

Projet de fin d'études

Pour l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'état en Agronomie
Option : Management des ressources en sol et en eau.

Évaluation de la gestion de la fertilité des sols dans les oasis de montagnes : Cas de M'Smerir

Présenté et soutenu publiquement par :

BADDOU Alae

Devant le jury composé de :

Pr. NAIMI Mustapha	IAV Hassan II	Président
Pr. SEIF-ENNASR Marieme	IAV Hassan II	Rapporteuse
Pr. CHIKHAOUI Mohamed	IAV Hassan II	Co-rapporteur
Pr. BURTE Julien	IAV Hassan II / CIRAD	Examineur
Pr. EL JANATI Mustapha	IAV Hassan II	Examineur

Octobre 2023

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A mes très Chers Parents

Aucun hommage ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien être. Grâce à vous que j'ai pu gravir les pentes qui me semblaient infranchissables.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance.

J'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondés en moi et réaliser aujourd'hui l'un de vos rêves.

*Puisse Allah vous accorder une longue vie et vous procurer santé et bonheur Je vous aime tout simplement **Maman et Papa.***

A mon frère et mes sœurs

Aucun mot ne peut exprimer la profondeur de mon amour et l'attachement que j'éprouve à votre égard. Je ne pourrais jamais imaginer la vie sans vous, vous comptez énormément pour moi. Je n'oublierais jamais votre soutien constant vos encouragements, et vos affections sans réserves.

Puisse Allah vous protéger et renforcer notre fraternité

*Je vous aime du fond du cœur mes chers : **Khalil, Nahia, Issad et Wadia***

*A mes chers amis **Zaineb, Ikram, Hiba, Chaimae, Hajar, Rania, Aya, Younes, Zakaria et Taha.***

En témoignage des agréables moments que nous avons passés ensemble.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

REMERCIEMENTS

À l'issue de ce travail, je souhaite exprimer ma sincère gratitude envers toutes les personnes qui ont joué un rôle crucial dans la réalisation de mon projet de fin d'études.

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement mon encadrante, Professeur **SEIF ENNASR Marieme**, pour sa disponibilité inépuisable et ses précieuses orientations qui ont grandement contribué à l'avancement de ma recherche.

Je souhaite également adresser mes remerciements les plus sincères à Monsieur **CHIKHAOUI Mohamed** pour ses conseils éclairés, sa disponibilité constante, son soutien, et ses orientations avisées tout au long de ce travail.

Un grand merci s'adresse également à l'ensemble du corps professoral du **département des ressources naturelles et de l'environnement de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II**. Leur enseignement pluridisciplinaire a été d'une valeur inestimable pour notre formation.

Je ne saurais oublier de remercier chaleureusement **les techniciens du laboratoire du département des ressources naturelles et de l'environnement** pour leur expertise précieuse et leur assistance inestimable tout au long de mon étude.

J'adresse mes sincères remerciements à **tous les membres de l'équipe du projet Massire** qui ont participé à l'encadrement et le soutien des étudiants pendant toute la période du DRPS.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers **les membres du jury** qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Enfin, je souhaite témoigner ma gratitude profonde envers **les agriculteurs et les habitants de M'semrir**, qui ont généreusement partagé des informations essentielles pour la rédaction de ce rapport.

RESUME

Les oasis de montagne, en tant qu'îlots de survie agricole dans des environnements arides, font actuellement face à un ensemble complexe de contraintes. La fertilité des sols, élément fondamental de ces systèmes de production, est affectée par des problèmes majeurs, notamment la topographie, le morcellement excessif des terres et les changements climatiques. De plus, les pratiques traditionnelles de gestion adoptées par les agriculteurs pour relever ces défis sont devenues un facteur modulateur crucial, soulevant des questions sur la durabilité de ces oasis. L'objectif de cette étude est d'identifier les facteurs qui influencent les paramètres de fertilité des sols dans les oasis d'une commune du Haut Atlas central, en examinant à la fois l'impact des pratiques agricoles, de l'état de surface du sol et de la position des parcelles. À cette fin, 60 enquêtes ont été menées auprès des agriculteurs de la commune de M'Semrir afin d'identifier les pratiques de gestion de la fertilité des sols. À partir de ces enquêtes, 48 échantillons de sol ont été prélevés et analysés en laboratoire. Les propriétés prises en compte comprenaient la texture, le pH, la conductivité électrique, la matière organique, l'azote minéral, le phosphore assimilable et le potassium échangeable. Les résultats indiquent que les agriculteurs privilégient l'agroforesterie, la rotation des cultures et le labour profond comme technique de travail du sol. Cependant, ces approches ne sont pas toujours mises en œuvre de manière optimale. De plus, la fertilisation pratiquée englobe à la fois les engrais organiques (fumier) et inorganiques (NPK et urée). Quant aux analyses de sol, elles indiquent que les sols ne présentent pas de salinité notable, avec une majorité de sols présentant une texture de limon sableux (41 %) suivi du limon fin (22 %). Le pH du sol est légèrement basique, avec des valeurs allant de 7,3 à 8,1. La teneur moyenne en matière organique est de 1,49 %, indiquant une faible concentration de cette composante essentielle pour la fertilité des sols. En ce qui concerne les éléments nutritifs fondamentaux, les moyennes de la teneur en azote, en phosphore et en potassium sont respectivement de 23,7 ppm (niveau moyen), 30,24 ppm (niveau riche) et 341,33 ppm (niveau très riche). Cette étude a également souligné l'effet de l'état de surface du sol sur les paramètres de fertilité. Bien que la position par rapport au gradient amont-aval de l'oued n'ait pas montré d'effet significatif, le facteur distance des parcelles par rapport à l'oued s'est avéré significatif en ce qui concerne l'accumulation de matière organique. En conclusion, les résultats de cette étude confirment que malgré l'effet positif des pratiques agricoles telles que l'agroforesterie, la rotation des cultures et l'apport de la fumure, les carences en matière organique et la teneur moyenne en azote minéral appellent à une attention particulière.

Mots clés : Fertilité, Oasis de montagnes, pratiques culturelles, fumures, matière organique, agroforesterie, rotation.

ABSTRACT

Mountain oases, as agricultural survival islands in arid environments, currently face a complex set of constraints. Soil fertility, a fundamental element of these production systems, is affected by major issues including topography, excessive land fragmentation, and climate change. Furthermore, the traditional management practices adopted by farmers to address these challenges have become a crucial modulating factor, raising questions about the sustainability of these oases. The objective of this study is to identify factors influencing soil fertility parameters in the oases of a municipality in the Central High Atlas by examining the impact of agricultural practices, soil surface conditions, and plot positions. To this end, 60 surveys were conducted with farmers in the M'Semrir municipality to identify soil fertility management practices. From these surveys, 48 soil samples were collected and analyzed in the laboratory. The properties considered included texture, pH, electrical conductivity, organic matter, mineral nitrogen, assimilable phosphorus, and exchangeable potassium. The results indicate that farmers prioritize agroforestry, crop rotation, and deep plowing as soil management techniques. However, these approaches are not always optimally implemented. In addition, the fertilization practiced includes both organic (manure) and inorganic fertilizers (NPK and urea). Soil analyses indicate that the soils do not exhibit notable salinity, with the majority of soils having a sandy loam texture (41%) followed by fine loam (22%). The soil pH is slightly alkaline, with values ranging from 7.3 to 8.1. The average organic matter content is 1.49%, indicating a low concentration of this essential component for soil fertility. Regarding essential nutrient elements, the average nitrogen, phosphorus, and potassium content levels are 23.7 ppm (medium level), 30.24 ppm (rich level), and 341.33 ppm (very rich level), respectively. This study also highlighted the effect of soil surface condition on fertility parameters. Although the position relative to the upstream-downstream gradient of the river did not show a significant effect, the distance of plots from the river proved significant concerning organic matter accumulation. In conclusion, the results of this study confirm that despite the positive effect of agricultural practices such as agroforestry, crop rotation, and manure application, deficiencies in organic matter and the average mineral nitrogen content call for special attention.

Keywords: Fertility, Mountain oases, Cultivation practices, Manures, Organic matter, Agroforestry, Rotation.

ملخص

تواجه الواحات الجبلية ، كجزيرات زراعية تمكنت من البقاء في الأوساط البيئية القاحلة، حاليًا ، مجموعة معقدة من التحديات. وتتأثر خصوبة التربة، وهي عنصر أساسي في نظم الإنتاج هذه، بمشاكل كبيرة، بما في ذلك التضاريس والتجزؤ المفرط للأراضي والتغيرات المناخية. بالإضافة إلى ذلك، أصبحت الممارسات التقليدية لاستغلال الأراضي المعتمدة من طرف المزارعين لمواجهة هذه التحديات عاملاً حاسماً في التأقلم مع هذه الأخيرة، مما يثير تساؤلات حول استدامة هذه الواحات. يتجلى الهدف من هذه الدراسة في تحديد العوامل المؤثرة على ثوابت خصوبة التربة في واحات إحدى الجماعات التابعة لجبال لأطلس الكبير الأوسط، من خلال دراسة تأثير الممارسات الزراعية وطبوغرافية المنطقة وموقع الأراضي الزراعية. ولأجل لذلك، تم إجراء دراسة استقصائية همت 60 من بين المزارعين بجماعة امسمرير من أجل معرفة الممارسات المعتمدة في تدبير خصوبة التربة. ومن هذه الاستقصاءات تم جمع 46 عينة من التربة وتحليلها في المختبر. وشملت الخاصيات التي تم أخذها بعين الاعتبار قوام التربة، و pH التربة، والتوصيلية الكهربائية، والمواد العضوية، والنيتروجين الكلي، والفوسفور القابل للتمثيل، والبوتاسيوم القابل للتبديل. تشير النتائج إلى أن المزارعين يفضلون الحراثة الزراعية، وتناوب المحاصيل والحراثة، بدلاً من إراحة التربة. علاوة على ذلك، فإن التسميد يشمل الأسمدة العضوية (السماذ) وغير العضوية (NPK والبولة). وأظهرت تحاليل التربة أن التربة غير مالحة و 64% من العينات التي تم تحليلها هي تربة قوام متوازن و pH قاعدي يتراوح بين 7.3 و 8.1. ومتوسط محتوى المادة العضوية ضعيف، حيث يبلغ 1.49% فقط. ويبلغ متوسط محتويات النيتروجين والفوسفور والبوتاسيوم على التوالي 23.7ppm (المستوى المتوسط)، و 30.24ppm (المستوى الغني) و 341.33ppm (المستوى الغني جداً). كما أبرزت هذه الدراسة تأثير حالة سطح التربة على معايير الخصوبة. على الرغم من أن الموقع بالنسبة لمنحدر الوادي من الأعلى إلى الأسفل لم يظهر تأثيراً كبيراً، فقد وجد أن عامل مسافة قطع الأراضي من الوادي مهم فيما يتعلق بتراكم المواد العضوية. ختاماً، تؤكد نتائج هذه الدراسة أنه على الرغم من التأثير الإيجابي للممارسات الزراعية مثل الحراثة الزراعية، وتناوب المحاصيل وإضافة السماذ، ونقص المواد العضوية، فإن متوسط محتوى النيتروجين المعدني يستدعي اهتماماً خاصاً.

الكلمات المفتاحية: الخصوبة، الواحات الجبلية، الممارسات الثقافية، التسميد، المادة العضوية، الحراثة الزراعية، الدورة الزراعية.

SOMMAIRE

DEDICACES	II
REMERCIEMENTS	III
RESUME.....	IV
ABSTRACT	V
ملخص.....	VI
SOMMAIRE	VII
LISTE DES ABREVIATIONS.....	X
LISTES DES TABLEAUX.....	XI
LISTES DES FIGURES.....	XII
LISTES DES ANNEXES.....	XIII
LISTE DES PHOTOS	XIII
INTRODUCTION GENERALE.....	14
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	17
Chapitre I : Caractérisation de la fertilité des sols dans les agrosystèmes oasiens	18
I. Agrosystème oasien.....	18
II. Notion de la fertilité des sols.....	20
Chapitre II : Pratiques de gestion de la fertilité des sols dans les oasis.....	28
I. Agroforesterie	28
II. Rotation des cultures	30
III. Jachère.....	30
IV. Utilisation des engrais minéraux	31
V. Amendements organiques	31
MATERIEL ET METHODES	34
I. Zone d'étude.....	35
1. Situation géographique	35

2. Milieu naturel.....	36
3. Données socio-économiques.....	39
II. Outils et méthodologie.....	39
1. Phase 1 : Diagnostic territorial collectif.....	40
2. Phase 2 : Collecte des données	40
RESULTATS	46
I. Pratiques de gestion de la fertilité des sols adoptée par les agriculteurs.....	47
1. Adoption Répandue de l'Agroforesterie	48
2. Rotation des Cultures	49
3. Travail du Sol.....	49
4. Application de la fumure	50
II. Etat actuel des sols de la zone d'étude.....	54
1. Analyse des paramètres physico-chimiques.....	54
III. Influence des facteurs environnementaux sur la fertilité des sols	66
1. Effet du facteur gradient amont aval sur les paramètres étudiés.....	66
2. Impact de l'association agricole sur la fertilité des sols	67
DISCUSSION	70
Introduction	71
I. Impact des pratiques agricoles sur la fertilité des sols d'Oussikis	71
1. Granulométrie et matière organique	71
2. Éléments essentiels NPK	72
3. pH et conductivité électrique	73
II. Stratégies de gestion de la fertilité des sols d'Oussikis : pratiques actuelles, défis majeurs et perspectives durables	73
1. Avantages et défis de l'agroforesterie.....	73
2. Effet de la rotation des cultures sur la fertilité des sols	75
3. Risques associés au travail du sol	76

4. Tendance à la désuétude de la jachère naturelle	76
5. Logiques locales des modes de fertilisation.....	77
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	80
CONCLUSION	81
RECOMMANDATIONS	83
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	84
ANNEXES	96

LISTE DES ABREVIATIONS

ANOVA	Analyse de la variance
CMV	Centre de Mise en Valeur Agricole
ORMVAO	L'Office Régional de Mise en Valeur Agricole Ouarzazate

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1. Normes d'interprétation du pH eau des sols selon les normes Baize (1988).	55
Tableau 2. Classe de la qualité des sols par la méthode Extrait 1 :5 (Moughli, 2019)	57
Tableau 3. Normes d'interprétation de la matière organique selon Schaffer (1975).	59
Tableau 4. Répartition des classes de phosphore assimilable (Méthode Olsen) (Moughli, 2019)	61
Tableau 5. Répartition des classes de potassium échangeable (Moughli, 2019)	63
Tableau 6. Répartition des classes de nitrate et de l'ammonium (Moughli, 2019)	65
Tableau 7. Comparaison des paramètres du sol en fonction du facteur gradient amont-aval et la distance par rapport à l'oued	67
Tableau 8. Comparaison des paramètres du sol en fonction des types de culture.	69
Tableau 9. Résultats des analyses physicochimiques.....	104
Tableau 11. ANOVA (Facteur gradient amont/aval)	107
Tableau 12. ANOVA (Facteur distance par rapport à l'oued).....	108
Tableau 13. Corrélacion entre la matière organique et le phosphore assimilable.	108

LISTES DES FIGURES

Figure 1. Cycle du phosphore dans les petites exploitations en Afrique (Hodges, 2010).	26
Figure 2. Schéma récapitulatif des interactions aériennes et sous terraines entre les arbres et la culture sous-jacente dans un système agroforestier classique (encadrés rouge : interactions négatives/encadrés vertes : interactions positives (Garaux et al., 2018))......	29
Figure 3. Carte de la région de Drâa-Tafilalt et le découpage communal des provinces (ORMVAO, 2019)	35
Figure 4. Évolution de la pluviométrie dans la commune de M'Semrir entre 2013 et 2020 (ORMVAO, 2020).	36
Figure 5. Territoire de vie Oussikis (Zone d'étude).....	41
Figure 6. Plan d'échantillonnage.....	43
Figure 7. Prélèvement le long de la diagonale de la parcelle	43
Figure 8. Pratiques culturales utilisées par les agriculteurs enquêtés en pourcentage.	47
Figure 9. Principaux engrais chimiques utilisés exprimés en pourcentages des agriculteurs enquêtés.	50
Figure 10. Pourcentage de répartition des classes texturales du sol d'Oussikis.	54
Figure 11. Répartition des échantillons de sol en fonction de leur pH eau exprimée en pourcentage.	56
Figure 12. Carte du pH des sols d'Oussikis	56
Figure 13. Carte de la conductivité électrique des sols d'Oussikis.....	57
Figure 14. Répartition de la teneur en matière organique dans les sols d'Oussikis.	59
Figure 15. Carte de la teneur en matière organique des sols d'Oussikis.....	60
Figure 16. Pourcentage de répartition de la teneur en phosphore dans les sols.	61
Figure 17. Carte de la teneur en phosphore assimilable dans les sols d'Oussikis.....	62
Figure 18. Pourcentage de répartition de la teneur en potassium dans les sols d'Oussikis	63
Figure 19. Carte de la teneur en potassium échangeable dans les sols d'Oussikis	64
Figure 20. Pourcentage de répartition de la teneur en azote minéral dans sols d'Oussikis.	65
Figure 21. Carte de la teneur en azote minéral dans les sols d'Oussikis.....	66

LISTES DES ANNEXES

Annexe 1. Questionnaire	97
Annexe 2. Protocoles suivis pour les analyses de sol	101
Annexe 3. Résultats des analyses physicochimiques	104
Annexe 4. Résultats d'ANOVA.....	106

LISTE DES PHOTOS

Photo 1. Différents types d'agroforesterie (Oussikis, 2023).....	48
Photo 2. Deux parcelles travaillées (Oussikis, 2023).....	50
Photo 3. Forme de stockage du fumier (Oussikis, 2023)	53

INTRODUCTION GENERALE

Les oasis, qui représentent l'une des richesses naturelles majeures du Maroc avec une étendue de 77 000 km², font actuellement face à des défis critiques. La région de Draa-Tafilalet, abritant la plus grande oasis au monde, se trouve au cœur de ces enjeux majeurs. Les effets des changements climatiques, marqués par la récurrence des sécheresses et la multiplication des phénomènes climatiques extrêmes, ont mis en danger ces précieux îlots de verdure. Cette situation est encore aggravée par la diminution des ressources en eau et la dégradation des sols, entraînant un recul significatif de l'activité agricole dans les zones oasiennes (ANDZOA, 2023).

Les oasis de montagne du haut Atlas, faisant partie intégrante de cette région, se trouvent confrontées à une situation similaire. L'agriculture dans ces systèmes agroécologiques est caractérisée par une micro-exploitation des terres. Le morcellement des parcelles découle souvent d'un système d'héritage, contraignant les agriculteurs à exploiter leurs terres de manière intensive en pratiquant fréquemment l'association de cultures à deux ou trois étages. Cependant, cette intensification conduit à une utilisation épuisante des sols, menaçant leur fertilité à long terme.

L'extension continue de la mise en culture et la réduction du temps de mise en jachère dans ces régions oasiennes ont suscité des préoccupations quant à la dégradation des terres agricoles, à la diminution du taux de matière organique dans les sols, et à l'épuisement des ressources du sol. Ces tendances soulèvent des inquiétudes quant à la durabilité à long terme de la production agricole dans ces zones (Van der Pol, 1991, Berthé et al., 1991).

L'intensification de la production agricole et la gestion durable de la fertilité du sol constituent aujourd'hui des thèmes prioritaires de recherche. En effet, de nombreuses études ont été à cet égard, parmi lesquelles celle de (Zouahri, 2023), (Haj-Amor et al., 2020) et (Ou-Zine et al., 2021). C'est dans ce contexte que ce travail s'inscrit, en mettant l'accent sur l'exploration des pratiques agricoles locales dans les oasis de montagnes de M'Semrir, avec un accent particulier sur la préservation de la fertilité des sols, une question cruciale pour la durabilité à long terme de l'agriculture dans ces régions spécifiques.

Ce travail trouve son cadre au sein du projet MASSIRE (2019-2023), une initiative visant à renforcer les capacités des acteurs opérant dans les zones oasiennes et arides du Maghreb. Au Maroc, ce projet concerne un territoire englobant la vallée de Todgha et les oasis de Ferkla, qui comprennent 19 communes rurales s'étendant du versant sud du Haut Atlas jusqu'aux portes du désert. L'objectif principal est de développer et de mettre en œuvre des innovations permettant un développement durable de ces territoires uniques (Massire, 2023).

L'objectif principal de cette étude est de réaliser une évaluation approfondie de la gestion de la fertilité des sols de M'Semrir. Pour atteindre cet objectif, l'étude se décline en trois volets principaux à savoir :

- La détermination des pratiques locales de gestion de la fertilité des sols ;
- L'analyse des paramètres physicochimiques des sols cultivés pour obtenir un aperçu précis de l'état actuel de la fertilité des sols dans la zone d'étude ;
- Identifier les lacunes dans la gestion de la fertilité des sols en examinant les pratiques des agriculteurs et en les comparant aux résultats des analyses du sol, tout en analysant l'effet de l'état de surface du sol et de la position des parcelles sur ces dernières.

Ce rapport de projet de fin d'étude est structuré en cinq chapitres. Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique. Le deuxième chapitre présente la zone d'étude et la méthodologie adoptée. Le troisième chapitre est réservé à la présentation et l'analyse des principaux résultats. Le quatrième chapitre est dédié à la discussion de ces résultats. Enfin, le cinquième chapitre offre les conclusions, les recommandations et les propositions afin de contribuer à maintenir et améliorer la qualité des sols dans la zone de M'Semrir.

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : Caractérisation de la fertilité des sols dans les agrosystèmes oasiens

Introduction

Ce chapitre est structuré en deux axes. Le premier axe explore les oasis, en commençant par une définition générale, puis en se concentrant sur les oasis de montagne et leurs caractéristiques. Le deuxième axe aborde la fertilité des sols en définissant ce concept et en examinant de manière approfondie ses composants, physiques et chimiques.

I. Agrosystème oasien

1. Définition des oasis

Les oasis sont des zones géographiques, où la vie sédentaire et l'agriculture sont rendues possibles grâce à l'existence d'émergences locales de nappes aquifères ou à la présence d'eau superficielle apportée par des cours d'eau allochtones ou des montagnes proches (Mechelei, 1980). D'une autre manière, Lacoste (1987) définit l'oasis comme un espace cultivé intensivement dans un milieu désertique ou fortement marqué par l'aridité. Ces écosystèmes constituent des systèmes de production complexes à composantes multiples, fonctionnant dans un environnement difficile. Dans les oasis, où l'espace est intensément cultivé en milieu aride, l'activité humaine est organisée de manière à maximiser l'utilisation de l'eau disponible et de l'espace cultivable à proximité (Dollé, 1990). Les agrosystèmes oasiens reposent souvent sur des méthodes agricoles traditionnelles transmises de génération en génération. Cela inclut les pratiques de gestion de l'eau, de la terre et des cultures.

En fait, la définition des oasis peut être approfondie sous diverses perspectives. Skouri (1960) a présenté une approche multifacette qui permet de mieux comprendre la complexité et la diversité des oasis et de leurs systèmes agricoles associés. Ainsi, dans une perspective géographique, les oasis sont définies comme des îlots de survie au sein d'un environnement aride. Sur le plan bioclimatique, elles induisent un microclimat grâce à la diversité des cultures qu'elles abritent. D'un point de vue agronomique, les oasis sont interprétées comme des agrosystèmes qui peuvent varier en intensification. Enfin, sur le plan socio-économique, elles jouent un rôle central en tant que lieux de sédentarisation, d'activités économiques et de développement socioculturel.

2. Oasis de montagne : Caractéristiques et contraintes

Les oasis de montagne sont l'un des types d'oasis que l'on trouve au Maroc, généralement en amont de la chaîne du Haut Atlas, telles qu'Amellago et Imlchil (Raddo, 2023). Ils sont caractérisés par leur climat particulier. Caractérisées par des hivers froids et des gelées printanières tardives, ces régions connaissent des étés marqués par une chaleur intense et des vents chauds et desséchants (Crossa, 1990).

Les habitants de ces oasis ont développé un savoir-faire remarquable en matière d'aménagement de l'espace pour surmonter les difficultés liées à la topographie. Ils parviennent à créer des parcelles planes ou en terrasses de faible largeur, dotées d'une terre suffisante pour permettre la culture de denrées vivrières. Ainsi, l'optimisation de l'espace cultivé et la gestion efficace de l'eau deviennent indispensables dans ces systèmes. Cela explique le recours à une densité élevée de la végétation et à l'association de plusieurs cultures en étages sur la même parcelle. Cependant, une caractéristique distinctive de ces oasis de montagne est l'absence de palmiers dattiers en raison de l'altitude et du froid hivernal, qui rendent la maturation des fruits impossible. Au lieu de cela, on y trouve généralement seulement deux étages de végétation : des arbres fruitiers tels que les pommiers et les oliviers, ainsi que des cultures basses comme les céréales et la luzerne. Cette adaptation est nécessaire pour répondre aux conditions climatiques spécifiques des zones montagneuses (Acherkouk et al., 2003; Albab et al., 2013).

Les systèmes agricoles des oasis et des zones montagneuses sont confrontés à un ensemble de contraintes complexes et interdépendantes. Parmi celles-ci, on retrouve tout d'abord les ressources hydriques limitées, résultant de la surexploitation et des périodes de sécheresse récurrentes. En outre, la topographie de la région et le phénomène de morcellement excessif des terres contribuent à restreindre la superficie des terres cultivables, tandis que la faible fertilité des sols, causée par des facteurs tels que la température élevée, le lessivage répété dû à l'irrigation excessive et la dégradation rapide de la matière organique, constitue un autre défi (Crossa, 1990).

Le faible niveau de technicité des agriculteurs et des vulgarisateurs résulte de l'absence de l'encadrement. Par ailleurs, la difficulté de commercialisation des produits agricoles et l'insuffisance d'approvisionnement en matériels et intrants dans les exploitations agricoles constituent d'autres défis majeurs (Kradi et al., 2012).

II. Notion de la fertilité des sols

1. Définition de la fertilité

La fertilité des sols est un concept fondamental dans le domaine de l'agriculture, mais il est également crucial pour comprendre l'évolution des systèmes de production agricole. Ce concept englobe différentes actions visant à maintenir, entretenir, soutenir, renforcer, améliorer ou même régénérer la capacité d'un sol à produire des cultures de manière durable. Selon Pieri (1989), ce concept de fertilité de sol peut être abordé selon trois points de vue distincts :

La première définition de la fertilité des sols est une définition biophysique. Il s'agit d'une approche qui se concentre sur l'aptitude intrinsèque d'un sol à produire des cultures. Elle prend en compte des caractéristiques physiques et chimiques du sol, telles que sa structure, sa texture, sa composition organique, la matière organique assimilable, les éléments chimiques disponibles (comme la capacité d'échange cationique), ainsi que les facteurs environnementaux tels que le climat et la topographie. Cette définition est statique et structurelle, et elle est souvent utilisée pour réaliser des bilans d'éléments minéraux et déterminer les meilleures pratiques en matière d'utilisation d'engrais et de gestion des systèmes de culture.

