

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis De Mostaganem

كلية العلوم الطبيعية والحياة

Faculté des sciences de la Nature et de la Vie

قسم الفلاحة

Département d'Agronomie



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par :

GHALEM Mounir

En vue de l'obtention du diplôme de

Master Académique en Agronomie

Spécialité : Aménagement Hydro-Agricole

THÈME

**Approche pédoclimatique pour un plan d'aménagement
de la ferme pilote Si Mourad (Sidi Ali, Mostaganem)**

Devant le JURY :

Président LARID Mohamed Pr Univ-Mostaganem

Examineur AMIRI Ouafaa MAB Univ-Mostaganem

Encadreur TAHRI Miloud MCA Univ-Mostaganem

Co-encadreur ARBAOUI Mohammed MCA Univ-Mostaganem

Année universitaire: 2023 – 2024

Remerciement

Je remercie "Allah" le tout puissant qui m'a donné la force et la patience pour mener à bien ce modeste travail.

Ce modeste travail achevé, je ne peux que rendre hommage et remercier les nombreuses personnes qui m'ont soit aider, soit soutenu de loin ou de près tout le long de notre travail.

*Je voudrais exprimer ma gratitude à mon encadreur **Dr. TAHRI Miloud** Maître de conférence A et mon co-encadreur **Dr. ARBAOUI Mohammed** Maître conférence A à l'université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem pour avoir accepté de diriger ce travail. Leurs conseils et leurs observations efficaces ont été essentiels tout au long du déroulement de ce travail.*

*J'exprime mes remerciements au **Professeur LARID Mohamed** pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma soutenance.*

*Je remercie également **Dr AMIRI Ouafaa** Maître assistante à l'université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem qui a accepté d'examiner ce travail.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents qui ont sacrifiés leur vie pour ma réussite.

*Toutes la famille **GHALEM**.*

*Mes frères **AMIR** et **AYMEN***

*Mes amis **Salah, Sid Ahmed, Younes**.*

Toute l'équipe d'enseignants du département d'Agronomie.

*Toute l'équipe de **la ferme pilote Si Mourad***

*Toute ma promotion des Sciences Agronomiques et surtout celle de la spécialité
Aménagement hydro-agricole 2023/2024.*

*Tous mes amis (es), en témoignages des années passées ensemble, je leur
souhaite beaucoup de courage, de réussite et brillant avenir.*

In chaa Allah

Approche pédoclimatique pour un plan d'aménagement de la ferme pilote Si Mourad (Sidi Ali, Mostaganem)

Résumé : Actuellement, le potentiel de production du secteur agricole rencontre des difficultés d'ordre infrastructurel, fonctionnel et d'adaptation aux nouvelles conditions pédoclimatiques. Réalisé au niveau de la ferme pilote polyvalente « Si Mourad (Sidi Ali-Mostaganem) », le présent travail s'accorde une importance particulière aux besoins spécifiques en équipements et infrastructures nécessaires pour le bon fonctionnement et l'optimisation de la production agricole. Une caractérisation physico-chimique des sols a été nécessaire pour une meilleure fertilisation des plantes et les problèmes de la gestion de l'eau pour une meilleure efficacité de l'irrigation. Dans le but d'innover l'activité agricole, de nouvelles tendances y compris les idées d'appliquer des technologies intelligentes ont été abordées. Des recommandations pratiques et scientifiques ont été proposées afin d'assurer la durabilité des ressources naturelles pour une meilleure productivité agricole dans la région de Sidi Ali (Mostaganem).

Mots clés : Ferme agricole, Infrastructures agricoles, productivité agricole, pédoclimatiques, durabilité des ressources.

Pedoclimatic approach for a management plan for the Si Mourad pilot farm (Sidi Ali, Mostaganem)

Abstract: Currently, the production potential of the agricultural sector is facing infrastructural and functional difficulties and in adapting to the new pedoclimatic conditions. Carried out at the level of the multipurpose pilot farm "Si Mourad (Sidi Ali-Mostaganem)", the present work attaches particular importance to the specific needs in terms of equipment and infrastructure necessary for the proper functioning and optimization of agricultural production. A physico-chemical characterization of the soils was necessary for better fertilization of the plants and the problems of water management for a better efficiency of irrigation. With the aim of innovating the agricultural activity, new trends including ideas for applying smart technologies were discussed. Practical and scientific recommendations were proposed to ensure the sustainability of natural resources for better agricultural productivity in the region of Sidi Ali (Mostaganem).

Keywords: Agricultural farm, Agricultural infrastructure, agricultural productivity, pedoclimatic, resource sustainability.

دراسة التربة والظروف المناخية لخطّة تطوير مزرعة سي مراد النموذجية (سيدي علي، مستغانم)
المخلص في الوقت الحالي، تواجه إمكانات الإنتاج للقطاع الزراعي صعوبات هيكلية وإدارية وتكيف مع التربة والظروف المناخية الجديدة الكلمات المفتاحية: التكيف، زيادة الإنتاجية، التنمية المستدامة. ويولي هذا العمل، الذي ينفذ على مستوى المزرعة التجريبية المتعددة الأغراض "سي مراد (سيدي علي مستغانم)"، أهمية خاصة للاحتياجات المحددة من حيث المعدات والبنية التحتية اللازمة لحسن سير الإنتاج الزراعي وتحسينه. كان التوصيف الفيزيائي الكيميائي للتربة ضروريا لتحسين تسميد النباتات ودرس مشاكل تسيير المياه من أجل كفاءة أفضل للري. بهدف ابتكار الأعمال الزراعية، تمت مناقشة الاتجاهات الجديدة بما في ذلك أفكار تطبيق التقنيات الذكية. واقتُرحت توصيات عملية وعلمية لضمان استدامة الموارد الطبيعية من أجل إنتاجية زراعية أفضل في منطقة سيدي علي (مستغانم).
الكلمات المفتاحية: مزرعة زراعية، بنية تحتية زراعية، إنتاجية زراعية، تربة مناخية، استدامة الموارد.

Liste des figures

Figure 1. Courbe de croissance en réponse de la quantité d'azote disponible	6
Figure 2. Rendements et besoins en eau des cultures irriguées et pluviales	24
Figure 3. Contraintes des zones d'agriculture pluviale	25
Figure 4. Distribution géographique de la différence entre températures annuelles moyennes et températures saisonnières (en °C°) entre 2050 et 2000.....	30
Figure 5. Localisation géographique de l'EURL Si Mourad (Sidi Ali-Mostaganem)	35
Figure 6. Délimitation de la ferme pilote Si Mourad	36
Figure 7. Technique de prélèvement en zigzag	39
Figure 8. Prélèvement d'échantillons de sol en zigzag	40
Figure 9. Les 6 échantillons de sol après le tamisage.	41
Figure 10. Les 6 échantillonnées en four pendant 24 heures.	42
Figure 11 . Analyse granulométrique par la méthode de la pipette de Robinson.....	42
Figure 12. Mesure du pH d'un échantillon de sol à l'aide d'un pH-mètre.....	43
Figure 13. Mesure de la conductivité électrique du sol par le conductimètre.	43
Figure 14. Dosage du calcaire total.	44
Figure 15. Dosage du calcaire actif.	44
Figure 16. Composition granulométrique des 6 échantillons de sol étudiés.	48
Figure 17. Triangle des textures minérales	48
Figure 18. Résultats du calcaire total des 6 échantillons de sol étudiés	49
Figure 19. Résultats calcaire actif de 6 échantillons de sol étudiés	50
Figure 20. Le pH des 6 échantillons de sol étudiés.	51
Figure 21. La CE des 6 échantillons de sol étudiés.	51
Figure 22. Teneurs en matière organique et en carbone organique des 6 échantillons de sol étudiés.	52
Figure 23. Taux d'humidité enregistrés de 6 échantillons de sol étudiés.....	53

Liste des tableaux

Tableau 1. Les principaux équipements pour une ferme céréalière.....	3
Tableau 2. Les principaux équipements pour une d'élevage bovin laité.....	5
Tableau 3. Matériel et produits.	38
Tableau 4. Résultats des analyses granulométriques des sols étudiés.	47
Tableau 5. Résultats Calcaire total.....	49
Tableau 6. Qualité du sol en calcaire actif des 6 échantillons de sol étudiés.....	50
Tableau 7. Taux de la matière et du carbone organique des différents échantillons testés.....	52
Tableau 8. Le pH du sol.	72
Tableau 9. Classes de la qualité des sols selon leur CE.	72
Tableau 10. Les normes de calcaire total.	72
Tableau 11. Les normes calcaire actif.....	72
Tableau 12. Les normes de carbone organique.....	73

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des photos	
Liste des tableaux	
Introduction	1

Synthèse bibliographique

Chapitre I : Analyse des besoins spécifiques

I.1	Les besoins spécifiques en équipements d'une ferme agricole.....	3
I.1.1	Ferme céréalière	3
I.1.2	Ferme d'élevage bovin laité.....	4
I.2	Les besoins spécifiques en termes de cultures	5
I.3	Trouver le bon équilibre pour une fertilisation optimale.....	5
I.4	Des outils complémentaires pour faire le bon diagnostic.....	7
I.5	Les éléments nutritifs des plantes.....	7
I.6	Principaux éléments nutritifs	8
I.6.1	L'azote.....	8
I.6.2	Le phosphore	8
I.6.3	Le potassium.....	8
I.7	Les sels minéraux	9
I.7.1	Le magnésium	9
I.7.2	Le calcium	9
I.7.3	Le fer	9
I.7.4	Le soufre.....	9
I.7.5	Les autres oligo-éléments	9

