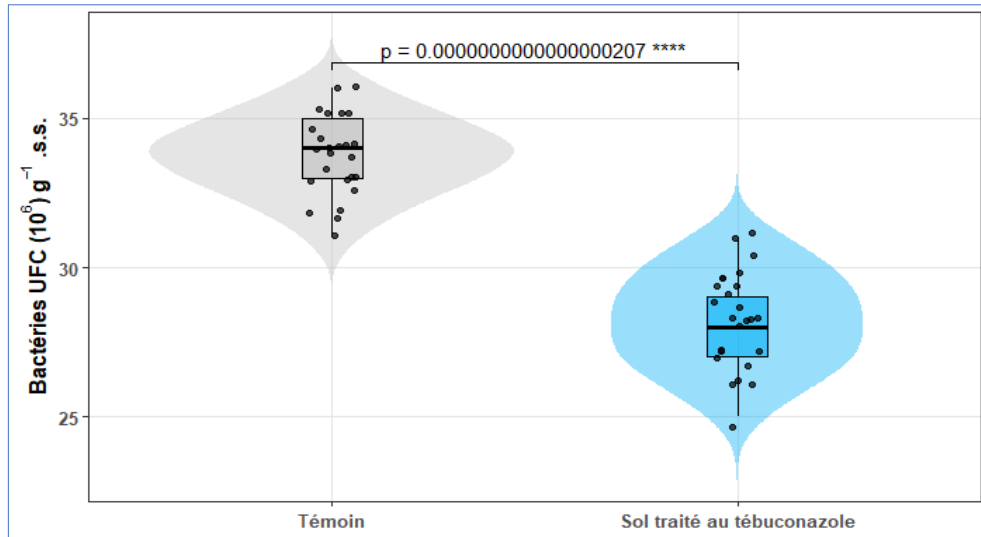
### VII.2.4.1.3. Impact de tébuconazole sur les populations bactériennes et fongiques du sol

Les populations bactériennes du sol révèlent une réponse négative nette et progressive au tébuconazole. Dans le sol témoin, les bactéries présentent une dynamique relativement stable, avec une légère augmentation en début d'essai. Les valeurs passent de  $32,2 \pm 1,140$  au jour 2 à  $33,4 \pm 1,140$  au jour 7, puis atteignent un maximum de  $34,4 \pm 1,140$  au jour 14. Par la suite, une baisse modérée est enregistrée aux jours 21 et 28 ( $34,800 \pm 0,837$  puis  $33,800 \pm 0,837$ ). Cette évolution traduit un fonctionnement microbien habituel, non perturbé par des facteurs externes. En revanche, dans le sol traité au tébuconazole, la population bactérienne diminue de manière continue et régulière au cours du temps. Les valeurs chutent de  $30,2 \pm 0,837$  au jour 2 à  $29,2 \pm 0,837$  au jour 7, puis  $28,200 \pm 0,837$  au jour 14. La tendance se poursuit à  $27,200 \pm 0,837$  (jour 21) et  $26,200 \pm 0,837$  (jour 28) (figure 56).



**Figure 56.** Evolution des bactéries du sol sous Tébuconazole (J2–J28)

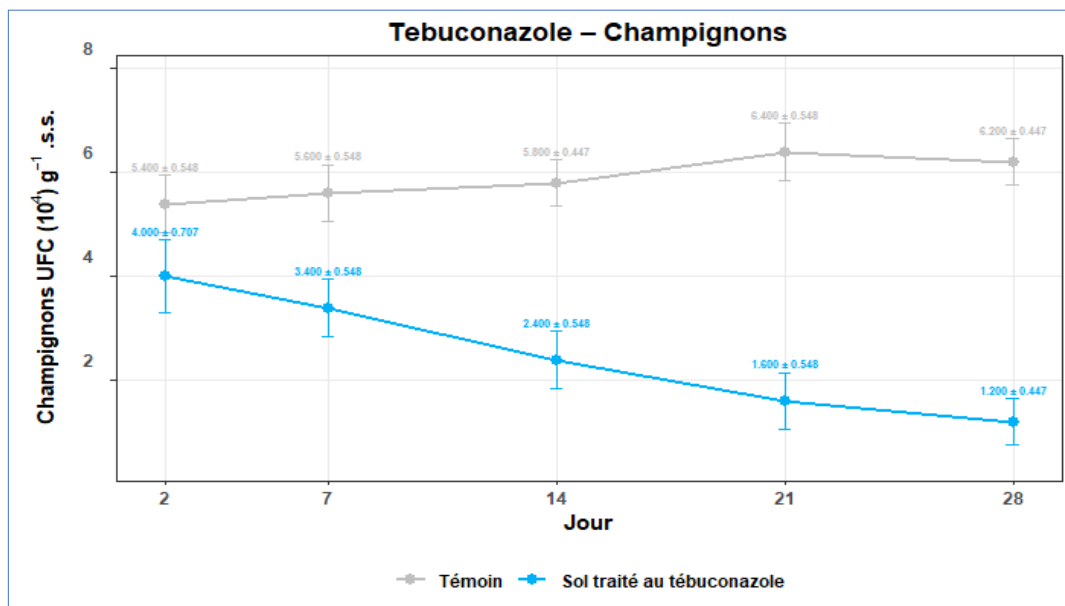
On observe une diminution d'environ la moitié de la population bactérienne, une différence très hautement significative ( $p = 1,4 \times 10^{-8} < 0,001$ ) (figure 57).



**Figure 57.** Effet du Tébuconazole sur la densité bactérienne du sol ( $p$ -value  $< 0,05$ )

Cette tendance indique que le tébuconazole, bien que ciblant principalement les champignons, peut exercer un effet indirect sur les bactéries du sol en modifiant la composition et la diversité de la communauté microbienne ou en perturbant les interactions microbiennes dans le microenvironnement du sol. Cela est soutenu par des études montrant que l'exposition répétée au tébuconazole altère la structure de la communauté microbienne et diminue la diversité bactérienne (Han et al., 2021), et que les fongicides triazoles peuvent provoquer des changements significatifs dans la structure des populations microbiennes du sol (Bending et al., 2021).

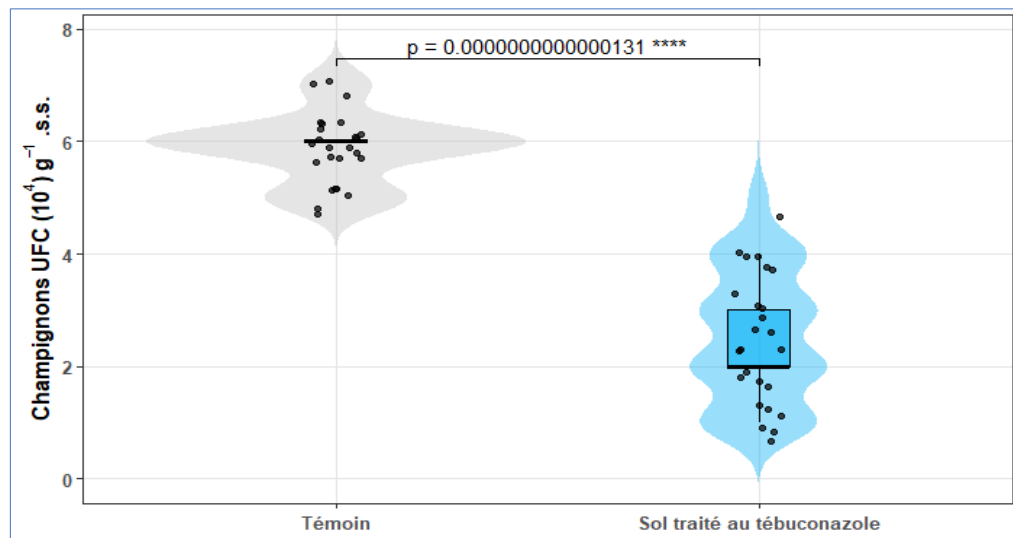
Pour les champignons (cfu  $\times 10^4$  g $^{-1}$  s.s.) met clairement en évidence un impact négatif marqué du tébuconazole sur l'abondance des champignons du sol (figure 58).



**Figure 58.** Évolution de la biomasse fongique du sol sous Tébuconazole (J2–J28)

Dans le sol témoin, la population fongique reste relativement stable et même légèrement croissante au cours de l'expérimentation. Les valeurs passent de  $5,6 \pm 0,548$  au jour 2 à  $5,6 \pm 0,548$  au jour 7, puis  $5,8 \pm 0,447$  au jour 14. Un pic est atteint au jour 21 avec  $6,4 \pm 0,548$ , suivi d'une légère baisse à  $6,2 \pm 0,447$  au jour 28. Cette dynamique témoigne d'un microbiote fongique actif et non perturbé. À l'inverse, le sol traité au tébuconazole présente une chute progressive et spectaculaire de la population fongique. Dès le début, les valeurs diminuent de manière constante de  $4 \pm 0,707$  au jour 2,  $4 \pm 0,548$  au jour 7,  $2,4 \pm 0,548$  au jour 14,  $1,6 \pm 0,548$  au jour 21, et enfin  $1,2 \pm 0,447$  au jour 28.

Le test statistique montre une différence hautement significative ( $p = 2,1 \times 10^{-8} < 0,001$ ) reflétant l'efficacité du Tébuconazole (figure 59). Ce déclin confirme que le Tébuconazole, en tant que fongicide de type triazole, exerce un effet inhibiteur direct sur la microflore fongique du sol, entraînant une réduction durable de l'activité fongique (Bending *et al.*, 2021 ; Han *et al.*, 2021)

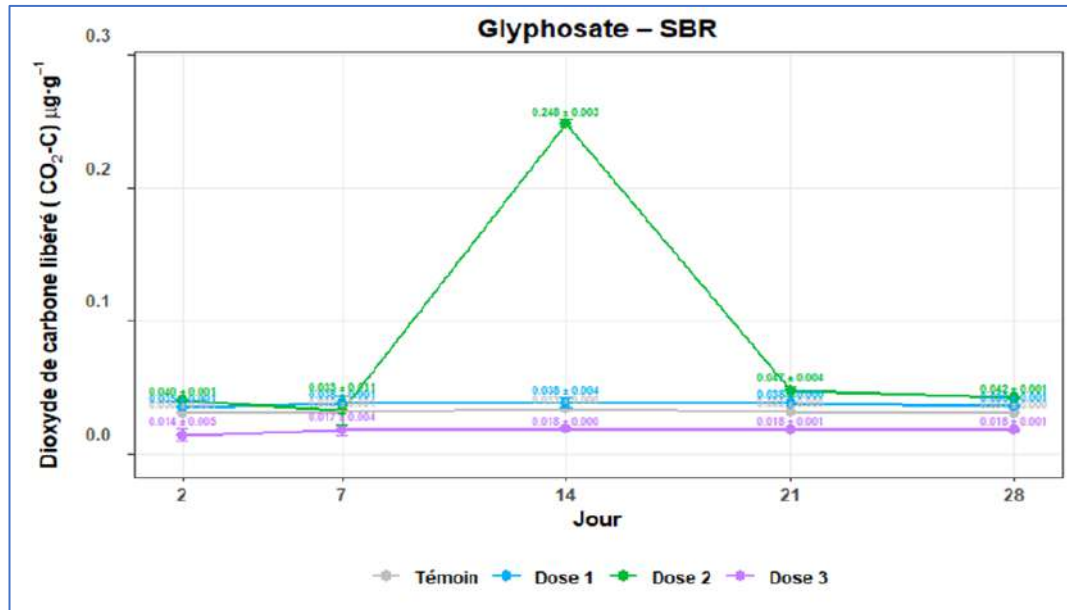
**Figure 59.** Effet du Tébuconazole sur la biomasse fongique (p-value < 0,05)

#### VII.2.4.2. Effet des pesticides sur la respiration microbienne

##### VII.2.4.2.1. Effet du glyphosate sur la respiration microbienne

Sous l'effet du glyphosate, la respiration basale du sol SBR (CO<sub>2</sub>-C libéré) reste globalement faible pour la majorité des doses (figure 60), mais la 2<sup>ème</sup> dose se distingue par un pic marqué à J14 (0,27 µg/g de sol) avec de p-values extrêmement faibles obtenues lors des comparaisons (notamment  $p = 0.00000656$ ) révèlent un effet hautement significatif

(figure 61). Tandis que le témoin et les autres concentrations demeurent proches de 0,04  $\mu\text{g/g}$ .



**Figure 60.** Evolution de dioxyde de carbone du sol sous glyphosate (J2–J28).

Ce pic transitoire reflète une stimulation momentanée de l'activité microbienne, probablement due à l'utilisation du glyphosate ou de ses produits de dégradation comme source de carbone ou de phosphore par certains microorganismes du sol, entraînant ainsi une augmentation ponctuelle de la respiration microbienne.

À l'inverse, la dose 3 montre une chute de la respiration basale, avec des valeurs comparables au témoin et à la dose 1, mais sans atteindre l'intensité d'activité microbienne observée à la dose 2. Cette baisse peut être interprétée comme un signe d'inhibition microbienne liée à une concentration trop élevée de glyphosate, dépassant la capacité adaptative des microorganismes.

Ces observations confirment que l'effet du glyphosate sur le métabolisme microbien est dose-dépendant et temporaire, avec une augmentation initiale suivie d'un retour aux valeurs de base, ce qui reflète la capacité de la communauté microbienne à retrouver son équilibre après une stimulation ponctuelle (Nguyen *et al.*, 2016). Les résultats de ces études indiquent également que la réponse microbienne peut varier selon la nature du sol, le pH, la teneur en matière organique et le niveau de l'application du pesticide (Araújo *et al.*, 2003; Haney *et al.*, 2000).