La fertilité peut être abordée aussi à travers une conception agronomique. Dans cette perspective, la fertilité des sols est considérée comme le potentiel de production dépendant des interactions entre l'agriculteur et son environnement. Selon (Sébillotte, 1989) la fertilité s'envisage relativement aux fonctions du milieu dans le processus de production. Cette approche reconnaît que la fertilité des sols est influencée par les pratiques agricoles mises en œuvre par les agriculteurs, les systèmes de production utilisés, ainsi que les décisions et les actions des acteurs agricoles. Améliorer la fertilité des sols dans cette optique implique de prendre en compte les techniques culturales, les rotations des cultures, l'utilisation d'engrais organiques ou chimiques, et d'autres pratiques agronomiques adaptées à chaque contexte.

Enfin, une troisième approche davantage contextuelle différencie deux concepts : la fertilité agronomique et la fertilité économique. Selon cette perspective élargie de la fertilité des sols, celle-ci dépend étroitement de son contexte économique et social (Reboul, 1989, Maraun et al., 2007). En d'autres termes, la fertilité des sols est influencée par l'organisation sociale des communautés agricoles, leur intégration dans les marchés agricoles et les capacités financières des exploitants.

2. Fertilité des sols

2.1. Fertilité physique

2.1.1. Texture

L'aspect physique du sol est déterminé par les proportions relatives de ses composants de base : le sable, le limon et l'argile. En fonction de cette composition, les sols sont catégorisés en différentes textures telles que sableuses, sablo-limoneuses, limoneuses, limono-argileuses, ou argileuses. Ces classifications sont également désignées sous les termes de sols « légers » (par exemple, les sols sableux et sablo-limoneux), de sols « moyens » (comme les sols limoneux), ou encore de sols « lourds » (par exemple, les sols limono-argileux et argileux). Ces dénominations sont basées sur la facilité de manipulation du sol (FAO, 2003).

La composition en texture du sol joue un rôle essentiel dans la gestion de l'irrigation et dans la disponibilité d'eau pour les cultures (Oke et al, 2022). Elle affecte également la quantité d'éléments nutritifs dans un sol (Bowen et Pallister, 2000).

2.1.2. Structure

La structure du sol apparait comme le facteur physique le plus important. Elle joue un rôle déterminant dans le développement des racines des plantes, la circulation de l'eau et les échanges gazeux essentiels pour la croissance des végétaux ainsi que pour la microfaune du sol.

- Développement racinaire : Une structure fine, granulaire ou grumeleuse, crée une terre meuble qui facilite la pénétration des racines dans le sol. Cela permet aux racines de prospecter un plus grand volume de sol, ce qui augmente le stock d'éléments minéraux et d'eau disponibles pour les plantes. En revanche, un sol à la structure dégradée en surface (sol battant) peut former une croûte superficielle qui entrave la levée des semis. La présence d'horizons compacts en profondeur peut également limiter l'épaisseur utile du sol, car les racines ne peuvent pas pénétrer cet horizon.
- Circulation de l'eau : Combeau et Monnier (1964) ont démontré que la perméabilité du sol dépend largement de sa structure plutôt que de sa texture. La vitesse de filtration de l'eau est significativement plus élevée dans les sols ferrallitiques ayant une structure bien formée (60 à 80 % de teneur en éléments fins), atteignant environ 6 à 10 cm par heure. En comparaison, dans les sols ferrugineux sableux (8 à 12 % d'argile), cette vitesse est beaucoup plus faible, seulement.

2.2. Fertilité chimique

Les facteurs chimiques tels que le pH et la conductivité électrique du sol n'ont généralement pas d'effet direct sur la fertilité du sol. Leur rôle principal est de fournir des indications sur le niveau global des éléments nutritifs présents dans le sol (pH), l'aération adéquate du sol (pH) et la concentration générale des sels dissous dans la solution du sol (conductivité). Ils agissent comme des paramètres de mesure importants pour évaluer la qualité générale du sol et sa capacité à fournir des nutriments essentiels aux plantes.

2.2.1. Potentiel hydrogène (pH)

Le pH du sol représente la mesure de son acidité ou alcalinité relative, et il joue un rôle crucial dans la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes. Idéalement, un sol neutre est considéré comme optimal, avec un pH compris entre 6,5 et 7,5, car cette plage favorise la croissance racinaire des plantes et assure une disponibilité optimale des nutriments essentiels.

L'azote (N), le potassium (K) et le soufre (S) sont des éléments nutritifs importants pour les plantes, et bien qu'ils soient moins sensibles au pH du sol que d'autres, ils sont tout de même affectés dans une certaine mesure. En revanche, le phosphore (P) est directement influencé par le pH du sol. À des pH alcalins (supérieurs à 7,5), les ions phosphate ont tendance à se lier rapidement avec le calcium (Ca) et le magnésium (Mg) pour former des composés moins solubles. À l'inverse, dans des sols acides, les ions phosphate réagissent avec l'aluminium (Al) et le fer (Fe) pour former à nouveau des composés moins solubles.

D'autre part, la plupart des autres nutriments, en particulier les micronutriments, deviennent moins disponibles lorsque le pH du sol dépasse 7,5, et ils sont mieux disponibles dans un sol légèrement acide, autour d'un pH de 6,5 à 6,8. Cependant, le molybdène (Mo) présente une exception, étant moins disponible à un pH acide, mais plus disponible dans des sols légèrement alcalins.

2.2.2. Sels (Conductivité électrique)

La salinité se produit généralement lorsqu'une concentration élevée de sels solubles est présente dans le sol et l'eau. Cette accumulation excessive de sels peut entraîner des dommages aux plantes en perturbant leur absorption d'eau par les racines et en interférant avec l'absorption de nutriments essentiels. Cette perturbation affecte la disponibilité et l'absorption des éléments nutritifs par les plantes. Physiologiquement, la salinité a un impact négatif sur divers processus

de croissance, entraînant une réduction de la croissance cellulaire, de la surface foliaire, de la biomasse et du rendement des cultures (Ehtaiwesh, 2022).

2.2.3. Matière organique

La teneur en matière organique d'un sol est une caractéristique essentielle de sa fertilité (Stevenson & Cole, 1999). Cette matière organique représente 1 à 10 % du sol selon Calvet et al (2011).

a. Compartiments fonctionnels

L'hétérogénéité des éléments organiques présents dans le sol conduit souvent à considérer non pas la matière organique, mais plutôt les matières organiques. Une description proposée par Soltner (1992) identifie quatre compartiments "fonctionnels" distincts :

Le premier compartiment est constitué des végétaux et des animaux vivants présents dans le sol, tels que les racines, les vers de terre, la microflore et la microfaune. Ce compartiment est responsable de la majeure partie des transformations du carbone organique et se renouvelle rapidement, en moins d'un an. Il représente environ 0,5 % à 4,5 % du carbone organique et 4 % à 10 % de l'azote organique du sol (Nicolardot, 1993).

Ensuite, il y a la matière organique fraîche, principalement constituée de débris végétaux tels que les feuilles, les racines mortes et les résidus de récoltes, ainsi que de débris animaux tels que les déjections et les cadavres. Ces débris sont composés de substances hydrocarbonées, de substances azotées sous forme de protéines, et de sels minéraux libres. Dès qu'ils arrivent au sol, ces débris sont décomposés par la microflore et la microfaune du sol. La vitesse de décomposition dépend de la complexité moléculaire des débris, les sucres étant décomposés en premier, tandis que la lignine, les résines et les tanins résistent davantage à l'altération.

Les composés intermédiaires, également appelés « produits transitoires » ou « matière organique labile », constituent le maillon suivant de la chaîne de transformation. Ils résultent de la transformation des grosses molécules de la matière organique fraîche en substances minérales simples ou en petites molécules, comme le dioxyde de carbone (CO₂) et la vapeur d'eau (H₂O), ainsi que des matières minérales telles que les nitrates, les phosphates et les sulfates. Ce processus de décomposition est appelé « minéralisation primaire », et les composés résultants sont réutilisés comme substances nutritives par la partie vivante du sol ou servent de précurseurs des substances humiques. Une partie de ces composés sera perdue par lessivage.

Leur durée de vie peut aller jusqu'à quelques dizaines d'années. Ce compartiment représente environ 10 % à 40 % de la matière organique stable. Ces trois premiers compartiments fonctionnels de la MO représentent la composante active de la MO du sol. Celle-ci agit comme réserve principale d'éléments nutritifs libérés après minéralisation.

Enfin, l'humus, également appelé « substances humiques », constitue la matière organique stable du sol. Certains produits transitoires, au lieu de se minéraliser complètement, subissent une évolution inverse et les molécules simplifiées se regroupent et se polymérisent pour former des macromolécules complexes, peu solubles dans l'eau et tensioactives. Ce processus est appelé « humification ». La matière organique qui en résulte est chimiquement et physiquement protégée. En raison de la complexité de ses molécules et de son association avec des particules minérales du sol, elle est moins accessible et moins dégradée par les micro-organismes du sol. Les composés humiques offrent une grande variabilité, ce qui permet à Leclerc (2002) de dire qu'il n'existe sans doute pas deux molécules humiques identiques. Leur durée de vie varie de quelques centaines d'années à plus de mille ans. Au cours de cette période, cet « humus stable » sera à son tour dégradé par les micro-organismes lors du processus lent de « minéralisation secondaire ».

b. Rôle clef des matières organiques dans les sols cultivés

Bien que 80 % des sols marocains sont très fragiles à la mise en culture avec des taux de matière organique inférieurs à 1 % (Mrabet et al. 2004), les matières organiques améliorent les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol (Chenu, 2001) soit par sa présence en quantité ou à travers sa minéralisation.

- **Propriété physique**

La matière organique joue également un rôle important dans l'amélioration de la structure du sol. Elle favorise l'agrégation des particules minérales, stimulant ainsi l'activité microbiologique du sol (Bot & Benites, 2005). Cela entraîne une augmentation de la porosité du sol, améliorant l'infiltration, le drainage et la capacité de rétention d'eau. En effet, chaque augmentation de 1 % de matière organique dans le sol peut entraîner une augmentation de 3,7 % de la capacité du sol à retenir l'eau (Hudson, 1994).

- **Propriété chimique**

La matière organique labile est particulièrement riche en éléments nutritifs, contenant plus de 95 % de l'azote total du sol (Bot & Benites, 2005) et représentant de 3 à 90 % du phosphore

total du sol et plus de 90 % du soufre total du sol (Calvet et al., 2011). Ainsi, la minéralisation de la fraction organique labile joue un rôle essentiel dans l'enrichissement de la fertilité chimique du sol, en particulier en ce qui concerne l'azote, le phosphore et le soufre.

D'autre part, la fraction organique améliore la capacité d'échange cationique grâce aux propriétés électriques complexantes des substances humiques. De plus, les composés organiques agissent comme des tampons de pH dans le sol, en libérant ou en retenant les ions H^+ en fonction de la fonction carboxyle (Calvet et al., 2011).

- **Propriété biologique**

La matière organique du sol joue un rôle crucial en tant que réserve d'énergie métabolique et de nutriments pour la biomasse microbienne du sol. En effet, le carbone organique utilisé par la faune du sol est estimé à environ 0,3 à 0,45 T/ha/an (Bot & Benites, 2005). De nombreuses études ont également mis en évidence une corrélation positive entre la teneur en matière organique et la libération et l'activité d'enzymes essentielles pour les cycles des éléments nutritifs dans le sol (Deng et Tabatabai, 1996).

2.2.4. Azote

L'azote est un élément nutritif essentiel utilisé en quantités importantes par tous les êtres vivants. Il joue un rôle critique dans la formation de la chlorophylle, la synthèse des acides aminés et des protéines dans les plantes. Au niveau du sol, il se présente sous deux formes essentielles : l'azote organique, intégré dans les molécules complexes de la matière organique après la décomposition des tissus végétaux et animaux, et l'azote minéral, qui comprend l'azote nitrique et ammoniacal et est utilisé pour estimer la fertilité du sol et optimiser la fertilisation azotée (Baize, 2004). Les plantes absorbent principalement leur azote sous forme d'ammonium (NH_4^+) ou de nitrate (NO_3^-). La disponibilité de ces deux formes pour l'absorption par les plantes dépend de la libération de l'azote inorganique à partir de sources organiques ou de l'application d'engrais contenant l'une de ces formes d'azote (Recous et al., 2015). Cependant, un excès d'azote peut avoir des conséquences négatives pour les cultures, retardant la floraison ou la fructification et favorisant une croissance fragile et vulnérable aux maladies.

Historiquement, l'azote était un facteur limitant pour la production agricole, mais grâce aux engrais azotés, cette limitation a été atténuée (Hodges, 2010).

2.2.5. Phosphore

Le phosphore joue un rôle essentiel dans la fertilité des sols et la croissance des plantes. Il favorise le développement des jeunes racines, stimule la fructification précoce et influence la formation des graines. Il se concentre particulièrement dans les graines et les fruits, ce qui a un impact majeur sur la qualité des graines dans les cultures destinées à la production de semences (Pellerin & Nesme, 2015).

Cependant, la gestion du phosphore est complexe en raison de sa réactivité élevée avec les phases solides et liquides du sol. Cette réactivité limite sa mobilité, sauf dans les sols organiques ou les sables blancs ayant une faible capacité d'échange cationique (CEC). Le phosphore peut se présenter sous différentes formes, mais seules les formes HPO_4^{2-} et H_2PO_4^- sont disponibles pour les plantes en fonction du pH du sol. Les sols alcalins favorisent la forme HPO_4^{2-} , tandis que les sols légèrement acides favorisent la forme H_2PO_4^- (Hodges, 2010). Les principales caractéristiques du cycle du phosphore sont illustrées dans la figure 4. Historiquement, le phosphore était un facteur limitant majeur pour la production agricole avant l'utilisation généralisée des engrais phosphatés. Aujourd'hui, l'ajout d'engrais phosphatés permet d'optimiser la croissance des plantes. Cependant, il est important de veiller à ne pas apporter de quantités excessives de phosphore, car cela peut entraîner le développement de plantes trop vigoureuses et sensibles à certaines maladies (Hodges, 2010).

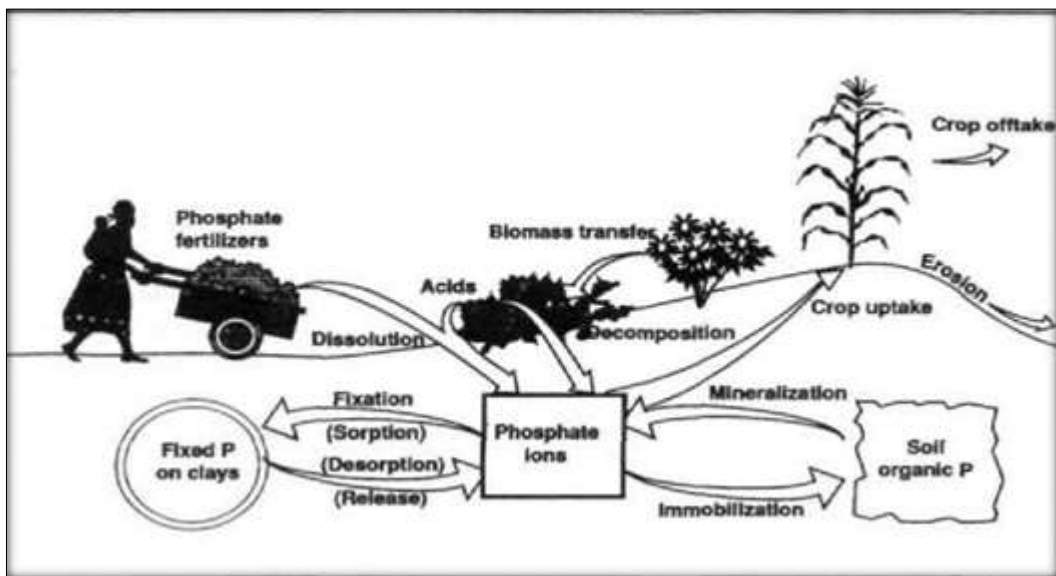


Figure 1. Cycle du phosphore dans les petites exploitations en Afrique (Hodges, 2010).

2.2.6. Potassium

Le potassium est un élément essentiel pour les plantes, nécessaire en quantités similaires, voire légèrement supérieures à l'azote (Hodges, 2010). Il est libre dans la solution du sol, ce qui le rend facilement assimilable par la plante (Schvartz, 2005). Bien que le potassium ne forme pas de composés organiques dans la plante et reste sous forme ionique de K^+ , il joue un rôle crucial dans diverses réactions chimiques et processus métaboliques essentiels, notamment la photosynthèse, le transport des glucides, la régulation de l'eau et la synthèse des protéines. Une bonne nutrition en potassium présente de nombreux avantages, tels qu'une meilleure résistance aux maladies, une croissance végétative vigoureuse, une tolérance accrue à la sécheresse, une résistance améliorée au froid des fourrages et une diminution des risques de verse. Les plantes en carence de potassium montrent des signes de retard de croissance, un développement médiocre des racines, des symptômes de décoloration sur les feuilles inférieures et peuvent être sujettes à la verse, ce qui peut entraîner une perte de rendement significative (Hodges, 2010).

Conclusion

La fertilité des sols est un concept complexe qui englobe la capacité d'un sol à produire des cultures de manière durable. Elle dépend de facteurs physiques, chimiques, notamment la texture du sol, sa structure, le pH, la matière organique, ainsi que des éléments nutritifs tels que l'azote, le phosphore et le potassium. La gestion efficace de la fertilité des sols est essentielle pour soutenir la production agricole et répondre aux défis des oasis, en particulier dans les oasis de montagne confrontées à des contraintes climatiques et topographiques.

Chapitre II : Pratiques de gestion de la fertilité des sols dans les oasis

Introduction

Ce chapitre explore différentes méthodes utilisées pour préserver et améliorer la fertilité des sols dans les oasis. Il mettra en lumière diverses stratégies telles que l'agroforesterie, la rotation des cultures, l'application de fumures et l'utilisation de la jachère. Chacune de ces approches sera examinée en détail, en mettant en évidence ses avantages, ses défis et son potentiel pour soutenir le développement agricole prospère.

I. Agroforesterie

Au Maroc, l'agroforesterie est ancrée dans les paysages ruraux traditionnels, jouant un rôle prépondérant dans les régions oasiennes, accidentées et arides (Daoui & Fatemi, 2014). Cette pratique est définie comme l'ensemble des agrosystèmes où arbres, cultures, et parfois animaux, sont associés de façon simultanée sur une même parcelle et interagissent entre eux (Nair et al., 2008).

Cette pratique présente des bienfaits environnementaux considérables à savoir la séquestration du carbone dans les sols des parcelles agroforestières, comme en témoignent plusieurs études (Jose, 2018; Dupraz et al., 2011; Noordwijk et al., 2016). Cette séquestration résulte en grande partie de la capacité des arbres à produire de la matière organique, à maintenir des taux élevés de matière organique grâce à leurs feuilles, branches et racines, et à contribuer ainsi à la fertilité du sol, comme l'ont souligné Nair (1984) et Young (1995). Les mécanismes tels que la redistribution des éléments nutritifs, la réduction des pertes et l'enrichissement du sol expliquent cette contribution positive des arbres.

De plus, les arbres jouent un rôle essentiel dans l'amélioration du microclimat en fournissant de l'ombre, parmi d'autres effets bénéfiques. De même, l'agroforesterie permet de lutter efficacement contre l'érosion grâce à la couverture du sol fournie par le couvert des arbres et la litière, en plus de l'action des arbres en tant que barrière contre le ruissèlement (Bayala & Ouédraogo, 2008).

Cependant, il convient de noter que des interactions se produisent entre les parties aériennes et les parties souterraines des arbres et des cultures sous-jacentes dans cette pratique (voir figure 6). Par conséquent, une gestion appropriée des systèmes agroforestiers est essentielle pour

favoriser les interactions positives tout en minimisant les interactions négatives, telles que la compétition pour les ressources et la présence de ravageurs, comme l'ont souligné Dupraz et al. (2011). Cette approche holistique de l'agriculture vise à optimiser les avantages tout en atténuant les éventuels inconvénients de l'agroforesterie.

En plus de ses avantages environnementaux, l'agroforesterie offre l'avantage significatif de diversifier les sources de revenus pour les exploitations agricoles (Graves et al., 2007). Les arbres, grâce à leur valorisation sur le long terme, apportent un capital supplémentaire aux ventes des récoltes annuelles des cultures associées, ce qui peut être très avantageux en choisissant les essences d'arbres adaptées à la valorisation souhaitée, que ce soit en tant que fruitiers, bois d'œuvre ou ressources énergétiques (Guyomard et al., 2013 ; Guitton et al., 1994).

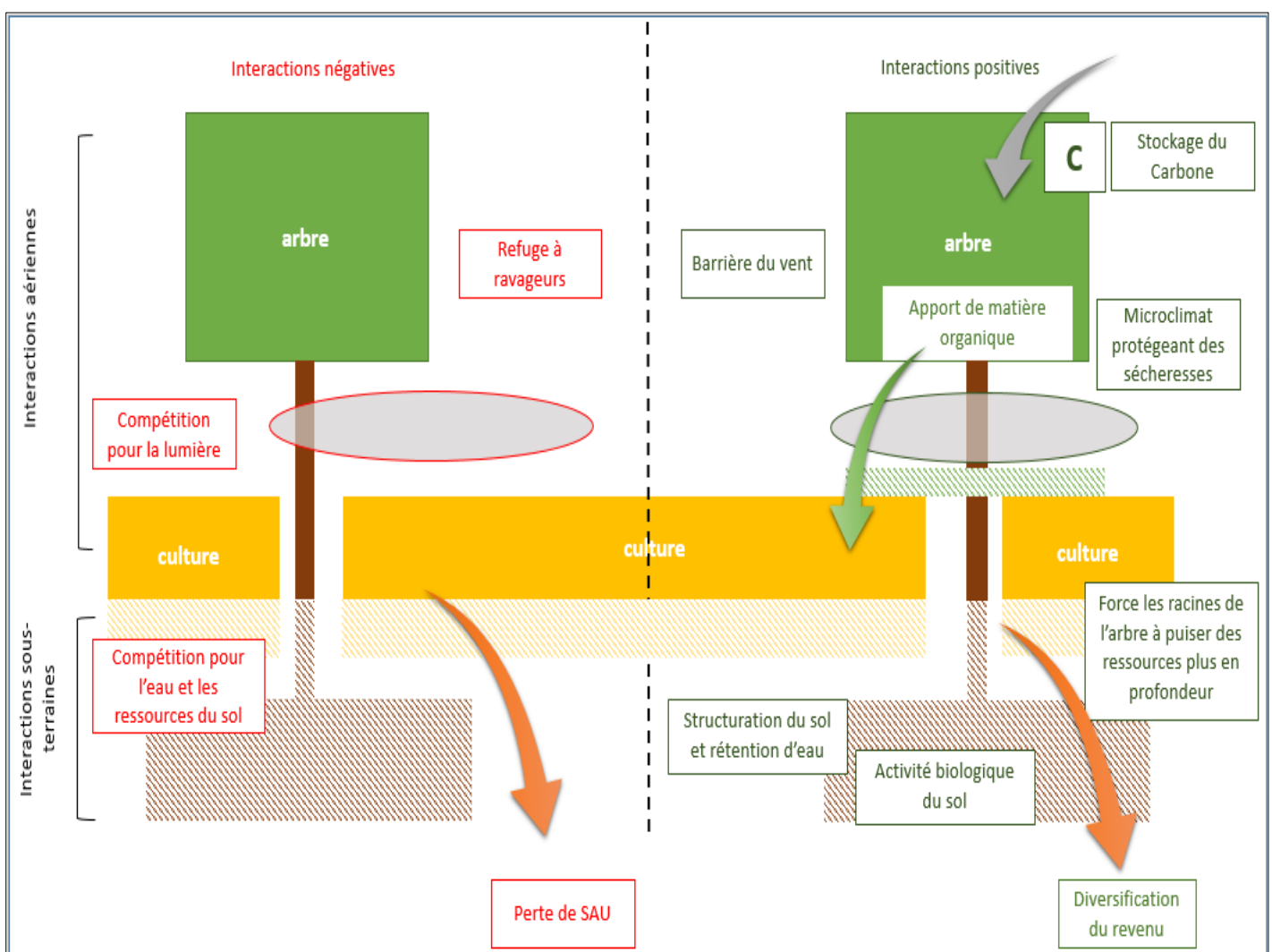


Figure 2. Schéma récapitulatif des interactions aériennes et sous terraines entre les arbres et la culture sous-jacente dans un système agroforestier classique (encadrés rouge : interactions négatives/encadrés verts : interactions positives (Garaux et al., 2018).

II. Rotation des cultures

La rotation des cultures consiste à planifier la succession de différentes cultures sur une même parcelle dans le temps. Cette pratique présente de nombreux avantages. Tout d'abord, elle contribue à améliorer la structure et la fertilité du sol, tout en réduisant efficacement la prolifération des mauvaises herbes et en minimisant les attaques de parasites (Arihara et Ohwaki, 1989). Cette pratique repose sur des principes clés, notamment :

- La diversification des familles de cultures
- Le choix d'une durée de cycle de rotation appropriée
- L'alternance entre les cultures d'hiver et de printemps pour contribuer à prévenir les épidémies de ravageurs et à éviter la résistance aux herbicides.

Une rotation bien pensée peut avoir un impact plus positif sur la fertilité des sols par rapport à une simple jachère de courte durée (Bado, 2002). En outre, cette approche permet de réduire la dépendance aux intrants chimiques dans l'agriculture. Selon (Danso, 1995), la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses joue un rôle crucial dans la croissance des plantes, ce qui est particulièrement pertinent dans les pays en développement par rapport à l'application d'engrais azotés. Les cultures suivant les légumineuses peuvent également bénéficier indirectement de l'azote fixé par celles-ci, grâce aux résidus qu'elles laissent dans le sol (Asimi, 2009). Dans le même contexte, les résultats de (Pouya, 2013) mettent en évidence que l'utilisation de légumineuses comme cultures précédentes peut littéralement doubler les rendements des cultures qui suivent.

III. Jachère

La jachère, selon la définition de (Sébillotte, 1985) correspond à la période entre la récolte d'une culture et le moment où une nouvelle culture est plantée. Elle est décrite par comme une phase d'inactivité agricole de la terre après avoir été cultivée (Floret et al., 1993).