Chapitre II : Aménagement des infrastructures

II.1	Importance de l'aménagement des Infrastructures.....	13
II.2	Les différents types d'infrastructures	13
II.2.1	Bâtiments.....	13
II.2.2	Aménagements extérieurs	14
II.2.3	Autres infrastructures	14
II.3	Défis et enjeux	15

II.3.1	Durabilité des infrastructures	15
II.3.2	Financement	15
II.4	Innovations et nouvelles tendances	16
II.4.1	Utilisation de la technologie	16
II.4.2	Qu'est-ce que l'IoT ?	16
II.4.3	L'urgence d'une agriculture plus intelligente	16
II.4.4	L'IoT dans l'agriculture	17
II.5	Infrastructures intelligentes	17
II.5.1	Fermes intelligentes et intégration des données pour améliorer l'efficacité	17
II.5.2	Comment former les agriculteurs à utiliser ces technologies ?	18
II.5.3	Pour la formation des agriculteurs	19

Chapitre III : Gestion des ressources en eau

III.1	Généralité	23
III.2	Utilisation de l'eau dans l'agriculture	23
III.3	Adaptation agro-climatique et écarts de rendements	24
III.4	Efficacité de l'irrigation	26
III.5	Efficiences des systèmes d'irrigation au sein des exploitations agricoles	27
III.6	Nouvelles approches et nouveaux outils pour la gestion de l'eau	27
III.7	La gestion participative de l'irrigation	29
III.8	Impacts du changement climatique et mesures d'adaptation (bonnes pratiques)	30

Etude expérimentale

Chapitre I : matériel et méthodes

I.1	Objectif	35
I.2	Présentation de la ferme Si Mourad	35
I.2.1	Travail du sol	36
I.2.2	Conditions climatiques de la station	36
I.2.3	Plan de production 2023/2024	37
I.2.4	Equipement et matériel	37
I.3	Matériel	38
I.3.1	Verreries, appareils et produits utilisés	38
I.4	Méthodes	38
I.4.1	Echantillonnage	38
I.4.2	Les analyses physicochimiques	41

Partie troisième : Résultats et discussion

I.1	Interprétation des résultats.....	47
I.2	Discussion.....	53
	Conclusion.....	60
	Références bibliographiques	62
	Annexe I.....	68
	Annexe II.....	72

Introduction

Introduction

L'agriculture est un secteur vital pour l'économie, la société et l'environnement. Elle produit des biens et des services indispensables, comme l'alimentation, les fibres, l'énergie, la préservation des ressources naturelles, le maintien du tissu rural, etc. Cependant, l'agriculture fait face à de nombreux défis (**Omari, 2012**), comme le changement climatique, la sécurité alimentaire, la compétitivité, la réglementation, etc. Pour relever ces défis, il est nécessaire de développer des pratiques agricoles durables, respectueuses de l'environnement et des hommes, et adaptées aux besoins et aux attentes des consommateurs. Dans ce contexte, l'aménagement d'une ferme agricole est un projet qui vise à optimiser l'utilisation des terres, des ressources, des équipements et des infrastructures, afin de rendre l'exploitation plus performante, plus diversifiée, plus attractive et plus intégrée dans son territoire. L'aménagement d'une ferme agricole peut également avoir une dimension pédagogique, en permettant de sensibiliser le public, notamment les jeunes, aux enjeux et aux métiers de l'agriculture, et de favoriser le partage de savoirs et de savoir-faire entre les acteurs du monde rural.

Dans ce contexte, l'aménagement des fermes agricoles représente un levier important pour relever ces défis et assurer la pérennité et la compétitivité du secteur. Il s'agit d'un projet complexe qui vise à optimiser l'utilisation des terres, des ressources naturelles, des équipements et des infrastructures, afin de rendre l'exploitation plus performante, plus diversifiée et mieux intégrée dans son territoire.

Dans le même temps, l'internet, qui est déjà très populaire, et le big data fournissent suffisamment de ressources et de solutions pour maintenir, stocker et analyser les énormes quantités de données générées par les appareils connectés à l'internet. La gestion et l'analyse des données de l'internet des objets peuvent être utilisées pour automatiser des processus, prévoir des situations et améliorer de nombreuses activités, même en temps réel (**Maté et al, 2017 ; Marr, 2016**). En effet, l'IoT permet désormais aux exploitations agricoles d'augmenter leur efficacité opérationnelle en automatisant et optimisant les chaînes de production (**Haniche et Tabrait, 2019**). L'IoT apporte également des bénéfices indéniables pour la gestion des exploitations.

La méthode utilisée pour réaliser ce mémoire est basée sur une approche participative, qui implique les différents acteurs du projet, comme les agriculteurs, les habitants, les élus, les techniciens, les enseignants, les chercheurs, etc. Elle consiste à recueillir et à analyser les données relatives au contexte, aux besoins, aux attentes, aux contraintes et aux opportunités du projet, à travers des enquêtes, des entretiens, des observations, des ateliers, etc. Elle permet également de concevoir et de proposer des solutions adaptées, en tenant compte des aspects techniques, financiers, juridiques, organisationnels, etc. Elle vise enfin à évaluer et à valoriser le projet, en utilisant des indicateurs et des outils de suivi, de contrôle et de communication.

Le plan du mémoire est le suivant :

- Introduction générale : présentation du sujet, du contexte, de la problématique, des objectifs, de la méthode et du plan du mémoire.
- Chapitre 1 : Analyse des besoins spécifiques.
- Chapitre 2 : Aménagement des infrastructures.
- Chapitre 3 : Gestion des ressources en eau
- Conclusion générale : synthèse des résultats, discussion des limites, des perspectives et des recommandations du projet.

Première Partie

Synthèse bibliographique

Chapitre I
Analyse des besoins spécifiques

I.1 Les besoins spécifiques en équipements d'une ferme agricole

Comme mentionné précédemment, les besoins spécifiques en équipements d'une ferme agricole varient considérablement en fonction de plusieurs facteurs.

Pour vous donner une idée plus précise, voici quelques exemples de besoins en équipements pour deux types de production agricole courants.

I.1.1 Ferme céréalière

L'agriculture céréalière représente une part importante de la production agricole mondiale, fournissant des cultures essentielles comme le blé, le maïs, le riz et l'orge. Pour mener à bien les opérations d'une ferme céréalière de manière efficace et productive, un équipement agricole spécifique et performant est indispensable.

Une ferme céréalière moderne nécessite un parc de machines adapté à chaque étape du cycle de production, depuis la préparation des sols jusqu'à la récolte et au stockage des grains. Cette section détaille les principaux équipements requis, classés en deux catégories principales : les engins agricoles et le matériel de stockage/traitement.

Les engins agricoles constituent l'épine dorsale des travaux aux champs. Un tracteur puissant, doté d'une force de traction élevée, est essentiel pour tirer les outils attelés comme les charrues, hermes et semoirs. La moissonneuse-batteuse, véritable pièce maîtresse, permet une récolte efficace et rapide des céréales à maturité. Les pulvérisateurs assurent l'application précise d'intrants phytosanitaires si nécessaire.

Après la récolte, un équipement de stockage et de traitement performant prend le relais. Les silos à grains, tels que ceux de la marque Brock Grain Systèmes, offrent une solution sûre pour conserver les céréales dans des conditions optimales. Les séchoirs à grains permettent un séchage contrôlé pour une meilleure conservation.

Cette combinaison judicieuse d'engins et de matériel post-récolte (Tab 1) permet ainsi aux exploitants de fermes céréalières de maximiser leurs rendements et la qualité de leur production.

Tableau 1. Les principaux équipements pour une ferme céréalière

Engins agricoles (Traction, travail du sol, semis, traitement, récolte, irrigation, et.)	<ul style="list-style-type: none">• Tracteur agricole puissant (150 à 300 cv)• Moissonneuse-batteuse• Botteleuse• Charrues (socs, disques et à dents)• Semoir• Pulvérisateur• Pompes et systèmes d'irrigation divers
Matériels de stockage et de traitement des produits agricoles	<ul style="list-style-type: none">• Silo à grains :• Silo à grains Brock Grain Systèmes• Séchoir à grains

I.1.2 Ferme d'élevage bovin laité

L'élevage bovin constitue un pilier essentiel de nombreuses exploitations agricoles à travers le monde. Qu'il s'agisse de production laitière ou de viande bovine, les opérations requièrent des infrastructures et des équipements spécifiques pour assurer le bien-être des animaux, optimiser les rendements et répondre aux normes de qualité.

Au cœur d'une ferme d'élevage bovin se trouvent les bâtiments d'élevage, conçus pour offrir un environnement adapté aux besoins des bovins. Les étables à stabulation libre permettent aux animaux d'évoluer librement sur une litière paillée ou une aire bétonnée, favorisant leur confort et leur comportement naturel. Les étables à logettes, quant à elles, proposent des stalles individuelles équipées de barrières et de mangeoires, idéales pour la production laitière.

Le matériel d'élevage joue un rôle crucial dans la gestion quotidienne des troupeaux. Des mangeoires et des abreuvoirs robustes et hygiéniques garantissent une alimentation et un abreuvement adéquats. Les équipements de contention, tels que les chutes, les stalles et les barres, permettent une manipulation sécuritaire des animaux lors des soins vétérinaires ou des interventions nécessaires.