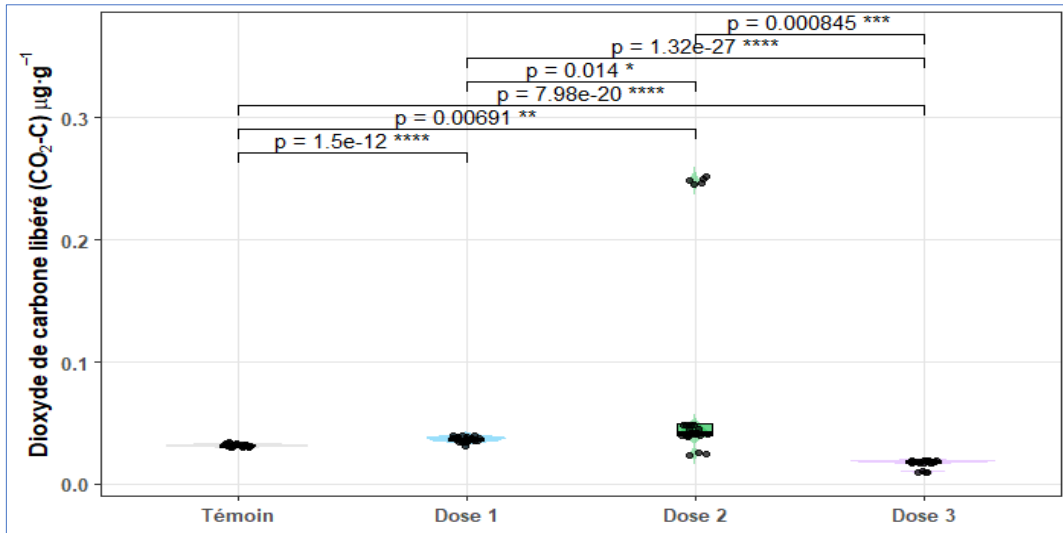


Figure 61. Effet du glyphosate sur la respiration basale du sol ( $p$ -value  $< 0,05$ )

#### VII.2.4.2.2. Effet de l'abamectine sur la respiration microbienne

Pour l'Abamectine, la respiration microbienne, évaluée via le SBR met en évidence une différence marquée entre le sol témoin et le sol traité à l'abamectine (figure 62).

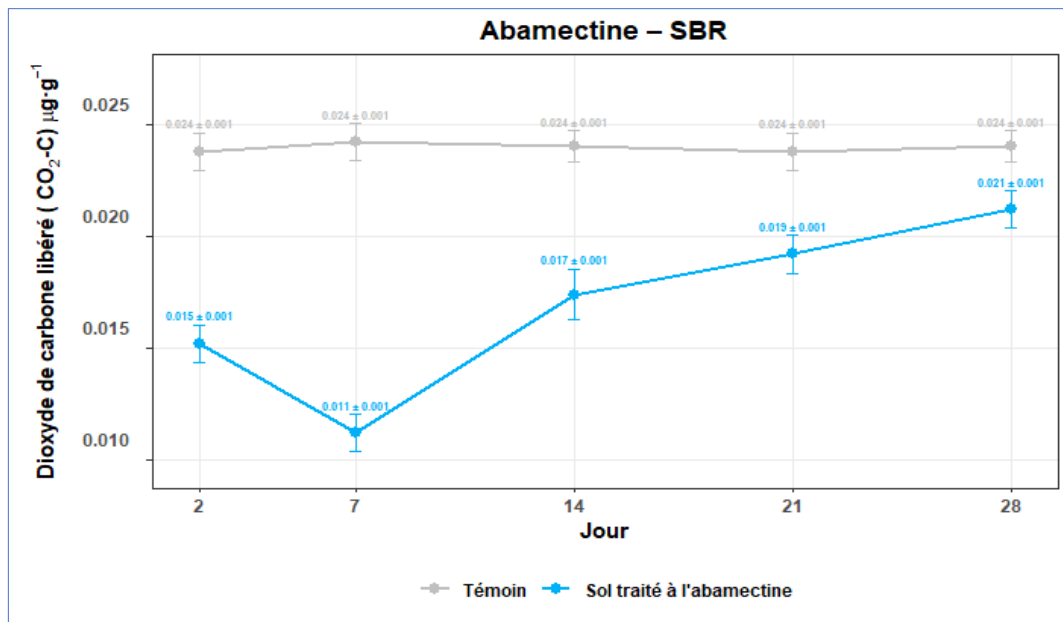
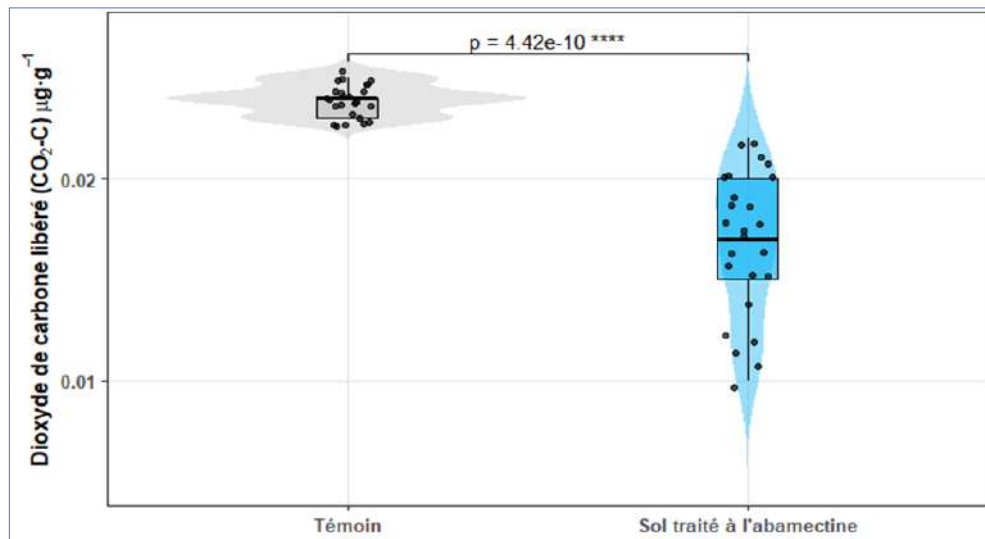


Figure 62. Evolution de dioxyde de carbone du sol sous l'abamectine (J2–J28).

Dans le sol témoin les valeurs restent stables, de  $0,024 \pm 0,001 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  au jour 2 à  $0,024 \pm 0,001 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  au jour 28, sans variation significative, cette constance reflète une activité respiratoire normale et non perturbée. En revanche, le sol traité à l'abamectine présente une dynamique nettement altérée au début de l'essai, la respiration microbienne est d'abord réduite avec  $0,015 \pm 0,001 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  au jour 2 puis atteint un minimum au jour 7 avec  $0,011 \pm$

0,001  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  soit une diminution de plus de 50 % par rapport au témoin, cette chute indique une forte inhibition de l'activité microbienne probablement liée à un stress toxique initial causé par l'abamectine, à partir du jour 7, une reprise progressive de l'activité respiratoire est observée de  $0,017 \pm 0,001 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  au jour 14,  $0,019 \pm 0,001 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  au jour 21, et  $0,021 \pm 0,001 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  au jour 28. La p-value extrêmement faible ( $4,42 \times 10^{-10}$ ) confirme un effet hautement significatif de l'Abamectine sur ce paramètre (figure 63).

Cette dynamique traduit un effet inhibiteur temporaire sur l'activité microbienne globale, suivi d'une phase de récupération progressive grâce à la résilience écologique des communautés microbiennes du sol (Qiu et al., 2022). Cette réponse transitoire est cohérente avec l'évolution observée de la densité microbienne totale, qui diminue d'abord puis se stabilise à la fin de l'expérimentation.



**Figure 63.** Effet de l'abamectine sur la respiration basale du sol (p-value < 0,05)

#### VII.2.4.2.3. Effet du tébuconazole sur la respiration microbienne

La respiration basale du sol (SBR), indicateur direct de l'activité métabolique microbienne, montre une évolution contrastée entre le sol témoin et le sol traité au tébuconazole. Dans le sol témoin, la SBR augmente légèrement en début d'expérimentation, suggérant une stimulation modérée de l'activité microbienne. Les valeurs passent de  $0,022 \pm 0,001 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  au jour 2 à  $0,023 \pm 0,001$  au jour 7, puis atteignent un maximum de  $0,024 \pm 0,001$  au jour 14 et au jour 21. Une légère baisse apparaît ensuite au jour 28 ( $0,023 \pm 0,001$ ), tout en maintenant un niveau globalement élevé. Dans le sol traité au tébuconazole, la respiration microbienne suit une évolution différente et globalement plus faible. Après une légère augmentation initiale ( $0,021 \pm 0,001$  au jour 2 passant de  $0,021 \pm 0,001$  au jour 7), la

SBR diminue ensuite pour se stabiliser autour de  $0,020 \pm 0,001$  aux jours 14 et 21, puis chuter à  $0,019 \pm 0,001 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  au jour 28 (figure 64). Cette baisse correspond à l'effet inhibiteur direct du fongicide sur les microorganismes, en particulier sur la communauté fongique, et à des effets indirects sur les bactéries via la perturbation des interactions microbiennes du sol (Han *et al.*, 2021 ; Bending *et al.*, 2021).

L'analyse statistique montre une p-value extrêmement faible ( $p = 0.0000000574$ ), indiquant une différence hautement significative entre les conditions (figure 65).

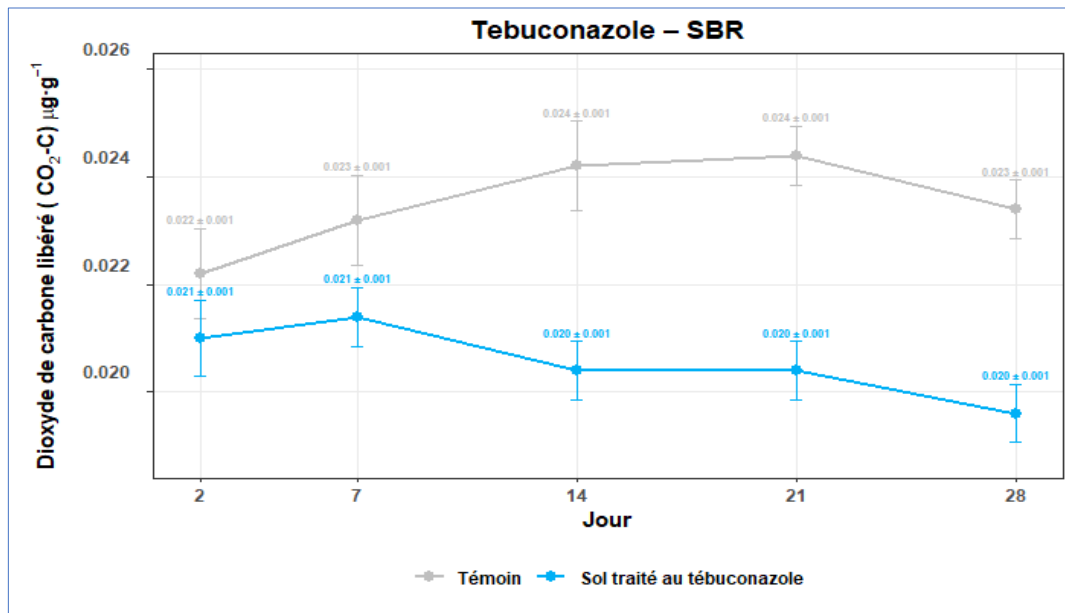


Figure 64. Evolution de dioxyde de carbone du sol sous tébuconazole (J2-J28).

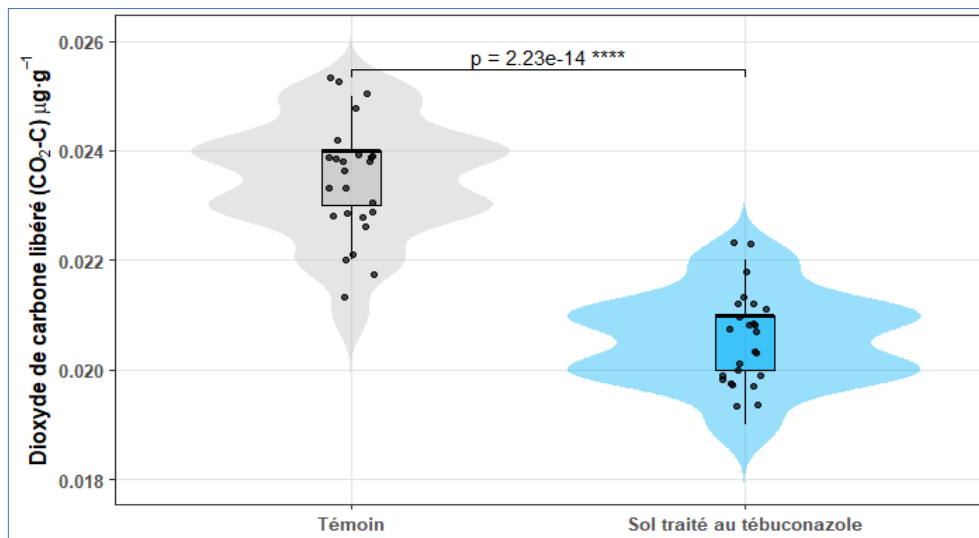
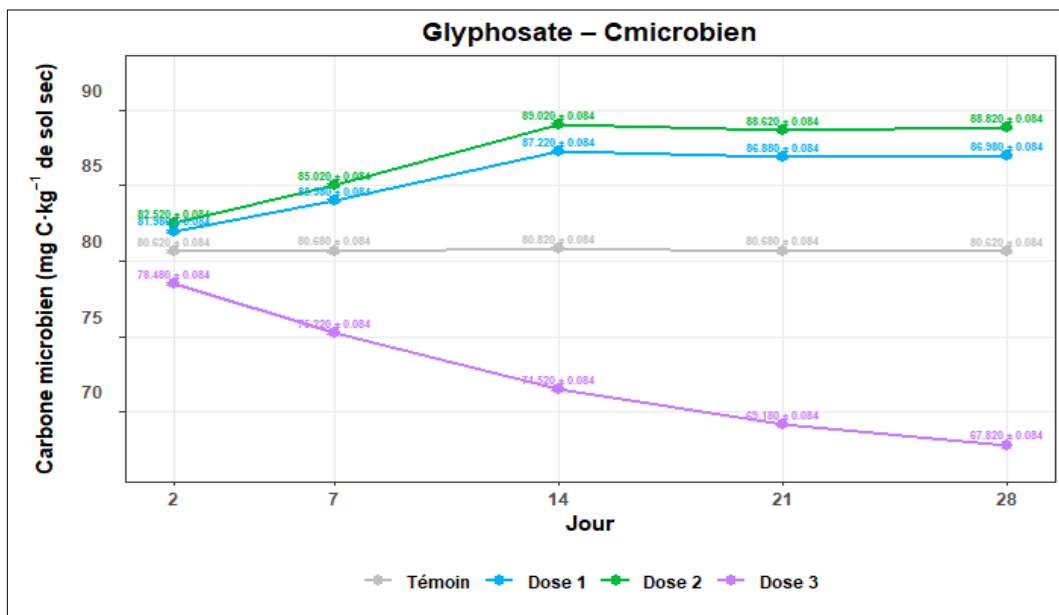


Figure 65. Effet du Tébuconazole la respiration basale du sol ( $p$ -value  $< 0,05$ )

#### VII.2.4.3. Effet des pesticides sur la biomasse microbienne du sol

### VII.2.4.3.1. Evolution temporelle de la biomasse microbienne du sol sous l'effet du glyphosate

La biomasse microbienne du sol sous traitement au Glyphosate montre une augmentation nette durant les deux premières semaines, suivie d'une stabilisation par la suite. Les deux premières doses présentent des valeurs supérieures au témoin, atteignant jusqu'à 90 mg C/kg à J14, tandis que la dose la plus élevée (3<sup>ème</sup> dose) provoque une diminution progressive et marquée de la biomasse (79 passant de 67 mg C/kg) (figure 66).