La mise en jachère vise à restaurer la fertilité des sols cultivés en favorisant la récupération de la matière organique, en maintenant l'humidité et en perturbant les cycles de vie des nuisibles et des agents pathogènes du sol en supprimant temporairement leurs hôtes (Mando et al. en 2005 ; Somé et al. en 2007). En effet, de nombreuses études ont montré que, dans les sols cultivés, il y a généralement un bilan négatif en éléments nutritifs chaque année, tandis qu'en jachère, ce bilan est positif (Antoine et al., 2007).

Cependant, aujourd'hui, la pression démographique croissante et la demande accrue en terres perturbent ce cycle culture-jachère. Les périodes de jachère sont de plus en plus courtes, parfois même remplacées par une culture continue (Hien et al., en 2004).

IV. Utilisation des engrais minéraux

Les engrais minéraux sont des produits synthétiques qui apportent au sol un ou plusieurs éléments essentiels à la nutrition des plantes, améliorant ainsi la fertilité des sols en augmentant la disponibilité d'éléments nutritifs pour les plantes. Selon (Vanlauwe et Giller, 2006) l'utilisation judicieuse des engrais minéraux conduit à une augmentation des rendements, pourvu qu'aucun autre facteur de croissance ne devienne limitant. De plus, l'usage d'engrais peut non seulement accroître la biomasse aérienne et la disponibilité des résidus de culture, mais également favoriser l'accroissement de la biomasse racinaire, ce qui peut entraîner une augmentation de la matière organique du sol (Bationo et Buerkert, 2001). Cependant, il est important de souligner que l'utilisation exclusive de la fertilisation minérale ne peut pas maintenir durablement la fertilité des sols (Bado, 2002 ; Mills et al., 2003).

Les engrais minéraux représentent un moyen puissant d'intensifier l'agriculture (FAO, 2003 ; Vanlauwe & Giller, 2006). Dans les pays développés, les rendements moyens des cultures céréalières ont triplé, voire quadruplés, depuis les années 1950 grâce à l'utilisation d'engrais azotés. Cependant, dans l'agriculture de subsistance des pays d'Afrique, les engrais minéraux sont peu utilisés, principalement en raison de leur coût élevé par rapport aux faibles revenus des agriculteurs et de leur disponibilité limitée (Chivenge et al., 2022).

V. Amendements organiques

Les amendements organiques utilisés dans la réhabilitation des sols proviennent de diverses sources, notamment l'agriculture, la foresterie et les zones urbaines. Parmi ceux générés par l'agriculture, on trouve le fumier de bétail (qu'il soit frais, composté ou constitué de fractions solides issues de la digestion anaérobie) provenant de diverses espèces. D'autres amendements issus de l'agriculture comprennent les résidus de culture tels que la paille et les légumineuses (Larney & Angers, 2012). Ces amendements jouent un rôle essentiel en apportant de la matière organique au sol, ce qui favorise la formation de l'humus. Ils subissent une minéralisation progressive, ce qui signifie que les nutriments et les minéraux qu'ils contiennent sont libérés graduellement grâce à l'action des organismes du sol, devenant ainsi accessibles aux plantes (Ngo, 2014). Selon (Larney & Angers, 2012) une seule application importante d'amendements

organiques peut accélérer la restauration initiale et mener à une productivité primaire nette qui se maintiendra d'elle-même.

1. Fumier

Dans les oasis, l'utilisation du fumier est très répandue pour maintenir la fertilité des sols soumis à des pratiques agricoles intensives, en raison de l'importance de l'élevage dans les systèmes de production oasis (Dollé, 1990). L'apport du fumier améliore les récoltes à la fois en termes de quantité (rendement) et de qualité (valeur nutritionnelle) (Roose, 2017). Les éléments fertilisants qu'il contient proviennent principalement de l'alimentation des animaux. Environ 75 % de l'azote, du phosphore et du potassium présent dans les aliments des animaux sont excrétés dans leurs fèces et leur urine, car les animaux n'en assimilent qu'environ 25 % (Fraser, 1987).

La fertilisation des sols par l'épandage de fumier est un processus où les substances organiques contenues dans le fumier sont décomposées par des micro-organismes, produisant du gaz carbonique, de l'eau et des éléments nutritifs tels que l'azote, le phosphore et le soufre conduisant à une amélioration de la fertilité des sols. Lorsque le fumier est épandu sur les cultures ou les pâturages, il réduit la dépendance aux engrais chimiques, car il fournit une source naturelle de nutriments pour les plantes (Tittonell et al., 2007).

2. Résidus de culture

Le recyclage des résidus de cultures est une pratique ancienne qui trouve une justification pleine et entière dans la valeur agronomique de ces résidus. Selon Camara (1996), le recyclage des résidus de récolte revêt une importance particulière dans les pays en développement, étant donné que les quantités de nutriments qu'ils renferment sont sept à huit fois supérieures à celles apportées par l'application d'engrais. Ces résidus, qu'ils soient intégrés au sol ou utilisés comme paillis, sont essentiellement composés de matières organiques. En conséquence, leur contribution engendre divers effets, notamment la stimulation générale des populations microbiennes et de la faune, ainsi que l'amélioration des propriétés physico-chimiques des sols et à la réduction des phénomènes d'érosion (Monaco et al., 2008).

Conclusion

La gestion de la fertilité des sols dans les oasis est essentielle pour soutenir l'agriculture durable dans ces environnements arides. Les pratiques examinées dans ce chapitre offrent une gamme d'options aux agriculteurs pour améliorer la fertilité du sol, augmenter les rendements,

diversifier les sources de revenus, et contribuer à la préservation de l'environnement. Une approche intégrée de ces pratiques peut jouer un rôle clé dans la prospérité agricole à long terme dans les oasis.

MATERIEL ET METHODES

Introduction

Après avoir établi la problématique de notre étude et défini nos objectifs de recherche, cette section sera consacrée à la présentation des éléments essentiels permettant de mieux appréhender l'environnement de notre étude, à savoir "M'Semrir". Par la suite, nous exposerons notre approche et la méthodologie que nous avons adoptées pour mener à bien cette recherche.

I. Zone d'étude

1. Situation géographique

Notre zone d'étude est la commune territoriale de M'Semrir, qui se situe au niveau de la province de Tinghir, elle fait partie de la région de Drâa Tafilelt (Figure 7). Elle se place au piémont du Haut Atlas à une altitude de 1900 m et précisément dans la vallée de l'oued IMDGHAS, l'un des principaux affluents de l'oued Dadès (ORMVAO, 2019).

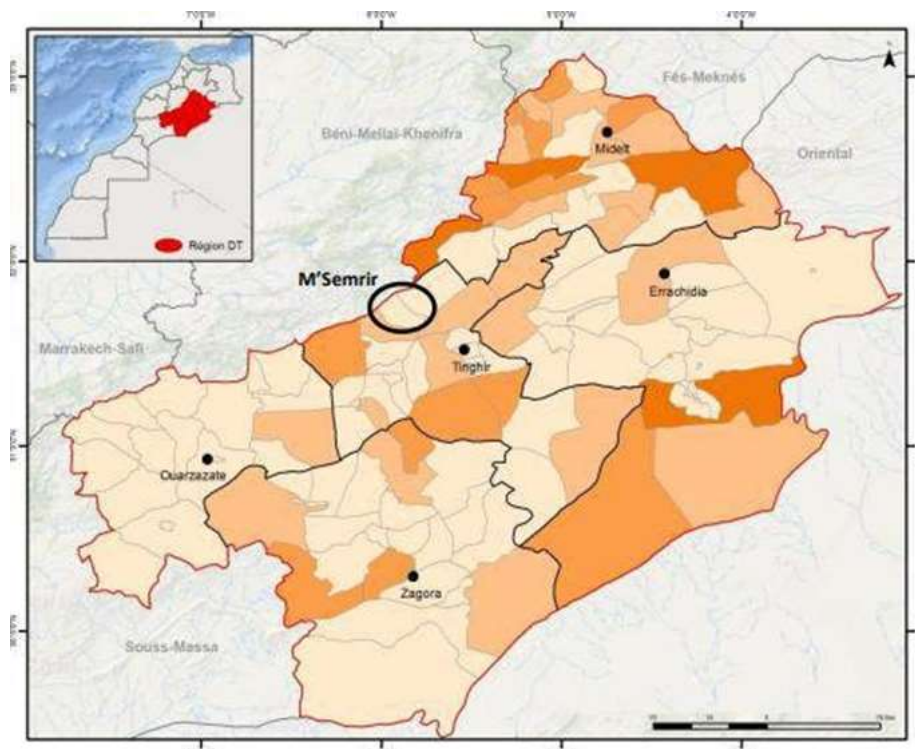


Figure 3. Carte de la région de Drâa-Tafilalt et le découpage communal des provinces (ORMVAO, 2019)

2. Milieu naturel

2.1. Topographie

La zone présente une topographie accidentée, avec les chaînes atlasiques prédominant dans sa partie septentrionale. Ces chaînes se présentent sous forme de crêtes aiguës et de gorges profondes, donnant lieu à des altitudes variant entre 1500 m et 3000 m. La pente générale suit la direction de l'oued Dadès, s'étendant du Nord-Est vers le Sud-Ouest (Projet OASIL, 2018).

2.2. Climat

La zone M'Semrir se caractérise par un climat sec à tendance continentale, influencé par des masses d'air sahariennes et des masses atlantiques venant du Sud-Ouest. La pluviométrie annuelle présente des niveaux moyens irréguliers et limités dans le temps et l'espace, surtout au cours des 5 dernières années (figure 9). Par exemple, lors de la campagne 2019/2020, les précipitations ont été de l'ordre de 108,7 mm, en baisse de 22,63 % par rapport à l'année précédente qui avait enregistré 140,5 mm. Les hautes montagnes, à partir de 1 800 m d'altitude, peuvent recevoir des chutes de neige qui, en fondant, alimentent les ressources hydriques, tant superficielles que souterraines (ORMVAO, 2020). Ces précipitations peuvent également entraîner des crues violentes des oueds, entraînant des pertes pour les infrastructures hydroagricoles et les terrains cultivés. La région connaît des températures très élevées en été, dépassant souvent les 40 °C, et des températures très basses en hiver, pouvant atteindre jusqu'à -5 °C, accompagnées de forts courants venteux. Les gelées printanières sont fréquentes et peuvent causer des pertes considérables de production, en particulier pour les cultures de rosacées fruitières (HCP, 2017).

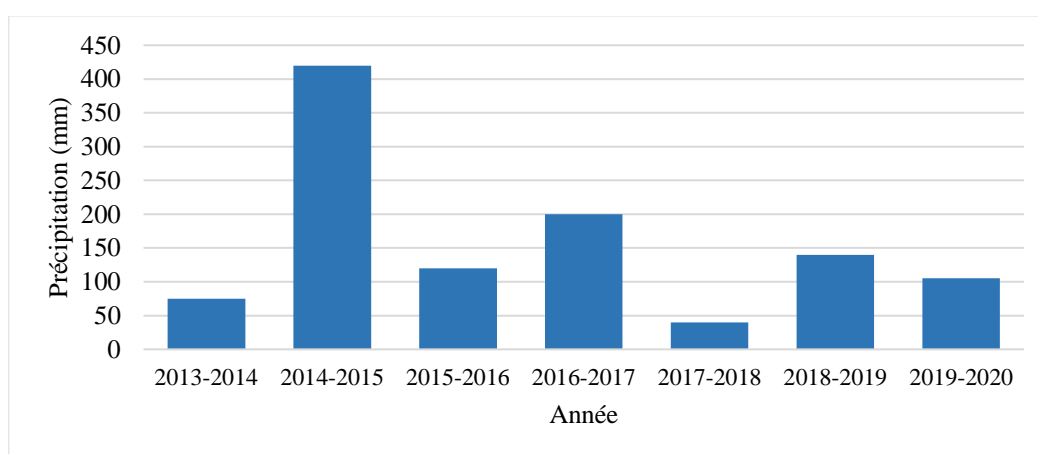


Figure 4. Évolution de la pluviométrie dans la commune de M'Semrir entre 2013 et 2020 (ORMVAO, 2020).

2.3. Sol

La zone étudiée présente une variété de sols minéraux bruts, répartis en trois catégories principales. Les sols d'érosion squelettiques, tels que les lithosols et les regosols, se trouvent principalement sur les pentes raides des montagnes et des collines. Dans cette zone d'étude, des techniques d'amendement sont utilisées pour améliorer ces sols en ajoutant d'autres types de sol afin d'optimiser leur texture, favorisant ainsi la formation d'agrégats terreux. Les sols alluvio colluviaux, situés dans les fonds de vallées peu profondes et composés de matériaux d'apport fluvial tels que des sables, des galets et des graviers, présentent généralement une texture grossière et une faible à forte teneur en calcaire, mais ils contiennent très peu de matières organiques ce qui implique à apporter d'autres types de sol pour améliorer la texture, renforçant ainsi la cohésion des sols nouvellement reconstitués, suivie de l'ajout de matière organique telle que du fumier pour augmenter leur contenu en matière organique, les rendant ainsi aptes à l'agriculture. Les sols d'apport éolien sont des dépôts sableux sous forme de voiles peu épais ou de dunes, principalement situés sur les terrasses moyennes des oueds. Les sols peu évolués, les plus répandus dans la région, sont composés de matériaux sablo-limoneux, limono-sableux, argilo-limoneux et limono-argilo-sableux, avec des apports alluvionnaires et une teneur moyenne à forte en calcaire, mais pauvres en matières organiques. Enfin, les sols plus évolués, tels que les sols bruns iso humiques, les sols rouges ferrallitiques et les sols bruns eutrophes, se retrouvent principalement dans les zones montagneuses du Haut Atlas. Cependant, ces sols sont fragiles et en dégradation progressive en raison de la destruction du couvert végétal (Projet OASIL, 2018).

2.4. Ressources hydriques

La zone d'étude est perçue comme une zone aride dans la totalité de ses communes bien qu'elle soit dotée d'un ensemble d'oueds et de bassins hydrauliques. Les principaux bassins hydrauliques qui couvrent la province sont : Guir-Ziz-Ghriss, et le barrage de Mansour Eddahbi. Les eaux de surface proviennent pour l'essentiel des cours d'eau Oussikis et Imdghas, se déversant tous les deux l'Oued Dadès. Les écoulements peuvent atteindre des débits très importants en périodes pluviales et de fonte de neige. Le régime moyen annuel de l'Oued Dadès au niveau de M'Semrir est de 3,6 m³/seconde. L'irrigation se fait généralement par les séguias qui sont au nombre de 30 au niveau de M'Semrir, avec une khattara. Les eaux de surface sont à 270 millions m³ tandis que la nappe est d'une profondeur de 20 m (ORMVAO, 2019).

2.5. Végétation

La disponibilité limitée des terres agricoles a contraint le mode d'utilisation des sols dans la commune de M'Semrir à adopter un système de production végétale intensif. Ce système se caractérise par une association entre le pommier et les cultures basses. Parmi ces dernières, la culture annuelle de pomme de terre prédomine en tant que culture génératrice de revenus.

Parallèlement, les céréales, notamment le blé et l'orge, ainsi que les légumineuses telles que la luzerne, sont également cultivées.

L'arboriculture fruitière, formée particulièrement des rosacées, est plus importante dans le périmètre avec près de 370 000 de pommiers, soit 95 % du patrimoine arboricole (ORVAMO, 2019). Il s'agit donc d'une arboriculture commerciale par excellence. L'importance de cette espèce pourrait s'expliquer par son adaptation à la zone et manifestant également une compatibilité aux systèmes de cultures.

2.6. Elevage

Dans la zone de M'Semrir, l'élevage constitue l'une des activités principales pour une part importante de la population. Selon les données de ORMVAO (2019) deux systèmes d'élevage peuvent être distingués dans la zone selon les caractéristiques spécifiques en termes de gestion du bétail, de mode d'alimentation et de pratiques d'élevage, comme suit :

- Un système d'élevage semi-intensif de type oasien qui associe l'élevage d'ovins et de bovins en stabulation permanente. Les races locales sont principalement élevées, et l'alimentation du troupeau est assurée principalement par des cultures fourragères, notamment la luzerne verte ou le foin, ainsi que des sous-produits végétaux. Le troupeau est estimé à 6 500 têtes d'ovins et 3 130 bovins.
- Un système d'élevage transhumant axé sur l'élevage extensif des petits ruminants en parcours. Dans ce système, l'alimentation du bétail est basée sur les ressources pastorales. Environ 250 éleveurs pratiquent ce système, avec un effectif total de 32 600 ovins et 7 450 caprins. Cependant, ces derniers temps, les éleveurs appartenant à ce groupe ont tendance à se sédentariser davantage autour du périmètre, ce qui a entraîné une réduction du cheptel transhumant.

3. Données socio-économiques

3.1. Population

Selon le dernier recensement réalisé en 2019 au Maroc, la population de la zone de M'Semrir s'élève à 20 238 habitants, répartis entre 3 084 ménages et 37 douars. La taille moyenne des ménages est de 6,9 personnes, et les femmes représentent près de 51 % de la population. La densité de population est élevée dans les zones où les ressources en eau sont disponibles, atteignant 13 habitants par hectare, ce qui met en évidence la forte pression exercée sur les ressources naturelles. Initialement constituée de nomades, la population s'est progressivement sédentarisée le long des cours d'eau, et actuellement, la zone compte 2 200 agriculteurs qui dépendent principalement de l'agriculture et de l'élevage pour leur économie. Toutefois, des sources de revenus extra-agricoles proviennent également des activités commerciales, de l'émigration et du développement émergent du tourisme, notamment l'accueil de randonneurs (ORMVAO, 2019).

3.2. Structures foncières

Le périmètre de M'Semrir s'étend sur une superficie totale d'environ 212 400 hectares, répartie selon différents modes d'usage. Les terres agricoles ne représentent qu'une faible proportion, soit seulement 0,65 % de la superficie totale, alors que les parcours jouent un rôle essentiel dans cette zone. La concentration des terres cultivées dans les vallées principales et le système de division des terres ont engendré une structure foncière caractérisée par la micropropriété et un morcellement très marqué. En effet, la superficie moyenne des exploitations agricoles est d'environ 0,7 hectare, avec une moyenne de 12 parcelles par exploitation (ORMVAO, 2019).

II. Outils et méthodologie

L'étude a été menée en utilisant deux approches complémentaires : des enquêtes auprès des agriculteurs et des analyses de sol réalisées au laboratoire. Cette combinaison de méthodes permet de constituer une base solide pour une compréhension globale et nuancée de la fertilité des sols dans la zone d'étude. L'étude a été menée en respectant un processus en trois phases principales, tel que décrit ci-dessous :

1. Phase 1 : Diagnostic territorial collectif

Avant d'entreprendre des travaux sur le terrain, une phase de préparation cruciale consiste à définir les objectifs du diagnostic tout en réalisant une analyse approfondie préliminaire de la zone d'étude. Cette approche repose sur l'utilisation d'images satellitaires et sur une évaluation critique des connaissances disponibles dans la littérature.

La deuxième étape est consacrée au « Diagnostic du territoire de vie ». Au cours de cette période, nous avons systématiquement identifié les différentes zones de vie, plongeant ainsi dans l'exploration de leurs caractéristiques distinctives et des communautés qui les habitent. Cette exploration a été facilitée grâce à des entretiens individuels et collectifs, ainsi qu'à une analyse minutieuse des cartes et des images satellitaires. Cela a permis d'acquérir une compréhension plus nuancée du paysage environnant.

La conclusion de cette phase marque le début d'une synthèse et d'un dialogue collectif. Cette discussion, ancrée dans une approche participative, vise à combler les éventuelles lacunes identifiées et à corriger d'éventuelles erreurs. Les échanges entre les parties prenantes servent ainsi à consolider les données recueillies, à enrichir la compréhension globale du territoire, et à établir une base solide pour la suite de l'étude.

2. Phase 2 : Collecte des données

L'étude a été menée en utilisant deux approches complémentaires : des enquêtes auprès des agriculteurs et des analyses de sol réalisées au laboratoire du département. Cette combinaison de méthodes permet d'obtenir une vision globale de la fertilité des sols dans la zone d'étude. Les étapes de réalisation de chaque approche sont expliquées de la manière suivante :

2.1. Approche 1 : Enquêtes

2.1.1. Identification des enquêtés

Notre étude s'est focalisée exclusivement sur la zone d'Oussikis, intégrée à la commune de M'Semrir en raison de la contrainte de temps qui a restreint notre capacité à mener une investigation exhaustive. De plus, compte tenu du fait que nous avons réalisé des prélèvements pour des analyses de sol, il était impératif de restreindre notre champ d'étude dans l'espace pour garantir une meilleure représentativité des données.



Figure 5. Territoire de vie Oussikis (Zone d'étude)

2.1.2. Échantillonnage

Face à l'absence de données complètes concernant le nombre total d'agriculteurs dans la région, nous avons adopté la méthode de la boule de neige. Cette approche nous a permis de contourner cette lacune en tirant parti des recommandations et des contacts fournis par les personnes déjà interrogées, facilitant ainsi la collecte d'informations spécifiques auprès de la population ciblée. Pour constituer notre échantillon, nous avons sélectionné de manière aléatoire 60 agriculteurs au sein de la zone d'Oussikis.

2.1.3. Questionnaire utilisé

Le questionnaire a été soigneusement conçu pour servir d'outil fondamental de collecte de données dans le cadre de notre étude. Son objectif central est d'approfondir notre compréhension de la manière dont les agriculteurs perçoivent la gestion de la fertilité des sols et des pratiques qu'ils mettent en place à cet égard. De plus, il couvre des aspects tels que les systèmes de culture, l'historique des cultures sur la parcelle ainsi que l'utilisation d'intrants

agricoles tels que les engrais minéraux et le fumier. Les détails complets du questionnaire, y compris les questions spécifiques et les modalités de réponses sont disponibles en annexe 1.

2.1.4. Analyse des données

Les données ainsi collectées ont été résumées sous forme de graphiques à l'aide du logiciel Microsoft Excel.

2.2. Approche 2 : Prélèvement des échantillons de sol

2.2.1. Objectifs des prélèvements

Les prélèvements de sol réalisés revêtent un objectif essentiel dans le cadre de cette étude. Ils visent avant tout à évaluer l'état actuel de fertilité des sols au sein de la zone d'étude. De plus, ces analyses nous permettront de quantifier l'impact des différentes pratiques de gestion de la fertilité mises en place par les agriculteurs de la région. De plus, nous pourrions étudier l'impact de l'état de surface du sol ainsi que de la position des parcelles sur ces paramètres.

2.2.2. Identification des exploitations

Au sein de cette étude, trois facteurs ont été sélectionnés pour évaluer leur impact sur la fertilité des sols dans la zone d'étude (figure 11) à savoir :

- Le gradient amont aval de l'oued, spécifiquement celui de l'Oued d'Oussikis. Cet aspect sera exploré au travers de trois transects distincts, permettant d'examiner les nuances subtiles dans les propriétés du sol en réponse aux variations hydrologiques.
- La distance par rapport à l'oued, a été subdivisée en deux niveaux distincts : les parcelles en proximité immédiate de l'oued et les parcelles plus éloignées, qui se rapprochent des flancs montagneux.
- Les associations végétales, en se focalisant sur deux types dominants d'après les enquêtes réalisés dans la zone d'étude : l'association arboriculture et légumineuse, ainsi que l'association arboriculture et céréaliculture. L'objectif est d'analyser comment les différentes interactions végétales pourraient influencer les caractéristiques du sol et, par extension, sa fertilité.

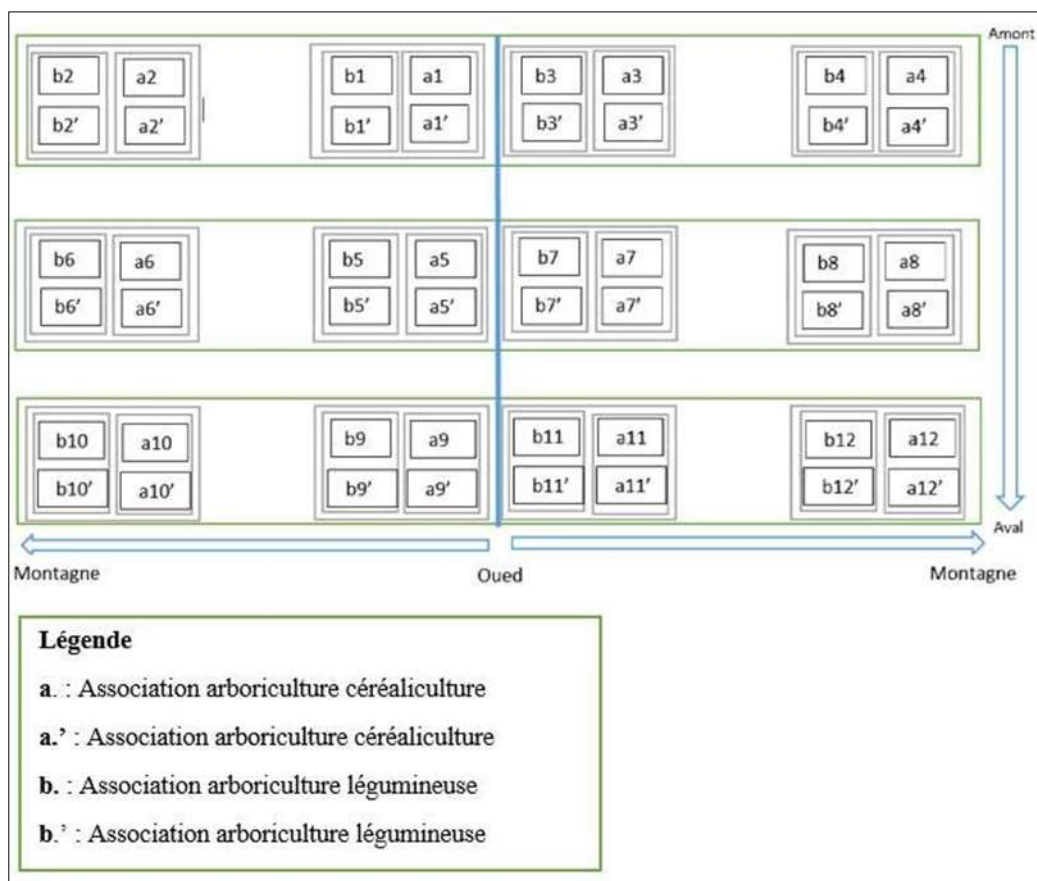


Figure 6. Plan d'échantillonnage

2.2.3. Protocole d'échantillonnage

Au total 48 échantillons ont été prélevés avec une tarière à une profondeur de 0 à 30 cm. Pour chaque échantillon composite, 6 à 8 prélèvements ont été effectués le long de la principale diagonale de chaque parcelle (figure 12).