Dans le cas spécifique des fermes laitières, le matériel de stockage et de traitement du lait est indispensable. Les tanks à lait réfrigérés préservent la qualité du lait en vrac avant le ramassage. Des unités de conditionnement, comprenant des pasteurisateurs, des homogénéisateurs et des embouteilleuses, peuvent également être nécessaires pour la transformation et la vente directe du lait.

Un choix judicieux d'équipements adaptés aux besoins spécifiques de l'exploitation est essentiel pour assurer la rentabilité et la durabilité d'une ferme d'élevage bovin, tout en respectant les normes de bien-être animal et de qualité des produits (Tab 2).

Tableau 2. Les principaux équipements pour une d'élevage bovin laité

<p>• Bâtiments d'élevage</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Étable à stabulation libre : Bâtiment ouvert avec litière paillée ou aire bétonnée, idéal pour le bien-être animal • Étable à logettes : Stabulation individuelle avec barrières et mangeoires, adaptée à la production laitière
<p>Matériel d'élevage</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mangeoires et abreuvoirs : Adaptés à la taille et au nombre d'animaux, en acier inoxydable ou en plastique pour la durabilité et l'hygiène • Traiteuse à lait : • Matériel de contention : Chutes de contention, stalles de contention, barres de contention, pour des soins et une manipulation des animaux en toute sécurité
<p>Matériel de stockage et de traitement du lait</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tank à lait : Refroidisseur de lait en vrac, idéal pour conserver la qualité du lait avant le ramassage • Unité de conditionnement du lait : Pasteurisateur, homogénéisateur, embouteilleuse, pour la transformation et la vente du lait

I.2 Les besoins spécifiques en termes de cultures

Tout au long de l'histoire de l'humanité, la fertilité du sol a pris de plus en plus de place. Elle représentait une mesure de la capacité du sol à engendrer des plantes bénéfiques. Le mécanisme de la fertilité du sol n'a pas été compris pendant longtemps, il était lié aux dieux et faisait partie intégrante des différentes religions. C'est assez tard dans l'histoire de l'humanité qu'on a compris que la fertilité du sol est d'abord une question de nutrition des plantes, donc une question de physiologie végétale et non pas un problème surnaturel. La transformation du mout en vin a également été considérée comme un processus effectuée par des forces surnaturelles. Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), un génie brillant, a démontré que la fermentation était un processus chimique où le sucre est converti en éthanol et en dioxyde de carbone, et que cette transformation n'était pas causée par des forces surnaturelles. Les philosophes et les scientifiques ont grandement bénéficié de cette découverte fondamentale pour saisir que le mécanisme de la fertilité du sol était en relation avec un processus physico-chimique.

A l'époque de Lavoisier, la famine était un grand problème en Europe et, évidemment, il y fut confronté. Il a rapidement réalisé que le problème du manque d'engrais était crucial. En utilisant le fumier qu'il a produit en parquant des vaches et des moutons de juin à octobre, la nuit, sur un terrain défini qui était fertilisé par les excréments des animaux, il a doublé les récoltes et a démontré que les matières premières contribuent à la fertilité du sol. Lavoisier a commencé à penser vers la fin de sa vie, en 1792, que la nutrition des plantes n'était pas due à l'humus (Boulaie, 1994).

I.3 Trouver le bon équilibre pour une fertilisation optimale

En utilisant la fertilisation raisonnée, on peut préserver l'environnement tout en combinant rendement et qualité des cultures. Une gestion incorrecte de l'azote peut entraîner

des répercussions néfastes tant pour la plante que pour le sol (**fig. 1**). Parmi ces conséquences, on peut dégager:

- Le manque d'azote peut entraîner une baisse des rendements, des organes plus petits, une fructification précoce et une mauvaise qualité, ce qui signifie que la plante ne peut se contenter de ses réserves pour subvenir à ses besoins.
- Après la récolte, un excès d'azote entraîne la formation de dépôts azotes excessifs dans le sol, ce qui entraîne la contamination des eaux souterraines.
- Un excès de nitrate d'azote entraîne une plus grande sensibilité aux insectes et à certaines maladies.

Dans la plante, les signes associés à la présence d'azote ne sont pas linéaires. C'est la raison pour laquelle il y a différents niveaux, allant de la carence aiguë à l'excès toxique. Les symptômes de la carence aiguë sont très évidents : la plante est petite et les feuilles passent du vert jaunâtre à l'orange avant de tomber, les rendements sont faibles et la qualité médiocre. Lorsqu'il y a une subcarence, il n'y a pas de signes manifestes de carence, mais les rendements diminuent et la qualité est moins optimale. Lorsqu'il s'agit d'un approvisionnement optimal, la croissance et la qualité sont idéales. Dans le domaine de la consommation de luxe, il y a une croissance et une qualité. Finalement, dans une situation de toxicité, c'est-à-dire d'un surplus d'approvisionnement, la croissance et la qualité sont réduites (**Démarques et Aouriri, 2023**).

Il est donc difficile d'établir un diagnostic précis quant à la disponibilité en azote en se basant uniquement sur les symptômes et, souvent, lorsque le symptôme est observé, il est déjà trop tard pour la culture. Il est donc conseillé de prévoir les éventuelles lacunes en réalisant régulièrement des analyses de sol.

Les besoins des plantes peuvent être mieux appréhendés grâce à trois outils : les analyses de sols, les analyses de plantes et les analyses visuelles.

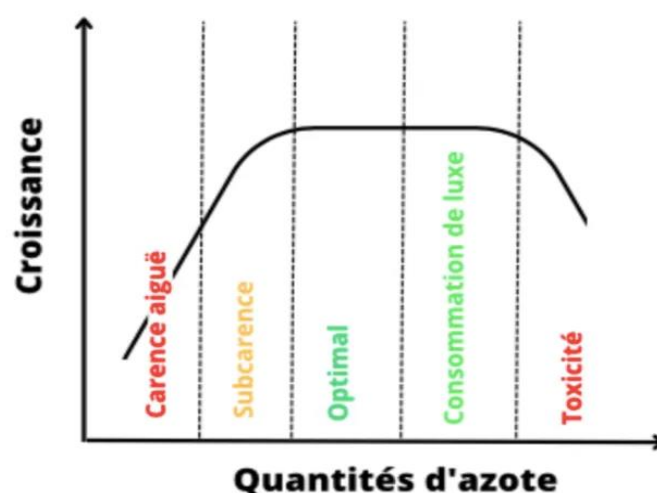


Figure 1. Courbe de croissance en réponse de la quantité d'azote disponible (**Démarques et Aouriri, 2023**).

I.4 Des outils complémentaires pour faire le bon diagnostic

Le choix des engrais azotés est influencé par de nombreux éléments : les conditions météorologiques, l'espèce cultivée, les caractéristiques du sol, l'irrigation, les cultures antérieures, les méthodes de semis, ... L'activité de cultiver est complexe et demande de nombreuses interventions sur la culture et son environnement. Ces interventions se déroulent en différentes étapes tout au long de la saison agricole. Il existe un parcours technique spécifique à chaque culture qui résume le programme prévu ainsi que les étapes à suivre pour atteindre les objectifs de performance. Il est possible d'adapter cet itinéraire en fonction des conditions météorologiques et des spécificités de l'année en cours, en modifiant la date de semis ou en modifiant le choix des variétés, par exemple. La description de chaque intervention effectuée sur une parcelle spécifique permet de garantir un suivi des tâches et des produits utilisés, ce qui peut également vous être utile pour la traçabilité (**Démarques et Aouriri, 2023**).

Heureusement, il y a des ressources disponibles pour mettre en œuvre la stratégie la plus appropriée à vos besoins. Pour vous accompagner dans l'adaptation de l'itinéraire technique, les chambres d'agriculture offrent, par exemple, des fiches techniques et des informations réglementaires adaptées au contexte pédoclimatique de votre région. Des centres techniques peuvent également vous soutenir en offrant une assistance technique sur mesure afin d'améliorer vos méthodes. Des outils informatiques peuvent également être utilisés pour représenter vos cultures et vous accompagner dans la gestion de l'itinéraire technique (**Démarques et Aouriri, 2023**).

I.5 Les éléments nutritifs des plantes

Afin de se développer et produire des fruits, une plante nécessite de l'eau, de la lumière et des nutriments.

La photosynthèse est le processus par lequel le végétal produit sa matière organique à partir d'eau et de gaz carbonique (CO₂) grâce à l'énergie solaire. Elle cherche dans le sol les minéraux et l'eau dont elle a besoin pour se développer.

La plante extrait aussi des éléments nécessaires en quantités plus faibles (calcium, magnésium, soufre...) Et des oligo-éléments en quantités très faibles (fer, manganèse, zinc, cuivre, bore, molybdène...).

La plante nécessite principalement l'azote, le phosphore et le potassium comme éléments nutritifs. Ils font partie des éléments considérés comme essentiels (dont la plante a besoin en grande quantité) et sont les éléments les plus susceptibles de manquer dans un sol (**Menger, 2000**).

Certaines espèces sont plus gourmandes en certains éléments nutritifs que d'autres. Par exemple :

- Cultures exigeantes en azote : gazon, graminées et bambous, arbustes, plantes vertes d'intérieur, légumes feuilles.
- Cultures exigeantes en phosphore : principalement les espèces à fleurs et à fruits et légumes graines.
- Cultures exigeantes en potasse : arbres fruitiers, arbustes à fleurs, fraisiers, rosiers, bulbes, légumes racines.