**Figure 66.** Évolution de la biomasse microbienne du sol sous Glyphosate (J2–J28).

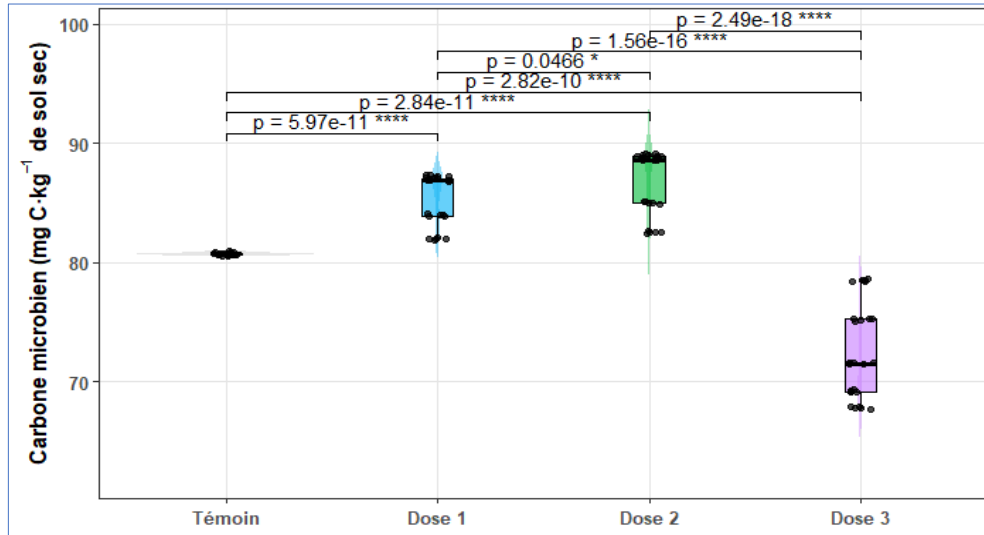
Cette dynamique reflète un effet dépendant de la dose :

- **Faibles et moyennes doses** : stimulation de l'activité microbienne, probablement due à l'utilisation du glyphosate comme source secondaire de carbone par certains microorganismes, ce qui active leur métabolisme et favorise la croissance globale.
- **Forte dose** : effet inhibiteur clair, indiquant une toxicité directe sur la communauté microbienne, réduisant la capacité des microorganismes à croître et à métaboliser les nutriments.

Cette réponse est cohérente avec les observations de Zobiolo *et al.* (2010) et Kremer et Means (2009), qui ont montré que le glyphosate peut stimuler temporairement l'activité microbienne à faible dose, tout en exerçant des effets toxiques à forte concentration.

Les tests statistiques montrent que les différences entre le témoin et la dose 2 sont significatives, confirmant l'effet stimulant du glyphosate sur la biomasse microbienne à cette

concentration. Cependant, à la dose 3, le carbone microbien chute et atteint des valeurs proches de 72 mg C/kg. Cette diminution indique une contraction de la biomasse microbienne sous l'effet toxique de la forte dose, confirmant qu'un seuil critique est dépassé au-delà duquel l'herbicide n'est plus bénéfique mais devient inhibiteur (figure 67).



**Figure 67.** Effet du glyphosate sur biomasse microbienne (p-value < 0,05)

#### VII.2.4.3.2. Evolution temporelle de la biomasse microbienne du sol sous l'effet de l'Abamectine

Sous traitement à l'Abamectine, la biomasse microbienne du sol varie de façon non linéaire, avec une chute initiale marquée à J7, suivie d'une reprise progressive jusqu'à J28, atteignant alors des valeurs proches du témoin (65 mg C/kg). Le témoin reste stable tout au long de l'expérimentation (figure 68). La p-value extrêmement faible ( $p = 0.00000000307$ ) indique une différence hautement significative et une forte sensibilité de la biomasse microbienne à ce pesticide (figure 69).

Cette dynamique reflète un effet inhibiteur temporaire de l'Abamectine sur la communauté microbienne, probablement lié à une perturbation initiale de l'activité métabolique des microorganismes, suivie d'une phase de récupération progressive grâce à la résilience écologique des communautés du sol. La récupération est également facilitée par la capacité de certaines bactéries du sol à dégrader l'Abamectine et à l'utiliser comme source de carbone (Zhang *et al.*, 2004). Ces observations sont en accord avec les résultats de Qiu *et al.* (2022), qui ont montré qu'Abamectine induit une inhibition initiale suivie d'une normalisation progressive de l'activité microbienne.

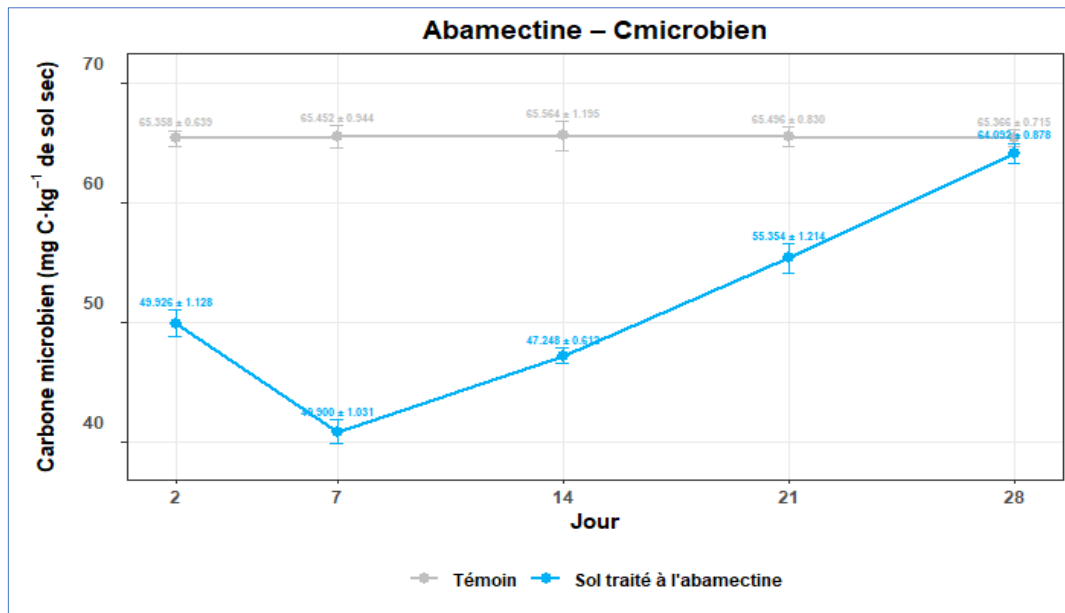


Figure 68. Évolution de la biomasse microbienne du sol sous Abamectine (J2–J28).

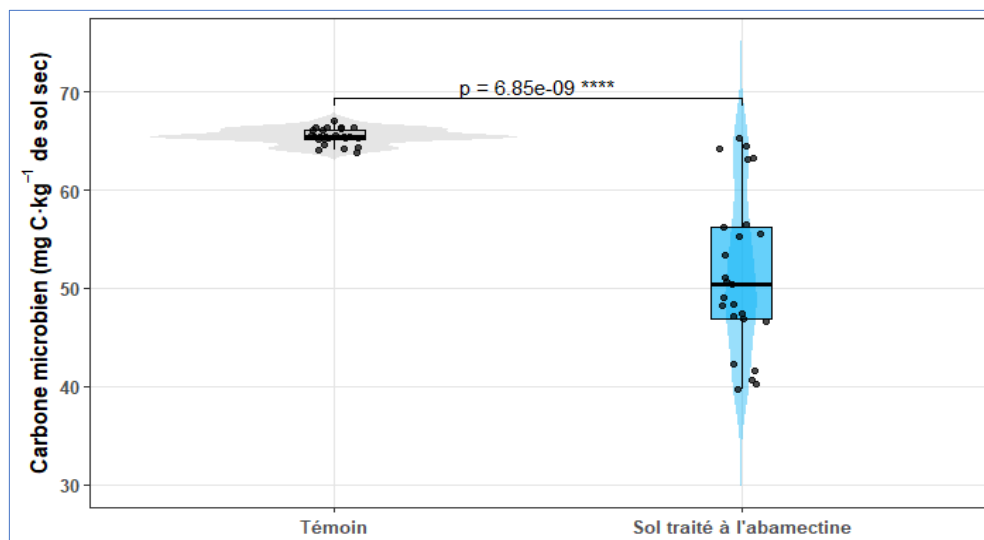


Figure 69. Effet de l'abamectine sur la biomasse microbienne ( $p$ -value < 0,05)

### VII.2.4.3.3. Evolution temporelle de la biomasse microbienne du sol sous l'effet de tébuconazole

Sous traitement au Tébuconazole, la biomasse microbienne du sol décroît de façon continue, tandis que le témoin montre une légère augmentation jusqu'à J21 avant de se stabiliser (figure 70). L'écart entre les deux courbes s'accroît au fil du temps, indiquant un effet inhibiteur durable du fongicide sur la microflore du sol. Le test statistique confirme cette différence avec une  $p$ -value extrêmement faible ( $p = 2,8 \times 10^{-8} < 0,001$ ) indiquant un effet hautement significatif du Tébuconazole sur la biomasse microbienne (figure 71).

Cette diminution reflète la perturbation directe des champignons ainsi que les interactions microbiennes, et respiratoire de la communauté microbienne. Ces observations sont cohérentes avec les résultats rapportés dans plusieurs études récentes, qui montrent que les triazoles, dont le Tébuconazole, réduisent significativement la densité fongique et affectent la dynamique microbienne du sol (Han *et al.*, 2021; Roman *et al.*, 2021).

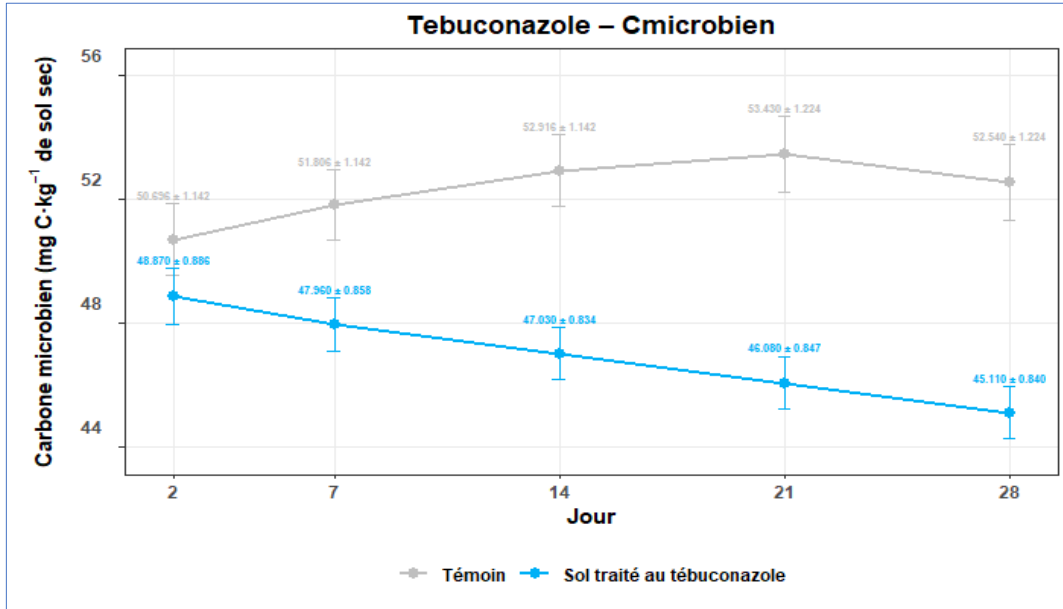


Figure 70. Évolution de la biomasse microbienne du sol sous Tébuconazole (J2–J28)