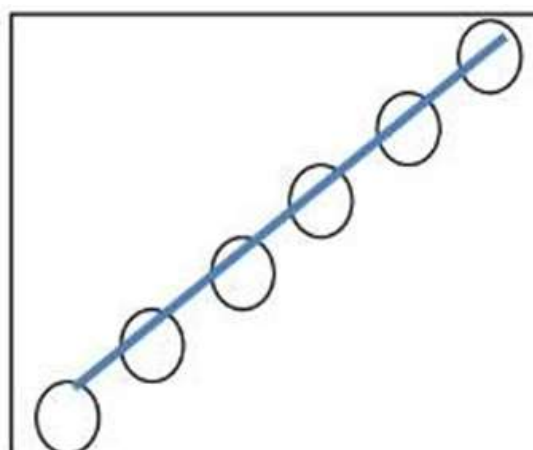


Figure 7. Prélèvement le long de la diagonale de la parcelle

2.2.4. Analyse des prélèvements au laboratoire

Les analyses physiques et chimiques ont été réalisées au laboratoire du département des ressources naturelles et environnements à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II. Le protocole expérimental utilisé est décrit comme suit :

a. Préparation des échantillons

Les échantillons de sol sont préalablement séchés à l'air libre, puis les mottes sont émietées afin de les broyer. Par la suite, les échantillons sont tamisés à travers un tamis de 2 mm, permettant de séparer la terre fine des agrégats sans altérer leur nature. Cette étape de tamisage est réalisée pour obtenir une fraction granulométrique homogène. Les échantillons ainsi préparés sont soumis à une série d'analyses physico-chimiques visant à évaluer différents paramètres.

b. Analyses de sol

Les analyses de sol effectuées couvrent divers paramètres, comprenant :

- La granulométrie, déterminée à l'aide de la méthode de la pipette de Robinson pour évaluer la texture du sol.
- Le pH du sol, mesuré à l'aide d'un pH-mètre selon la méthode potentiométrique.
- La conductivité électrique, employée pour évaluer la salinité des sols par la méthode 1:5.
- La matière organique, quantifiée en utilisant la méthode de Walkey-Black.
- L'azote minéral, déterminé par distillation.
- Le phosphore assimilable, évalué par la méthode d'Olsen.
- Le potassium échangeable, extrait à l'aide de l'acétate d'ammonium à un pH de 7 et mesuré par dosage photométrique à flamme.

Les protocoles de chaque analyse seront présentés en annexe 2.

2.2.5. Analyse des données

a. Analyse statistique

L'analyse statistique des données a été menée de manière rigoureuse pour évaluer l'impact de trois facteurs préalablement sélectionnés sur les paramètres des sols étudiés. À l'aide de l'outil

statistique SPSS 26, une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée en appliquant un seuil de probabilité de $\alpha = 5 \%$ et $\alpha = 1 \%$. Le détail des résultats sera présenté en annexe 4.

b. Élaboration des cartes thématiques

Une carte thématique est un outil permettant de représenter des données spatiales de manière visuelle. Les systèmes d'information géographique (SIG) facilitent la création de ces cartes en utilisant des logiciels spécialisés.

Dans le cadre de cette étude, des cartes thématiques de pH, la conductivité électrique, la teneur en matière organique et de la teneur en NPK dans les sols d'Oussikis ont été générées. Ces cartes ont été élaborées en saisissant d'abord les résultats des analyses dans le logiciel ArcGIS 10.1, puis en utilisant la méthode d'interpolation IDW (Inverse Distance Weight).

L'IDW fonctionne en déterminant les valeurs des cellules en combinant de manière pondérée les données provenant d'un ensemble de points d'échantillonnage. Plus un point d'échantillonnage est proche du centre de la cellule en cours d'analyse, plus son influence est significative dans le calcul, ce qui permet de créer une représentation continue des données sous forme de grille (raster) (Tuncay et al., 2016).

Conclusion

La zone d'étude de M'Semrir est un territoire où l'agriculture revêt une importance cruciale pour l'économie locale et la vie des habitants. Cependant, face à la topographie montagneuse, les impacts du changement climatique et l'intensification agricole due au morcellement excessif des terres, la question de la fertilité des sols se pose comme un défi majeur. Ce qui nous mène à analyser et à identifier les pratiques adoptées par les agriculteurs locaux en matière de gestion de la fertilité des sols en combinant des enquêtes sur le terrain et des analyses de sol.

RESULTATS

Introduction

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats obtenus en analysant les données collectées. Le premier axe se focalise sur les résultats des enquêtes, mettant principalement l'accent sur les pratiques de gestion de la fertilité des sols adoptées par les agriculteurs, en mettant l'accent sur les pourcentages d'adoption de chaque pratique. De plus, nous examinerons l'état actuel des sols de la zone d'étude en analysant les résultats de différents paramètres physico-chimiques tels que la texture, le pH, la salinité, la matière organique, le phosphore assimilable, le potassium échangeable et l'azote minéral. Enfin, nous évaluerons l'influence des facteurs environnementaux sur la fertilité des sols, notamment le gradient amont-aval et la distance par rapport à l'oued. Nous concluons cette section en explorant l'impact de l'état de surface sur la fertilité des sols.

I. Pratiques de gestion de la fertilité des sols adoptée par les agriculteurs

Les agriculteurs enquêtés ont mis en place plusieurs pratiques culturales de gestion de la fertilité des sols, comme illustrés en pourcentages dans la Figure 10. Parmi ces pratiques, on observe principalement l'agroforesterie (i), la rotation des cultures (ii), l'application de la fumure (iii) et le travail du sol (vi).

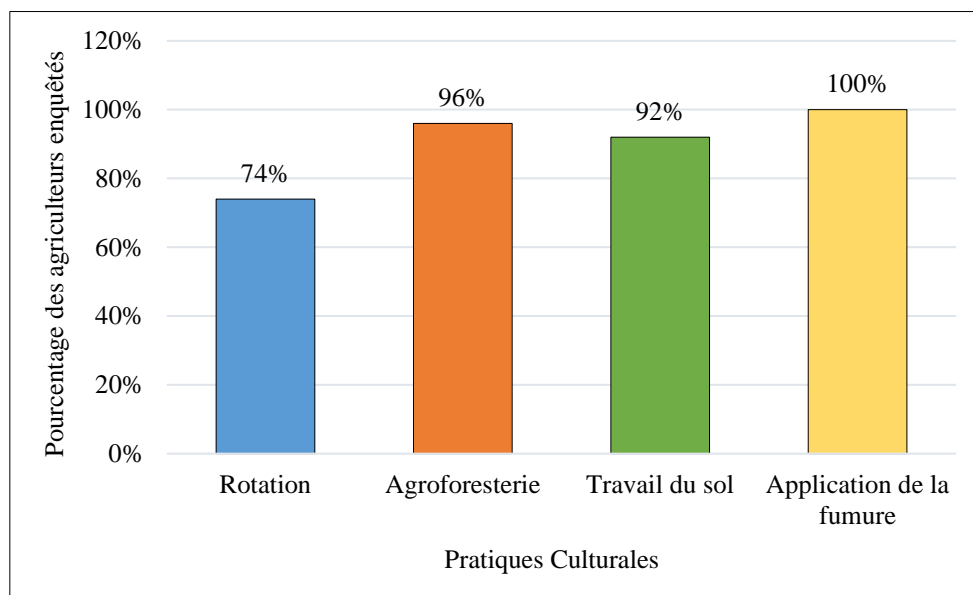


Figure 8. Pratiques culturales utilisées par les agriculteurs enquêtés en pourcentage.

1. Adoption Répandue de l'Agroforesterie

Nous avons observé une adoption massive de l'agroforesterie par les agriculteurs de la région, avec 96 % d'entre eux mettant en œuvre ce système de culture à deux étages, alliant les rosacées telles que les pommiers aux fourrages, céréales et maraichages, à savoir principalement la luzerne, l'orge, le blé et la pomme de terre.

Cette décision stratégique des agriculteurs résulte de plusieurs facteurs, dont le morcellement des terres et leur petite taille, des réalités locales qui ont incité les agriculteurs à adopter cette approche. L'objectif principal est de maximiser la production sur chaque petite parcelle de terre, en optimisant l'utilisation de l'espace disponible. Cependant, il est important de noter que dans leur choix d'agroforesterie, les agriculteurs se concentrent principalement sur les avantages pratiques immédiats en termes de rendements et d'utilisation efficace des terres. Ils accordent moins d'attention au rôle que les arbres jouent dans la préservation de la fertilité du sol à long terme. Diverses techniques d'agroforesterie sont mises en œuvre, notamment la plantation de bornage, la disposition d'arbres le long des contours ou des limites des plantations pour les marquer, ainsi que la création de bandes de protection ou de clôtures avec des arbres pour servir de barrière contre le vent, entre autres méthodes (photo1).



Photo 1. Différents types d'agroforesterie (Oussikis, 2023)

2. Rotation des Cultures

Une autre approche utilisée par les agriculteurs de la zone d'étude pour maintenir la fertilité des sols consiste à pratiquer la rotation des cultures. Cette méthode, plébiscitée par 75 % des agriculteurs interrogés lors de l'enquête, consiste à alterner les types de cultures sur une même parcelle de terrain. Les agriculteurs ont suivi diverses séquences de rotation en fonction de leurs objectifs spécifiques. Parmi les schémas les plus couramment employés, l'alternance entre cultures céréalières telles que le blé et l'orge prédomine. De plus, certains ont opté pour l'intégration de légumineuses dans leurs rotations, en alternant une culture céréalière par exemple blé, avec la luzerne. Une autre séquence répandue vise à intégrer des cultures maraichères dans la rotation, en associant blé, orge et pommes de terre, favorisant ainsi une diversification des cultures et une meilleure utilisation des ressources du sol. Par ailleurs, une minorité représentant 5 % des agriculteurs a introduit des périodes de jachère naturelle au sein de leurs séquences de rotation.

3. Travail du Sol

Les agriculteurs dans la zone d'étude travaillent leurs parcelles généralement deux fois par an. La première intervention, qui se déroule en mois d'octobre-novembre, implique un labour manuel profond jusqu'à 30 centimètres de profondeur, réalisé à l'aide d'une houe. Les agriculteurs considèrent cette méthode traditionnelle comme essentielle pour préparer efficacement le terrain en vue de la plantation de cultures, car elle permet un mélange harmonieux de la terre avec les engrais de fond, favorisant ainsi une meilleure aération du sol et une répartition uniforme des nutriments essentiels à la croissance des plantes.

La deuxième intervention a lieu généralement en mois de juillet. Lors de cette étape, les agriculteurs effectuent un travail superficiel du sol à une profondeur de 15 centimètres, dans le but de préparer le terrain en vue de la culture suivante (photo 2).



Photo 2. Deux parcelles travaillées (Oussikis, 2023)

4. Application de la fumure

4.1. Fumure minérale

4.1.1. Types d'engrais minéraux utilisés

Les agriculteurs utilisent, sur les cultures des complexes NPK et de l'urée ainsi que de l'ammonitrate apportant de l'azote, du phosphore et du potassium essentiel à la croissance des plantes cultivées (Figure 11).

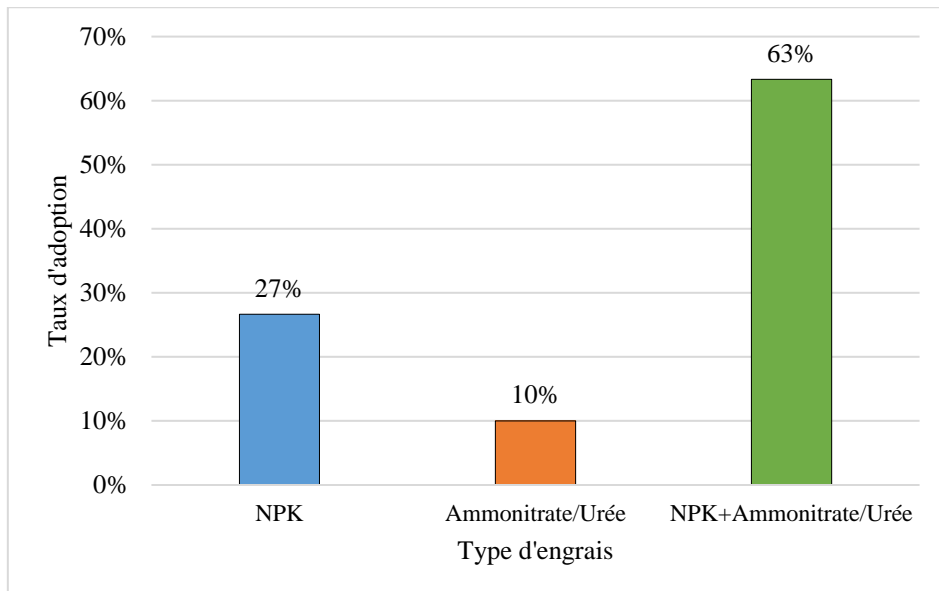


Figure 9. Principaux engrais chimiques utilisés exprimés en pourcentages des agriculteurs enquêtés.

4.1.2. Descriptions des engrais minéraux par les paysans

Les agriculteurs ont recours à divers critères pour identifier les types d'engrais minéraux qu'ils utilisent dans leurs champs, tels que la couleur du produit, celle du sac, le prix et leurs fonctions spécifiques.

Selon les agriculteurs, les complexes NPK et l'urée ont des effets distincts sur les différents composants de l'agrosystème, y compris les plantes, les sols et les mauvaises herbes. Les complexes NPK sont réputés pour leur capacité à améliorer la structure du sol, le rendant ainsi plus propice à la culture. En revanche, l'urée est considérée comme un engrais qui confère vigueur et force aux céréales, favorisant leur fructification et le remplissage des graines.

Toutefois, il est essentiel de noter que l'utilisation de l'urée peut encourager la croissance des mauvaises herbes, un problème majeur auquel sont confrontés les agriculteurs de la région, augmentant ainsi le risque de leur prolifération dans les parcelles.

De plus, les agriculteurs reconnaissent que l'utilisation d'engrais comporte des risques pour les cultures. Les engrais nécessitent une dissolution dans le sol avant de pouvoir agir, processus qui requiert une certaine quantité d'eau. En l'absence ou en cas d'insuffisance d'eau, les agriculteurs expliquent que les engrais ont tendance à dessécher les cultures, augmentant ainsi le risque de brûlure des plantes.

4.1.3. Justifications de l'utilisation d'engrais minéraux par les agriculteurs

Les justifications avancées par les agriculteurs pour l'utilisation des engrais minéraux sont principalement :

- Appauvrissement des sols : Les agriculteurs sont conscients que leurs sols perdent progressivement leurs éléments nutritifs essentiels au fil des saisons de culture. Cette réduction des nutriments dans le sol peut entraîner une diminution de la fertilité, ce qui limite la capacité des cultures à absorber les nutriments dont elles ont besoin pour croître en santé. Pour contrer cet appauvrissement, les agriculteurs se tournent vers les engrais minéraux pour rétablir l'équilibre nutritionnel du sol.
- Insuffisance de la fumure organique : La fumure organique peut être limitée en quantité ou devenir difficile à obtenir pour de nombreux agriculteurs. La collecte, la décomposition et l'application de matière organique nécessitent souvent des ressources et du temps considérable. En conséquence, les agriculteurs, en particulier ceux ayant

des ressources limitées, recourent aux engrais minéraux comme une source plus accessible et immédiate d'éléments nutritifs essentiels pour leurs cultures.

- Besoin d'accélérer la croissance des cultures et la recherche de bons rendements agricoles : Les engrais minéraux, riches en éléments nutritifs facilement disponibles, sont utilisés pour stimuler la croissance végétative rapide et obtenir des rendements plus élevés.

4.1.4. Modes d'approvisionnement en engrais minéraux

Dans la zone d'étude, l'approvisionnement en engrais minéraux utilisés par les agriculteurs est principalement géré par le Centre de Mise en Valeur Agricole (CMV). Cet organisme est chargé de distribuer l'engrais de base de type NPK « 10-28-10 ». Cependant, il est important de noter que cette distribution est effectuée pendant une phase spécifique de l'année, ce qui crée des défis pour certains agriculteurs en raison de contraintes financières.

En dehors de l'approvisionnement par le CMV, les agriculteurs se tournent vers le marché pour l'achat d'engrais. Cependant, la diversité des acteurs impliqués dans l'approvisionnement en intrants sur le marché (Souk hebdomadaire de M'Semrir) ne garantit pas l'uniformité des produits utilisés par les agriculteurs dans leurs champs, ce qui engendre des problèmes tels que des fluctuations de prix, une qualité d'engrais incertaine et une disponibilité limitée, en particulier pour les agriculteurs ayant des ressources restreintes.

Cette situation complexe met en évidence les défis auxquels les agriculteurs de la zone d'étude sont confrontés en termes d'approvisionnement en engrais minéraux. La dépendance à l'approvisionnement subventionné par le CMV, limité dans le temps, et l'incertitude du marché non structuré peuvent avoir un impact sur la capacité des agriculteurs à obtenir les engrais nécessaires pour maintenir la fertilité de leurs sols et augmenter leur production agricole.

4.2. Fumure organique

Il ressort clairement de cette étude que le fumier constitue une ressource précieuse pour les agriculteurs, en tant qu'amendement organique riche en nutriments pour restituer et fertiliser les sols et améliorer leur productivité. Deux principales sources de fumier sont identifiées : le fumier provenant de l'élevage sédentaire propre de l'agriculteur et celui acheté auprès des éleveurs agropasteurs et transhumant. Les agriculteurs préfèrent généralement le fumier transhumant en raison de sa haute teneur en nutriments provenant de différentes sources alimentaires utilisées pour le bétail.

Cependant, malgré cette préférence, l'accès au fumier transhumant est limité en raison des coûts élevés associés à son transport. Les petits agriculteurs ont des contraintes budgétaires qui les empêchent souvent de supporter ces frais supplémentaires. En conséquence, beaucoup se tournent vers l'utilisation du fumier produit sur leurs propres exploitations, car il est plus économique et disponible localement. En moyenne, les agriculteurs épandent environ 6470 kg/ha de fumier, mais cette quantité peut varier en fonction de la taille du cheptel et de la superficie des exploitations agricoles.

Un constat important concerne les pratiques de stockage du fumier, que les agriculteurs ont tendance à stocker le fumier en tas à même le sol, exposé aux éléments tels que les vents, les pluies, les neiges et les rayons du soleil, sans bénéficier d'une couverture adéquate (photo 3). Cette pratique de stockage directement sur un sol perméable entraîne plusieurs conséquences préjudiciables.



Photo 3. Forme de stockage du fumier (Oussikis, 2023)

4.3. Comparaison de l'effet des fumures organiques et minérales vue par les agriculteurs

Les agriculteurs ont observé que l'utilisation de fumures organiques favorise le développement de plantes robustes et une fructification satisfaisante des cultures. Ils reconnaissent cependant que les engrais minéraux ont un effet plus rapide sur la croissance des cultures. Les fumures organiques, quant à elles, sont réputées avoir des effets plus importants sur les sols. Elles contribuent à une meilleure rétention de l'eau, favorisent la structure, et facilitent le travail du sol.

Il est intéressant de noter que les deux types de fumures, organiques et minérales, semblent favoriser le développement des adventices. De plus, les fumures organiques peuvent contenir des graines d'adventices, ce qui peut contribuer à la dissémination de ces plantes indésirables.

Dans l'ensemble, les effets des fumures organiques et minérales sur les plantes, les sols et les adventices sont complémentaires. Les fumures organiques offrent des avantages durables pour la structure du sol et la rétention d'eau, tandis que les engrais minéraux agissent plus rapidement sur la croissance des cultures.

II. Etat actuel des sols de la zone d'étude

1. Analyse des paramètres physico-chimiques

1.1. Texture

Dans la zone d'étude, nous avons observé une diversité remarquable de caractéristiques texturales, allant du sableux au limoneux, en passant par l'argileux. Cependant, la texture prédominante dans cette zone est celle que l'on pourrait qualifier de « texture équilibrée », représentant 64 % des échantillons analysés. En examinant de plus près la répartition des différentes catégories texturales, nous constatons que le limon sableux constitue la majorité, représentant 41 %, suivi du limon fin à 22 %. La figure 15 illustre les diverses classes texturales présentes dans la zone d'étude, reflétant ainsi la variété des caractéristiques texturales observées dans les sols.

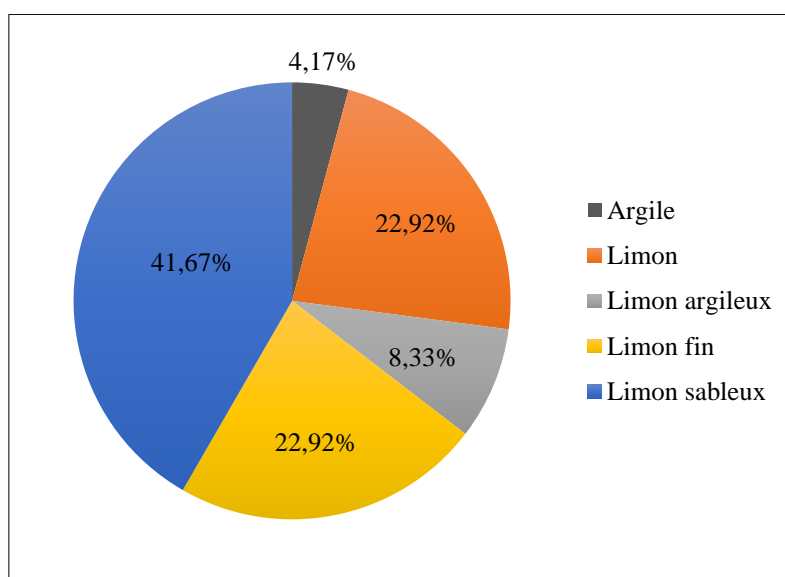


Figure 10. Pourcentage de répartition des classes texturales du sol d'Oussikis.

1.2. Potentiel hydrogène

L'analyse des résultats concernant le pH du sol révèle des informations cruciales sur l'environnement édaphique de la zone d'étude. Le pH du sol joue un rôle central dans la disponibilité et l'absorption des nutriments par les plantes, ce qui en fait un paramètre essentiel pour évaluer la fertilité et la santé des sols. En se basant sur les normes d'interprétation présentées dans le tableau 1, les résultats montrent que les échantillons de sol prélevés ont tendance à être basiques. En effet, la moyenne du pH eau calculée à 7,68 indique une alcalinité dans la plupart des échantillons. Les valeurs de pH en eau observées varient de 7,3 à 8,1, tandis que les valeurs de pH en KCl varient de 7,0 à 7,7. Il est important de noter que les variations dans les valeurs de pH en KCl sont relativement faibles, suggérant une certaine stabilité dans l'acidité potentielle des sols. La figure 17 présente une cartographie du pH eau du sol dans la zone d'étude.

Tableau 1. Normes d'interprétation du pH eau des sols selon les normes Baize (1988).

Classe	Interprétation
< 3.5	Hyper-acide
3.5 à 5	Très acide
5 à 6.5	Acide
6.5 à 7.5	Neutre
7.5 à 8.7	Basique
>9.0	Très basique

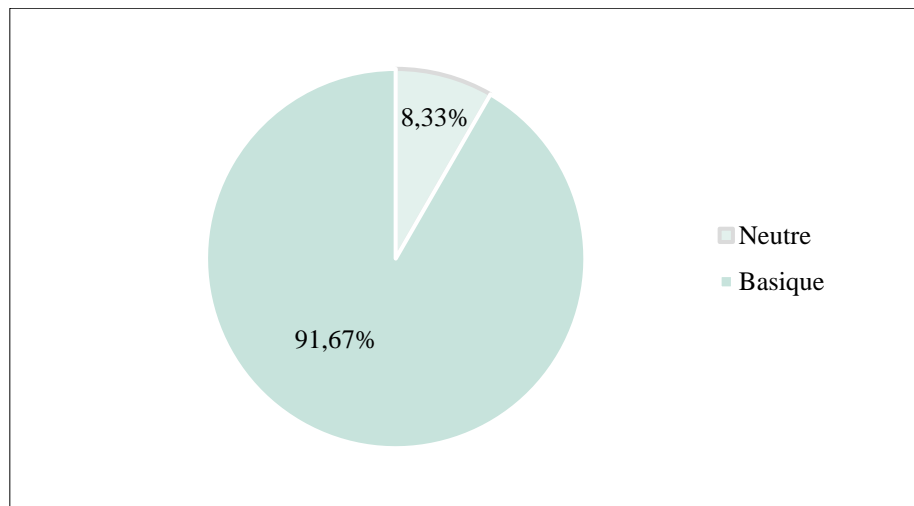


Figure 11. Répartition des échantillons de sol en fonction de leur pH eau exprimée en pourcentage.