Il faut donc tenir compte des besoins spécifiques de chaque plante, pour éviter les conséquences liées à des carences, d'excès ou de déséquilibre. Par exemple :

- Des feuilles décolorées, pales, peuvent indiquer un manque d'azote. Les feuilles jaunes, aux nervures bien vertes, indiquent une carence en fer (chlorose).
- Un apport en excès ou en mauvaise condition peut créer une brûlure directe du feuillage.
- Des grappes de fleurs qui ne se transforment pas en fruits (phénomène de coulure).
- Un apport excessif d'azote sur les tomates provoque un excès de la végétation au détriment de la floraison et de fructification.

•

I.6 Principaux éléments nutritifs

I.6.1 L'azote

L'azote (n) participe principalement au développement du feuillage et des parties aériennes des plantes. Si les plantes manquent d'azote, elles sont lentes à se développer, leur feuillage est vert clair ou jaunâtre.

Il y a des engrais simples qui ne contiennent que de l'azote. Il se trouve principalement dans l'urée, le sulfate d'ammoniaque, l'ammoniacale ou le nitrate de chaux. L'azote est principalement présent dans les engrais qui stimulent la croissance des plantes et la formation de tissus verts. Généralement, ils sont conseillés pour les plantes vertes, sans fleurs, ou pour les phases de croissance des plantes à fleurs, potagères ou fruitières (**Ruark et Bockheim, 1988**).

I.6.2 Le phosphore

Le phosphore (p) favorise la croissance des racines, la floraison et la production de fruits. En l'absence de phosphore, les plantes ont des feuillages foncés, rouges ou avec des taches rouges, la floraison est faible et la maturation des fruits est longue.

La principale source de phosphore est le superphosphate simple ou triple. Cette substance est généralement le principal composant de certains engrais visant à stimuler la reprise des plantes ou des jeunes boutures peu racinées. Au-delà de ce cas, le phosphore est rarement employé en tant qu'élément unique ou comme élément principal. On le retrouve principalement dans des engrais équilibrés (type 20-20-20) ou azotes.

I.6.3 Le potassium

Le potassium (k) joue un rôle essentiel dans la circulation de la sève et dans l'assimilation des nutriments par les végétaux. Sa résistance au gel, aux ravageurs et maladies, la couleur et la saveur des fruits, ainsi que la préservation des légumes racines, sont améliorées par cela. Les engrais pour plantes fleuries ou les engrais spécialisés qu'on trouve dans le commerce, tels que les engrais à rosiers, ont géraniums, agrumes ou pour les arbres fruitiers, contiennent grandement du potassium. Il peut servir en complément d'un engrais azote, à l'approche et pendant la floraison des plantes ou pour favoriser la fructification ou la production de légumes.

I.7 Les sels minéraux

En plus de ces trois composants indispensables à la croissance des plantes, de nombreux éléments et oligo-éléments présents sous forme de traces jouent également un rôle crucial dans le développement et la sante des plantes. Leur rôle est mieux compris grâce à quelques éléments de biologie et de biochimie (**Ruark et Bockheim, 1988**).

I.7.1 Le magnésium

Cette substance fait partie des composants de la chlorophylle et joue donc un rôle crucial dans la photosynthèse. Le magnésium joue un rôle métabolique crucial, mais en général, le sol est naturellement assez abondant en cet élément pour satisfaire les besoins des plantes. Les engrais spécifiques pour les rosiers et de plus en plus fréquemment pour les légumes (formule npk+mg) contiennent généralement du magnésium.

I.7.2 Le calcium

De plus, la présence naturelle du calcium dans le sol permet de garantir les quantités de calcium nécessaires pour les besoins métaboliques des végétaux. Généralement, le calcium est ajouté au sol afin d'améliorer sa structure ou de modifier son acidité (propriétés tampon du calcium).

I.7.3 Le fer

Il s'agit d'un composant dont le manque entraîne des conséquences bien connues, telles qu'un jaunissement de la plante (chlorose ferrique). Ce manque est causé par un obstacle à l'assimilation du fer dans les sols contenant du calcaire actif, a ph élevé. Ces lacunes peuvent être comblées par l'ajout de fer chélate. Il est recommandé de cultiver les plantes présentant des chloroses chroniques en pot dans les régions où le sol n'est pas approprié.

I.7.4 Le soufre

Le soufre joue un rôle essentiel dans l'assimilation des vitamines par les végétaux, en tant que composant des acides aminés et des protéines. Il contribue également à l'odeur et au goût de certaines plantes ou légumes (ail, oignon, chou). Les végétaux absorbent principalement le soufre à partir des sulfates. Il est généralement peu absorbé par les sols et nécessite un apport supplémentaire. Il est principalement présent dans les fumiers ou dans les engrais minéraux, sous la forme de sulfate d'ammoniaque, de super sulfate de chaux simple ou de sulfate de potasse (qui apporte aussi du potassium).

I.7.5 Les autres oligo-éléments

Les équilibres métaboliques des végétaux sont également influencés par le cuivre, le bore, le zinc, le molybdène ou le manganèse. Ces éléments sont indispensables en quantités très faibles, et la plupart du temps, ils sont abondants dans le sol ou dans l'eau pour répondre aux besoins des plantes.

Chapitre II
Aménagement des infrastructures

II. L'aménagement des infrastructures

L'aménagement des infrastructures d'une ferme agricole englobe la conception, la mise en place et l'organisation des éléments physiques nécessaires au bon fonctionnement de l'exploitation. Ces infrastructures sont essentielles pour soutenir les activités agricoles, qu'il s'agisse de la production de cultures, de l'élevage d'animaux ou du stockage des récoltes.

II.1 Importance de l'aménagement des Infrastructures

1. Optimisation de l'espace

- Une ferme bien aménagée permet d'utiliser efficacement l'espace disponible. Les bâtiments, les routes, les clôtures et les zones de culture doivent être disposés de manière à minimiser les pertes d'espace et à faciliter les opérations quotidiennes.

2. Productivité et rentabilité

- Des infrastructures bien conçues contribuent à la productivité de l'exploitation. Par exemple, des étables adaptées aux besoins des animaux permettent d'améliorer leur santé et leur production.
- L'efficacité des systèmes d'irrigation, des entrepôts et des silos influence directement la rentabilité de la ferme.

3. Confort et bien-être

- Les infrastructures doivent offrir un environnement sûr et confortable pour les travailleurs et les animaux. Des étables bien ventilées, des aires de stockage propres et des chemins praticables sont essentiels.

4. Durabilité et environnement

- L'aménagement doit prendre en compte les principes de durabilité. Cela inclut la gestion des eaux pluviales, l'utilisation responsable des ressources naturelles et la réduction de l'empreinte carbone.

II.2 Les différents types d'infrastructures

Les infrastructures agricoles englobent un large éventail de structures et de systèmes qui sont essentiels au bon fonctionnement d'une exploitation agricole. On peut les classer en plusieurs catégories

II.2.1 Bâtiments

- **Étables** : Abritent les animaux d'élevage, tels que les vaches, les porcs, les volailles, etc. Elles doivent être conçues pour répondre aux besoins spécifiques de chaque espèce en termes d'espace, de ventilation, de température et d'accès à l'eau et à la nourriture.
- **Hangars** : Utilisés pour stocker le matériel agricole, les récoltes, le foin et autres produits. Ils doivent être suffisamment grands et bien ventilés pour protéger les biens entreposés des intempéries et des nuisibles.
- **Silos** : Stockent le grain et autres aliments pour le bétail. Ils doivent être conçus pour empêcher la contamination et les pertes, et pour faciliter l'accès au contenu.

- **Maisons d'habitation:** Abrisent les agriculteurs et leurs familles. Elles doivent être confortables et sécuritaires, et répondre aux besoins de la vie quotidienne.

II.2.2 Aménagements extérieurs

- **Clôtures:** Délimitent les champs et les enclos, et empêchent le bétail de s'échapper et les animaux sauvages d'entrer. Elles doivent être solides et résistantes aux intempéries.
- **Chemins:** Permettent l'accès aux différentes parties de l'exploitation en véhicule ou à pied. Ils doivent être bien entretenus et praticables par tous les temps.
- **Systèmes d'irrigation:** Fournissent de l'eau aux cultures en cas de besoin. Il existe différents types de systèmes d'irrigation, tels que l'irrigation par aspersion, l'irrigation goutte-à-goutte et l'irrigation par gravité.
- **Étangs et bassins:** Stockent l'eau d'irrigation, d'abreuvement pour le bétail et pour la pêche. Ils peuvent également jouer un rôle dans la gestion des eaux pluviales et la conservation de la biodiversité.

II.2.3 Autres infrastructures

- **Réseaux d'électricité et d'eau :** Fournissent l'énergie et l'eau nécessaires aux opérations agricoles. Ils doivent être fiables et répondent aux besoins de l'exploitation.
- **Systèmes de communication :** Permettent aux agriculteurs de rester en contact avec les travailleurs, les clients et les fournisseurs. Ils peuvent inclure des téléphones, des radios et des ordinateurs.
- **Équipements agricoles :** Tracteurs, moissonneuses, charrues et autres machines agricoles sont essentiels pour effectuer les travaux des champs. Ils doivent être bien entretenus et utilisés en toute sécurité.