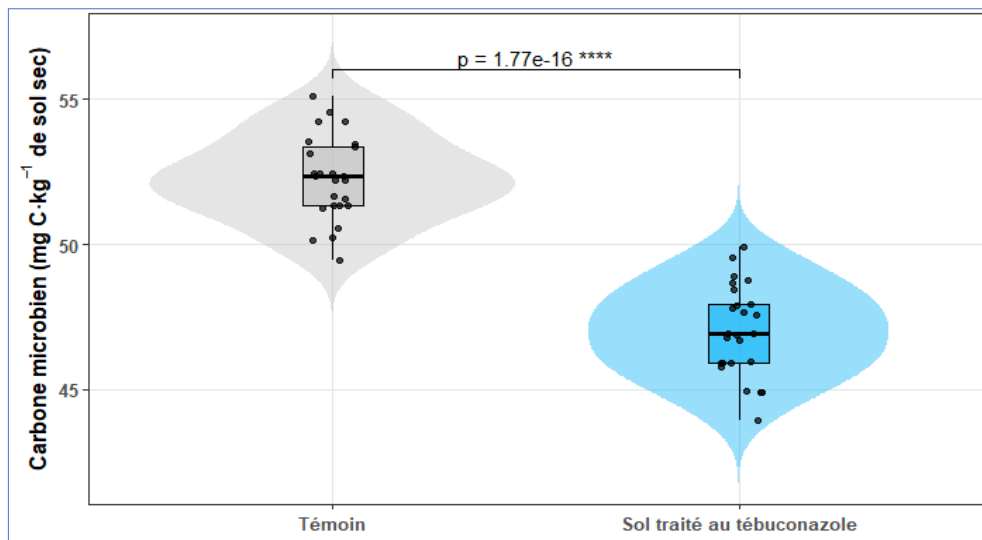
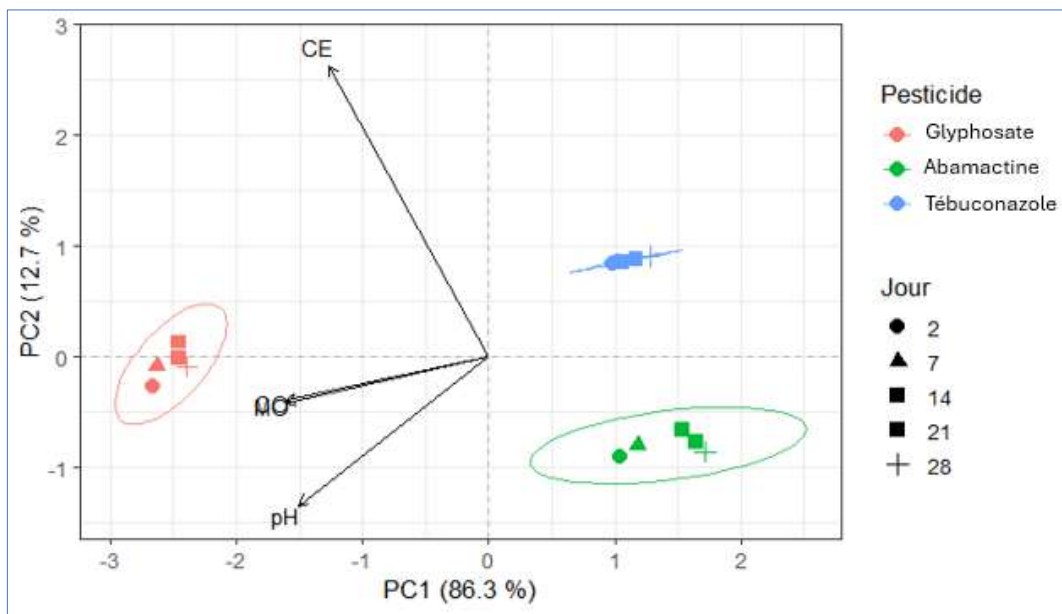


Figure 71. Effet du Tébuconazole sur la biomasse microbienne du sol (p-value < 0,05)

## VII.2.5. Statistique inférentielle

### VII.2.5.1. Analyse en composantes principales des paramètres physico-chimiques du sol

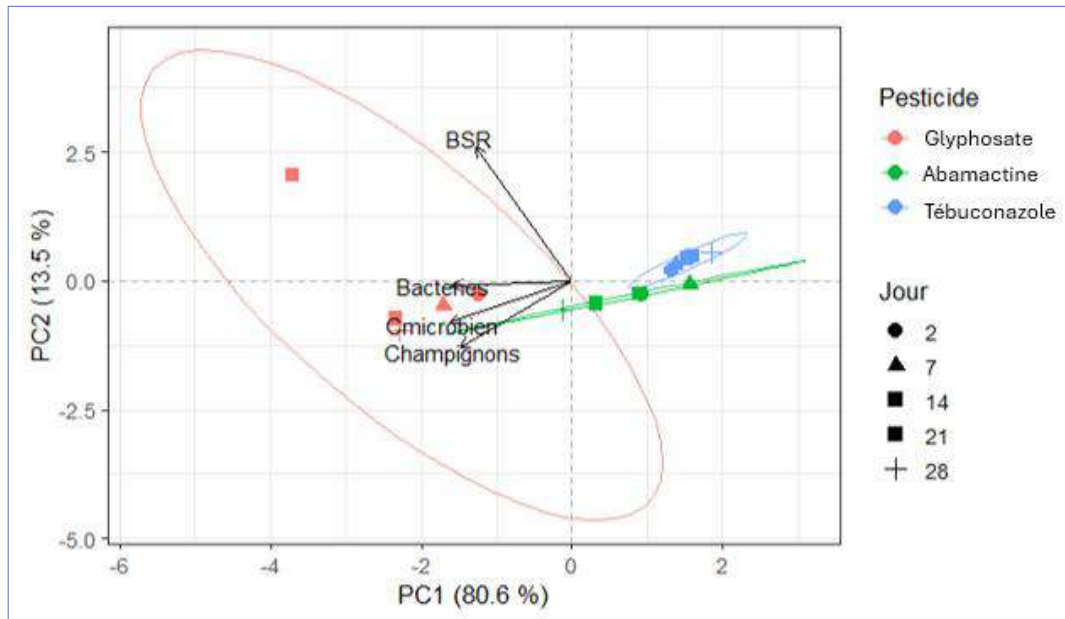
Cette ACP (figure 72), réalisée sur le pH, la matière organique (MO), et la conductivité électrique (CE), montre que l'axe 1 (PC1, 86,3 % de la variance) sépare très nettement les traitements, tandis que l'axe 2 (PC2, 12,7 %) apporte une information complémentaire plus faible. Les modalités Glyphosate se projettent du côté négatif de PC1, en association avec des valeurs relativement plus élevées de pH et de MO, tandis que les modalités Abamectine et tébuconazole se situent du côté positif de PC1, caractérisé par des CE plus élevées. Le vecteur CE est orienté vers le quadrant supérieur gauche, indiquant que ce paramètre contribue fortement à la discrimination des traitements et qu'il est opposé au pH et à la MO, qui s'orientent vers les valeurs négatives de PC2. Les ellipses de confiance montrent par ailleurs une bonne cohérence interne des points pour chaque pesticide, avec un nuage compact pour tébuconazole, un nuage un peu plus dispersé pour Abamectine, et une position bien distincte de Glyphosate. Globalement, ces résultats indiquent que les pesticides modifient principalement le fonctionnement physico-chimique du sol via un gradient opposant des sols à forte CE (Abamectine, tébuconazole) à des sols à pH et MO plus élevés mais à CE plus faible (Glyphosate).



**Figure 72.** Analyse en composantes principales (ACP) des paramètres physico-chimiques du sol

### VII.2.5.2. Analyse en composantes principales des paramètres microbiologiques du sol

Cette ACP (figure 73), réalisée sur le carbone microbien ( $C_{\text{microbien}}$ ), la densité bactérienne, l'abondance des champignons et la biomasse respiratoire (BSR), met en évidence un premier axe (PC1, 80,6 % de la variance) qui représente le gradient principal d'activité et de biomasse microbienne du sol, tandis que PC2 (13,5 %) différencie surtout la BSR des autres paramètres.



**Figure 73.** Analyse en composantes principales des paramètres microbiologiques du sol.

Les traitements au Glyphosate se projettent du côté négatif de PC1, ce qui traduit des niveaux globalement plus faibles de  $C_{\text{microbien}}$ , de bactéries, de champignons et de BSR. À l'inverse, les traitements Abamectine et tébuconazole se situent du côté positif de PC1, associés à des valeurs plus élevées de ces paramètres microbiens. Le vecteur BSR est orienté vers le quadrant supérieur droit, indiquant que ce paramètre est fortement corrélé aux traitements Abamectine et tébuconazole et qu'il contribue fortement à la discrimination vis-à-vis du Glyphosate. Les vecteurs  $C_{\text{microbien}}$ , Bactéries et Champignons sont regroupés dans la même direction, montrant un comportement cohérent des différents compartiments microbiens. Les ellipses de confiance révèlent une forte dispersion des modalités Glyphosate, traduisant une réponse microbienne plus variable sous cet herbicide, alors que les ellipses Abamectine et tébuconazole sont plus resserrées, suggérant une réponse plus homogène. Dans l'ensemble, cette ACP met en évidence un effet différencié des pesticides

sur le compartiment microbien du sol, Glyphosate étant associé à une diminution de la biomasse et de l'activité microbiennes, tandis qu'Abamectine et tébuconazole maintiennent ou stimulent ces paramètres.

Les deux ACP montrent une cohérence forte entre les réponses physico-chimiques et microbiologiques du sol face aux pesticides. Le Glyphosate forme un groupe distinct caractérisé par un pH et une MO légèrement plus élevés mais une CE plus faible, ce qui s'accompagne d'une réduction nette de la biomasse et de l'activité microbienne. Par ailleurs, Abamectine et Tébuconazole, associés à des CE plus élevées, se situent dans les ACP du côté d'une activité biologique plus importante ( $C_{\text{microbien}}$ , bactéries, champignons et BSR). Ces résultats indiquent que les modifications physico-chimiques induites par les pesticides s'accompagnent systématiquement d'effets proportionnels sur le fonctionnement microbien du sol.

### VII.2.5.3. Corrélations (Pearson) entre paramètres microbiologiques et physicochimiques du sol

L'analyse de la matrice de corrélations met en évidence une forte cohérence entre les paramètres microbiologiques et physicochimiques du sol (figure 74).



Figure 74. Corrélations (Pearson) entre paramètres microbiologiques et physicochimiques du sol.

Les coefficients de Pearson révèlent des relations linéaires très significatives ( $p < 0,01$ ) entre la biomasse microbienne ( $C_{\text{microbien}}$ ), la matière organique (MO), le carbone organique (CO) et le pH, avec des coefficients supérieurs à 0,9. Ces résultats traduisent une interaction étroite entre la qualité organique du sol et l'activité microbienne, suggérant que des conditions physicochimiques neutres à légèrement alcalines favorisent la croissance et la stabilité des communautés microbiennes.

Les populations bactériennes présentent également une corrélation positive et significative avec la biomasse microbienne ( $r = 0,95, p < 0,001$ ) tandis que les champignons sont modérément corrélés à ces dernières ( $r = 0,8, p < 0,01$ ). Le paramètre BSR (respiration basale spécifique) montre une corrélation positive mais légèrement plus faible avec les autres variables ( $r$  entre 0,6 et 0,8) traduisant une mobilisation du carbone microbien dépendante du pesticide et du temps d'incubation.

La conductivité électrique (CE) est la seule variable dont les corrélations apparaissent plus faibles ou non significatives ( $p > 0,05$  avec les champignons) suggérant qu'elle exerce une influence plus indirecte sur la dynamique microbienne.

Dans l'ensemble, la matrice de corrélation confirme que les indicateurs de fertilité biologique, tels que la biomasse microbienne, la matière organique et le carbone organique, sont étroitement liés et forment un complexe fonctionnel caractéristique de la qualité biologique du sol. Ces relations soutiennent les résultats précédents issus du modèle mixte et soulignent le rôle intégrateur de la biomasse microbienne comme indicateur sensible de la résilience des sols face aux traitements phytosanitaires.

#### **VII.2.5.4. Effet des pesticides sur les paramètres physico-chimiques (différence de moyenne)**

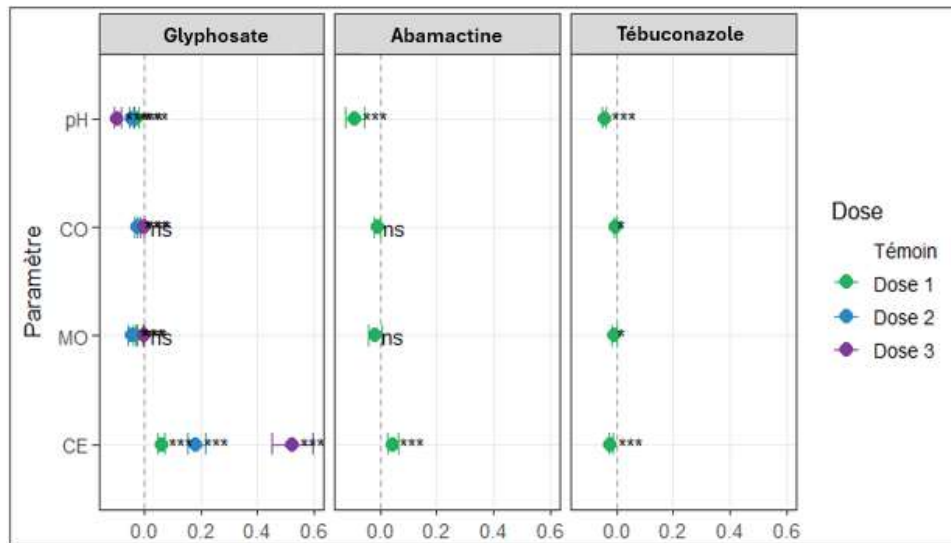
Pour les paramètres physico-chimiques, on observe d'abord une diminution quasi systématique du pH par rapport au témoin.

Sous Glyphosate, les doses 1, 2 et 3 induisent des baisses respectives de pH de  $-0,027$  ( $p = 2,4 \times 10^{-10}$ ),  $-0,044$  ( $p = 2,4 \times 10^{-10}$ ) et  $-0,093$  ( $p = 2,4 \times 10^{-10}$ ). Sous l'Abamectine, le pH est réduit de  $-0,089$  ( $p = 7,9 \times 10^{-10}$ ), tandis que sous Tébuconazole la diminution atteint  $-0,042$  ( $p = 1,3 \times 10^{-18}$ ).

La conductivité électrique (CE) montre une réponse encore plus marquée ; sous Glyphosate, les doses 1, 2 et 3 entraînent des hausses respectives de  $+0,0616$ ,  $+0,1844$  et

+0,5236 dS·m<sup>-1</sup> ( $p = 7,7 \times 10^{-3}$ ,  $3,2 \times 10^{-10}$  et  $3,2 \times 10^{-10}$  respectivement). Sous l'Abamectine, la CE augmente de +0,0444 ( $p = 3,7 \times 10^{-7}$ ), alors que sous Tébuconazole, elle diminue légèrement de -0,0216 ( $p = 2,4 \times 10^{-10}$ ).

La teneur en carbone organique (MO) suit le même schéma ; pour Glyphosate, les doses 1 et 2 entraînent des baisses de -0,029 et -0,041 ( $p = 9,3 \times 10^{-10}$  et  $3,2 \times 10^{-10}$ ), tandis que la dose 3 reste non significativement différente du témoin ( $p = 0,99$ ). Sous l'abamectine et Tébuconazole, les diminutions de MO pour les sols traités sont de -0,017 ( $p = 1,4 \times 10^{-3}$ ) et -0,0088 ( $p = 1,2 \times 10^{-3}$ ). Ces résultats sont illustrés dans la figure 75.