Cartographie

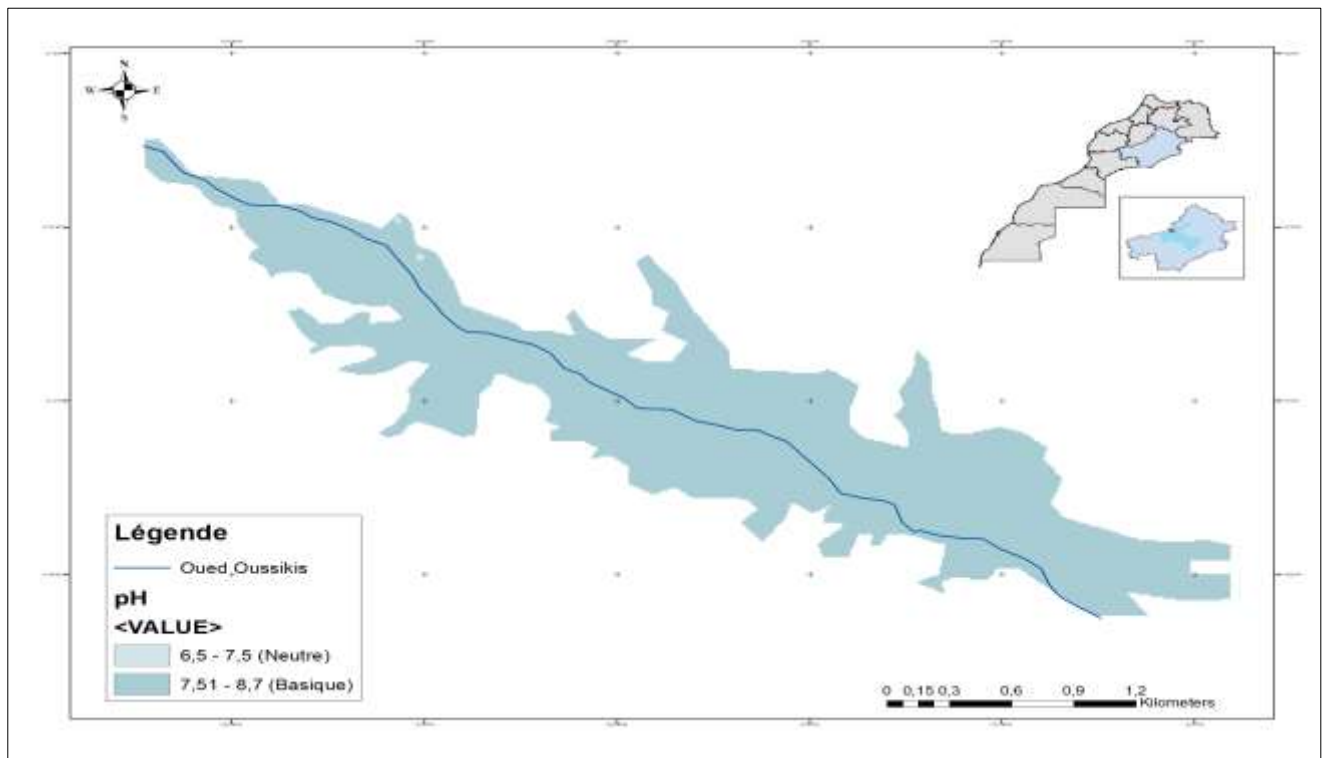


Figure 12. Carte du pH des sols d'Oussikis

1.3. Salinité des sols

L'analyse de la conductivité électrique (CE) des échantillons de sol a révélé une variabilité des valeurs, s'étendant de 0,048 mS/m à 0,442 mS/m. Cependant les valeurs obtenues restent toujours inférieures à 66 mS/m, suggérant ainsi une faible concentration en sels solubles dans les échantillons de sol étudiés. Selon les normes d'interprétation de la salinité présentées dans le tableau 2, ces sols sont considérés comme non salins. La figure 17 montrera une cartographie de la conductivité électrique du sol dans la zone d'étude.

Tableau 2. Classe de la qualité des sols par la méthode Extrait 1 :5 (Moughli, 2019)

Classe	CE en dS/m à 25°C	Qualité des sols
I	< 0.1	Non salé
II	0.1 - 0,3	Légèrement salé
III	0,31 - 0,65	Modérément salé
IV	0,66 - 1,4	Salé
V	1,41 - 2,9	Très salé
VI	> 2,9	Extrêmement salé

Cartographie

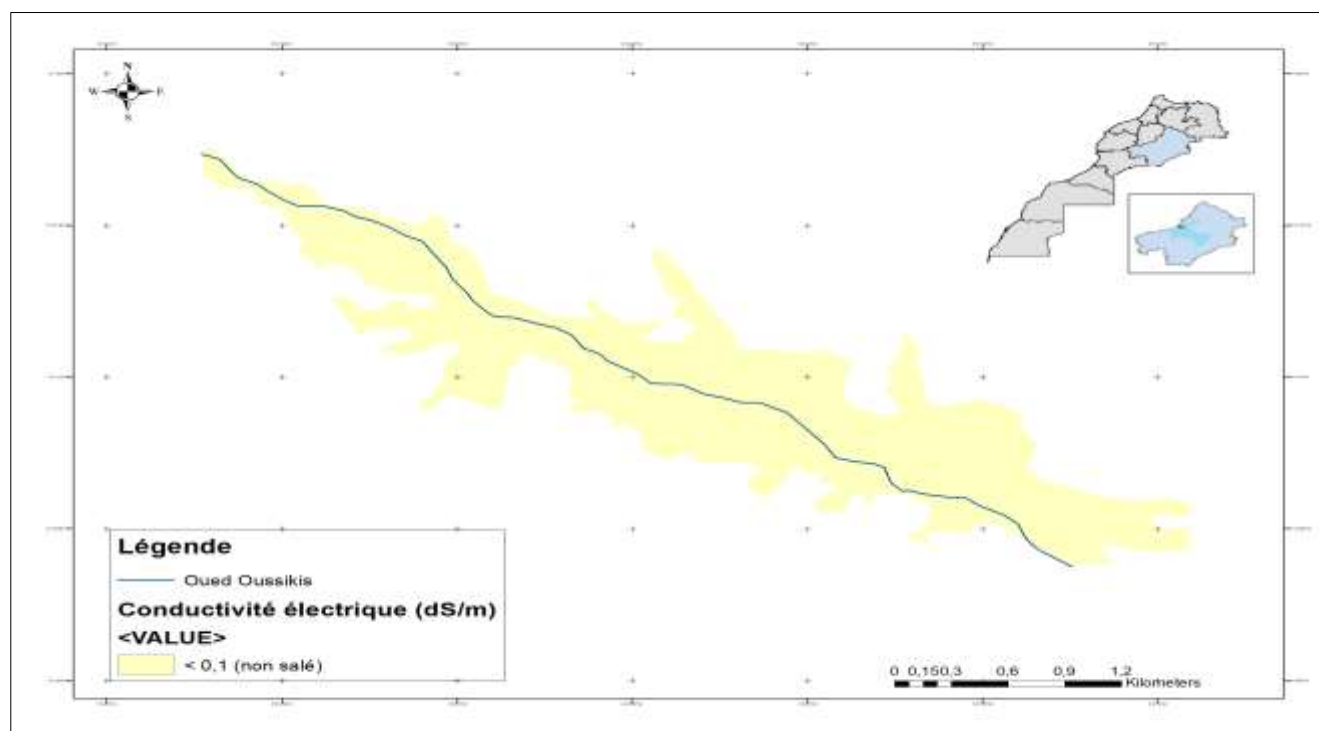


Figure 13. Carte de la conductivité électrique des sols d'Oussikis.

1.4. Matière organique

Conformément aux normes d'interprétation présentées dans le tableau 3, l'analyse des échantillons de sol met en lumière une déficience notable en matière organique au sein de la région étudiée, comme illustré de manière explicite dans la Figure 18. En moyenne, la teneur en matière organique s'établit à 1,49 %, avec des valeurs minimales atteignant 0,16 % et des valeurs maximales atteignant 4,04 %. La figure 19 présente une représentation cartographique approfondie de la répartition de la matière organique dans les sols de la zone d'étude.

Les faibles niveaux de matière organique observés dans la zone d'étude peuvent être expliqués en grande partie par les pratiques discutées dans le chapitre précédent.

1.4.1. L'application inadéquate du fumier (Quantité et gestion)

Tout d'abord, il est clair que l'insuffisance d'apport de fumier, qui constitue une source cruciale de matière organique, a joué un rôle dans cette situation. La matière organique contenue dans le fumier est essentielle pour maintenir et améliorer la fertilité du sol. Le manque de fumier a donc vraisemblablement contribué à la diminution des niveaux de matière organique dans les sols de la zone d'étude.

En outre, la gestion inadéquate de cette fumure organique, comme abordée précédemment, a exacerbé le problème. La mauvaise gestion a conduit à une perte de valeur nutritive et d'éléments essentiels contenus dans le fumier.

1.4.2. L'irrigation excessive

La pratique répandue et mal gérée de l'irrigation excessive aggrave encore davantage la dégradation de la matière organique du sol. L'excès d'irrigation provoque un lessivage accru, emportant avec lui les nutriments organiques essentiels, ce qui complique la préservation de la matière organique. Cette situation est d'autant plus problématique étant donné la nature prédominante des sols à texture sablo-limoneuse dans la région, qui joue un rôle crucial dans la diminution de la matière organique du sol. Ces sols, constitués principalement de sable et de limon avec une proportion moindre d'argile, se caractérisent par une perméabilité élevée qui favorise un drainage rapide. Cette caractéristique du sol est en partie responsable de la réduction observée de la rétention de matière organique et de nutriments.

1.4.3. Les conditions climatiques

De plus, les conditions climatiques locales ne sont pas à négliger. Les températures élevées pendant l'été accélèrent la décomposition de la matière organique, tandis que les gelées hivernales ralentissent ce processus. Les variations de température et les vents ont également été identifiés comme des facteurs perturbateurs de la formation et de la stabilité de l'humus.

Tableau 3. Normes d'interprétation de la matière organique selon Schaffer (1975).

Classe	Interprétation
< 1	Très pauvre
1 à 2	Pauvre
2 à 4	Moyen
> 4	Riche

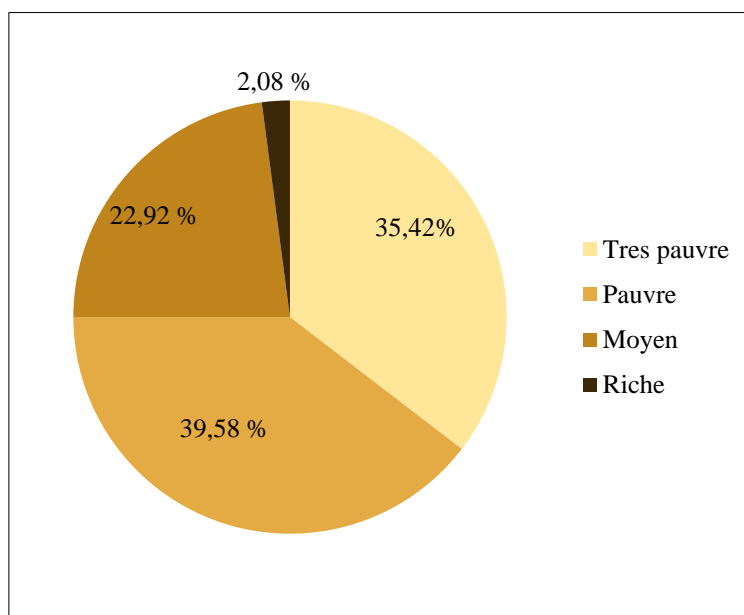


Figure 14. Répartition de la teneur en matière organique dans les sols d'Oussikis.

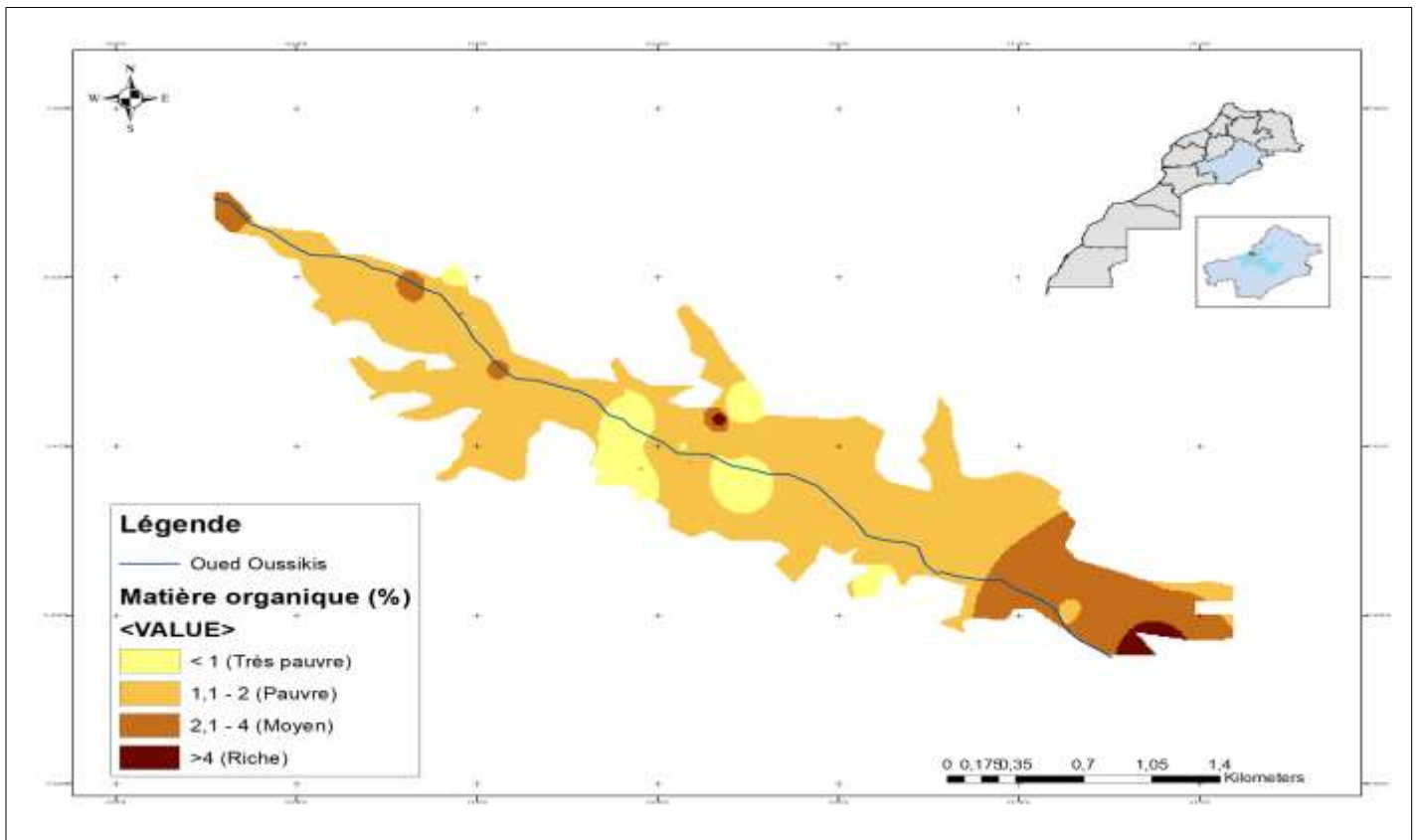


Figure 15. Carte de la teneur en matière organique des sols d'Oussikis.

1.5. Phosphore assimilable

Dans cette étude, il a été observé une concentration moyenne à élevée de phosphore assimilable dans les sols de la région étudiée, avec une grande variabilité spatiale. La moyenne de la teneur en P_2O_5 atteint 30,24 ppm, ce qui est considéré comme une valeur élevée selon les normes d'interprétation du phosphore (tableau 4). Les mesures effectuées ont révélé une gamme de concentrations allant de 6,7 ppm (valeur minimale) à 96,9 ppm (valeur maximale).

La figure 20 révèle qu'une proportion de plus de 47 % des échantillons présente une teneur en phosphore élevée à très élevée, dépassant les seuils considérés comme riches en ce nutriment. Ces résultats pourraient s'expliquer par des apports importants en engrais de fond et de fumier. Cependant, 39 % des échantillons montrent une teneur en phosphore pauvre à très pauvre. Cette situation peut entraîner une limitation de la croissance des cultures en raison de l'indisponibilité de phosphore, ce qui compromet la productivité agricole. De plus, environ 12,5 % des échantillons se situent dans une plage de teneur moyenne en phosphore. Cela suggère une

gestion plus équilibrée de ce nutriment, où les apports d'engrais et de fumier ont été mieux ajustés pour répondre aux besoins des cultures. Le test de corrélation « r » de Pearson entre la matière organique et le phosphore assimilable a révélé une signification statistique avec $r = 0,522$ (Annexe 4). Ceci confirme l'existence d'une relation entre la teneur en matière organique du sol et la disponibilité du phosphore assimilable. La figure 21 illustre cette variabilité spatiale en teneur en phosphore assimilable dans les sols de la zone d'étude.

Tableau 4. Répartition des classes de phosphore assimilable (Méthode Olsen) (Moughli, 2019)

Teneur du sol en phosphore assimilable (ppm)	Classe
< 8	Très pauvre
8,1 - 15	Pauvre
15,1 - 23	Moyen
23,1 - 30	Riche
> 30	Très riche

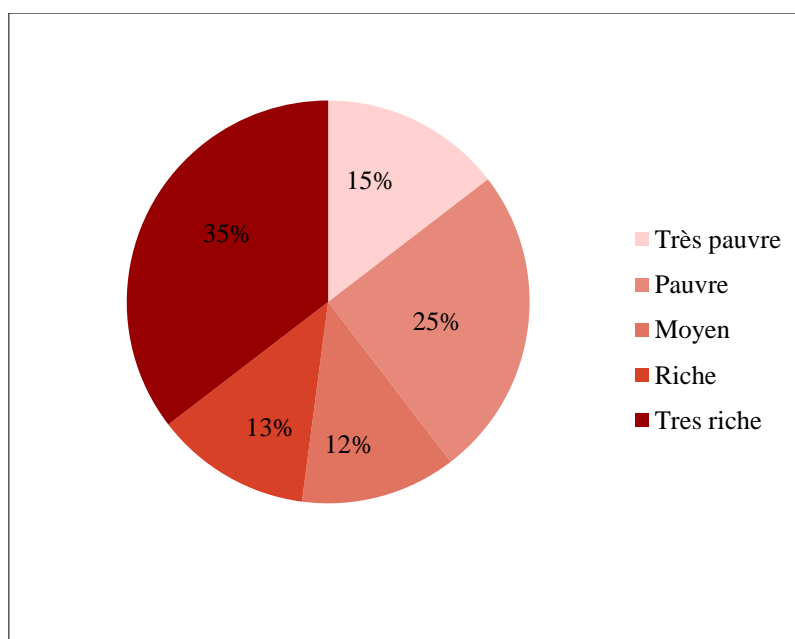


Figure 16. Pourcentage de répartition de la teneur en phosphore dans les sols.

Cartographie

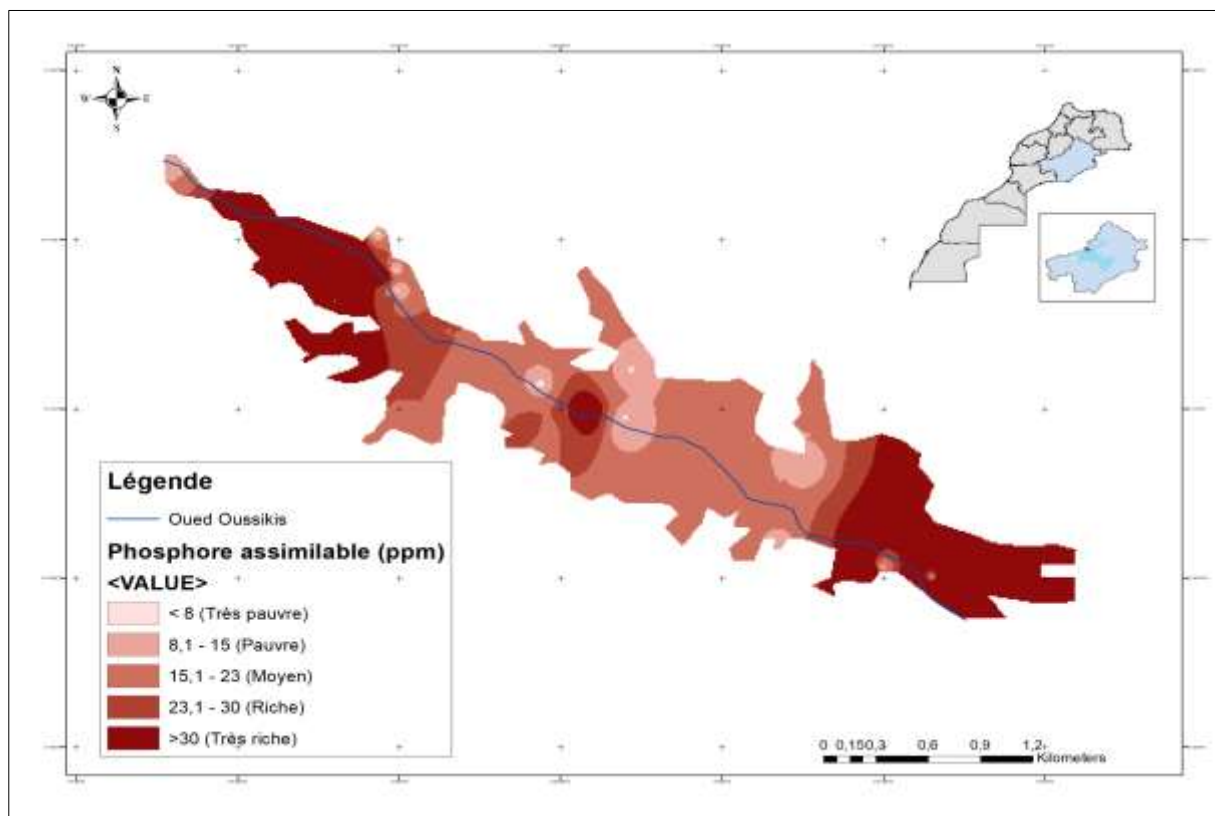


Figure 17. Carte de la teneur en phosphore assimilable dans les sols d'Oussikis

1.6. Potassium échangeable

Selon les normes d'interprétation présentées dans le tableau 5, les résultats révèlent une faible variabilité dans les concentrations de potassium observées dans la région étudiée. En effet, la majorité des échantillons, soit 83 %, affichent une teneur en potassium se situant dans la gamme de riches à très riches. Un pourcentage de 14,58 % présente une teneur moyenne en potassium, tandis que seulement 2,08 % des échantillons sont considérés comme ayant une teneur en potassium pauvre (figure 22). En ce qui concerne les valeurs globales, la moyenne de la teneur en potassium s'élève à 341,31 ppm, avec un minimum de 100 ppm et un maximum de 675 ppm. Une cartographie de la distribution du potassium échangeable dans les sols de la zone d'étude est présentée dans la figure 23.

La présence élevée de potassium (K) peut s'expliquer par la nature géologique des roches mères, qui sont riches en minéraux potassiques tels que les feldspaths, les micas et les amphiboles. La variabilité observée dans les concentrations de potassium peut également être attribuée à la

diversité des pratiques culturales, en particulier l'application de fertilisants potassiques, qui peut influencer le bilan en potassium du sol.

Tableau 5. Répartition des classes de potassium échangeable (Moughli, 2019)

Teneur du sol en potassium échangeable (ppm K)	Classe
<90	Très pauvre
91 - 130	Pauvre
131 - 170	Moyen
171 - 200	Riche
>200	Très riche

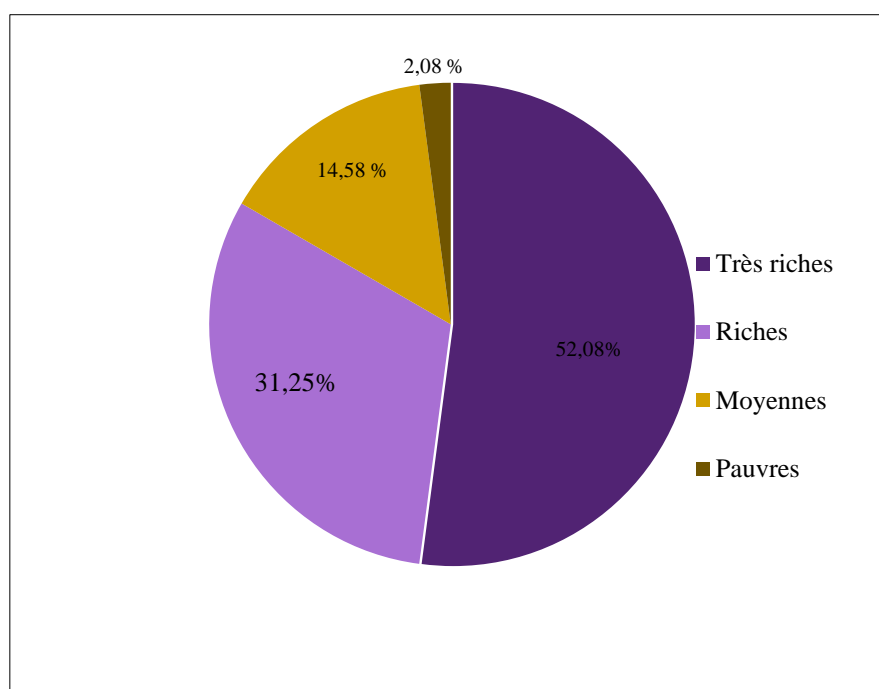


Figure 18. Pourcentage de répartition de la teneur en potassium dans les sols d'Oussikis

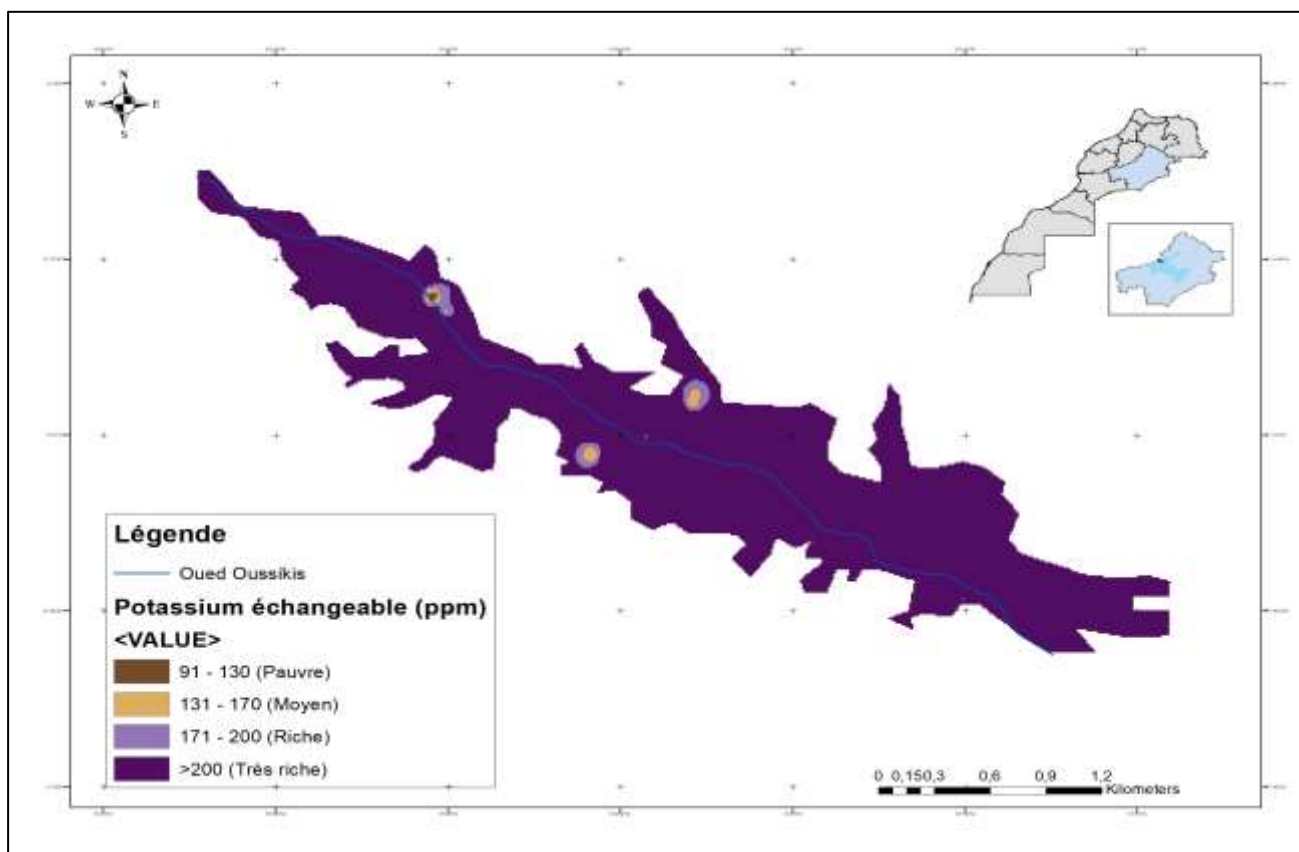


Figure 19. Carte de la teneur en potassium échangeable dans les sols d'Oussikis

1.7. Azote minéral

Conformément aux normes d'interprétations énoncées dans le tableau 6, il est observé que la majeure partie des sols de la zone d'étude présente une teneur en azote minéral moyenne pour soutenir la croissance des cultures. Cette adéquation est attribuable à l'application de fertilisants minéraux tels que le NPK et l'urée, ainsi qu'aux pratiques agricoles telles que la rotation des cultures et l'agroforesterie adoptées par les agriculteurs. La moyenne globale des échantillons analysés se situe à 23,70 ppm, avec une gamme allant de 9,24 ppm en valeur minimale à 39,20 ppm en valeur maximale. Plus spécifiquement, on constate que 77,08 % des échantillons présentent une teneur moyenne en azote total, se situant dans la plage de 10 ppm à 30 ppm. Environ 18,75 % des échantillons affichent une concentration en azote total considérée comme élevée. En revanche, 4,17 % des échantillons présentent une teneur en azote minéral total jugée insuffisante, inférieure à 10 ppm, suggérant un potentiel déficit nutritif dans ces zones particulières (figure 24).