En plus de ces infrastructures physiques, il est également important de considérer les infrastructures immatérielles telles que :

- **Le savoir-faire et les compétences des agriculteurs :** La gestion d'une exploitation agricole réussie nécessite des connaissances et des compétences dans des domaines tels que la production animale, la culture des plantes, la gestion des ressources et la gestion des affaires.
- **L'accès aux marchés:** Les agriculteurs doivent avoir accès aux marchés pour vendre leurs produits. Cela peut inclure des marchés locaux, des marchés régionaux et des marchés internationaux.
- **Les politiques et les réglementations:** Les politiques et réglementations gouvernementales peuvent avoir un impact significatif sur les opérations agricoles. Il est important que les agriculteurs soient conscients de ces politiques et réglementations et qu'ils puissent s'y conformer.

II.3 Défis et enjeux

II.3.1 Durabilité des infrastructures

Durabilité des infrastructures est un enjeu crucial pour la préservation de l'environnement. Voici quelques principes et pratiques pour concevoir des infrastructures durables et respectueuses de l'environnement dans une ferme :

1. **Choix des matériaux** : Optez pour des matériaux durables, recyclés ou renouvelables. Par exemple, privilégiez le bois certifié, les bétons bas carbone et les aciers recyclés.
2. **Conception bioclimatique** : Concevez les bâtiments et les installations en tenant compte du climat local. Utilisez des techniques passives pour maximiser l'utilisation de la lumière naturelle, la ventilation et la régulation thermique.
3. **Gestion de l'eau** : Collectez et réutilisez l'eau de pluie. Installez des systèmes d'irrigation efficaces pour minimiser le gaspillage.
4. **Énergie renouvelable** : Intégrez des sources d'énergie renouvelable comme les panneaux solaires, les éoliennes ou la biomasse. Réduisez la dépendance aux combustibles fossiles.
5. **Gestion des déchets** : Mettez en place des systèmes de tri et de recyclage. Réduisez les déchets à la source en favorisant les matériaux réutilisables.
6. **Mobilité durable** : Prévoyez des infrastructures pour les transports doux (vélos, piétons) et encouragez l'utilisation de véhicules électriques.
7. **Biodiversité** : Intégrez des espaces verts, des haies et des arbres pour favoriser la biodiversité. Pensez à la faune et à la flore locales.
8. **Entretien et rénovation** : Planifiez l'entretien régulier des infrastructures pour prolonger leur durée de vie. Lors de rénovations, améliorez l'efficacité énergétique et la durabilité.

En adoptant ces pratiques, vous contribuerez à un avenir plus durable et respectueux de l'environnement.

II.3.2 Financement

Les infrastructures jouent un rôle essentiel dans le développement économique et social, mais elles sont confrontées à plusieurs défis en matière de financement et de maintenance. Voici quelques-uns de ces défis :

1. **Financement insuffisant** : Le financement des infrastructures est souvent insuffisant pour répondre aux besoins croissants. Les projets d'infrastructures nécessitent des investissements considérables, et les fonds publics et privés disponibles ne sont pas toujours à la hauteur.
2. **Impact de la pandémie** : La pandémie de Covid-19 a eu un effet négatif sur le financement des infrastructures. En 2020, le total des engagements en faveur du financement des infrastructures en Afrique a atteint 81 milliards de dollars américains, soit 4 milliards de dollars de moins que les 85 milliards de dollars enregistrés en 2019. Cela est dû en grande partie à l'impact de la pandémie et à des financements moindres de la Chine (AD Bank, 2022).

3. **Déficit de financement** : Le déficit de financement creuse l'écart entre les investissements annuels nécessaires pour fournir des services d'infrastructure de base aux populations africaines et les montants de financement réels engagés. En 2019-2020, le financement des infrastructures sur le continent s'est chiffré en moyenne à 83 milliards de dollars, nettement inférieur au point culminant de 100,8 milliards de dollars atteint en 2018 (**AD Bank, 2022**).
4. **Vieillesse des infrastructures** : De nombreuses infrastructures sont vieillissantes et nécessitent une maintenance régulière. Le manque de financement pour la rénovation et la modernisation peut entraîner des défaillances et des risques pour la sécurité.
5. **Surendettement** : La réduction de l'activité économique due à la pandémie et la baisse des exportations ont eu un impact négatif sur le poids de la dette de nombreux pays africains. Certains sont désormais en situation de surendettement.
6. **Implication du secteur privé** : Le financement des infrastructures nécessite une collaboration entre les secteurs public et privé. Attirer des investissements privés tout en garantissant l'intérêt public est un défi complexe.
7. **Planification à long terme** : La planification à long terme est essentielle pour assurer un financement durable des infrastructures. Les gouvernements doivent élaborer des stratégies à long terme pour éviter les crises de financement.

En somme, le financement et la maintenance des infrastructures sont des enjeux critiques pour le développement durable et la qualité de vie des populations. Il est essentiel de trouver des solutions innovantes et durables pour relever ces défis.

II.4 Innovations et nouvelles tendances

II.4.1 Utilisation de la technologie

L'Internet des objets (IoT) est une technologie qui a pénétré de nombreux aspects de notre vie, de la santé à la domotique, en passant par l'automobile et les villes intelligentes. Il est logique que l'IoT trouve également son application dans l'agriculture, améliorant ainsi presque toutes les facettes de ce secteur (**Haniche et Tabrait, 2019**).

II.4.2 Qu'est-ce que l'IoT ?

L'IoT se réfère à l'ensemble des capteurs et objets connectés à Internet qui informent sur l'état des appareils auxquels ils sont liés. Ces appareils intelligents transfèrent des données sur un réseau pour une analyse en temps réel ou a posteriori. En 2020, on comptait près de 12 milliards d'objets connectés à l'échelle mondiale (**Haniche et Tabrait, 2019**).

II.4.3 L'urgence d'une agriculture plus intelligente

Avec la croissance exponentielle de la population mondiale, nous devons produire 70 % de nourriture en plus d'ici 2050 (**Timothy, 2013**). Cependant, la réduction des terres agricoles et l'épuisement des ressources naturelles rendent l'amélioration du rendement agricole critique. La disponibilité limitée de ressources telles que l'eau douce et les terres arables, ainsi que le ralentissement des rendements de certaines cultures de base, ont exacerbé ce phénomène. De plus, la diminution de la main-d'œuvre agricole est une préoccupation majeure.

II.4.4 L'IoT dans l'agriculture

Dans le monde agricole, l'IoT prend la forme de capteurs reliés à Internet qui collectent des mesures environnementales et mécaniques. Voici comment l'IoT améliore l'agriculture :

1. **Surveillance environnementale** : Les capteurs surveillent les conditions météorologiques, l'humidité du sol, la qualité de l'air, etc. Ces données aident les agriculteurs à prendre des décisions éclairées.
2. **Gestion de l'irrigation** : L'IoT permet une irrigation précise en fonction des besoins réels des cultures, réduisant ainsi le gaspillage d'eau.
3. **Suivi du bétail** : Des colliers intelligents équipés de capteurs surveillent la santé et la localisation des animaux.
4. **Maintenance prédictive** : Les capteurs installés sur les machines agricoles recueillent des données sur l'état des actifs, permettant une maintenance prédictive et la réduction des temps d'arrêt (**Haniche et Tabrait, 2019**).

II.5 Infrastructures intelligentes

II.5.1 Fermes intelligentes et intégration des données pour améliorer l'efficacité

L'intégration de la technologie dans l'agriculture est essentielle pour améliorer l'efficacité, la productivité et la durabilité. Voici comment les fermes intelligentes et l'intégration des données contribuent à cette évolution :

1. **Utilisation de capteurs**
 - Les capteurs surveillent divers paramètres tels que l'eau, la lumière, l'humidité, la température et la composition du sol.
 - Ils fournissent des données en temps réel pour une meilleure prise de décision.
2. **Technologies de télécommunications**
 - Les réseaux fiables et le GPS sont utilisés pour la communication entre les appareils.
 - L'intégration de ces technologies permet de suivre et de gérer les ressources agricoles de manière plus précise.
3. **Automatisation**
 - Les données collectées par les capteurs alimentent des systèmes automatisés.
 - Cela permet d'optimiser les opérations telles que l'irrigation, la fertilisation et la gestion des cultures.
4. **Agriculture de précision**
 - L'utilisation de l'ensemble de l'industrie de l'agriculture intelligente se classe généralement en trois catégories :
 - **Tracking** : Suivi des données pour une meilleure gestion.
 - **Monitoring** : Surveillance en temps réel des conditions agricoles.
 - **Automatisation** : Utilisation de logiciels pour gérer les fermes et les champs intelligents.
5. **Réduction des coûts et optimisation des ressources**

- L'intégration des données permet d'optimiser l'utilisation des ressources naturelles (eau, sol, énergie).
- Elle réduit les pertes et les gaspillages.

6. Pratiques durables

- Les fermes intelligentes favorisent des pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement.
- L'analyse des données aide à minimiser l'utilisation d'intrants tels que les pesticides et les engrais.

En somme, les fermes intelligentes tirent parti des avancées technologiques pour améliorer la productivité tout en préservant les ressources naturelles. Elles sont un pas vers une agriculture plus efficace et durable.

II.5.2 Comment former les agriculteurs à utiliser ces technologies ?