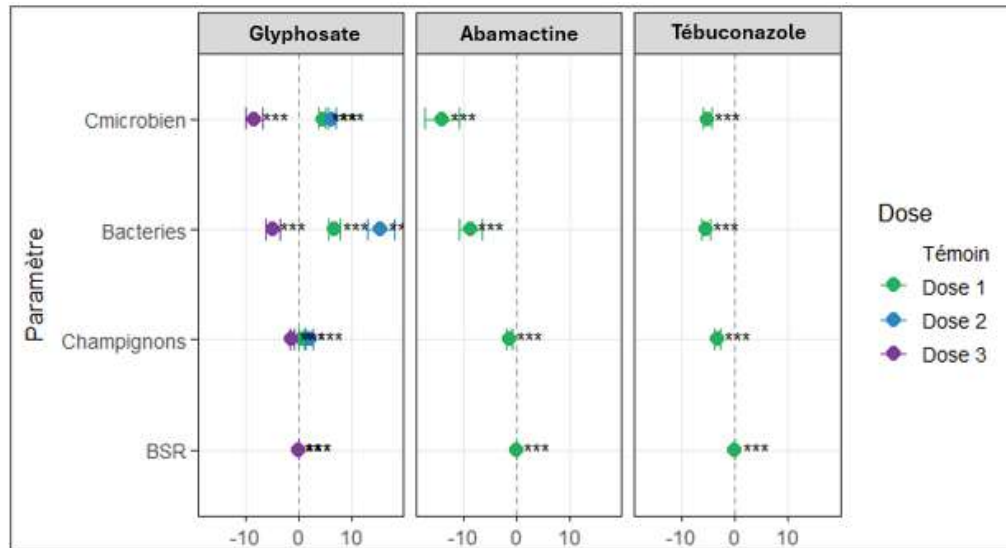


**Figure 75.** Effet des pesticides sur les paramètres physico-chimiques (différence de moyenne).

#### VII.2.5.5. Effet des pesticides sur les paramètres microbiologiques (différence de moyennes)

La figure 76 montre l'effet des différents traitements sur les paramètres microbiologiques du sol. L'abamectine et Tébuconazole entraînent une inhibition nette et systématique de l'activité microbienne. Sous l'Abamectine, la biomasse microbienne ( $C_{\text{microbien}}$ ) diminue de 13,9 mg C·kg<sup>-1</sup> ( $p = 7,4 \times 10^{-15}$ ), accompagnée d'une baisse des bactéries (8,64 ;  $p = 1,5 \times 10^{-14}$ ), des champignons (1,44 ;  $p = 3,9 \times 10^{-9}$ ) et de la respiration du sol BSR (0,0071 ;  $p = 7,5 \times 10^{-16}$ ). Le Tébuconazole induit le même profil dépressif avec une réduction de  $C_{\text{microbien}}$  de 5,27 mg C·kg<sup>-1</sup> ( $p = 3,7 \times 10^{-18}$ ), des bactéries (5,56 ;  $p = 2,6 \times 10^{-19}$ ), des champignons (3,36 ;  $p = 7,7 \times 10^{-17}$ ) et de la BSR (0,0029 ;  $p = 5,3 \times 10^{-16}$ ).

À l'inverse, sous Glyphosate, les faibles concentrations présentent un effet stimulant, alors que la concentration la plus élevée devient inhibitrice, révélant une réponse biphasique. Les doses 1 et 2 augmentent la biomasse microbienne de 4,72 et 6,12 mg C·kg<sup>-1</sup> ss ( $p = 2,9 \times 10^{-8}$  et  $3,2 \times 10^{-10}$  respectivement), les bactéries de 6,88 et 15,44 ( $p = 8,1 \times 10^{-10}$  et  $3,2 \times 10^{-10}$ ) et les champignons de 0,68 ( $p = 1,4 \times 10^{-3}$ ) et 2,16 ( $p = 2,4 \times 10^{-10}$ ). En revanche, la dose 3 entraîne une baisse de  $C_{\text{microbien}}$  (8,24 mg C·kg<sup>-1</sup> ;  $p = 3,2 \times 10^{-10}$ ), des bactéries (4,88 ;  $p = 5,3 \times 10^{-6}$ ) et des champignons (1,24 ;  $p = 8,8 \times 10^{-9}$ ). Pour la respiration du sol, seule la dose 2 du Glyphosate montre une augmentation significative (0,050 ;  $p = 2,2 \times 10^{-5}$ ), tandis que les doses 1 et 3 ne diffèrent pas du témoin ( $p = 0,90$  et  $0,38$ ). À l'opposé, l'abamectine (-0,0071 ;  $p = 7,5 \times 10^{-16}$ ) et Tébuconazole (-0,0029 ;  $p = 5,3 \times 10^{-16}$ ) réduisent significativement la BSR dès le sol traité, confirmant un profil monotone d'inhibition microbienne contrastant avec la réponse biphasique observée sous Glyphosate.



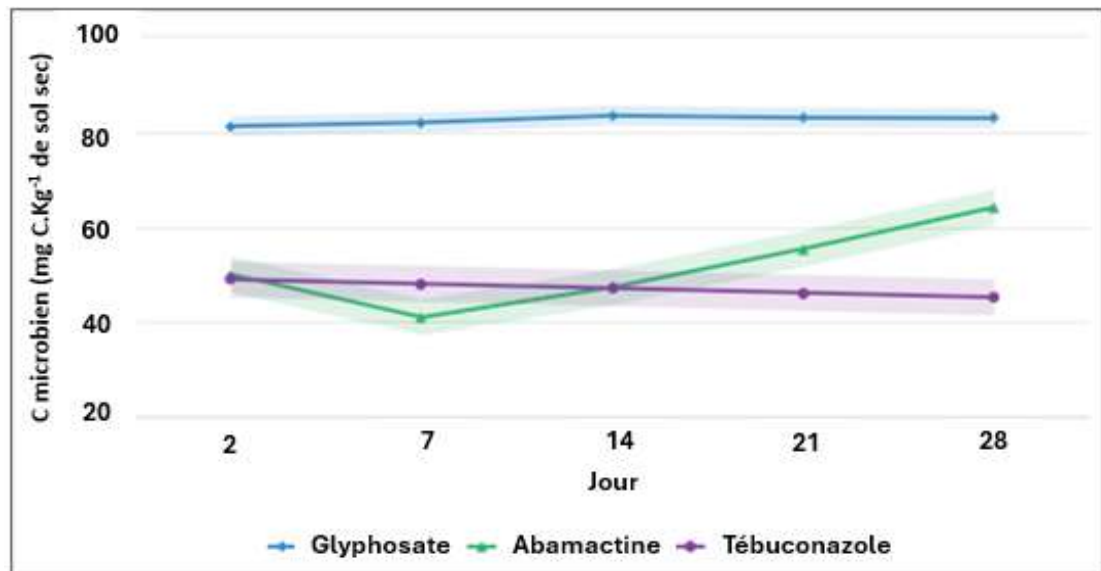
**Figure 76.** Effet des pesticides sur les paramètres microbiologiques (différence de moyennes)

#### VII.2.5.6. Profils temporels des EMMs de la biomasse microbienne selon le pesticide

Un modèle linéaire mixte a été ajusté pour la biomasse microbienne ( $C_{\text{microbien}}$ ) en fonction du type de pesticide, de la concentration ( $C_0$  : témoin et  $C_1$  pour l'ensemble des pesticides ;  $C_2$  et  $C_3$  uniquement pour le glyphosate), la concentration étant codée numériquement, et du temps (jours 2, 7, 14, 21, 28), avec un effet aléatoire pour les unités expérimentales (répétitions imbriquées dans pesticide  $\times$  concentration). La modalité  $C_0$  correspond, pour chaque pesticide, au témoin sans application de la molécule. De plus,

chaque pesticide a été étudié dans un milieu/sol différent ; le facteur “pesticide” reflète donc à la fois la nature de la molécule et les conditions de l’essai.

L’ANOVA de type III (méthode Satterthwaite/Kenward–Roger) met en évidence des effets principaux significatifs des trois facteurs : pesticide ( $p = 5,1 \times 10^{-7}$ ), concentration ( $p = 6,1 \times 10^{-7}$ ) et temps ( $p = 9,8 \times 10^{-5}$ ). Les interactions sont fortement significatives, y compris l’interaction triple pesticide  $\times$  concentration  $\times$  temps ( $p < 2,2 \times 10^{-16}$ ), indiquant que l’évolution temporelle de la biomasse dépend à la fois du pesticide appliqué et de la dose. Les moyennes marginales estimées (EMMs), moyennées sur le temps et les concentrations, suggèrent des niveaux de biomasse globalement plus élevés sous Glyphosate (82,5 mg C·kg<sup>-1</sup> ss ; IC 95% [80,6 ; 84,4]) que sous Abamectine (51,5 ; [48,0 ; 55,0]) et Tébuconazole (47,0 ; [43,5 ; 50,5]) (figure 77).



Courbe : moyenne marginale estimée (EMM) issue du modèle mixte, moyennée sur C1–C4 ; ruban : IC95 % conditionnels par jour.

**Figure 77.** Profils temporels des EMMs de la biomasse microbienne ( $C_{\text{microbien}}$ ) selon le pesticide

De même, la moyenne sur l’ensemble des pesticides montre une hausse tardive entre J2 et J28 (de 60,0 à 64,0 mg C·kg<sup>-1</sup> s.s). Ces tendances « globales » doivent toutefois être interprétées avec prudence en présence d’une triple interaction : les écarts entre pesticides ne sont pas constants selon les jours et les doses. Lecture fine des effets (guidée par l’interaction triple). Comparaison entre pesticides à jour fixé : les contrastes (Tukey) montrent que Glyphosate maintient des niveaux de biomasse significativement supérieurs à ceux observés sous Abamectine et Tébuconazole à plusieurs temps, en particulier autour de

J14–J28 ; l'ampleur de ces différences varie selon la concentration considérée. Réponse dose-dépendante au sein de chaque pesticide : la concentration exerce un effet significatif ( $p < 10^{-6}$ ), mais non linéaire et dépendant du temps. Certaines hausses de dose s'accompagnent d'une augmentation temporaire de la biomasse (pic ou plateau transitoire), suivie d'une stabilisation ou d'un retour vers la ligne de base. Dynamique temporelle : la biomasse présente une phase ascendante modérée autour de J14–J21, avec des profils propres à chaque pesticide (interaction pesticide  $\times$  temps,  $p = 5,6 \times 10^{-14}$ ).

Les profils observés confirment ces résultats :

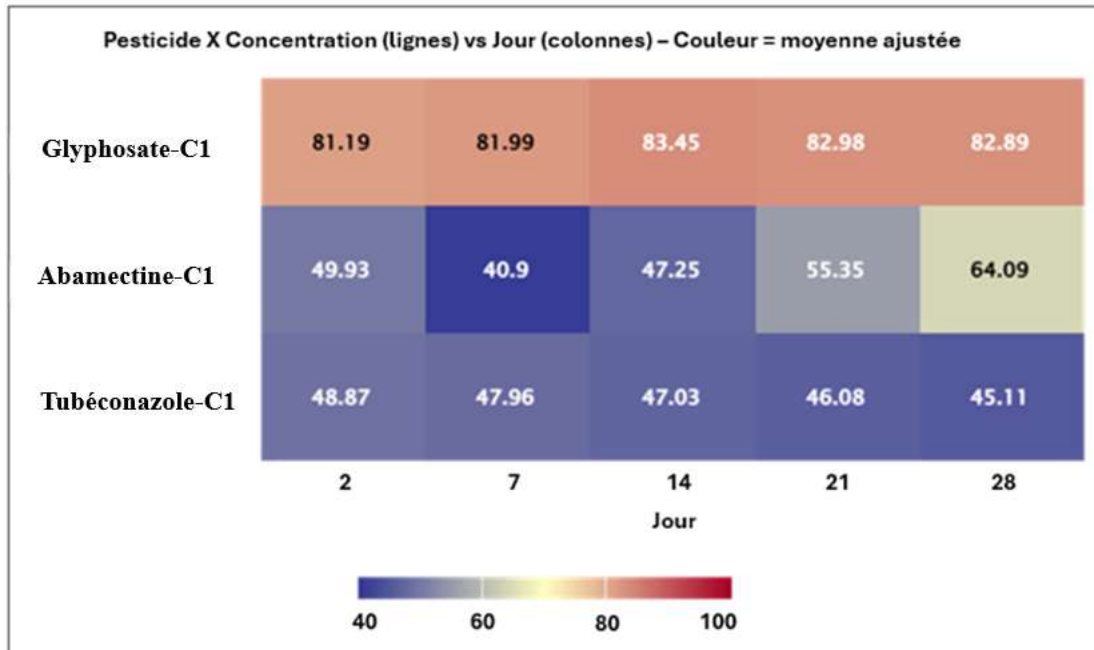
- ✓ Glyphosate : maintien des niveaux élevés et relativement stables de biomasse tout au long de l'expérimentation, avec une légère hausse à J28.
- ✓ L'abamectine présente une baisse initiale jusqu'à J7, suivie d'une augmentation progressive jusqu'à J28.
- ✓ Tébuconazole montre une diminution continue de la biomasse microbienne, avec des niveaux plus faibles que les deux autres pesticides.

La figure 78 synthétise la dynamique temporelle propre à chaque pesticide (les valeurs sont ajustées par le modèle et moyennées sur les concentrations), le glyphosate présente un profil élevé et remarquablement stable sur l'ensemble de l'essai (environ 82 - 85 mg C·kg<sup>-1</sup> s.s). Les rubans d'IC95 % étroits témoignent d'une variabilité faible et d'un maintien d'une biomasse microbienne soutenue. Concernant l'abamectine, il y a un creux précoce (autour de J7) suivi d'une remontée progressive jusqu'à J28 où les niveaux dépassent 60 mg C·kg<sup>-1</sup> s.s. Cette trajectoire évoque une inhibition transitoire puis une reprise de l'activité microbienne. Enfin, le Tébuconazole présente un profil globalement décroissant (environ 50 à 45 mg C·kg<sup>-1</sup> s.s) avec des IC95 % relativement serrés, suggérant une inhibition durable et peu de récupération au cours du temps.

La séparation visuelle des courbes confirme l'interaction pesticide  $\times$  temps mise en évidence par l'ANOVA : les écarts entre molécules évoluent avec le jour, et ne peuvent pas être résumés par un effet moyen unique. Le chevauchement limité des rubans d'IC entre Glyphosate et les deux autres pesticides aux temps tardifs corrobore des différences statistiquement marquées (cohérentes avec les comparaisons par Tukey).

Afin d'explorer plus précisément la contribution de la concentration et de son interaction avec le temps, une représentation bidimensionnelle des EMMs a été réalisée (Figure 78).

Celle-ci permet d'examiner simultanément l'effet du pesticide, de la concentration et du jour, en mettant en évidence la structure complète de l'interaction triple.