Tableau 6. Répartition des classes de nitrate et de l'ammonium (Moughli, 2019)

Teneur du sol en Nitrate/ Ammonium (ppm)	Classe
<5	Très pauvre
5 - 10	Pauvre
10.1 - 30	Moyen
30.1 - 50	Riche
>50	Très riche

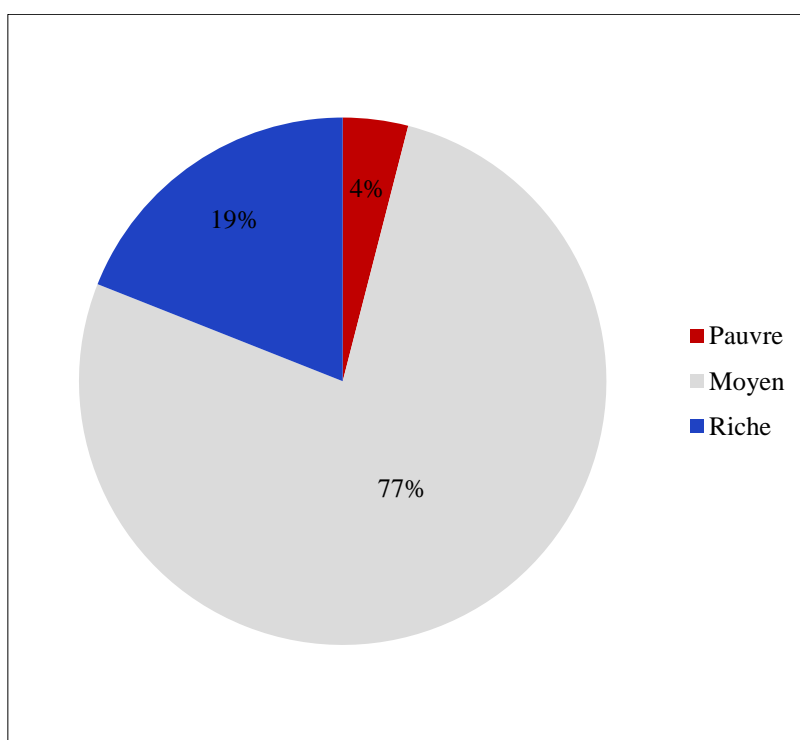


Figure 20. Pourcentage de répartition de la teneur en azote minéral dans sols d'Oussikis.

Cartographie

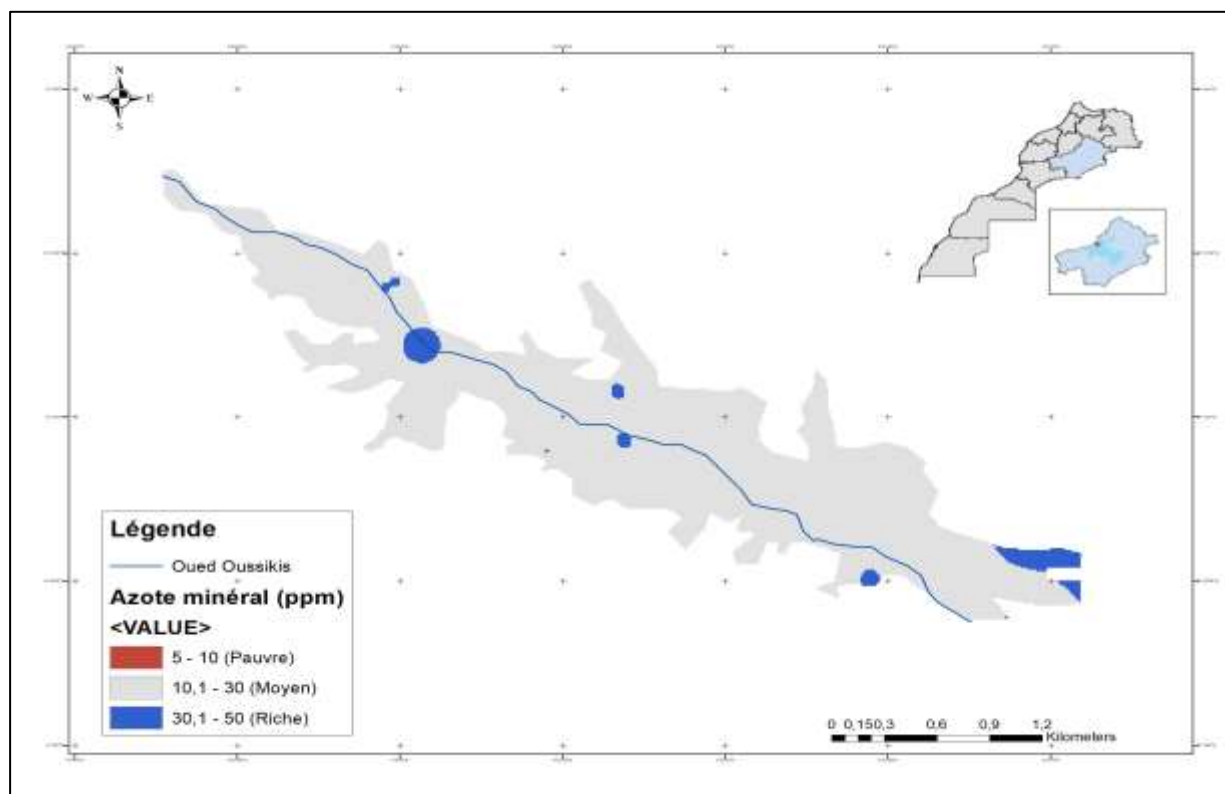


Figure 21. Carte de la teneur en azote minéral dans les sols d'Oussikis.

III. Influence des facteurs environnementaux sur la fertilité des sols

1. Effet du facteur gradient amont aval sur les paramètres étudiés

Il est notable que les parcelles en aval affichent des teneurs plus élevées de matière organique (MO) ainsi que d'azote, de phosphore et de potassium (NPK) par rapport à celles en amont et au milieu (tableau 7). Toutefois, il est essentiel de souligner qu'au niveau statistique, le gradient amont aval n'a pas montré d'influence significative sur les paramètres que nous avons examinés. En d'autres termes, bien que des tendances vers une augmentation des teneurs puissent être observées, elles ne sont pas corroborées par des résultats statistiquement significatifs.

2. Effet du facteur distance par rapport à l'oued sur les paramètres étudiés

Il est remarquable que les parcelles situées à proximité de l'oued affichent des concentrations plus élevées en matière organique (MO), azote (N), phosphore (P) et potassium (K) par rapport à celles qui sont éloignées (tableau 7). Cependant, il est essentiel de souligner que, sur le plan

statistique, seule la variable de matière organique a révélé un effet significatif en relation avec la distance par rapport à l'oued (p-value=0,014). Une explication plausible de cette observation réside dans les apports de sédiments charriés par les eaux de ruissellement depuis l'oued. En effet, les cours d'eau, tels que l'oued dans notre étude, transportent une variété de matériaux, y compris des alluvions riches en matière organique, provenant des régions en amont. Les parcelles proches de l'oued peuvent ainsi bénéficier d'une humidité plus élevée en raison de leur proximité avec la source d'eau. Cette humidité accrue peut favoriser la décomposition de la matière organique et son incorporation dans le sol, ce qui conduit à des niveaux plus élevés de matière organique. Ces résultats renforcent l'idée que les facteurs hydrologiques et géographiques, tels que la proximité de l'oued, jouent un rôle crucial dans la distribution spatiale de la matière organique dans la zone d'étude.

Tableau 7. Comparaison des paramètres du sol en fonction du facteur gradient amont-aval et la distance par rapport à l'oued

		pH	MO (%)	N (ppm)	P (ppm)	K (ppm)
Gradient amont aval	Amont	7,58 ±0,24	1,51 ± 0,61	22,72 ±6,30	33,32 ±32,01	317,1 ±138,0
	Milieu	7,7 ±0,17	1,21 ±1,04	22,90 ±7,03	23,16 ±16,34	331,9 ±180,7
	Aval	7,71 ±0,18	1,75 ± 1,12	25,48 ±8,28	34,25 ±29,34	374,8 ±194,0
Distance par rapport à l'oued	Proche de l'oued	7,64 ±0,21	1,82 ± 0,89 *	25,32 ± 6,32	35,52 ±27,86	365,8 ±173,4
	Proche de la montagne	7,73 ±0,17	1,16 ± 0,90 *	22,08 ± 7,79	24,96 ±24,26	316,7 ±164,0

*, **, Significatif à 5 % et 1 % respectivement

2. Impact de l'association agricole sur la fertilité des sols

L'analyse des données révèle des différences significatives entre les deux types d'associations agricoles, Arboriculture Céréaliculture et Arboriculture Légumineuse, en ce qui concerne la teneur en matière organique (MO), le phosphore (P), et le potassium (K) du sol. Ces différences sont mises en évidence par des valeurs moyennes distinctes et sont confirmées par l'analyse statistique (tableau 8).

En ce qui concerne la matière organique (MO), les parcelles en association avec la céréaliculture affichent une moyenne plus élevée comparée à celle en association légumineuse. Cette observation est corroborée par l'analyse de variance (ANOVA) qui montre une différence statistiquement hautement significative, avec un p-value remarquablement bas de 0,002. Ces

résultats indiquent que les parcelles en association de céréaliculture ont une teneur en matière organique significativement supérieure à celles en association légumineuse.

De manière similaire, pour le phosphore (P) et le potassium (K), les parcelles en association de céréaliculture présentent une moyenne plus élevée comparée à celle en association légumineuse. L'ANOVA confirme cette différence avec un p-value très bas de 0,001, 0,004 respectivement démontrant ainsi que les niveaux de phosphore et du potassium du sol sont considérablement plus élevés dans les parcelles en association céréaliculture.

Cependant, il est important de noter qu'aucune différence significative n'a été observée en ce qui concerne la teneur en azote (N) du sol, ni le pH entre les deux types d'associations agricoles. Les niveaux d'azote étaient similaires dans les deux types d'occupation du sol. De plus, le pH moyen du sol était proche dans les deux cas. L'ANOVA confirme l'absence de différences significatives pour ces deux variables, avec des p-values de 0,819 pour l'azote et de 0,053 pour le pH.

Ces distinctions peuvent être attribuées aux pratiques de gestion agricole spécifiques à chaque type d'association. Les agriculteurs tendent à accorder davantage d'attention aux céréales qu'aux légumineuses en matière de fertilisation, utilisant des engrais plus riches en phosphore et en potassium, ce qui contribue à ces niveaux accrus dans les parcelles associées à la céréaliculture. De plus, les céréales produisent plus de biomasse et de résidus de culture que les légumineuses, augmentant ainsi l'apport de matière organique au sol. Toutefois, il est important de noter que les niveaux d'azote sont similaires entre les deux types d'associations, grâce à la capacité des légumineuses à fixer l'azote atmosphérique. Le pH du sol, quant à lui, semble ne pas être significativement influencé par le choix de l'association agricole dans le cadre de cette étude

Les résultats de l'étude montrent que le choix de l'association agricole et les pratiques de gestion agricole peuvent avoir un impact considérable sur la composition du sol en termes de matière organique et de nutriments, ce qui a des implications importantes pour la fertilité du sol et la productivité agricole.

Tableau 8. Comparaison des paramètres du sol en fonction des types de culture.

		pH	MO (%)	N (ppm)	P (ppm)	K (ppm)
Type de culture	Arboriculture	7,66 ±0,17	1,16 ± 0,90 **	23,46± 7,17	41,49 ±29,52**	405,5 ±168,8 **
	Céréaliculture					
	Arboriculture	7,68 ±0,23	1,07 ± 0,83 **	23,94 ± 7,39	19,00 ±17,93 **	277,1 ±149,7**
	Légumineuse					

*, **, Significatif à 5 % et 1 % respectivement

Conclusion

Les pratiques agricoles telles que l'agroforesterie, la rotation des cultures, le travail du sol et l'application de la fumure sont largement répandues parmi les agriculteurs de la région. Cependant, les résultats de l'étude ont mis en évidence des carences en matière organique, une teneur moyenne en azote minéral et des déficits en phosphore. Ces constatations soulignent l'importance de discuter et d'examiner de plus près l'efficacité et l'application de ces pratiques dans le contexte local.

DISCUSSION

Introduction

Cette quatrième partie de notre étude, se consacre à une discussion approfondie des pratiques agricoles adoptées par les agriculteurs de la région, mettant en évidence à la fois les avantages qu'elles offrent, les défis qu'elles rencontrent, et les lacunes qui subsistent dans leur mise en œuvre, tout en mettant le lien avec les résultats des analyses de sol. Tout au long de cette discussion, nous nous appuyerons sur des études similaires pour enrichir notre compréhension et mettre en perspective les pratiques observées par rapport aux meilleures pratiques et aux enseignements tirés de la recherche antérieure.

I. Impact des pratiques agricoles sur la fertilité des sols d'Oussikis

À la suite de notre étude, dont l'objectif était d'évaluer les paramètres physicochimiques des sols en vue d'une gestion durable des exploitations agricoles, il est évident que la fertilité des sols dans la région est globalement limitée. L'analyse des paramètres physicochimiques a révélé une grande disparité dans les niveaux de fertilité, avec une préoccupation particulière concernant la matière organique, qui affiche des teneurs pauvres, tandis que les teneurs en azote (N), phosphore (P) et potassium (K), sont relativement positives.

1. Granulométrie et matière organique

La matière organique participe à l'amélioration de la fertilité des sols. Elle est un bon indicateur pour la bonne santé des plantes (Pallo, 2009). Or, les résultats révèlent que 75 % des sols sont pauvres à très pauvres en matière organique, une situation qui corrobore les conclusions d'autres chercheurs tels que Mrabet et al. (2004), qui ont établi que jusqu'à 80 % des sols marocains affichent une teneur faible en matière organique inférieure à 1 %. Cela pourrait s'expliquer par les pratiques agricoles. Outre la surexploitation des sols et l'insuffisance d'amendements organiques, l'irrigation excessive, souvent motivée par la disponibilité apparente de l'eau, joue également un rôle significatif dans la diminution de la matière organique des sols. Une étude menée par Naman F et al. (2001) a révélé que la durée de mise en eau exerce un effet très hautement significatif sur les teneurs en matières organiques des sols, entraînant une perte moyenne de 48,47 %. De plus, des résultats similaires ont été rapportés dans plusieurs oasis marocaines, notamment à Aoufouss, Mezguita, et Tinghir-Toudgha, où plus de 86 % des sols présentent une teneur faible en matière organique selon l'étude de (Zouahri, 2023).

Cette situation préoccupante est étroitement liée à la prédominance de sable et de limon dans la zone d'étude, avec des taux d'argile nettement inférieurs. Comme le souligne l'étude de Yemefack et al. (2004), l'argile et la matière organique sont essentiels pour le complexe argilo-humique, qui joue un rôle crucial dans la rétention d'eau, la rétention des éléments nutritifs et la structure des sols. Par conséquent, leur déficience contribue largement à la dégradation de la fertilité de ces sols.

2. Éléments essentiels NPK

En ce qui concerne les éléments essentiels NPK, nos résultats révèlent une tendance relativement positive en majorité. La teneur en azote minéral et en potassium dans les sols est généralement favorable. En effet, plus de 75 % des sols affichent des teneurs moyennes en azote minéral, suggérant une disponibilité relativement adéquate de cet élément essentiel pour la croissance des cultures. De plus, environ 83 % des sols démontrent une richesse en potassium, indiquant qu'ils répondent aux besoins en potassium des cultures sans présenter de déficience. Il est également pertinent de noter que les résultats de (Zouahri, 2023) ont montré des teneurs élevées en potassium dans plus de 90 % des sols des oasis de Tinghir-Toudgha, ce qui est similaire à nos observations. Cette constatation suggère que la richesse en potassium est une caractéristique générale de la région, ce qui est un élément positif pour la fertilité des sols dans cette zone.

En ce qui concerne le phosphore, la situation est plus complexe. Les résultats révèlent une variabilité significative, avec 60 % des sols montrant des niveaux moyens à élevés en phosphore. Cependant, il est préoccupant de noter que 40 % des sols souffrent d'une pauvreté en cet élément crucial pour le développement des racines et la croissance initiale des plantes. Ce constat pour ces sols pauvres serait lié aux faibles taux de matière organique observés dans les sols. Plusieurs chercheurs ont souligné l'importance de la matière organique dans la disponibilité du phosphore assimilable (Amonmide et al. 2019). En effet, les apports de matières organiques sont essentiels pour la synthèse des enzymes phosphatases, ce qui permet de mobiliser le phosphore organique provenant notamment des apports de matières organiques (Amonmide et al. 2019). Enrichir le sol en matière organique s'avère donc indispensable pour augmenter la contribution du phosphore organique à la dynamique du phosphore dans les sols (Parent et Khiari, 2003). L'humus, présent dans la matière organique, offre des sites de faible énergie de liaison pour le phosphore, facilitant ainsi sa mise à disposition pour les plantes. Il est clair que la matière organique du sol joue un rôle crucial dans la disponibilité du phosphore

pour les plantes cultivées. Il est pertinent de noter que le test de corrélation que nous avons effectué entre la matière organique et le phosphore a révélé une signification statistique, renforçant ainsi l'idée que la matière organique contribue de manière significative à la disponibilité du phosphore dans les sols. Il convient également d'ajouter que ce faible taux pourrait également être lié à la quantité limitée d'engrais utilisée dans la zone d'étude.

3. pH et conductivité électrique

Les résultats de l'analyse des sols dans la région d'étude révèlent deux éléments importants. Premièrement, les concentrations en sels solubles sont relativement faibles, suggérant que les oasis de montagne de Msemrir ne sont pas touchées par le problème de la salinisation des sols, une préoccupation courante dans les zones irriguées des régions arides ou semi-arides, comme c'est le cas dans certaines oasis au Maroc, notamment celles de Bouanane et d'Akka dont 80 % des sols de ces oasis souffrent de salinité élevée (Zouahri, 2023). Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces variations de salinité entre les oasis, notamment la composition des sources d'eau utilisées pour l'irrigation et les conditions climatiques. D'autre part, les résultats mettent également en évidence une prédominance de sols à pH basique dans la région d'étude, en accord avec des conclusions similaires dans les oasis de Tinghir-Toudgha, situées dans la même province. Cette tendance basique du sol est principalement influencée par la nature calcaire de la roche mère qui prédomine dans la région (Rezaei & Gilkes, 2005),

II. Stratégies de gestion de la fertilité des sols d'Oussikis : pratiques actuelles, défis majeurs et perspectives durables

1. Avantages et défis de l'agroforesterie

L'adoption massive de l'agroforesterie par les agriculteurs de la zone d'étude représente une avancée significative vers des pratiques agricoles plus durables et diversifiées. Cette transition vers l'agroforesterie a été en partie stimulée par l'introduction initiale du pommier dans la région au début des années 1980, dans le cadre du programme d'intensification de la culture du pommier par l'ORMVAO, en réponse aux besoins de lutte contre la pauvreté, de fixation des populations rurales et de prévention de l'érosion des sols. Plusieurs facteurs motivent cette transition vers l'agroforesterie. Tout d'abord, les agriculteurs reconnaissent l'attractivité de ce système en raison de la diversité des cultures et de la répartition des revenus sur l'année. Contrairement à la monoculture, où les agriculteurs sont souvent tributaires d'une seule récolte annuelle, l'agroforesterie permet une multitude de cultures interagissant les unes avec les autres.

Cette diversification contribue à réduire les charges opérationnelles et à stabiliser les revenus, offrant ainsi une certaine sécurité économique aux agriculteurs.

De plus l'agroforesterie offre des avantages à court et à long terme pour la fertilité des sols. À court terme, l'installation de légumineuses telles que la luzerne fixatrice d'azote et l'incorporation de matière organique résiduelle provenant d'autres cultures, ainsi que l'enracinement profond de certaines plantes, améliorent la structure du sol et augmentent sa fertilité. À long terme, la couverture permanente du sol dans le cadre de l'agroforesterie contribue à lutter contre l'érosion, à maintenir la fertilité du sol et à en préserver la santé (Masure et al., 2022).

Cependant, il est crucial de noter que l'impulsion vers une intensification accrue de l'agriculture au moyen de l'agroforesterie ne doit pas être motivée uniquement par des considérations économiques. Une approche basée sur des données scientifiques solides est essentielle pour garantir le succès à long terme de l'agroforesterie. Des pratiques de gestion inadéquates, telles qu'un agencement inapproprié des arbres, peuvent entraîner une compétition néfaste pour les ressources essentielles, notamment la lumière, l'eau et les nutriments. Par exemple, selon l'étude de (Kanyama-Phiri et al., 1998) la compétition excessive due à un mauvais placement des arbres peut nuire à la croissance du blé en limitant sa capacité à recevoir suffisamment de lumière, d'eau et de nutriments. Ces erreurs de gestion peuvent avoir un impact sur la santé et la productivité des cultures ainsi que sur la fertilité globale du sol. À l'instar de la situation observée dans notre zone d'étude, les petits agriculteurs des montagnes de Bamboutos rencontrent des difficultés dans la maîtrise des techniques agroforestières et ne respectent pas toujours les distances de plantation. Dans certains cas, les arbres ne sont pas taillés, ce qui entraîne une ombre excessive et nuit aux rendements des cultures en réduisant la lumière solaire disponible (Jetro Nkengafac et al., 2021).

De plus, l'insuffisance d'expérience dans la gestion de cette compétition, comme évoquée dans les travaux de (El Yadari et al. 2019) au Maroc, souligne la nécessité d'une recherche et d'une formation continues pour aider les agriculteurs à prendre des décisions éclairées concernant le choix des espèces associées, l'orientation des haies et la taille des branches et des racines. Une approche basée sur les meilleures pratiques de gestion est essentielle pour maximiser les avantages de l'agroforesterie tout en minimisant les inconvénients potentiels.

En conclusion, l'adoption généralisée de l'agroforesterie par les agriculteurs présente de nombreux avantages en termes de durabilité, de diversification des revenus et d'amélioration de la fertilité des sols. Cependant, une gestion adéquate et une base scientifique solide sont essentielles pour garantir le succès à long terme de cette pratique.

2. Effet de la rotation des cultures sur la fertilité des sols

L'adoption de la rotation des cultures est une mesure sûre et efficace qui peut améliorer la productivité du sol, réduire les agents pathogènes, contrôler les maladies des plantes transmises par le sol et augmenter les rendements par rapport à la culture continue (Larkin et Halloran, 2014 ; Ashworth et al., 2020). Cependant, il est essentiel de noter que l'efficacité et la valeur d'une rotation de cultures sont soumises à une variété de facteurs. Parmi ces facteurs figurent les types de cultures impliquées dans la rotation (Tiemann et al., 2015), la séquence spécifique et la fréquence des cultures au sein de la rotation (Bainard et al., 2017), la longueur de la période de rotation (Bennett et al., 2012), l'historique agricole du terrain et les caractéristiques du sol (Li et al., 2019).

Dans la région étudiée, on observe des pratiques agricoles bénéfiques qui intègrent la luzerne dans leurs rotations sur une période de 3 à 4 ans, suivie par la culture de blé ou d'orge. Cette approche peut jouer un rôle essentiel dans l'amélioration de la fertilité du sol. Cette rotation favorise également une meilleure structure du sol, grâce aux racines profondes de la luzerne, ce qui contribue à l'aération, à la rétention d'eau et à la réduction de l'érosion du sol. Cette stratégie a le potentiel d'augmenter non seulement la productivité globale, mais également la teneur en protéines du blé, la culture qui suit la luzerne. Cette amélioration découle principalement de l'augmentation de la disponibilité en azote dans le sol, résultant de la fixation biologique qui se produit après la culture des légumineuses (Gan et al., 2003).

Or, pour les agriculteurs qui optent pour une rotation qui consiste exclusivement en la culture alternée de blé et d'orge, cette approche, bien que courante, présente des défis spécifiques en ce qui concerne la gestion de la fertilité du sol et la durabilité à long terme de l'agriculture. Le blé et l'orge étant toutes deux des cultures exigeantes en azote, elles ont tendance à puiser activement cet élément nutritif du sol et entraîner une diminution de la fertilité du sol au fil du temps.

3. Risques associés au travail du sol

Le labour est une pratique agricole très répandue dans la zone d'étude, enracinée depuis de nombreuses années dans les habitudes des agriculteurs locaux. Ils le considèrent souvent comme une étape cruciale dans la préparation du terrain pour leurs cultures. Cependant, une récente série d'études, dont celle menée par (Bouthier et al., 2014) met en lumière les risques associés à cette méthode traditionnelle. En effet, l'idée d'une agriculture de conservation, qui prône la préservation des sols, s'oppose au travail excessif du sol, car celui-ci a été associé à la destruction de la structure des sols.