La formation des agriculteurs à l'utilisation des technologies agricoles est essentielle pour améliorer leur efficacité et leur productivité. Voici quelques approches pour former les agriculteurs :

1. Enseignement agricole

- L'enseignement agricole, qu'il s'agisse d'établissements techniques ou supérieurs, joue un rôle clé dans la formation des futurs professionnels de l'agriculture et de la forêt.
- Les programmes et diplômes sont rénovés pour intégrer des notions d'agroécologie, de performance économique, environnementale et sociale.
- Des heures supplémentaires en agronomie et en écologie sont ajoutées pour sensibiliser les étudiants aux méthodes de production alternatives.

2. Expérimentation au sein des lycées

- Les lycées agricoles expérimentent des pratiques agro-écologiques.
- Ils réduisent l'utilisation d'intrants, augmentent l'autonomie fourragère et protéique dans les élevages, et développent l'agroforesterie.

3. Diffusion des pratiques

- Les établissements agricoles sont des outils d'innovation et de diffusion de nouvelles pratiques.
- Ils organisent des visites d'exploitations, des ateliers technologiques et des rencontres avec des professionnels du secteur.

4. Formation Continue

- Proposer des formations continues aux agriculteurs et à leurs conseillers.
- Ces formations abordent les nouvelles technologies, les pratiques durables et les évolutions du secteur.

5. Partenariats avec les entreprises

- Collaborer avec les entreprises du secteur agricole pour organiser des sessions de formation.
- Les agriculteurs peuvent apprendre directement des experts et des fournisseurs de technologies.

6. Plateformes en ligne et applications

- Développer des plateformes en ligne et des applications mobiles pour la formation à distance.
- Ces outils permettent d'accéder à des ressources pédagogiques, des vidéos et des tutoriels.

II.5.3 Pour la formation des agriculteurs

Pour la formation des agriculteurs, voici quelques technologies spécifiques qui peuvent être recommandées :

1. Agroécologie et agriculture de précision

- L'**agroécologie** est une approche durable qui intègre les principes écologiques dans les pratiques agricoles. Elle favorise la biodiversité, la rotation des cultures et la réduction des intrants chimiques.
- L'**agriculture de précision** utilise des technologies telles que les capteurs, les drones et les systèmes d'information géographique (SIG) pour optimiser l'utilisation des ressources (eau, engrais, pesticides) et améliorer les rendements.

2. Technologies numériques

- Les **technologies numériques** jouent un rôle croissant dans l'agriculture. Elles incluent les applications mobiles, les plateformes en ligne et les logiciels de gestion agricole.
- Les agriculteurs peuvent apprendre à utiliser ces outils pour la gestion des cultures, la surveillance des conditions météorologiques, la traçabilité des produits, etc.

3. Formation sur les machines agricoles:

- La connaissance des machines agricoles est essentielle. Les agriculteurs doivent savoir utiliser et entretenir les tracteurs, les moissonneuses-batteuses, les pulvérisateurs, etc.
- Des cours spécifiques sur les machines agricoles peuvent être proposés.

4. Formation sur les cultures spécifiques:

- Selon la région et le type de culture, des formations spécifiques peuvent être recommandées. Par exemple :
 - Pour les **cultures céréalières**, des connaissances sur les semences, la fertilisation et la protection des cultures sont importantes.
 - Pour les **cultures maraîchères**, des compétences en irrigation, en gestion des ravageurs et en récolte sont nécessaires.

5. Formation sur la gestion d'exploitation

- Les agriculteurs doivent apprendre à gérer leur exploitation de manière efficace. Cela inclut la planification des cultures, la gestion des ressources, la comptabilité et la commercialisation.

6. Formation sur la durabilité

- Sensibiliser les agriculteurs aux pratiques durables, telles que la conservation des sols, la gestion de l'eau et la réduction de l'empreinte carbone.

Chapitre III
Gestion des ressources en eau

III. Gestion des ressources en eau

III.1 Généralité

Le manque d'eau constitue aujourd'hui un problème urgent susceptible d'imposer à la région méditerranéenne des contraintes importantes pour son développement et sa sécurité alimentaire. Selon le Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau (WWAP) créé par l'UNESCO (**WWAP, 2015**), à moins d'un changement significatif des politiques au niveau mondial, seuls 60 % des besoins en eau de notre monde pourront être assurés en 2030. Le bassin méditerranéen est l'une des régions les plus touchées. Elle ne compte que 3 % des ressources mondiales d'eau douce mais abrite plus de 50 % des populations dites « pauvres en eau », soit environ 180 de ses 460 millions d'habitants (**Châtel et al., 2014**).

L'ensemble de la région possède un stock de ressources renouvelables équivalent à 1 452 km³, distribué de manière extrêmement peu homogène entre le Nord (74 %), l'Est (21 %) et le Sud (5 %) (**Ferragina, 2010**). Le manque d'eau est de plus appelé à s'intensifier dans cette région déjà fragilisée par la croissance économique et démographique, la désertification et les besoins qu'exige la protection de l'environnement. En outre, la hausse des températures imposera de nouveaux stress sur des ressources en eau douce limitées, la région étant identifiée comme particulièrement à risque sous l'effet du changement climatique. Le manque d'eau peut être dû non seulement à une pénurie de la ressource, mais aussi à une infrastructure d'approvisionnement inadaptée et à une mauvaise gestion de l'eau.

Certains n'y voient qu'une pénurie physique en termes absolus de stock quand d'autres soutiennent qu'on peut trouver ses causes dans la pauvreté, les inégalités et les mauvaises politiques de gestion. La disponibilité de la ressource en eau dans le bassin méditerranéen a déjà subi de fortes dégradations qui représentent un risque important pour la sécurité alimentaire et l'environnement.

III.2 Utilisation de l'eau dans l'agriculture

L'agriculture est le secteur le plus aquavore dans la région (au nord comme au sud de la Méditerranée) : elle utilise en moyenne 64 % de l'eau consommée (le chiffre varie de 50 % à 90 % dans certains pays), suivie par l'industrie (dont les secteurs de l'énergie et du tourisme) (22 %) et la consommation domestique (14 %) (**GWP, 2010**). D'ici 2050, l'agriculture devra produire 60 % de nourriture en plus au niveau mondial et 100 % en plus dans les pays en voie de développement (**Alexandratos et Bruinsma, 2012**). Dans de nombreuses zones à faible pluviométrie du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord, une grande partie de l'eau disponible est déjà prélevée, et 80 % à 90 % est consacrée à l'agriculture. De ce fait, les rivières et les aquifères déclinent au-delà de leurs niveaux soutenable (**FAO, 2011a**). Le secteur agricole devra donc améliorer la productivité de ses cultures rapportées à l'eau consommée pour espérer garantir la sécurité alimentaire. Produire plus avec moins d'eau semble être le défi majeur des décennies à venir.

L'agriculture peut être tenue à la fois pour responsable et victime du manque d'eau. De tous les secteurs de l'économie, elle est celui qui y est en effet le plus sensible. Les pays du bassin méditerranéen dépendent de plus en plus des eaux souterraines, une source importante

d'eau dans toute la région, pour faire face à la croissance rapide du secteur agricole. L'utilisation de technologies nouvelles permet un rythme de prélèvement largement supérieur à celui de la recharge. Il en découle une diminution rapide des réserves aquifères, provoquant des intrusions salines dans les zones côtières accompagnées de phénomènes de désertification. En outre, la dangereuse pollution des nappes phréatiques par infiltration des produits chimiques agricoles a diminué la qualité des eaux souterraines ainsi que des cours d'eau qu'elles alimentent.

III.3 Adaptation agro-climatique et écarts de rendements

En 2000, environ un quart de la superficie récoltée mondiale était irriguée, avec une intensité de culture (jachères comprises) de 1,12, et plus de 50 % des terres émergées étaient adaptées à la production pluviale, selon les données de MIRCA2000 (**Portmann et al., 2010**). Le riz est la première culture dans les zones irriguées occupant 1 million de km², tandis que le blé et le maïs sont les cultures les plus importantes dans les zones pluviales, s'étendant respectivement sur 1,5 et 1,2 million de km² (**Portmann et al., 2010**).

La proportion totale de cultures pluviales varie de 95 % en Afrique subsaharienne à 90 % en Amérique du Sud, 75 % en Afrique du Nord et au Proche-Orient, 65 % et 60 % en Extrême-Orient et en Asie du Sud (**Wani et al., 2009**). Bien que les surfaces irriguées occupent un espace très réduit par rapport aux cultures pluviales, elles contribuent à hauteur de 40 % à la production agricole mondiale (**FAO, 2002**). Selon la FAO (2002), le rendement maximal des cultures céréalières en zone irriguée est plus de deux fois supérieur à celui des cultures pluviales. Même une culture irriguée à faible taux d'intrants est plus productive qu'une production pluviale à haut niveau d'intrants (Fig.02).