**Figure 78.** Heatmap (pesticide × concentration × jour)

La matrice des EMMs (Figure 78) illustre la dynamique temporelle de la biomasse microbienne pour les trois pesticides en fonction du temps et de la concentration C1. Pour le glyphosate, les valeurs correspondent à des moyennes marginales estimées calculées sur l'ensemble des concentrations (C1, C2, C3), tandis que pour l'Abamectine et le Tébuconazole, la concentration représentée est la seule étudiée pour chaque pesticide (C1).

L'ensemble de ces analyses confirme que la nature du pesticide, sa concentration et la durée d'exposition modulent conjointement la dynamique microbienne du sol. Les figures 77 et 78 illustrent de manière complémentaire la stabilité du Glyphosate, la plasticité de l'Abamectine et la sensibilité du Tébuconazole. Ces différences traduisent des stratégies microbiennes distinctes face au stress chimique et soulignent l'importance d'approches multifactorielles pour évaluer les impacts des pesticides sur la qualité biologique des sols.

### VII.2.6. Conclusion

En résumé, les pesticides étudiés (Glyphosate, Abamectine et Tébuconazole) exercent des effets limités sur les propriétés physico-chimiques du sol, telles que la conductivité électrique et le pH, avec des variations principalement modérées ou transitoires. Sur le plan biologique, une légère diminution de la matière organique reflète des modifications de

l'activité microbienne, sans compromettre la stabilité globale du sol. Ces observations soulignent l'importance de suivre l'évolution temporelle des paramètres physico-chimiques et biologiques afin de mieux comprendre l'impact des pesticides et d'optimiser leur usage dans une agriculture durable.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

Très peu d'études ont exploré l'impact des pesticides sur les sols oasiens de la région de Ouargla, en particulier concernant les communautés microbiennes et les propriétés physico-chimiques.

Cette étude a pour objectif de combler cette lacune en combinant des données issues à la fois des enquêtes menées auprès des agriculteurs et des expérimentations sur l'effet de trois pesticides spécifiques : le Glyphosate, l'Abamectine et le Tébuconazole, sur les sols oasiens.

Pour atteindre cet objectif, un questionnaire détaillé a été élaboré afin de recueillir des informations sur l'utilisation des pesticides, leurs doses et modes d'application, ainsi que sur la perception des agriculteurs quant à l'impact de ces produits sur la qualité des sols.

Parallèlement, des expériences contrôlées ont été réalisées à la fois en laboratoire et sur le terrain, utilisant des sols prélevés dans différents sites oasiens. Ces expérimentations ont permis de suivre les variations microbiologiques telles que la densité microbienne, la biomasse microbienne et la respiration du sol ainsi que les paramètres biophysico-chimiques, notamment la matière organique, le pH et la conductivité électrique, en fonction du type de pesticide, de la dose appliquée et du temps d'exposition.

Les résultats de l'enquête indiquent que 100 % des agriculteurs interrogés utilisent des pesticides, avec une prédominance des insecticides (64 %), suivis des herbicides (30 %) et des fongicides (6 %). La sélection des produits repose principalement sur les conseils des vendeurs spécialisés (55 %), tandis que 25 % des agriculteurs ne respectent pas strictement les doses recommandées. Toutefois, tous respectent les délais avant récolte, garantissant ainsi la sécurité sanitaire des cultures. Ces pratiques témoignent d'un usage intensif des pesticides et suggèrent que les comportements locaux peuvent amplifier leurs effets sur les sols.

Les analyses expérimentales révèlent que, malgré la stabilité générale du pH et des caractéristiques majeures du sol, l'application des pesticides provoque des variations notables qui dépendent de la dose et du temps d'exposition. Ces observations traduisent une interaction complexe entre les composés chimiques et la communauté microbienne.

Le Glyphosate a montré un effet dose-dépendant marqué. Aux doses faibles et intermédiaires, il stimule la croissance bactérienne et fongique ainsi que la biomasse microbienne. Cette stimulation favorise une minéralisation accrue de la matière organique et une respiration microbienne temporairement élevée. En revanche, la dose élevée exerce un effet

inhibiteur, réduisant l'activité microbienne et stabilisant la matière organique, ce qui reflète une toxicité directe sur certaines communautés microbiennes. Ces résultats confirment que le Glyphosate peut agir à la fois comme source de carbone pour certains microorganismes et comme facteur limitant à forte concentration, affectant ainsi la dynamique microbienne du sol.

L'Abamectine provoque une perturbation initiale des populations microbiennes, caractérisée par une diminution significative des bactéries et champignons durant la première semaine, suivie d'une récupération progressive vers les valeurs du témoin. Ce profil suggère un effet inhibiteur temporaire et réversible, mettant en évidence la résilience écologique des communautés microbiennes et leur capacité à s'adapter aux perturbations chimiques. Les modifications de la matière organique et de la conductivité électrique restent limitées, reflétant une interaction modérée avec les propriétés physico-chimiques du sol.

Le Tébuconazole, un fongicide triazolé, exerce un effet inhibiteur direct et prolongé sur la microflore du sol. Les populations fongiques et bactériennes diminuent nettement, accompagnées d'une réduction continue de la respiration microbienne. L'effet sur la matière organique est modéré, mais traduit une perturbation de l'activité microbienne responsable de sa dégradation. La conductivité électrique et le pH présentent des variations faibles mais significatives, cohérentes avec le comportement du fongicide dans la fraction solide du sol.

Concernant les propriétés physico-chimiques, tous les sols étudiés présentent une texture sablo-limoneuse, un pH globalement alcalin, une faible teneur en matière organique et des concentrations limitées en azote. L'application des pesticides entraîne des modifications transitoires de la conductivité électrique, un léger ajustement du pH et des variations dépendant du type de pesticide et de sa dose sur la matière organique. Ces changements suggèrent que les pesticides interagissent avec les composantes minérales et organiques du sol, modifiant localement les équilibres chimiques et biologiques.

Dans l'ensemble, les résultats montrent que l'impact des pesticides sur les sols oasiens est multidimensionnel et dépendant de la dose, du type de pesticide et des caractéristiques du sol. L'enquête auprès des agriculteurs complète ces observations en révélant que les pratiques actuelles, parfois non conformes aux recommandations, peuvent amplifier ces effets.

Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte la dose et le type de pesticide, ainsi que les propriétés spécifiques des sols, pour évaluer leur impact écologique. Ils fournissent une base scientifique précieuse pour une gestion raisonnée des produits phytosanitaires dans les

systèmes agricoles des oasis sahariennes, conciliant efficacité agronomique et préservation de la santé des sols et de leurs communautés microbiennes.

Enfin, ces observations ouvrent la voie à des études futures plus approfondies, en utilisant des outils d'analyse moléculaire avancés pour mieux comprendre la composition et la dynamique des communautés microbiennes, et pour relier ces informations à la santé des sols et à la productivité des cultures sur le long terme.

# Références bibliographiques

**Références bibliographiques**

ANRH (Agence nationale des ressources hydrauliques). (2004). *Synthèse sur les ressources en eau de la wilaya de Ouargla* (Rapport technique). Ouargla, Algérie, 16 p.

ACTA (Association de coordination technique agricole). (2002). *Index phytosanitaire* (38e éd.). Paris, France : ACTA Éditions, 788 p.

Adal, Y. M. (2024). The impact of beneficial microorganisms on soil vitality: A review. *Frontiers in Environmental Microbiology*, 10(2), 45–53.

Ahriz, A., Fezzai, S., & Mady, M. A. A. (2019). Predicting the limits of the oasis effect as a cooling phenomenon in hot deserts. *Desert*, 2, 255–266.

Ait El Mokhtar, M., Ben Laouane, R., Anli, M., Boutasknit, A., Fakhech, A., Wahbi, S., & Meddich, A. (2019). Climate change and its impacts on oases ecosystem in Morocco. In A. Karmaoui (Ed.), *Climate change and its impact on ecosystem services and biodiversity in arid and semi-arid zones* (pp. 217–245). IGI Global.

Al Rajab Abdul Jabbar. (2007). *Impact sur l'environnement d'un herbicide non sélectif, le glyphosate* (Thèse de doctorat). Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 148 p.

Alengebawy, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R., et Wang, M. Q. (2021). Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health implications. *Toxics*, 9(3), 42.

Ali, S. W., Li, R., Zhou, W.-Y., Sun, J.-Q., Guo, P., Ma, J.-P., & Li, S.-P. (2010). Isolation and characterization of an abamectin-degrading Burkholderia cepacia-like GB-01 strain. *Biodegradation*, 21(4), 681–689.

Aloui, N. (2019). *Étude de la biodégradation de quelques pesticides par des bactéries isolées de différentes niches écologiques de la wilaya de Ouargla* (Thèse de doctorat). Université de Ghardaïa, Algérie, 171 p.

Amouzay, H., Chakir, R., Dabo-Niang, S., & El Ghini, A. (2023). Structural Changes in Temperature and Precipitation in MENA Countries. *Earth Systems and Environment*, 7(2), 359–380.

Araújo, A., Monteiro, R., & Abarkeli, R. (2003). Effect of glyphosate on the microbial activity of two Brazilian soils. *Chemosphere*, 52(5), 799–804.

- Ardouin, A. (2014). *Guide pratique pour la description des sols de France*. CEN Bourgogne, 430 p.
- Aubert, G. (1978). *Méthodes d'analyses des sols*. 2e édition, Centre régional de documentation pédagogique (CRDP), Marseille, France, 191 p
- Bai, S. H., & Ogbourne, S. (2016). Eco-toxicological effects of the avermectin family with a focus on abamectin and ivermectin. *Chemosphere*, 154, 204–214.
- Baize, D. (2000). *Guide des analyses en sciences du sol*. Éditions Quae, Versailles, France, 257 p.
- Bakker, M. G., Chaparro, J. M., Manter, D. K., & Vivanco, J. M. (2015). Impacts of bulk soil microbial community structure on rhizosphere microbiomes of *Zea mays*. *Plant and Soil*, 392(1), 115–126.
- Battaglin, W. A., Meyer, M. T., Kuivila, K. M., & Dietze, J. E. (2005). Glyphosate and its degradation product AMPA in surface waters, sediments, and soils. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(1), 323–332.
- Bazzine, S., & Hamdi-Aïssa, N. (2014). Étude des propriétés physico-chimiques et microbiologiques des sols oasiens de la région de Ouargla. *Revue Algérienne de Biologie*, 5(2), 45–58.
- Ben Abdallah, A. (1990). La phoeniciculture. In : Dollé, V. & Toutain, G. (eds.), *Les systèmes agricoles oasiens*. Montpellier: CIHEAM, pp. 105–120.
- Ben Bessis, Y., Bedda, H., Boumadda, A., Benbrahim, F., & Bouammar, B. (2024). Agroecosystems in the basin of Ouargla (Algeria): Developing a typology and analysis of function. *African Journal of Biological Sciences*, 6(13), 234–252.
- Ben Salah, M. (2014). *Le recyclage des sous-produits des oasis : acquis et perspectives*. Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS), Projet MENA-DELP, 86 p.
- Bending, G. D., Lincoln, S. D., & McLain, J. E. T. (2021). Effects of triazole fungicides on soil microbiota and enzyme activities. *Agriculture*, 11(9), 893.
- Benslama, A., Benbrahim, F., Rym Gadoum, L., Gómez Lucas, I., Mordan Vidal, M. M., Navarro Pedreño, J., & Bech Borrás, J. (2024). Soil carbon storage under different types of arid land use in Algeria. *Environmental Geochemistry and Health*, 46, Article 330.

- Berkal, I., Walter, C., Michot, D., & Djili, K. (2014). Seasonal monitoring of soil salinity by electromagnetic conductivity in irrigated sandy soils from a Saharan oasis. *Soil Research*, 52(8), 769–780.
- Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28, 1327–1350.
- Borggaard, O. K., & Gimsing, A. L. (2008). Fate of glyphosate in soil and the possibility of leaching to ground and surface waters: a review. *Pest Management Science*, 64(4), 441–456.
- Borggaard, O. K., & Gimsing, A. L. (2008). Fate of glyphosate in soil and its effect on pH and nutrient availability. *Environmental Science and Pollution Research*, 15(4), 316–328.
- Bonnard & Gardel. (2003). *Études d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation : Mesures de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Volet étude d'impact sur l'environnement, mission IIB : Caractérisation environnementale de la situation actuelle* (Rapport n° 6029.01-RN058). Distribution ONA et BG
- Bouguedoura, N., Bennaceur, M., Babahani, S., & Benziouche, S. E. (2015). Date palm status and perspective in Algeria. In J. M. Al-Khayri, S. M. Jain, & D. V. Johnson (Eds.), *Date palm genetic resources and utilization* (Vol. 1, pp. 125–168).
- Bouraoui, M., Cheriti, A., & Khaldi, A. (2020). État des lieux de l'usage des pesticides dans les systèmes agricoles sahariens : cas de la région d'Ouargla. *Revue des Bioressources*, 10(2), 45–56.
- Bourbia Ait-Hamlet, S. (2013). *Évaluation de la toxicité de mixture de pesticides sur un bioindicateur de la pollution des sols, H. aspersa* (Thèse de doctorat). Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 110 p.
- Bouselsal, B. et Kherici, N. (2014). Effets de la remontée des eaux de la nappe phréatique sur l'homme et l'environnement : Cas de la région d'El-Oued (SE Algérie). *African Science Review: International Des. Science and Technology*, 10, 161–170.
- Bouzaher, S. L. born, & Alkama, D. (2013). The Requalification of the Palm Trees of Ziban as a Tool for Sustainable Planning. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 102, 508–519.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils* (15th ed., Global ed.). Pearson Education, 1104 p.

- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1–2), 3–22.
- Calvet, R. (2003). *Le sol : propriétés et fonctions. Tome 1 : Constitution et structure, phénomènes aux interfaces*. Éditions France Agricole, France, pp. 27–313.
- Calvet, R., Barriuso, E., Bedos, C., Benoit, P., Charnay, M.-P., & Coquet, Y. (2005). *Les pesticides dans le sol : conséquences agronomiques et environnementales*. Éditions France Agricole, Paris, 625 p.
- Canfield, D. E., Glazer, A. N., & Falkowski, P. G. (2010). The evolution and future of Earth's nitrogen cycle. *Science*, 330(6001), 192-196.
- Canfora, L., Pugliese, M., & Furmanczyk, E. M., 2024. Editorial: The impact of environmentally friendly agricultural practices on soil microbiome. *Frontiers in Microbiology*, 15:1505220.
- CDARS (Commissariat au Développement de l'Agriculture des Régions Sahariennes). (2013). Rapport : *données statistiques*. Ouargla, Algérie.
- Cehma, A. (2011). *Le Sahara en Algérie : situation et défis*. Communication présentée lors de la conférence internationale « L'effet du changement climatique sur l'élevage et la gestion durable des parcours dans les zones arides et semi-arides du Maghreb », Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 21–24 novembre 2011.
- Cherif, R. (2020). *Étude comparative des activités biologiques des extraits de deux plantes spontanées récoltées au Sahara algérien* (Thèse de doctorat en écologie saharienne). Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre, Université de Ghardaïa, Algérie, 151 p
- Chauhan, P., Sharma, N., Tapwal, A., Kumar, A., Verma, G. S., Meena, M., Seth, C. S., & Swapnil, P. (2023). Soil microbiome: Diversity, benefits and interactions with plants. *Sustainability*, 15(19), 14643.
- Chen P, Wang S, Liu Y, Wang Y, Li Z, Wang Y, Zhang H, Zhang Y. (2022). Spatio-temporal patterns of oasis dynamics in China's drylands between 1987 and 2017. *Environmental Research Letters* 17(6):64044

- Chen, W.-J., Liu, M., Chen, S.-F., Zhang, Y., Song, H., Abdoulahi, M. H., Bhatt, K., Ghorab, M. A., & Zhang, W. (2025). Glyphosate bioremediation using a newly isolated *Bacillus albus* strain F9D: mechanisms and kinetic studies. *Microbial Cell Factories*, 24, 195.
- Chossat, J.C., 2005. *La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols*. Choix des méthodes. TEC & DOC, Hermès- Lavoisier. France.705p.
- Condron, L. M., Turner, B. L., & Cade-Menun, B. J. (2005). Chemistry and dynamics of soil organic phosphorus. In J. T. Sims & A. N. Sharpley (Eds.), *Phosphorus: Agriculture and the environment* (Agronomy Monograph No. 46, pp. 87–121). ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.
- Cornet, A. (1961). *Initiation à l'hydrogéologie saharienne* [Cours ronéoté destiné aux officiers du cours préparatoire aux affaires sahariennes]. S.E.S., Birmandreis, Alger.
- Corwin, D. L., & Lesch, S. M., 2019. Apparent soil electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 165 :104943.
- Coulibaly, H. (2005). *Le SCV (semis direct sous couverture végétale), un élément stratégique de gestion durable des terres agricoles : une expérience française comme base de réflexion pour le Mali* (Mémoire DEPA, pp. 13–20). France.
- Cycoń, M., Mroziak, A., & Piotrowska-Seget, Z. (2019). Bioaugmentation as a strategy for the remediation of pesticide-polluted soil: A review. *Chemosphere*, 227, 418–440.
- Cycoń, M., & Piotrowska-Seget, Z. (2016). Pyrethroid-degrading microorganisms and their potential for the bioremediation of contaminated soils: A review. *Frontiers in Microbiology*, 7 :1463.
- Dadda Moussa, M. L. (2007). *Les effets induits des différents programmes de développement agricole sur la préservation de l'écosystème saharien : Cas de la région de Ouargla* (Mémoire de magister). Université Kasdi Merbah Ouargla.
- Daddi Bouhoun, M. (2010). *Contribution à l'étude de l'impact de la nappe phréatique et des accumulations gypso-salines sur l'enracinement et la nutrition du palmier dattier dans la cuvette de Ouargla (sud-est algérien)* (Thèse de doctorat). Université Badji Mokhtar Annaba.
- Dakhia N., Bensalah M. K., Romani M., Djoudi A. M. et Belhamra M., 2013. État phytosanitaire et diversité variétale du palmier dattier au Bas Sahara Algérie, *Journal Algérien des Régions Arides*, N spécial N 12-2013, page 5-15.

- Das, D., Sengupta, S. (2024). The role of microorganisms in agriculture: Enhancing soil health, crop productivity, and sustainable farming practices. *Agriculture and Sustainability Journal*, 6(2), 219.
- Delgado-Baquerizo, M., et al. (2018). A global atlas of the dominant bacteria found in soil. *Science*, 359(6373), 320–325.
- Dionisio, A. C., & Rath, S. (2016). Abamectin in soils: Analytical methods, kinetics, sorption and dissipation. *Chemosphere*, 151, 17–29.
- Djemili, A., & Belmahdi, H. S. (2019). Lecture des paysages et du système écologique de la ville oasis pour promouvoir la durabilité du paysage urbain de la ville désertique moderne : étude de cas de la ville de Biskra. *Courrier du Savoir*, (01), 23–30, p. 25.
- Dubey, R., Gunasekaran, A., Childe, S. J., Papadopoulos, T., Luo, Z., Wamba, S. F., & Roubaud, D., 2019. Can big data and predictive analytics improve social and environmental sustainability? *Technological Forecasting and Social Change*, 144, 534–545.
- Dubost, F. (1991). La problématique du paysage : État des lieux. *Études rurales*, (2), 121–124.
- Duchaufour, P., 1994. *Pédologie : sol, végétation, environnement*. Masson éditeur, Paris, 476 p.
- Duke, S. O., & Powles, S. B. (2008). Glyphosate: a once-in-a-century herbicide. *Pest Management Science*, 64(4), 319–325.
- Dutil, P. (1971). *Contribution à l'étude des sols et des paléosols du Sahara* (Thèse de doctorat d'État, Faculté des sciences de l'Université de Strasbourg). (346 p.)
- El Fergougui, M. M., Benyamina, H., Boutoutaou, D., Bouzouaid, S., & Chaib, H. (2023). Study of soils salinity in arid area: Case of Ouargla (Algeria). *Journal of Survey in Fisheries Sciences*, 10(3), 442–450.
- Egamberdieva, D., Jabbarov, Z., Arora, N. K., Kimura, S. D., & others, 2021. Biochar mitigates effects of pesticides on soil biological activities. *Environmental Sustainability*, 4(4), 389–401.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2017). *The future of food and agriculture: Trends and challenges*. Rome, Italy, 163 p.

- Fan, P., Ouyang, Z., Basnou, C., Pino, J., Park, H., & Chen, J., 2017. Nature-based solutions for urban landscapes under post-industrialization and globalization: Barcelona versus Shanghai. *Environmental Research*, 156, 272–283.
- Ferreira, T., Silva, B., Gonçalves, M., & Correia, M. (2009). Effects of triazole fungicides on soil microorganisms and enzyme activities. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131(3-4), 226–233.
- Fierer, N. (2021). Embracing the unknown: Disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 19, 579–590.
- Fierer, N., Leff, J. W., Adams, B. J., et al. (2012). Cross-biome metagenomic analyses of soil microbial communities and their functional attributes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(52), 21390–21395.
- Fierer, N., Schimel, J. P., & Holden, P. A. (2003). Influence of drying–rewetting frequency on soil bacterial community structure. *Microbial Ecology*, 45(1), 63–71.
- Gan, L., Liu, X., Zhang, Y., & Wang, Q. (2021). Repeated exposure to tebuconazole alters soil microbial community and functional profiles. *Environmental Pollution*, 287, 117660.
- Glick, B. R. (2012). Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications. *Scientifica*, 2012 :963401.
- Gobat, J. M., Aragno, M., & Mathey, W. (2010). *Le sol vivant : Bases de pédologie – Biologie des sols* (3e éd. Révisée). (165 p.).
- Goodfellow, M., & Fiedler, H. P. (2010). *Actinobacteria: Applications in biotechnology*. Springer. (502 p.).
- Gras, R. (1990). *Systèmes de culture : Définitions et concepts clés*. In L. Combe & D. Picard (Eds.), *Les systèmes de culture* (pp. 7–14). INRA.
- Halitim, A. (1985). *Contribution à l'étude des sols des zones arides (hautes plaines steppiques de l'Algérie) : Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols* (Thèse de doctorat). Université de Rennes. (384 p.).
- Hamdi-Aissa B. et Girard, M.C. (2000). Utilisation de la télédétection en régions sahariennes pour l'analyse et l'extrapolation spatiale des pédopaysages. *Sécheresse*, 11, 179-188

- Hamdi-Aïssa, B. (2001). *Le fonctionnement actuel et passé des sols du Nord Sahara (Cuvette de Ouargla) : Approches micromorphologique, géochimique, minéralogique et organisation spatiale* (Thèse de doctorat). INA Paris-Grignon. (315 p.).
- Han, L., Kong, X., Xu, M., Nie, J., Sun, H., & Wang, Y. (2021). Repeated exposure to fungicide tebuconazole alters the degradation characteristics, soil microbial community and functional profiles. *Environmental Pollution*, 287, 117660.
- Haney, R. L., Senseman, S. A., Hons, F. M., & Zuberer, D. A. (2000). Effect of glyphosate on soil microbial activity and biomass. *Weed Science*, 48(1), 89–93.
- Hillel, D. (2004). *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier Academic Press. (494 p.)
- Idder, A., Nezli, I. E., Idder, T., & Azib, S. (2021). Winter saline accumulation in the Bare Aridosols: The example of the bowl of Ouargla (Northern Sahara Algeria). *International Journal of Biosciences*, 18(3), 205–213.
- Idder, T., Idder, A., Tankari Dan-Badjo, A., Benzida, A., Merabet, S., Negais, H., & Serraye, A. (2014). Les oasis du Sahara algérien, entre excédents hydriques et salinité. L'exemple de l'oasis de Ouargla. *Revue des Sciences de l'Eau*, 27(2), 155–164.
- Imfeld, G., Lefrancq, M., Maillard, E., & Payraudeau, S. (2013). Transport and fate of glyphosate and AMPA in surface water and soil. *Chemosphere*, 93(3), 558–573.
- INRS. (2013). *Fiche toxicologique n°299 : Abamectine*. Base de données Fiches toxicologiques. Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS).
- INRS. (2017). *Fiche toxicologique n°299 : glyphosate*. Base de données Fiches toxicologiques. Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS).
- International Organization for Standardization. (1995). ISO 11048:1995 – *Soil quality: Determination of water-soluble and acid-soluble sulfate*. ISO.
- Jablonowski, N. D., Burauel, P., & Schäffer, A. (2015). Soil ecotoxicity assessment of glyphosate use under field conditions: microbial activity and community structure of Eubacteria and ammonia-oxidising bacteria. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 112, 76–84.
- Jablonowski, N. D., Schäffer, A., & Burauel, P. (2021). Effects of glyphosate-based herbicides and their active ingredients on earthworms, water infiltration and glyphosate leaching are influenced by soil properties. *Environmental Sciences Europe*, 33, 51.

- Jablonowski, N. D., Schäffer, A., & Burauel, P. (2023). Glyphosate-based herbicide formulations with greater impact on earthworms and water infiltration than pure glyphosate. *Soil Systems*, 7(3), 66.
- Jansson, J. K., & Hofmockel, K. S. (2020). Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 18(1), 35–46.
- Karabi, M. (2016). *Fonctionnement microbiologique des sols oasiens : Cas de quelques sols de la région de Ouargla* (Thèse de doctorat en sciences du sol). Université de Ouargla. (215 p.).
- Kekane, S.S., Chavan, R.P., Shinde, D.N., Patil, C.L., & Sagar, S.S. (2015). A review on physico-chemical properties of soil. *International Journal of Chemical Studies*, 3(4), 20-25
- Khan, M. A., & Khan, S. T. (2020). Microbial communities and their predictive functional profiles in the arid soil of Saudi Arabia. *SOIL*, 6, 513–528.
- Knight, J., Merlo, S., & Zerboni, A. (2023). *Landscapes and landforms of the central Sahara*. Springer. (235 p.).
- Kumar, U., Kasturappa, G., Annappa, N. N., & Rangaiah, K. M. (2025). Pesticide residue pollution and its impact on environment and human health. In *Research Trends in Environmental Science*, Vol. 15. AkiNik Publications, New Delhi, India, pp. 19–32.
- Kremer, R. J., & Means, N. E. (2009). Glyphosate and glyphosate-resistant crop interactions with rhizosphere microorganisms. *European Journal of Agronomy*, 31, 153–161.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627.
- Lal, R. (2020). Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66(1), 1–9.
- Leroux P. (2003). Mode d'action des produits phytosanitaires sur les organismes pathogènes des plantes. *Biologie et pathologie végétales*, PP 326.
- Li, J., Wang, X., & Zhao, L. (2016). Abamectin in soils: Analytical methods, kinetics, sorption and dissipation. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 51(4), 234–243.
- Link, J. S. (2018). Critical Review of the Effects of Glyphosate Exposure to the Environment and Humans through the Food Supply Chain. *Sustainability*, 10(4), 950.

- Liu, Y., Chen, W., & Zhao, J. (2021). Effects of tebuconazole application on soil microbial diversity and enzyme activities. *Molecules*, 27(21), 7501.
- Lo, C. C. (2010). Effect of pesticides on soil microbial community. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 45(5), 348–359.
- Maamri, K. (2026). *Contribution à la caractérisation phénotypique de cinq génotypes de Chenopodium quinoa Willd. Pour leur adaptation aux conditions sahariennes (cas de Ouargla), Algérie* (Thèse de doctorat). Université Kasdi Merbah Ouargla. (150 p.).
- Ministère de l’Agriculture et du Développement Rural (MADR). (2019). *Statistique agricole : Superficies et productions, série “B”*. <https://madr.gov.dz/wp-content/uploads/2022/04/SERIE-B-2019.pdf>
- Malik Z, Ahmad M, Abassi GH, Dawood M, Hussain A, Jamil M (2017) Agrochemicals and soil microbes: interaction for soil health. In: Hashmi MZ, Kumar V, Varma A (eds), *Xenobiotics in the soil environment*, vol 49. Springer, Cham, pp 139–152
- Mamane, A. (2016). *Effets sanitaires aigus de l'exposition aux pesticides en milieu rural : étude dans un pays du nord* (Thèse de doctorat en épidémiologie). Université de Bordeaux. 236 p.
- Manseur, A. (2018). « *Algérie : utilisation des pesticides, un meilleur contrôle s'impose (contribution)* ». Maghreb Émergent, 17 décembre 2018.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press. 651 p.
- Martin, R. J., Robertson, A. P., & Wolstenholme, A. J. (2002). Mode of action of the macrocyclic lactone. In: Vercruyssen, J. & Rew, R. S. (eds.), *Macrocyclic lactones and antiparasitic therapy*. CAB International, pp. 125–162.
- McKellar, Q. A. (1997). Ecotoxicology and residues of anthelmintic compounds. *Veterinary Parasitology*, 72(3–4), 413–425.
- Muñoz-Leoz, B., Ruiz-Romera, E., Antigüedad, I., & Garbisu, C. (2011). Tebuconazole application decreases soil microbial biomass and activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(10), 2176–2183.