Par ailleurs, les recherches de (Ferreira et al., 2013) soulignent que les effets nuisibles sur la fertilité des sols sont amplifiés lorsque des méthodes de labour conventionnelles sont employées. Le labour intensif expose également le sol à l'air et au soleil, ce qui peut accélérer l'évaporation de l'humidité, une problématique préoccupante dans les régions sujettes à la sécheresse. De plus, cette pratique peut entraîner une diminution de la teneur en matière organique du sol, un élément essentiel pour la fertilité du terrain.

4. Tendance à la désuétude de la jachère naturelle

Les résultats de la zone d'étude s'alignent clairement sur les conclusions tirées de plusieurs études antérieures, notamment celles menées par Rabiou et al. (2017), qui ont mis en évidence la tendance inquiétante de la réduction progressive de la pratique de la jachère naturelle. Les agriculteurs sont confrontés à la nécessité de produire davantage pour répondre aux besoins alimentaires croissants de la population. Ils sont de plus en plus enclins à cultiver de manière continue pour garantir un approvisionnement régulier en denrées alimentaires pour leur famille. Dans ce contexte, l'intensification de l'agriculture est devenue monnaie courante, avec une utilisation maximale des terres disponibles pour augmenter les rendements et les revenus. Toutefois, les conséquences à long terme de cette tendance pourraient être préoccupantes. C'est là que l'importance de la jachère devient plus évidente que jamais. Comme le soulignent Koulibaly et al. (2009), la jachère joue un rôle vital en tant que source naturelle de renouvellement de la fertilité des sols. Elle permet non seulement l'accumulation de matières organiques, d'azote total et de phosphore, des éléments essentiels pour préserver la santé des sols, mais elle offre également une pause bien nécessaire dans le cycle de production intensive (Bacyé et al., 2019).

5. Logiques locales des modes de fertilisation

5.1. Défis et contraintes de l'utilisation des engrais chimiques

La préservation de la fertilité des sols et de leur capacité de production a toujours été au cœur des préoccupations des exploitations agricoles. Parmi les diverses approches utilisées, l'épandage de la fumure organique et/ou minérale se distingue comme la principale méthode traditionnelle de gestion de la fertilité des sols dans la région étudiée. Les agriculteurs ont effectivement recours aux engrais chimiques pour amender leurs sols, cependant, les quantités utilisées demeurent en deçà des recommandations. Cette situation résulte des défis liés à l'accessibilité, attribuables à la disponibilité limitée et aux coûts élevés associés à ces engrais.

Ces enjeux liés à l'accès aux engrais dans la zone d'étude reflètent une réalité observée dans d'autres régions de l'Afrique subsaharienne. Malgré la reconnaissance de l'importance des engrais par les agriculteurs, leur utilisation demeure restreinte en raison de divers facteurs, comprenant notamment les coûts élevés, les contraintes financières et les rendements variables (Chianu et Mairura, 2012).

De manière parallèle à notre zone d'étude, les agriculteurs de l'oasis de Nefzaoua, située dans le sud de la Tunisie, ont également recours aux engrais chimiques pour amender leurs sols (Benaoun et al., 2014).

5.2. Importance de la Fumure organique et Défis de Gestion

Les engrais chimiques ne représentent pas la seule solution pour enrichir les sols en éléments nutritifs. Conformément aux conclusions de (Koulibaly et al. 2016), l'apport régulier de fumure organique demeure une approche viable pour améliorer les propriétés chimiques des sols qui sont cultivés de manière continue sur de longues périodes. L'utilisation de fumure organique contribue à atténuer le processus d'acidification tout en fournissant des nutriments aux sols, favorisant ainsi une augmentation du taux de saturation en éléments essentiels.

Les agriculteurs accordent une préférence marquée à l'utilisation de la fumure organique en raison de ses effets plus significatifs sur l'amélioration des sols. Cette observation trouve également écho dans l'étude conduite par (Ouedraogo et al.2022), où les agriculteurs expriment leur penchant pour la fumure organique en raison de sa résilience et de son impact durable sur la fertilité du sol.

L'application de cette stratégie est prédominante chez la plupart des exploitants agricoles de la zone d'étude, de même qu'elle est largement adoptée par bon nombre d'agriculteurs dans la région du Haut Atlas, en particulier à Imilchil, comme l'a observée (Samid & Alem, 2023). Cependant, il est crucial de noter que la quantité de fumures organiques répandue par les agriculteurs, en moyenne 6470 kg/ha, demeure nettement inférieure aux quantités nécessaires pour préserver la fertilité du sol. Selon une étude de (Janati A., 1990), l'agriculture oasienne requiert en réalité des quantités substantielles de fumures organiques, estimées à environ 30 à 40 tonnes par hectare par an, afin de maintenir un niveau de fertilité adéquat.

Un autre aspect à prendre en considération concerne la gestion de la fumure. La méthode de stockage actuellement utilisée pour la fumure entraîne une fermentation insuffisante des matières fécales présentes, résultant en des pertes significatives d'humidité, pouvant atteindre jusqu'à 70 %. De plus, des éléments nutritifs essentiels tels que l'azote, le carbone et la potasse sont perdus de manière conséquente, en accord avec les observations de (El Yadari et al., 2019). Outre ces pertes nutritives, une gestion inadéquate de la fumure favorise également la propagation de maladies, l'introduction de graines d'adventices et la dissémination de micro-organismes nuisibles dans le sol. Cette situation compromet la santé des cultures et peut entraîner des pertes de rendement significatives.

Une étude menée par (Casu, 2018) au Kenya, portant sur des exploitations agricoles adoptant de mauvaises pratiques de gestion de la fumure, a révélé des pertes de matière sèche atteignant jusqu'à 62,9 %, ainsi que des pertes substantielles de carbone (87,2 %), d'azote (84,5 %) et de phosphore (17,2 %). Cette recherche souligne l'importance critique d'une gestion adéquate de la fumure pour préserver la qualité des sols et assurer des rendements agricoles durables.

Face à la quantité insuffisante de fumier utilisée et à sa qualité médiocre, les résultats des analyses révèlent une situation préoccupante quant à la fertilité des sols. En effet, une constatation majeure est que 75 % des sols présentent des niveaux de matière organique considérés comme pauvres à très pauvres, mettant en évidence la relation directe entre la quantité et la qualité de la fumure organique apportée et la qualité des sols.

Conclusion

Ce chapitre nous a révélé une réalité complexe dans la gestion de la fertilité des sols par les agriculteurs de la zone étudiée. Bien que certaines bonnes pratiques aient été adoptées, comme l'agroforesterie, la rotation des cultures et l'apport des fumures, il est évident que ces approches

ne sont pas toujours mises en œuvre de manière optimale. Cela se reflète dans les résultats des analyses de sol, qui montrent des niveaux de fertilité limités. Ces constatations serviront de base solide pour formuler des recommandations pratiques en vue d'une gestion plus efficace et durable des sols dans cette région.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSION

La présente étude a examiné en détail divers aspects des pratiques agricoles, de la gestion des sols et de la fertilité des sols dans la zone d'étude. Les conclusions tirées de cette analyse révèlent des dynamiques complexes et des défis importants auxquels les agriculteurs de la région sont confrontés, tout en mettant en lumière certaines pratiques bénéfiques.

Premièrement, l'adoption de l'agroforesterie dans cette région représente une avancée majeure vers des pratiques agricoles plus durables et diversifiées. Cette transition offre divers avantages tels que la diversification des cultures, la stabilisation des revenus agricoles et l'amélioration de la fertilité du sol. Cependant, il est impératif de souligner que la gestion adéquate de l'agroforesterie est cruciale pour éviter la compétition entre les cultures et les arbres, ainsi que pour maximiser les avantages.

En ce qui concerne la rotation des cultures, il est évident que cette pratique joue un rôle crucial dans l'amélioration de la fertilité des sols. Les rotations de cultures à long terme, telles que celles impliquant la luzerne suivie du blé ou de l'orge, se sont avérées particulièrement bénéfiques en augmentant la disponibilité en azote dans le sol et en améliorant la productivité globale. Cependant, les rotations de cultures courtes, qui alternent uniquement le blé et l'orge, peuvent présenter des vulnérabilités aux maladies spécifiques à l'hôte, soulignant ainsi l'importance du choix judicieux des rotations en fonction des conditions locales.

En ce qui concerne le travail du sol, l'utilisation excessive du labour traditionnel peut entraîner des conséquences négatives sur la structure et la fertilité des sols. Les pratiques agricoles de conservation, qui limitent le travail du sol, sont de plus en plus recommandées pour préserver la santé des sols.

La tendance à l'abandon de la jachère naturelle est préoccupante, car elle compromet la régénération de la fertilité des sols. Les agriculteurs sont incités à cultiver de manière continue pour répondre à la demande croissante en denrées alimentaires, mais cela peut avoir des répercussions négatives à long terme.

En ce qui concerne l'utilisation de la fumure, le défi réside dans la capacité des agriculteurs à apporter suffisamment de fumures, qu'il s'agisse d'engrais chimiques ou de fumure organique, conformément aux recommandations. Cependant, l'utilisation prédominante de la fumure organique est bénéfique pour la fertilité des sols. Il est essentiel de promouvoir une gestion appropriée de la fumure afin de maximiser ses avantages tout en minimisant les pertes.

Lorsqu'on évalue la fertilité des sols, il est évident que la matière organique joue un rôle crucial dans la qualité des sols. Les sols de la zone étudiée présentent souvent une faible teneur en matière organique, ce qui peut compromettre leur fertilité. Cependant, la disponibilité en azote, phosphore et potassium est généralement favorable, bien que des déficits en phosphore aient été observés dans 40 % des sols analysés.

De plus, cette étude met en évidence l'importance de l'état de surface du sol en tant que facteur essentiel influençant la fertilité des sols dans la région étudiée. Cependant, il est notable que le facteur de position des parcelles, qu'il s'agisse du gradient amont aval ou de la distance par rapport à l'oued, n'a pas affecté de manière uniforme tous les aspects de la fertilité des sols. Il a plutôt joué un rôle plus significatif dans l'accumulation de matière organique, soulignant ainsi son impact particulier sur cet aspect de la fertilité du sol.

RECOMMANDATIONS

Il est bien établi qu'en plus des faiblesses naturelles des sols de montagne, certaines pratiques agricoles participent à la dégradation de cette ressource précieuse. Face à ces défis, la nécessité de trouver un équilibre entre l'augmentation de la productivité et la durabilité des systèmes de production agricole, le tout dans un contexte de ressources financières limitées, devient impérative. Dans ce contexte, l'agroécologie émerge comme une voie prometteuse pour relever ces défis de manière durable.

En guise de recommandations et sur la base des résultats qui découlent de notre analyse, il a été jugé utile d'émettre quelques propositions concernant les pratiques agroécologiques visant à mieux gérer la fertilité des sols :

- Réduction de l'érosion et du travail du sol : Encourager la réduction du travail du sol en limitant la profondeur et la fréquence du travail du sol. Adoptez des méthodes de travail du sol minimales, telles que le non-retournement de la couche arable, pour préserver la structure du sol.
- Allongement de la rotation des cultures : Promouvoir l'allongement de la rotation des cultures pour diversifier les besoins nutritionnels des plantes et réduire la pression sur les sols. Intégrez davantage de cultures légumineuses dans la rotation pour enrichir le sol en azote de manière naturelle.
- Couverture végétale : Favoriser la couverture végétale en utilisant des cultures de couverture, du paillis organique ou des plantes vivaces pour maintenir l'humidité du sol, prévenir l'érosion et enrichir la matière organique.
- Fabrication de compost : Il est fortement recommandé de fabriquer du compost en utilisant les résidus de récolte et d'autres matières végétales combinées avec les déchets d'élevage. Le compostage est une méthode efficace pour améliorer la fertilité du sol.
- Encadrement agricole : Il est important de mettre en place un système d'encadrement accessible à tous les agriculteurs de manière à ce qu'ils puissent mettre en œuvre efficacement les pratiques de maintien et d'amélioration de la fertilité des sols.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Acherkouk, M., Boughlala, M., Kaci, S., Omeiri, N., Onana, C., & Rakotoson, S. R. (2003). Systèmes de production oasiens et sylvo-pastoraux : interactions, complémentarités et développement durable. Cas du bassin de Ghéris (Maroc). 159.
- Albab, S., Ezaidi, A., Benssaou, M., & Kabbachi, B. (2013). Le patrimoine naturel-géologique et oasien-au service du développement géotouristique dans la province de Sidi Ifni et son arrière-pays oasien (Maroc). Collection EDYTEM. Cahiers de géographie, 14(1), 117-130. <https://doi.org/10.3406/edyte.2013.1229>.
- Amonmide, I., Dagbenonbakin, G., Agbangba, C. E., & Akponikpe, P. (2019). Contribution à l'évaluation du niveau de fertilité des sols dans les systèmes de culture à base du coton au Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13(3), 1846-1860. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v13i3.52>.
- Antoine, S., Karim, T., Ouola, T., & Tassebedo, M. (2007). Potentiel des jachères artificielles à *Andropogon* spp. Dans l'amélioration des propriétés chimiques et biologiques des sols en zone soudanienne (Burkina Faso). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 11. <https://doi.org/10.3406/edyte.2013.1229>.
- Arihara, J. and Ohwaki, Y 1989. Estimation of available phosphorous in vertisol and alfisol on view of root effects on rhizosphere soil. In XI Colloquium, Wageningen, Holland
- Ashworth, A., Owens, P. Et Allen, F. (2020). La gestion à long terme des systèmes de culture influence la résistance du sol et le cycle des éléments nutritifs. *Geoderma* 361, 114 062. Doi : 10.1016/j.geoderma.2019.114062.
- Asimi, S. (2009). Influence des modes de gestion de la fertilité des sols sur l'activité microbienne dans un système de cultures de longue durée au Burkina Faso. Thèse de Doctorat d'état sciences naturelles, Institut du Développement Rural/Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, 177.
- Bacye, B., Kambire, H. S., & Some, A. S. (2019). Effets des pratiques paysannes de fertilisation sur les caractéristiques chimiques d'un sol ferrugineux tropical lessivé en zone cotonnière à l'Ouest du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13(6), 2930-2941. Doi : 10.4314/ijbcs.v13i6.39.
- Bado B.V., 2002. Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne au Burkina- Faso. Thèse de doctorat de troisième cycle, université Laval Québec, 148p.

- Bainard, L. D., Navarro-Borrell, A., Hamel, C., Braun, K., Hanson, K., & Gan, Y. (2017). Increasing the frequency of pulses in crop rotations reduces soil fungal diversity and increases the proportion of fungal pathotrophs in a semiarid agroecosystem. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 240, 206-214. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.020>.
- Baize D., 1988. Guide des analyses courantes en pédologie. INRA. Paris. ISBN 2-7380-00754. 172.
- Bationo, A., & Bürkert, A. (2001). Soil organic carbon management for sustainable land use in Sudano-Sahelian West Africa. In *Managing Organic Matter in Tropical Soils: Scope and Limitations: Proceedings of a Workshop organized by the Center for Development Research at the University of Bonn (ZEF Bonn)—Germany, 7–10 June, 1999* (pp. 131-142). Springer Netherlands.
- Benaoun, A., Elbakkey, M., & Ferchichi, A. (2014). Change of oases farming systems and their effects on vegetable species diversity: Case of oasian agro-systems of Nefzaoua (South of Tunisia). *Scientia Horticulturae*, 180, 167-175. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.10.030>.
- Bennett, A. J., Bending, G. D., Chandler, D., Hilton, S., & Mills, P. (2012). Meeting the demand for crop production: the challenge of yield decline in crops grown in short rotations. *Biological reviews*, 87(1), 52-71. doi: 10.1111/j.1469-185X.2011.00184.x. Epub 2011 Jun 1. PMID : 21 631 700.
- Berthé A. Blokland A., Bouaré S., Diallo B., Diarra M., Geerling C., Mariko F., N'Djim H., Sanogo B. (1991). Profil d'environnement Mali-Sud : Etat des ressources naturelles et potentialités de développement. Amsterdam (NL) : IER/KIT, 1991. 79 p.
- Bot, A., & Benites, J. (2005). The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil and sustained food production (No. 80). Food & Agriculture Organization.
- Bouthier, A., Pelosi, C., Villenave, C., Peres, G., Hedde, M., Ranjard, L., Vian, J. F., Peigné, J., Cortet, J., Bispo, A., & Piron, D. (2014). Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique. In *Faut-il travailler le sol?* (p. 85-108). Quae. <https://hal.science/hal-01608212>.
- Bowen, A., & Pallister, J. (2000). AS level geography. Heinemann Educational, 12 p.

- Bremner, J. M., & Keeney, D. R. (1966). Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability 1. *Agronomy journal*, 58(5), 498-503.
- Calvet, R., Chenu, C., & Houot, S. (2011). *Les matières organiques des sols: Rôles agronomiques et environnementaux* (pp. 347-p). Editions France Agricole.
- Camara, O. S. (1996). *Utilisation des résidus de récolte et du fumier dans le Cercle de Koutalia: Bilan des éléments nutritifs et analyse économique* (No. 18).
- Casu, F. A. (2018). *Manure management and nutrient cycling in smallholder crop-livestock systems in Nyando, Kenya* (Doctoral dissertation).
- Chenu, C., & Balabane, M. (2001). *Matières organiques et activités biologiques des sols cultivés. Une approche des matières organiques par leurs fonctions. Perceptives Agricoles*, N°272, pp : 42-45.
- Chianu JN , Mairura, F. 2012. Les engrais minéraux dans les systèmes agricoles d'Afrique subsaharienne. *Une critique Agro. Soutenir. Dév. , 32 (2012) , p. 545 – 566*
- Chivenge, P., Zingore, S., Ezui, K. S., Njoroge, S., Bunquin, M. A., Dobermann, A., & Saito, K. (2022). Progress in research on site-specific nutrient management for smallholder farmers in sub-Saharan Africa. *Field Crops Research*, 281, 108503. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108503>.
- Combeau, A., & Monnier, G. (1961). *Methode d'etude de la stabilite structurale. Application aux sols tropicaux. Sols Africains 1 (6), 5-32.(1961).*
- Crossa, R. (1990). *Note Technique: L'Arboriculture Fruitière dans les Systèmes Agricoles Oasiens. Les Systèmes Agricoles Oasiens, 11, 319-324.*
- Danso, S. K. A. (1995). *Assessment of biological nitrogen fixation. In Nitrogen Economy in Tropical Soils: Proceedings of the International Symposium on Nitrogen Economy in Tropical Soils, held in Trinidad, WI, January 9–14, 1994 (pp. 33-41). Springer Netherlands.*
- Daoui, K., & Fatemi, Z. E. A. (2014). *Agroforestry systems in Morocco: the case of olive tree and annual crops association in Saïs region. Science, policy and politics of modern agricultural system: global context to local dynamics of sustainable agriculture, 281-289. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7957-0_19.*

- Deng, S. P., & Tabatabai, M. A. (1996). Effect of tillage and residue management on enzyme activities in soils: I. Amidohydrolases. *Biology and Fertility of Soils*, 22, 202-207.
- Dollé, V. (1990). Elevage intensif en oasis, une composante importante du système de production [Conference_item]. Les systèmes agricoles oasiens : Actes du colloque de Tozeur (19-21 novembre 1988); CIHEAM-IAMM. <https://agritrop.cirad.fr/570689/>
- Dupraz, C., Liagre, F., Querné, A., Andrianarisoa, S., & Talbot, G. (2011). L'agroforesterie peut-elle permettre de réduire les pollutions diffuses d'origine agricole ? Rapport de contrat de recherche n°2009 - 0009 avec l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée-Corse
- Ehtaiwesh, A. F. (2022). The effect of salinity on nutrient availability and uptake in crop plants. *Scientific Journal of Applied Sciences of Sabratha University*, 55-73.
- El Yadari, H., Chikhaoui, M., Naimi, M., Sabir, M., & Raclot, D. (2019). Techniques de conservation des eaux et des sols au Maroc: Aperçu et perspectives. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 7(2).
- FAO. (2003). Economie de l'agriculture de conservation. Service de la gestion des terres et de la nutrition des plantes, Division de la mise en valeur des terres et des eaux. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. Rome, Italie
- Ferreira, I. Q., Arrobas, M., Claro, A. M., & Rodrigues, M. A. (2013). Soil management in rainfed olive orchards may result in conflicting effects on olive production and soil fertility. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11(2), 472-480. <https://doi.org/10.5424/sjar/2013112-3501>.
- Floret C., Pontanier R., Serpantié G. (1993). La jachère en Afrique tropicale. Paris : Unesco, Dossier MAB 16
- Gan, Y.T., Miller, P.R., McConkey, B.G., Zentner, R.P., Stevenson, F.C. and McDonald, C.L. (2003) Influence of Diverse Cropping Sequences on Durum Wheat Yield and Protein in the Semiarid Northern Great Plains. *Agronomy Journal*, 95, 245-252. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.0245>.
- Garaux, M., Pitchers, B., Vandoorne, B., & Lauri, P. (2018). Pommiers en système agroforestier : Architecture, phénologie et flux de sève (Rapport de stage). INRAE. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03030300>.

- Graves, A. R., Burgess, P. J., Palma, J. H. N., Herzog, F., Moreno, G., Bertomeu, M., ... & Van den Briel, J. P. (2007). Development and application of bio-economic modelling to compare silvoarable, arable, and forestry systems in three European countries. *Ecological Engineering*, 29(4), 434-449. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.018>.
- Guitton, J. L., Dupraz, C., Auclair, D., & de Montard, F. X. (1994). Quel projet agroforestier pour l'Europe tempérée?. *Revue forestière française*, 46(S), 179-188.
- Guyomard, H., Huyghe, C., Peyraud, J. L., Boiffin, J., Coudurier, B., Jeuland, F., & Urruty, N. (2013). Vers des agricultures à hautes performances. Volume 3. Evaluation des performances de pratiques innovantes en agriculture conventionnelle. Inra. 376 pages
- Haj-Amor, Z., Dhaouadi, L., Kim, D.-G., Anlauf, R., Mokadem, N., & Bouri, S. (2020). Effects of climate change on key soil characteristics and strategy to enhance climate resilience of smallholder farming : An analysis of a pomegranate-field in a coastal Tunisian oasis. *Environmental Earth Sciences*, 79(19), 470. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09222-w>.
- HCP, (2017). Annuaire statistique du Maroc, année 2016. <https://www.hcp.ma/file/235422/>
- Hien E., (2004). Dynamique du carbone dans un Acrisol ferrique du Centre-Ouest Burkina: Influence des pratiques culturales sur le stock et la qualité de la matière organique. Doctorat en Sciences du Sol à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. 138p.
- Hodges, s. (2010). soil fertility basics: NC Certified Crop Advisor Training. North Carolina State University Soil Science Extension.
- Hudson, B. D. (1994). Soil organic matter and available water capacity. *Journal of soil and water conservation*, 49(2), 189-194.
- Janati A. (1990). Les cultures fourragères dans les oasis. In Dollé V. & Toutain G. (Éds.), *Les systèmes agricoles oasiens* (Vol. 11, p. 163-169). Montpellier : CIHEAM. <http://om.ciheam.org/om/pdf/a11/CI901493.pdf>.
- Jetro Nkengafac, N., Nkempi, L., Christopher Mubeteneh, T., Nji Herman, D., & Ernest Forghab, N. (2021). Soil Fertility Management Practices by Smallholder Farmers in

the Bamboutos Mountain Ecosystem. *World Journal of Agricultural Research*, 9(2), 58-64. <https://doi.org/10.12691/wjar-9-2-3>.

Jose, S., Gold, M. A., & Garrett, H. E. (2018). Temperate agroforestry in the United States: current trends and future directions. In *Temperate agroforestry systems* (pp. 50-71). Wallingford UK: CAB International.

Kanyama-Phiri, G., Snapp, S., & Minae, S. (1998). Partnership with Malawian farmers to develop organic matter technologies. *Outlook on Agriculture*, 27(3), 167-175.

Koulibaly B, Traoré T, Dakio D, Zombré PN. 2009. Effets des amendements locaux sur les rendements, les indices de nutrition et les bilans culturaux dans un système de rotation coton-maïs dans l'Ouest du Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 13 : 103-111. <https://www.tropicultura.org>

Koulibaly, B., Dakuo, D., Traore, M., Traore, O., Nacro, H. B., Lompo, F., & Sedogo, M. P. (2016). Effets de la fertilisation potassique des sols ferrugineux tropicaux sur la nutrition minérale et la productivité du cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10(2), 722-736. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v10i2.22>.

Kradi, C. (2012). *L'agriculture solidaire dans les éco-systèmes fragiles au Maroc*. Institut national de la recherche agronomique.

L'Agence Nationale pour le Développement des Zones Oasiennes et de l'Arganier. (2023). Initiative Oasis Durables. Récupéré le 2 octobre 2023, sur <http://andzoa.ma/fr/initiative-oasis-durables/>

Lacoste, Y. (1987). *Encyclopedia universalis* p. 13.

Larkin, RP et Halloran, JM (2014). Effets de la gestion des cultures de rotation suppressives de maladies sur le rendement de la pomme de terre et les maladies transmises par le sol et leurs implications économiques dans la production de pommes de terre. *Am J Potato Res* 91, 429–439. doi : 10.1007/s12230-014-9366-z

Larney, F. J., & Angers, D. A. (2012). The role of organic amendments in soil reclamation : A review. *Canadian Journal of Soil Science*, 92(1), 19-38. <https://doi.org/10.4141/cjss2010-064>.

- Li, A., Jousset, L., de Boer, W., Carrión, V. J., Zhang, T., Wang, X., & Kuramae, E. E. (2019). L'héritage de l'histoire de l'utilisation des terres détermine la reprogrammation de la physiologie des plantes par le microbiome du sol. *ISME Journal*, 13, 738–751.
- Mando, A., Ouattara, B., Somado, A. E., Wopereis, M. C. S., Stroosnijder, L., & Breman, H. (2005). Long-term effects of fallow, tillage and manure application on soil organic matter and nitrogen fractions and on sorghum yield under Sudano-Sahelian conditions. *Soil use and management*, 21(1), 25-31.
- Maraux, F., Dugué, P., & Ganry, F. (2007). Amélioration de la fertilité du sol et réhabilitation des terres dégradées : dynamiques socio-techniques en zones sèches d'Afriques de l'ouest et du centre. Accra (Ghana) : Agricultural innovation in dryland Africa: What are the key drivers for success?, AIDA Conference, du 22 au 24 janvier 2007.
- Massire. (2020, 25 juin). Terrains au Maroc. Récupéré le 2 octobre 2023, sur <https://massire.net/terrain-au-maroc/>
- Masure, A., Martin, P., Lacan, X., & Rafflebeau, S. (2022). Promouvoir l'agroforesterie à base de palmiers à huile : un atout pour la durabilité de la filière. *Cahiers Agricultures*, 31, 14. <https://doi.org/10.1051/cagri/2022010>.
- Mills, A. J., & Fey, M. V. (2003). Declining soil quality in South Africa: effects of land use on soil organic matter and surface crusting. *South African Journal of Science*, 99(9), 429-436.
- Moughli, L., & Mosseddaq, F. (2016). Management de la fertilité du sol et fertilisation des cultures (Cours). Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II.
- Mrabet, R., Lahlou, S., Le Bissonnais, Y., & Duval, O. (2004). Estimation de la stabilité structurale des sols semi-arides marocains: Influence des techniques culturales simplifiées. *Bulletin du Réseau Erosion*, 23(2), 405-415.
- Nair PKR, Gordon AM, Rosa Mosquera-Losada M. (2008). Agroforesterie. *Encyclopédie d'écologie* 101–110. DOI : 10.1016/B978-008045405-4.00038-0 .
- Nair, P. K. R. (1984). Soil Productivity Aspects of Agro forestry: Science and Practice in Agroforestry. International Council for Research in Agro forestry (ICRAF): Nairobi, Kenya. Gliessman, SR *Agroecologia: Procesos ecologicos en agricultura sostenible*./CATIE Turrialba, CR p, 260-268.