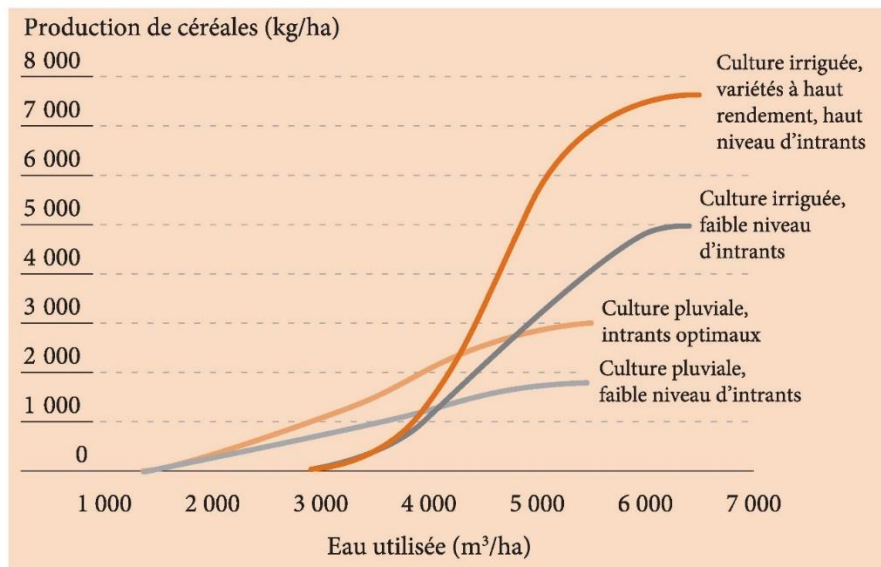


Figure 2. Rendements et besoins en eau des cultures irriguées et pluviales FAO (2002).

Dans les zones arides et semi-arides, la pluviométrie est l'un des obstacles majeurs à l'agriculture pluviale. Cependant, il ne tient pas tant à la faible pluviométrie annuelle qu'à son extrême variabilité qui se traduit par des événements pluvieux rares de forte intensité, et une mauvaise répartition spatiale et temporelle des précipitations (**Rockstrom et al., 2010**). La sécheresse et la dégradation des sols limitent l'expansion et l'accroissement de la production

des systèmes agricoles. Ce phénomène est également dû à une mauvaise efficacité de l'utilisation de l'eau et à l'absence de politiques à même d'améliorer la situation sur le court et le long terme.

La gestion inadéquate des ressources naturelles, associée à un déficit de connaissance des exploitants, au manque d'appui politique et d'infrastructures comme les marchés et l'accès au crédit, à la faiblesse des investissements dans l'agriculture pluviale, au recours à des cultivars traditionnels, au faible usage d'engrais, à une utilisation peu efficace des eaux de pluie, aux nuisibles, aux maladies ainsi qu'à l'absence d'approche intégrée et compartimentée en termes de gestion explique en grande partie la faiblesse du rendement des exploitations et les forts écarts de rendements dans l'agriculture pluviale (Wani *et al.*, 2009). Les principales contraintes en matière d'agriculture, en particulier pluviale, sont résumées dans la Figure 03.

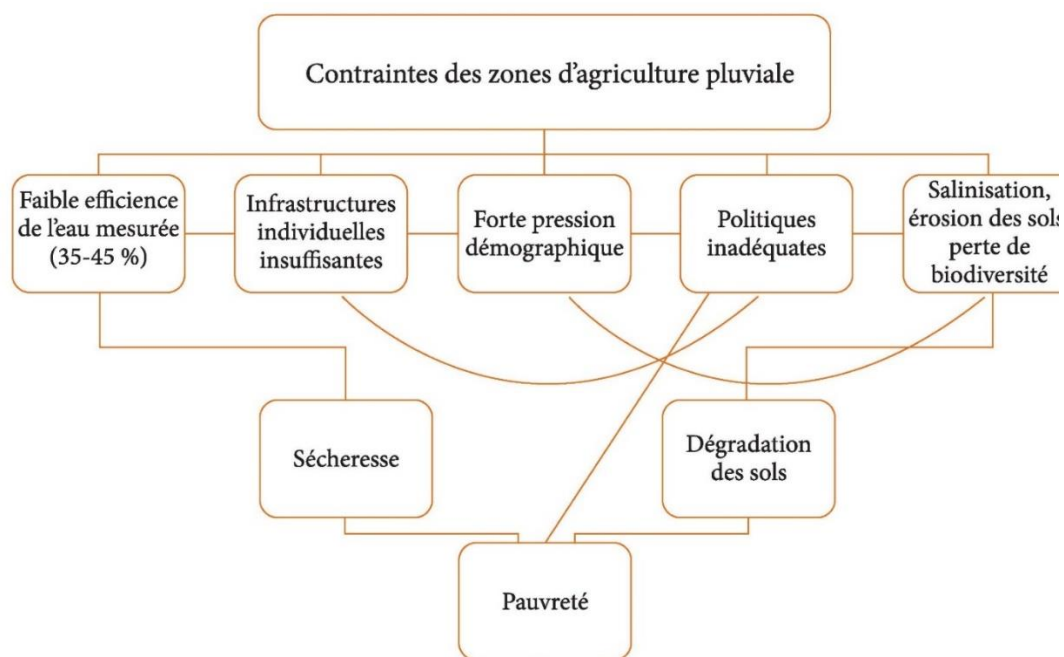


Figure 3. Contraintes des zones d'agriculture pluviale (Rockstrom *et al.*, 2007; Wani *et al.*, 2009).

L'impact direct de l'adaptation agro-climatique sur les rendements obtenus dans l'agriculture pluviale ainsi que le rôle crucial de la gestion des ressources en eau apparaissent dès lors clairement. Diverses méthodes et modes de classification des systèmes s'appuient sur un ou plusieurs critères dont la pluviométrie, les températures, les principaux systèmes agricoles, les différences en termes de caractéristiques écologiques, etc. Le Rapport sur l'eau no 41 de la FAO souligne le besoin de solutions « intelligentes » et réalistes de façon à réduire au maximum les écarts de rendement dans les petits et grands systèmes culturels à travers le monde. Afin d'avancer dans cette direction, les étapes suivantes doivent être observées : définition et techniques de mesure et de modélisation des rendements à différents niveaux (réel, atteignable, potentiel) et différentes échelles spatiales (champ, ferme, région, planète) et temporelles (court et long termes) ; identification des causes des écarts entre les niveaux de rendement ; solutions de gestion pour résorber ces écarts autant que possible ; politiques d'aide à l'adoption de technologies efficaces en la matière.

Face à la pression démographique grandissante, il convient d'adopter des stratégies et de concevoir des plans destinés à réduire le nombre total de pauvres au niveau mondial. Une étude (**Rockstrom et al., 2010**) a analysé les écarts de rendement dans l'agriculture pluviale, c'est-à-dire l'écart entre les rendements réels et le rendement potentiel via une gestion optimale, pour les principales cultures céréalières dans divers pays d'Afrique, d'Asie et du Moyen-Orient.

L'expérience des pays méditerranéens a montré que les moyens des gouvernements ne suffisaient pas à diffuser largement les technologies innovantes de systèmes de production capables d'améliorer la productivité et de réduire les pertes et gaspillages de denrées alimentaires, mais qu'ils étaient indispensables pour faciliter l'action des parties prenantes, institutions publiques, société civile et secteur privé, à travers : l'instauration d'un environnement institutionnel et politique favorable ; la création d'un climat favorable à l'investissement ; le renforcement des transferts de technologie et leur dissémination à travers des partenariats public-privé ; la sensibilisation et la promotion ; la mise en place de partenariats et d'alliances ; le soutien aux produits et aux processus innovants ; le renforcement des capacités au niveau institutionnel et dans la chaîne logistique ; et le financement de recherches sur le développement de cultures à haut rendement, moins gourmandes en eau et multi-tolérantes aux maladies.

III.4 Efficacité de l'irrigation

La notion d'efficacité joue un rôle essentiel dans la compréhension de la manière dont chaque système peut réduire les pertes à sa propre échelle, mais elle ne s'applique pas nécessairement au système dans son ensemble. L'efficacité de l'eau dans le domaine agricole est loin d'être satisfaisante. Ce mot est fréquemment employé pour désigner tous les sous-systèmes d'irrigation : le stockage, le transport, la distribution dans et hors de l'exploitation, ainsi que les systèmes locaux d'application (**Pereira et al., 2012**). Le terme "efficacité de l'approvisionnement" ou "efficacité de l'irrigation" définit la distinction entre l'approvisionnement en eau dans le système et les pertes physiques causées par des fuites de canalisations ou de canaux ouverts, ainsi que les pertes au niveau de l'exploitation en raison d'une application inadéquate de l'eau aux cultures.

Selon **Rijsberman (2006)**, certains écrivains privilégient l'utilisation de la notion de « productivité de l'eau », qui correspond à la quantité de biens et de services produits en termes de masse physique et de valeur monétaire par unité d'eau consommée, plutôt que de parler de l'efficacité de l'eau ou de l'irrigation, qui est moins claire. Selon **Molden (2010)**, les prévisions optimistes indiquent que les trois quarts des besoins en nourriture supplémentaires pourraient être comblés en augmentant la productivité de l'eau dans les zones irriguées. Selon (**GWP, 2010**), les pays en développement utilisent deux fois plus d'eau par hectare irrigué que les pays industrialisés, tandis que les rendements agricoles y sont trois fois plus faibles en raison de méthodes d'irrigation inefficaces, de taux d'évaporation élevés, etc.

Il est possible d'améliorer la productivité de l'eau en utilisant principalement une agronomie appropriée et de meilleurs cultivars. Étant donné que le climat, le sol et la culture jouent un rôle essentiel dans l'efficacité d'un système, il est essentiel de faire des améliorations en se basant sur une sélection appropriée de chaque élément. En ingénierie, il est nécessaire d'adopter des technologies et des pratiques de gestion appropriées pour moderniser et réhabiliter les infrastructures d'approvisionnement en eau et d'irrigation.