- Nguyen, D. B., Rose, M. T., Rose, T. J., Morris, S. G., & van Zwieten, L. (2016). Impact of glyphosate on soil microbial biomass and respiration: A meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 92, 50–57.
- Mohabey, D. P., Nongkynrih, J. M., & Kumar, U. (2023). Urban growth trend analysis of proposed Greater Silchar City, India, using landscape metrics and Shannon entropy model. *Environment, Development and Sustainability*, 26(10), 25335–25366.
- Omorinola, M., Oyedeji, A. O., & Adebayo, O. (2023). Biodegradation of glyphosate containing herbicide by soil fungi. *International Journal of Life Sciences*, 11(3), 72–80.
- Ōmura, S. (2008). Ivermectin: 25 years and still going strong. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 31(2), 91–98.
- Popp, J., Pető, K., & Nagy, J. (2013). Pesticide productivity and food security. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(1), 243–255.
- Prashar, P., & Shah, S. (2016). Impact of fertilizers and pesticides on soil microflora in agriculture. In E. Lichtfouse (Ed.), *Sustainable agriculture reviews*, Vol. 19, pp. 331–336.
- Qi, Z., Miller, G. W., & Voit, E. O. (2014). Rotenone and paraquat perturb dopamine metabolism: a computational analysis of pesticide toxicity. *Toxicology*, 315, 92–101.
- Qiu, D., Xu, N., Zhang, Q., Zhou, W., Wang, Y., Zhang, Z., Yu, Y., Lu, T., Sun, L., Zhou, S., Peijnenburg, W. J. G. M., & Qian, H. (2022). Negative effects of abamectin on soil microbial communities in the short term. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1053153.
- Rahal Bouziane, H., Boulahbal, O., Blama, A., Mossab, K., Djidda, A., Allam, A., & Tirichine, A. (2010). Contribution à l'étude des régions arides. *Revue des Régions Arides*, Numéro spécial 24(2), Actes du 3ème meeting international « Aridoculture et cultures oasiennes : gestion et valorisation des ressources et applications biotechnologiques dans les agrosystèmes arides et sahariens », Djerba (Tunisie), 15–17/12/2009.
- Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 60, Washington, D.C., 160 p.
- Rognon, P. (1994). Les principaux sols du Maghreb. In : Désertification et aménagement, Med. Campus, n°8, Cours de séminaire, Mednin (Tunisie), Agadir (Maroc), Caen, pp. 89–112.

- Roman, D. L., Voiculescu, D. I., Filip, M., Ostafe, V., & Isvoran, A. (2021). Effects of triazole fungicides on soil microbiota and on the activities of enzymes found in soil: a review. *Agriculture*, 11(9), 893.
- Rouvillos-brigol M. (1975). *Le pays de Ouargla (Sahara algérien) variation et organisation*. Pub. Univ. Sorbonne. Paris. 361p.
- Saleem, M., Hu, J., & Jousset, A. (2019). More than the sum of its parts: Microbiome biodiversity as a driver of plant growth and soil health. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 50, 145-168.
- Sarkar, T., Ram, S., & Verma, P. (2025). Ecological footprints of Pesticides in Agriculture: Environmental and Health impacts. *Journal of Agriculture Biotechnology & Applied Sciences*, 3(1), 146-150.
- Satyanarayana, T., Johri, B. N., & Prakash, A. (eds.). (2012). *Microorganisms in Sustainable Agriculture and Biotechnology*. Springer Science+Business Media, Dordrecht, 829 p.
- Sedra, M. H. (2003). *Le palmier dattier : base de la mise en valeur des oasis au Maroc*. INRA Édition. 265 p
- Slimani, R., Charikh, M., & Aljaradin, M. (2024). Hydrogeological characterization and management of the Ouargla aquifer system in the Algerian Sahara. *African Journal of Biological Sciences*, 6(13), 7021-7039.
- Selmi, S., & Boulinier, T. (2003). Breeding bird communities in southern Tunisian oases: The importance of traditional agricultural practices for bird diversity in a semi-natural system. *Biological Conservation*, 110(3), 285–294.
- Senoussi A. (2000), Le palmier dattier dans le pays de Ouargla : éternelle culture et des perspectives de développement inouïes. *In journée d'Etude sur la culture du palmier dattier*, Université Amar Telidji - Laghouat (Algérie), les 22 et 23 novembre 2000
- Sharma, N., Kumawat, M., & Shukla, P. (2012). Algal biofertilizers and their role in soil fertility. *Asian Journal of Agricultural Research*, 6(2), 74-81.
- Singh, B. K., Walker, A., Morgan, J. A. W., & Wright, D. J. (2018). Effects of fungicides on soil microbial communities and biochemical processes. *Soil Biology & Biochemistry*, 119, 65–75.

- Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S. M., de Moraes Sa, J. C., & Albrecht, A. (2002). Soil organic matter, biota and aggregation. *Soil and Tillage Research*, 72(2), 203–215.
- Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis* (3rd ed.). Academic Press, London, 787 p.
- Spinelli, V., Ceci, A., Dal Bosco, C., Gentili, A., & Persiani, A. M. (2021). Glyphosate-eating fungi: Study on fungal saprotrophic strains' ability to tolerate and utilise glyphosate as a nutritional source and on the ability of *Purpureocillium lilacinum* to degrade it. *Microorganisms*, 9(11), 2179.
- Srivastava, P., Singh, P. K., Singh, R., Bhadouria, R., Singh, D. K., Singh, S., Afreen, T., Tripathi, S., Singh, P., Singh, H., & Raghubanshi, A. S. (2016). Relative availability of inorganic N-pools shifts under land use change: an unexplored variable in soil carbon dynamics. *Ecological Indicators*, 64, 228–236.
- Suwanaruang, T. (2024). Pesticides, Toxicity and Its Effects on Human Health and Environment. Kalasin University, Faculty of Science and Health Technology, Thailand, 119 p.
- Suwardji, S., & Sudantha, I. M. (2021). The Fate of Glyphosate in Soil and Water: A Review. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 7(Special Issue), 389–399.
- Tang, J., Zhu, H., Ma, X., Ding, Z., Luo, Y., Wang, X., Gao, R., & Gong, L. (2025). Effects of Oasis Evolution on Soil Microbial Community Structure and Function in Arid Areas. *Forests*, 16(2), 343.
- Torretta, V., Katsoyiannis, I. A., Viotti, P., & Rada, E. C. (2018). Critical review of the effects of glyphosate exposure on human health: From the absorption to the environmental fate. *Environmental Engineering and Management Journal*, 17(9), 2189–2197.
- Toutain, G. (1973). La micro-exploitation phoenicicole saharienne face au développement. *Options Méditerranéennes*, 26, 73–81. CIHEAM, Montpellier.
- Țopa, D.-C., Căpșună, S., Calistru, A.-E., & Ailincăi, C. (2025). Sustainable practices for enhancing soil health and crop quality in modern agriculture: A review. *Agriculture*, 15(9), 998.
- Tripathi S, Srivastava P, Devi RS, Bhadouria R (2020) Influence of synthetic fertilizers and pesticides on soil health and soil microbiology. In: Vara Prasad MN (ed) Agrochemicals detection, treatment and remediation. *Butterworth-Heinemann*, pp 25–54

- Twagirayezu, G., Cheng, H., Wu, Y., Lu, H., Huang, S., Fang, X., & Irumva, O. (2024). Insights into the influences of biochar on the fate and transport of pesticides in the soil environment: A critical review. *Environmental Pollution*, Vol. 285, 115-13
- Van der Heijden, M. G. A., Bardgett, R. D., & van Straalen, N. M. (2008). The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 11(3), 296–310.
- Van der Heijden, M. G. A., Hartmann, M., & van Straalen, N. M. (2015). The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and ecosystem functioning. *Bioscience*, 65(1), 69–79.
- Vázquez, M. B., Moreno, M. V., Amodeo, M. R., & Bianchinotti, M. V. (2021). Effects of glyphosate on soil fungal communities: a field study. *Revista Argentina de Microbiología*, 53(4), 349–358.
- Vidal, M. (2005). *Ajustement entre des systèmes irrigués et des systèmes de culture diversifiés : fonctionnement de deux oasis du Tafilalet* (Mémoire de Master). 200 p.
- Vincze, É. B., Becze, A., Laslo, É., & Mara, G. (2024). Beneficial soil microbiomes and their potential role in plant growth and soil fertility. *Agriculture*, 14(1), 152.
- Walder, F., van der Heijden, M. G. A., & Boller, T. (2022). Fungal networks in the soil: Ecology, mechanisms, and implications for agriculture. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 329–354
- Werheni Ammeri, P., López, A., & García, R. (2023). Improvement of degraded agricultural soils through integrated management practices: Effects on soil microbiota. *Soil Use and Management*, 39(1), 123–136
- Xue, J., Gui, D., Lei, J., Sun, H., Zeng, F., Mao, D., Zhang, Z., Jin, Q., & Liu, Y. (2019). Oasis microclimate effects under different weather events in arid or hyperarid regions: a case analysis in the southern Taklimakan Desert and implications for maintaining oasis sustainability. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(1–2), 89–101.
- Zabaloy, M. C., Gomez, E., & Sampedro, I. (2012). Assessment of microbial community function and structure in soil microcosms receiving different doses of glyphosate. *Applied Soil Ecology*, 61, 333–339.

Zhao, H., Tao, K., Zhu, J., Liu, S., Gao, H., & Zhou, X. (2015). Bioremediation potential of glyphosate-degrading *Pseudomonas* spp. strains isolated from contaminated soil. *Journal of General and Applied Microbiology*, 61(5), 165–170.

Zenkri, S. (2016). *L'agriculture saharienne : du système oasien traditionnel à l'établissement d'une conception d'économie de marché et de développement durable* (Thèse de doctorat en sciences agronomiques). Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem. (244 p.).

Zhang, B., Zhang, J., Liu, Y., Shi, P., Wei, G. (2017). Depth-related changes in community structure and metabolic potential of the soil microbiome revealed by metagenomics. *Microbiome*, 5(1), 113.

Zhang, W., Yu, Y., Lin, K., Li, S., Wu, J., & Fan, D. (2004). Microbial degradation of Abamectin in soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15(11), 2175–2178.

Zobiolo, L. H. S., Kremer, R. J., Oliveira, R. S., & Constantin, J. (2011). Glyphosate affects micro-organisms in rhizospheres of glyphosate-resistant soybeans. *Journal of Applied Microbiology*, 110(1), 118–127.

# Annexes

## Annexe 1

### Questionnaire utilisé pour l'enquête sur l'utilisation des pesticides par les agriculteurs

#### Enquête de terrain

##### 1-Coordonnées de l'agriculteur

Nom et Prénom :

Tél :

Mail :

Adresse :

##### 2- Informations de l'exploitation :

Nom de l'exploitation :.....

Système de culture .....

Superficie (Ha): .....

Précédent cultural :...

Culture en place :.....

##### 3-Travail du sol :

Travaux effectués (labour/sarclage/etc.)	Date

#### **4- Fertilisation**

##### **❖ *Apports organiques***

Type d'apport (lisier, fumier...)	Date

##### **❖ *Apports minéraux***

Date	Type (N,P, K....)	Dose kg/ha

#### **5- Etat phytosanitaire**

Culture	Symptômes	Identification	Efficacité

**6- Avez-vous recours à l'utilisation de pesticides dans vos cultures? oui.....Non.....**

Si oui citez-les plus fréquemment utilisées pour les différentes cultures :

Culture	Date	Surfaces	Pesticides utilisés (Nom commerciale+ Matière active)	Surfaces traitées	Dose appliquée	Nombre de fois/saison

**7- Parmi les facteurs suivants, lequel détermine le choix des produits utilisés :**

Efficacité..., Prix....., Dose d'emploi ..., Toxicité..., Produit biologique....

**8- Quel (s) facteur (s) induisent les traitements que vous effectuez ?**

- Observation des maladies ou insectes sur les plantes...

- Présence de plantules de mauvaises herbes...
- Présence des mauvaises herbes adultes, voire en fleurs...
- Condition météo favorisant les maladies ou insectes...
- Protection préventive...

9- Quel est le type du matériel utilisé pour les traitements ?

N°	Matériel	Capacité
01		
02		
03		

10- Quels équipements de protection utilisez-vous ?

- Masque
- Lunettes de protection
- Combinaison de protection
- Ensemble complet des équipements de protection
- Aucun équipement

11- Respectez-vous les délais d'attente avant récolte ? oui... non...

12- Respectez-vous toujours la dose recommandée lors de l'utilisation de pesticides ou d'engrais ? Oui Non...

13- Pensez-vous que l'utilisation des pesticides peut provoquer une pollution du sol ? Oui Non....

14- Selon vous, quel est l'impact des pesticides sur la fertilité du sol ?

- Très important
- Modéré
- Faible
- Aucun impact

15- Existe-t-il un point d'eau (puits, cours d'eau, forage...) à proximité ou dans votre champ ? Oui... Non....

-Si oui préciser.....

16-Autre observation .....  
 .....  
 .....  
 .....

## **Annexe 2**

### **Milieux de culture**

#### **A- Milieu de culture pour Bactéries (Pochon, 1954)**

Extrait de viande .....	1g
Extrait de levure .....	2g
Chlorure de sodium .....	5g
Peptone .....	10g
Agar-agar .....	15g
Extrait de terre.....	100ml

Dissoudre les constituants dans un litre d'eau distillée, puis autoclaver le mélange à 121 °C pendant 15 minutes.

#### **B- Milieu PDA d'après Davet et al. (1985)**

Pomme de terre .....	200g
Glucose .....	20g
Agar-agar .....	20g

Le milieu est préparé selon les étapes suivantes : 200 g de pommes de terre, pelées, lavées et coupées en fines tranches, sont cuites dans 500 ml d'eau distillée pendant une heure. L'extrait obtenu est ensuite filtré à travers plusieurs couches d'étamine pour en presser le liquide. Le glucose et l'agar sont ajoutés à cet extrait, puis le volume est complété à un litre avec de l'eau distillée.