- Naman, F., Souidi, B., & Chiang, C. (2001). Impact de l'intensification agricole sur le statut de la matière organique des sols en zones irriguées semi-arides au Maroc. *Etude et gestion des sols*, 8(4), 269-277.
- Ngo, T. P. (2014). Effets des amendements organiques exogènes sur la composition de la matière organique et le stockage du carbone d'un sol dégradé par l'érosion dans le Nord du Vietnam [These de doctorat, Paris 6]. <https://www.theses.fr/2014PA066152>
- Nicolardot, B. (1993). Les matières organiques et leur évolution dans le sol." In *Mémento du producteur la matière organique*, Editions S.E.R.A.I.L.et l'Information Agricole du Rhône.
- Noordwijk, M., Coe, R., & Sinclair, F. (2016). Central hypotheses for the third agroforestry paradigm within a common definition. Working Paper no. 233. Indonesia: World Agroforestry Centre (ICRAF) Southeast Asia Regional Program.
- Oke, A., Traore, K., Nati-Bama, A. D., Igbadun, H., Ahmed, B., Ahmed, F., & Zwart, S. (2022). Technologies d'irrigation à petite échelle et de gestion de l'eau pour la transformation agricole Africaine. In French. International Water Management Institute (IWMI).
- ORMVAO. (2019). « Rapport annuel des activités de l'ormva d'ouarzazate, zone d'action de la subdivision agricole de boulmane ».
- ORMVAO. (2020). Rapport annuel des activités de l'ORMVA d'Ouarzazat zone d'action de la subdivision agricole de Boulmane, Productions végétales, 2020.
- Ouedraogo, A., Kabore, F., & Kabore, O. (2022). Perception de la fertilité des sols et stratégies d'adaptation des producteurs agricoles à Samandéni (Burkina Faso): Soil fertility perception and adaptation strategies of farmers in Samandéni (Burkina Faso). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 16(4), 1536-1553. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v16i4.15>.
- Ou-Zine, M., Symanczik, S., Rachidi, F., Fagroud, M., Aziz, L., Abidar, A., Mäder, P., Achbani, E. H., Haggoud, A., Abdellaoui, M., & Bouamri, R. (2021). Effect of Organic Amendment on Soil Fertility, Mineral Nutrition, and Yield of Majhoul Date Palm Cultivar in Drâa-Tafilalet Region, Morocco. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(2), 1745-1758. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00476-2>.

- Pallo, F. J. P., Sawadogo, N., Zombré, N. P., & Sedogo, M. P. (2009). Statut de la matière organique des sols de la zone nord-soudanienne au Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 13(1): 139-142.
- Parent, L. É., & Khiari, L. (2003). Nitrogen and phosphorus indicators of organic soil quality. Chap. 5 dans: PARENT LÉ and P. ILNICKI (Éditeurs). *Organic soils and peat materials for sustainable agriculture*.
- Pauwels, J.M., Van Rants, E. and Verloom, M.A. (1992) *Mannuel de laboratoire de pédologie Méthode d'analyse des sols et plantes; équipements, gestion des stocks, de verrerie et de produits chimiques*. Place du champ de Mars 5, 1050 Bruxelles, Royaume de Belgique, 33-34.
- Pellerin, S., & Nesme, T. (2015). Flux de phosphore associés à l'élevage et conséquences sur la fertilité phosphatée des sols: analyse à plusieurs échelles. *Fourrages*, 223, 205-210.
- Pieri C., (1989). Fertilité des terres de savanes. Bilan de 30 ans de recherche et de développement agricoles au Sud du Sahara. CIRAD/Ministère de la Coopération et du Développement, 444 p.
- Pouya, M. B., Bonzi, M., Gnankambary, Z., Koulinaly, B., Ouedraogo, I., Ouedraogo, J. S., & Sedogo, P. M. (2013). Perception paysanne et impact agro-pédologique du niveau de mécanisation agricole dans les zones cotonnières Centre et Ouest du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 7(2), 489-506.
- Projet "Revitalisation des agro écosystèmes oasiens par une approche intégrée et durable du paysage dans la région Drâa-Tafilalet (OASIL) (2018).
- Rabiou, H., Maazou, R., Soumana, I., Mamoudou, B. M., Issaharou-Matchi, I., & Mahamane, A. (2017). Succession des communautés végétales des jachères protégées en zone sahéenne: cas de Banizoumbou (Niger). *Journal of Applied Biosciences*, 111, 10944-10956.
- Reboul, C. (1983). Monsieur le capital et madame la terre: fertilité agronomique et fertilité économique. *Monsieur le capital et madame la terre*, 1-258.
- Recous, S., Chabbi, A., Vertès, F., Thiebeau, P., & Chenu, C. (2015). Fertilité des sols et minéralisation de l'azote: sous l'influence des pratiques culturales, quels processus et interactions sont impliqués?. *Fourrages*, (223), 189-196.

- Réseau Associatif de Développement Durable des Oasis. (2023). Les oasis du réseau. Récupéré le 2 octobre 2023, à partir de <https://www.raddo.org/ecosysteme-oasien/Les-oasis-du-reseau>
- Rezaei, S., & Gilkes, R. (2005). The effects of landscape attributes and plant community on soil chemical properties in rangelands. *Geoderma*, 125, 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.07.010>.
- Roose, É. (Éd.). (2017). Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : Contribution à l'agroécologie. IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.24108>.
- Samid, I., & Alem, C. (2023). Culture du pommier et sa contribution au développement socio-économique dans la région d'Imilchil. *African and Mediterranean Agricultural Journal-Al Awamia*, (139), 127-149.
- Schwartz, C., Decroux, J., & Muller, J. C. (2005). Guide de la fertilisation raisonnée : grandes cultures et prairies. France Agricole Editions. 414 pages.
- Sébillotte M. (1985). La jachère, éléments pour une théorie. Paris : ORSTOM, A travers champs, agronomes et géographes, Collection Colloques et Séminaires, p. 175-229
- Sébillotte, M. (1989). Fertilité et systèmes de production. Fertilité et systèmes de production, 1-369.
- Soltner, D. (1992). Les bases de la production végétale. Tome 1 : le sol. Collection Sciences et Techniques Agricoles, 19^e édition, Sainte Gemmes sur Loire.
- Somé N. A., Traoré K., Traoré O., Tassebedo M., 2007. Potentiel des jachères artificielles à *Andropogon* spp. Dans l'amélioration des propriétés chimiques et biologiques des sols en zone soudanienne (Burkina Faso). *BASE*. 2007 11 (3): 245–252.
- Stevenson, F. J., & Cole, M. A. (1999). Cycles of soils: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. John Wiley & Sons, pp. 419
- Tiemann, L. K., Grandy, A. S., Atkinson, E. E., Marin-Spiotta, E., & McDaniel, M. D. (2015). Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. *Ecology Letters*, 18(8), 761-771. <https://doi.org/10.1111/ele.12453>.

- Tittonell, P., Zingore, S., van Wijk, M. T., Corbeels, M., & Giller, K. E. (2007). Nutrient use efficiencies and crop responses to N, P and manure applications in Zimbabwean soils: Exploring management strategies across soil fertility gradients. *Field Crops Research*, 100(2–3), 348-368. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.09.003>.
- Tuncay, T., Bayramin, I., AtALAY, F., & Ünver, İ. (2016). Assessment of Inverse Distance Weighting IDW Interpolation on Spatial Variability of Selected Soil Properties in the Cukurova Plain. *Journal of Agricultural Sciences*, 22(3), 377-384. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.257726>.
- Vanlauwe, B., & Giller, K. (2006). Popular myths around soil fertility management in sub-Saharan Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 116, 34-46. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.03.016>.
- Yemefack, M., Nounamo, L., Njomgang, R., & Bilong, P. (2004). Influence des pratiques agricoles sur la teneur en argile et autres propriétés agronomiques d'un sol ferrallitique au sud Cameroun. *Tropicultura*, 22(1), 3-10.
- Young, A. (1995). *L'Agroforesterie pour la conservation des sols*. Centre technique de coopération agricole et rurale, ICRAF.
- Zouahri, A., (2023, mai). Cartographie de la fertilité des sols pour une gestion durable des palmeraies marocaines [Congrès]. Congrès international des oasis et du palmier dattier, 29-30 mai 2023, Ouarzazate, Maroc.

ANNEXES

Annexe 1. Questionnaire

Identification de l'exploitant

Nom : _____ **Prénom :** _____
Age : _____ **Nombre d'années d'expérience :** _____
Douar : _____ **Numéro de tél :** _____

Identification de l'exploitation

Pouvez-vous décrire votre exploitation agricole en détaillant le nombre de parcelles que vous exploitez, la taille approximative de chacune, leur emplacement, et depuis combien de temps exploitez-vous ces parcelles ?

Nombre de parcelle	Taille	Emplacement	Temps d'exploitation
Parcelle 1			
Parcelle 2			
Parcelle 3			
Parcelle 4			

Pratiques culturales

Quel est le type de culture que vous pratiquez sur vos parcelles ?

- Céréales
 Arboriculture
 Légumineuses
 Autre : _____

Pratiquez-vous une association de cultures ?

- Oui Non

Si oui, pouvez-vous préciser quelles cultures sont associées et pourquoi vous avez fait ce choix ?

- Arboriculture + Blé
 Arboriculture + Orge
 Arboriculture + Luzerne
 Autre : _____

Pourquoi avez-vous choisi cette association ?

Pratiquez-vous une rotation de culture ?

- Oui Non

Si oui, pourriez-vous décrire votre pratique en précisant son type, sa durée et les raisons de son application ?

Type de rotation	Durée	Raisons

Apport de la fumure (minérale / organique)

1- Fumier

Ajoutez-vous du fumier à vos parcelles ?

Oui

Non

Le fumier que vous utilisez provient-il de votre propre élevage ?

Oui

Non

Si non, d'où et à quel prix ?

Origine :

Prix d'achat (Dh/Kg) :

Le fumier que vous utilisez est de quel type de fumier ?

Ovin

Bovin

Caprin

Mélange :

Le fumier que vous utilisez est-il traité avant l'utilisation ?

Oui

Non

Si oui, de quelle manière est-il traité ?

Composté

Fermenté

Autre :

Si oui, quel est le critère de mélange pour le fumier que vous utilisez ?

La

quantité

la taille de la parcelle

la culture

le type de sol

Autre :

Expliquez :

Depuis combien de temps ajoutez-vous du fumier à vos parcelles ?

Est-ce que l'utilisation du fumier est une pratique ancestrale dans votre région ou est-ce quelque chose d'importé ?

2- Engrais

Ajoutez-vous de l'engrais chimique à vos parcelles ?

Oui

Non

Quels types d'engrais utilisez-vous ?

D'où proviennent les engrais que vous utilisez dans votre exploitation agricole ?

Origine :

Prix d'Achat (Dh/Kg) :

Quels sont les critères de choix pour les engrais que vous utilisez ?

Le cout

La

disponibilité

La qualité

Recommandation du

vendeur

Autre :

Pouvez-vous décrire les caractéristiques des engrais que vous utilisez suivant ces variables ?

Engrais			
Variables de description	Prix		
Variables de fonction	Effets sur les plantes		
	Effets sur les fruits		
	Effets sur les sols		
Variables de risques	Faibles pluies		
	Fortes pluies		
	Enherbement		

À votre avis, quelle est la différence entre l'effet des fumures organiques et minérales sur les plantes, le sol et les adventices ?

Effet	Sur les plantes	Sur le sol	Sur les adventices
Fumure organique			
Fumure minérale			

Annexe 2. Protocoles suivis pour les analyses de sol

Granulométrie

La méthode de la pipette de Robinson est utilisée pour séparer les différentes fractions de particules d'un sol en dissolvant les ciments qui les lient. Les particules fines résultantes, telles que les sables, les limons et les argiles, sont alors collectées. Les liaisons entre les particules de calcaire et la matière organique sont éliminées en utilisant de l'acide chlorhydrique (HCl) et de l'eau oxygénée (H₂O₂). Le pH de la solution est neutralisé en la rinçant à l'eau distillée et en ajoutant une fraction de chlorure de potassium (KCl).

Le processus de la pipette de Robinson implique de prélever de manière répétée des échantillons de la suspension de sol à une hauteur fixe et à des moments précis en fonction de la densité du liquide et des classes de diamètre des particules qui nous intéressent (diamètre de particule déterminé par l'équation de Stokes). Le premier prélèvement est effectué après avoir agité les éprouvettes contenant la suspension du sol en les retournant sur la paillasse. Ce prélèvement nous permet d'obtenir la fraction d'argiles et de limons fins à une hauteur de 10 cm, après une agitation de la solution du sol pendant quatre minutes et quarante-huit secondes. Cette profondeur peut être maintenue en utilisant la pipette de Robinson fixée à un socle équipé d'un mécanisme de siphonnage, et nous prélevons 20 ml de la solution que nous transférons dans une capsule préalablement pesée. Les capsules sont ensuite séchées dans une étuve pendant 24 heures à 105 °C. Après quatre heures et trente minutes, nous effectuons le deuxième prélèvement qui permet de déterminer la fraction d'argiles uniquement, à une profondeur de 6,22 cm et à une température de 23 °C. Ensuite, nous soustrayons les poids des capsules vides pour calculer le poids des prélèvements précédemment séchés.

Ion hydrogène (pH eau et pH KCl)

Pour déterminer le pH H₂O, la méthode potentiométrique est utilisée en utilisant un pH-mètre qui se compose d'une électrode sensible aux ions H⁺ et d'une électrode de référence métallique. Les mesures de pH sont effectuées dans une solution du sol diluée à un rapport de 1 : 2,5 (20 g de sol dans 50 ml d'eau distillée). La méthode utilisée pour déterminer le pH KCl est semblable à celle utilisée pour le pH H₂O, si ce n'est qu'une solution de KCl 1M est utilisée à la place de l'eau distillée.

Conductivité électrique (CE)

Pour la mesure de la conductivité électrique de l'extrait de sol, le protocole suivi est le suivant.

Après avoir préparé la solution d'extrait 1:5 en mélangeant 10 g de sol avec 500 ml d'eau distillée, l'agitation vigoureuse du mélange sol-eau est effectuée pendant une période de 30 minutes pour assurer une extraction adéquate des solutés. Ensuite, le mélange est laissé en repos pendant la même période de temps, permettant ainsi aux particules de sol de se déposer au fond du récipient. Une fois le temps de repos écoulé, une partie de la solution d'extrait claire et non perturbée est prélevée avec précaution, et mesurée par un conductimètre.

Matière organique

La méthode utilisée pour l'analyse de la matière organique est connue sous le nom de méthode de Walkley-Black. Cette méthode implique une oxydation à froid de la fraction organique du carbone présente dans l'échantillon de sol. L'oxydation est réalisée en utilisant une solution de bichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) en présence d'acide sulfurique (H_2SO_4). Après l'oxydation, de l'eau distillée est ajoutée à la solution. Après 30 minutes de repos, la solution est titrée avec le sulfate ferreux ($FeSO_4$) jusqu'à ce que la couleur de la solution passe du bleu foncé au vert. Ce point de virage de couleur indique la fin de la réaction.

Phosphore assimilable

La méthode utilisée est celle d'Olsen. Elle est adoptée pour les sols ayant un pH supérieur à 7 comme dans le cas des échantillons étudiés (Olsen, S.R. and al., 1954). L'extraction est faite par une solution alcaline de bicarbonate de sodium ($NaHCO_3$) à pH égal à 8,5 pendant une heure à une température de 20 °C. Ce réactif diminue la concentration de Ca dans la solution (précipitation de Ca^{2+} sous forme de $CaCO_3$). Il en résulte une augmentation de la concentration de P dans la solution du sol.

Potassium échangeable

Le potassium échangeable est un élément susceptible à être absorbé directement par la plante, l'extraction s'effectue à l'aide d'une solution normale d'acétate d'ammonium à pH 7, par la suite, les mesures se font par dosage photométrique à flamme (Pauwels et al., 1992).

Azote minéral

La méthode utilisée préconise l'extraction de ces formes par une solution de KCL puis distillation de NH_4^+ et distillation de NO_3^- . Les quantités de NO_2^- en conditions normales

($T < 30\text{ °C}$ et $\text{pH} > 7$), sont faibles, on considère la 2ème distillation ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) = NO_3^- (Bremner et Keeney, (1966)).

Annexe 3. Résultats des analyses physicochimiques

Tableau 9. Résultats des analyses physicochimiques

Echantillon	Texture	pH eau	pH Kcl	CE (mS/m)	MO (%)	NH4 (ppm)	NO3 (ppm)	P (ppm)	K (ppm)
E1	Limon	7,90	7.5	0,20	2,30	4,76	11,62	77,30	326,00
E2	limon	7,70	7.2	0,16	2,19	7,56	9,94	69,40	443,00
E3	limon sableux	7,80	7.3	0,13	1,40	10,08	7,56	25,80	374,00
E4	limon fin	7,40	7.2	0,19	2,15	11,62	24,92	23,90	234,00
E5	limon argileux	8.0	7.2	0,14	1,96	9,10	14,56	91,20	464,00
E6	limon argileux	8.1	7.2	0,14	1,85	9,10	10,08	96,90	441,00
E7	Argile	7.7	7	0,16	1,39	8,96	18,62	12,40	492,00
E8	Argile	7.5	7	0,15	1,52	6,44	8,82	11,20	408,00
E9	limon	7,30	7	0,13	1,18	11,76	19,60	7,00	193,00
E10	limon sableux	8.2	7.4	0,13	1,84	6,44	18,62	10,80	198,00
E11	limon sableux	8.0	7.4	0,13	2,07	13,72	17,78	44,60	100,00
E12	limon sableux	8.1	7.3	0,13	0,87	7,98	15,96	7,10	160,00
E13	limon sableux	8.0	7.4	0,15	1,53	8,40	12,88	22,70	298,00
E14	Argile	8.1	7.1	0,10	1,25	8,96	7,42	10,10	235,00
E15	limon sableux	7,40	7.3	0,10	0,35	6,86	12,04	6,70	545,00
E16	limon sableux	8.2	7.2	0,12	0,33	12,46	8,82	16,10	163,00
E17	limon fin	8.1	7.2	0,20	1,96	5,46	15,68	31,10	586,00
E18	limon fin	8.2	7.4	0,20	2,07	6,02	15,96	33,70	604,00
E19	limon sableux	7,80	7.4	0,11	0,20	16,24	13,44	7,70	568,00
E20	limon sableux	7,80	7.3	0,11	0,42	19,04	15,96	11,20	504,00
E21	limon sableux	8.1	7.2	0,09	0,57	3,64	5,60	21,30	229,00
E22	Argile	8.0	7.4	0,16	1,01	10,36	17,22	16,90	222,00

E23	limon sableux	8.2	7.4	0,11	0,85	7,00	11,62	29,20	138,00
E24	limon sableux	8.1	7.4	0,13	0,96	6,16	7,42	22,20	159,00
E25	limon	8.0	7.4	0,12	0,76	6,02	9,10	41,50	184,00
E26	argile	8.0	7.4	0,13	1,34	8,54	13,72	42,90	305,00
E27	limon sableux	7,40	7.4	0,13	0,66	6,58	19,60	7,10	533,00
E28	limon fin	7,70	7.2	0,13	1,31	8,40	12,60	7,00	246,00
E29	limon	7.9	7.1	0,12	4,05	9,94	25,06	15,00	218,00
E30	limon argileux	7,60	7.5	0,15	2,80	11,62	13,86	64,20	505,00
E31	limon	7,90	7.7	0,13	0,38	8,12	15,12	12,80	149,00
E32	limon sableux	8.4	7.2	0,13	0,16	4,06	17,22	6,80	161,00
E33	limon fin	7,60	7	0,17	2,14	10,78	21,00	89,90	624,00
E34	limon fin	7,50	7.2	0,19	2,36	11,62	21,56	65,30	602,00
E35	Argile	8.0	7.4	0,18	2,44	7,42	18,62	12,80	248,00
E36	Argile	8,10	7.1	0,17	2,73	6,16	14,42	13,20	196,00
E37	limon	7,70	7.6	0,14	1,15	8,26	18,48	25,40	525,00
E38	limon fin	7,90	7.6	0,14	1,27	7,56	11,06	11,70	675,00
E39	limon sableux	8.1	7.3	0,05	0,48	3,36	6,02	9,40	179,00
E40	limon fin	7,60	7.2	0,12	0,52	7,14	9,80	14,38	155,00
E41	limon fin	7,60	7.2	0,19	3,41	8,96	10,36	76,20	664,00
E42	limon fin	8.0	7.1	0,17	3,95	7,70	25,76	41,30	372,00
E43	limon fin	7,50	7.2	0,16	2,66	12,88	9,94	91,30	306,00
E44	limon fin	7,60	7.2	0,44	1,50	12,74	15,40	14,60	210,00
E45	limon	7,70	7.2	0,20	1,70	14,98	20,58	24,40	537,00
E46	limon	7,80	7.4	0,12	1,33	7,28	8,40	9,60	282,00
E47	limon sableux	7,70	7.6	0,12	0,23	11,90	18,34	23,30	215,00
E48	limon sableux	8,00	7.5	0,20	0,23	17,64	21,56	25,30	208,00

Annexe 4. Résultats d'ANOVA

Tableau 10. ANOVA (facteur d'occupation du sol)

		Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Sig.
Matière organique (%)	Intergruppes	8,488	1	8,488	11,191	0,002
	Intragruppes	34,888	46	0,758		
	Total	43,376	47			
pH	Intergruppes	0,000	1	0,000	0,161	0,690
	Intragruppes	0,052	46	0,001		
	Total	0,052	47			
CE (mS/m)	Intergruppes	0,085	1	0,085	0,905	0,346
	Intragruppes	4,302	46	0,094		
	Total	4,387	47			
Azote minéral (ppm)	Intergruppes	2,813	1	2,813	0,053	0,819
	Intragruppes	2437,769	46	52,995		
	Total	2440,582	47			
Phosphore (ppm)	Intergruppes	1,245	1	1,245	11,988	0,001
	Intragruppes	4,778	46	0,104		
	Total	6,023	47			
Potassium (ppm)	Intergruppes	0,396	1	0,396	9,151	0,004
	Intragruppes	1,991	46	0,043		
	Total	2,387	47			

Tableau 11. ANOVA (Facteur gradient amont/aval)

		SOMME DES CARRES	DDL	CARRE MOYEN	F	SIG.
Matière Organique (%)	Inter-groupes	2,315	2	1,158	1,269	0,291
	Intra-groupes	41,061	45	0,912		
	Total	43,376	47			
PH	Inter-groupes	0,006	2	0,003	2,932	0,064
	Intra-groupes	0,045	45	0,001		
	Total	0,051	47			
CE (MS/M)	Inter-groupes	0,270	2	0,135	1,473	0,240
	Intra-groupes	4,117	45	0,091		
	Total	4,387	47			
Azote Minéral (PPM)	Inter-groupes	76,490	2	38,245	0,728	0,488
	Intra-groupes	2364,092	45	52,535		
	Total	2440,582	47			
Phosphore (PPM)	Inter-groupes	0,147	2	0,074	0,565	0,573
	Intra-groupes	5,876	45	0,131		
	Total	6,023	47			
Potassium (PPM)	Inter-groupes	0,039	2	0,020	0,374	0,690
	Intra-groupes	2,348	45	0,052		
	Total	2,387	47			

Tableau 12. ANOVA (Facteur distance par rapport à l'oued)

		Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Sig.
MATIERE ORGANIQUE (%)	Intergruppes	5,362	1	5,362	6,488	0,014
	Intragruppes	38,014	46	0,826		
	Total	43,376	47			
PH	Intergruppes	0,000	1	0,000	1,780	0,189
	Intragruppes	0,010	46	0,000		
	Total	0,010	47			
CE (DS/M)	Intergruppes	0,104	1	0,104	6,630	0,013
	Intragruppes	0,723	46	0,016		
	Total	0,827	47			
AZOTE MINERAL (PPM)	Intergruppes	125,777	1	125,777	2,499	0,121
	Intragruppes	2314,805	46	50,322		
	Total	2440,582	47			
PHOSPHORE (PPM)	Intergruppes	0,176	1	0,176	1,381	0,246
	Intragruppes	5,848	46	0,127		
	Total	6,023	47			
POTASSIUM (PPM)	Intergruppes	0,048	1	0,048	0,950	0,335
	Intragruppes	2,338	46	0,051		
	Total	2,387	47			

Tableau 13. Corrélation entre la matière organique et le phosphore assimilable.

		Matière organique (%)	Phosphore (ppm)
MATIERE ORGANIQUE (%)	Corrélation de Pearson	1	,522**
	Sig. (bilatérale)		0,000
	N	48	48
PHOSPHORE (PPM)	Corrélation de Pearson	,522**	1
	Sig. (bilatérale)	0,000	
	N	48	48
** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).			

مشروع نهاية الدراسات لنيل دبلوم مهندس في الزراعة
تخصص: تدبير موارد التربة والماء

تقييم إدارة خصوبة التربة في واحات الجبال: مسمير

قدم للعموم ونوقش من طرف

آلاء بادو

أمام اللجنة المكونة من

رئيس	معهد الحسن الثاني للزراعة والبيطرة	الأستاذ النعيمي مصطفى
مقرر	معهد الحسن الثاني للزراعة والبيطرة	الأستاذة سيف النصر مريم
مقرر مساعد	معهد الحسن الثاني للزراعة والبيطرة	الأستاذ شيخاوي محمد
ممتحن	IAV Hassan II \ CIRAD	الأستاذ بيرت جوليان
ممتحن	معهد الحسن الثاني للزراعة والبيطرة	الأستاذ الجناتي مصطفى

أكتوبر 2023