Toutefois, la majorité des projets de modernisation visant à moderniser l'irrigation entraînent des résultats mitigés, les agriculteurs préférant souvent des cultures plus rentables et plus nécessitant davantage d'eau (**Fernández et al., 2014**). Les problèmes de pénurie d'eau ne peuvent être résolus que par le recours à la technologie, sans avancées dans la gestion de l'eau au niveau de la ferme et du bassin versant. Il est donc essentiel de bien comprendre les environnements locaux, tant biophysiques qu'économiques, à l'échelle du champ, de la ferme et du bassin versant, afin d'améliorer la productivité de l'eau (**Molden et al., 2010**).

Certains auteurs proposent la notion de « chaîne d'efficience » qui propose une autre perspective d'analyse. Il y a les maillons suivants dans cette chaîne : l'efficacité du transport et de l'exploitation, l'application, la consommation et la transpiration, l'assimilation, la biomasse et le rendement (value). Une telle méthode offre la possibilité d'étudier et de mesurer l'amélioration globale de l'efficacité de l'eau en se basant sur les améliorations à chaque étape. De plus, il est crucial dans ce domaine de favoriser des politiques intelligentes qui impliquent tous les responsables et les exploitants.

S'il est indéniable que les avancées technologiques permettent des améliorations de la productivité en eau, il est néanmoins nécessaire de mettre en place un système d'échange de connaissances afin d'aider les agriculteurs, les associations d'usagers de l'eau et tous les gestionnaires des ressources à repérer les améliorations potentielles, afin qu'ils aient chacun une plus grande responsabilité sur l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement (**Levidow et al., 2014**). Il est crucial d'adopter une gestion raisonnée de l'eau afin de combattre les pénuries et d'aider le secteur agricole à s'ajuster à un avenir incertain.

III.5 Efficience des systèmes d'irrigation au sein des exploitations agricoles

On évalue l'efficacité globale d'un système d'irrigation en fonction du réservoir (efficacité du stockage), du système de distribution (efficacité du transport), de l'exploitation (efficacité de l'application directe) et de la plante (efficacité de l'eau). On la connaît par le rapport entre le volume d'eau utilisé par la plante et celui de la source.

Trois techniques d'irrigation sont utilisées pour classer les exploitations agricoles : goutte-à-goutte, aspersion et irrigation gravitaire.

Les systèmes de distribution d'eau sous pression présentent un avantage important par rapport aux canaux ouverts traditionnels :

1. Ils permettent de diminuer considérablement les pertes d'eau pendant le transport
2. Ils surmontent les contraintes topographiques ;
3. Ils évitent les prélèvements incontrôlés par la possibilité d'établir des redevances d'eau consommée ;
4. Ils permettent enfin aux exploitants d'adapter leurs pratiques d'irrigation selon leurs besoins (**Lamaddalena et Sagardoy, 2000**).

Peu importe la méthode employée, il est essentiel que le système puisse acheminer, avec le minimum de pertes, le volume d'eau souhaité à un endroit spécifique.

III.6 Nouvelles approches et nouveaux outils pour la gestion de l'eau

L'influence de l'agriculture sur les ressources en eau nécessite des choix complexes entre les exigences économiques, sociales et environnementales, qui sont prises en compte par de

nombreuses institutions. La qualité de la ressource est également affectée négativement par l'agriculture, qui est le principal secteur consommateur d'eau, et l'eau qu'elle utilise est largement gaspillée. Le défi principal est de garantir une meilleure répartition des ressources en eau utilisées par l'agriculture entre les différentes demandes, afin d'améliorer la production de nourriture et de fibres, de réduire la pollution qu'elle produit et de soutenir les écosystèmes, tout en répondant aux aspirations sociales en utilisant des droits fonciers et des structures et systèmes institutionnels variés (**OCDE, 2006**). En raison d'une maintenance inadéquate des réseaux, d'une mauvaise exploitation, de techniques d'irrigation et agronomiques inadéquates et d'une structure de gouvernance lacunaire, le rendement réel des systèmes d'irrigation est nettement inférieur à leur potentiel.

Devant l'augmentation du stress hydrique, de nombreux pays méditerranéens ont décidé de réorganiser leur système d'eau (**Thivet et Fernandez, 2012**). La majorité des stratégies nationales, pendant des décennies, ont privilégié l'offre, elle-même conditionnée par les progrès scientifiques et technologiques et dominée par les investissements dans le développement des infrastructures et des capacités de stockage et de transport, en négligeant complètement le potentiel énorme des économies d'eau réalisables sur tous les niveaux de la chaîne.

Selon Ferrara (2010), l'accent s'est ensuite progressivement mis sur la durabilité, c'est-à-dire l'exploitation raisonnée et responsable des ressources naturelles et la préservation des droits des générations. Les politiques de l'offre ont donc rendu nécessaires celles de la demande, qui visent essentiellement à rationaliser et à contrôler l'utilisation de l'eau, à réduire les pertes, à améliorer l'efficacité de l'eau consommée et à garantir l'équité dans l'accès à des ressources limitées. Selon (**Thivet et Fernandez, 2012**), l'amélioration de la gestion de l'eau nécessite une stratégie qui associe la création et l'exploitation de nouvelles ressources en eau, qu'elles soient conventionnelles ou non conventionnelles (gestion de l'offre), ainsi que des réformes importantes visant à optimiser l'utilisation des approvisionnements existants. Cette approche alternative offre une multitude d'outils pour répondre aux aspects techniques, économiques, institutionnels et comportementaux de la gestion de l'eau, afin d'améliorer l'efficacité de son utilisation par le secteur agricole.

D'un point de vue technique, l'efficacité de l'irrigation dépend de sa gestion, une gestion efficace nécessitant la collecte et l'intégration de données, d'outils d'analyse et de technologies immatérielles avancées. Le but est donc d'améliorer et d'utiliser de manière plus efficace les techniques existantes (agriculture de précision, réseaux de stations météo, techniques de pompage, systèmes de mesure de l'évapotranspiration, techniques de conservation des sols, etc.) et/ou d'adopter de nouvelles méthodes d'irrigation (relevés de données à distance, prévision météorologique, systèmes d'aide à la décision [décision support systèmes ou DSS], systèmes de captation de données au niveau de la plante, combinaison de pratiques de gestion à long terme et d'outils d'analyse statistique, etc.) (**NEEA, 2015**). Les compétences nécessaires pour l'utilisation de ces technologies ne pouvant être intégrées, leur développement nécessite un renforcement des capacités par la formation des populations concernées.

En termes d'économie, pour améliorer la gestion de l'eau, il est essentiel de comprendre les liens entre le domaine de l'eau et l'économie nationale (**FAO, 2015**), c'est-à-dire de saisir comment des instruments alternatifs de politique économique impactent l'utilisation de l'eau dans divers secteurs et à différentes échelles. Dans cette optique, des modifications essentielles

des structures institutionnelles et de la réglementation, les améliorations de la performance des usages de l'eau et l'organisation des usagers sont tout aussi importantes. Il est essentiel que les organismes responsables de l'irrigation adoptent une approche de service public et améliorent leurs résultats économiques et environnementaux. Les organismes du secteur doivent articuler leur mission principale, qui consiste à offrir des services d'irrigation, avec la production agricole et prendre en compte leurs besoins et leur utilisation de l'eau avec ceux des autres utilisateurs du même bassin versant. En prenant en considération les déplacements et les flux de l'eau dans les paysages et sa circulation entre les aquifères, il sera possible de prendre des décisions éclairées sur l'utilisation et le réemploi de l'eau agricole. Selon (**Kijne ,2003**), cela implique de garantir des principes et des techniques d'administration améliorés et de favoriser la participation des utilisateurs du réseau.

Selon (**Regner et al, 2006**), la gestion participative de l'irrigation (GPI) est un concept essentiel des approches actuelles visant à améliorer la gestion des ressources en eau dans les pays face à des pénuries d'eau ou à des problèmes liés au changement climatique. La GPI constitue une forme de réforme qui peut améliorer la durabilité des systèmes d'irrigation. Elle nécessite des campagnes de sensibilisation régulières, des programmes de renforcement des compétences, des consultations et l'engagement de tous les acteurs impliqués.

III.7 La gestion participative de l'irrigation

L'intérêt grandissant en faveur de la GPI s'explique par ses multiples avantages :

- Réduction des difficultés financières ou budgétaires des gouvernements ;
- Amélioration de l'efficacité de la gestion de l'irrigation ;
- Exploitation améliorée et entretien des infrastructures d'irrigation ;
- Changement de l'attitude des exploitants sur leur dépendance envers l'aide externe ;
- Expérience positive d'innovation des modes institutionnels pouvant être appliquée dans d'autres secteurs ;
- Promotion des activités communautaires ;
- Amélioration de la collecte des redevances sur l'eau.

La dévolution des responsabilités de la gestion de tout ou partie des systèmes d'irrigation suppose :

- Une décision politique ferme de transfert de responsabilités significatives aux usagers pour la gestion des systèmes d'irrigation ;
- Un cadre légal pour la mise en place et la mise en responsabilité d'associations des usagers de l'eau (AUE) indépendantes ;
- La possibilité pour les AUE de gérer le système ou le sous-système d'irrigation qui les dessert ;
- La possibilité pour les agences publiques d'irrigation 1) de procurer un soutien technique et institutionnel aux AUE et 2) de contrôler leur performance ;
- Une agriculture irriguée économiquement viable (pour être indépendantes et autogérées, les AUE doivent être financièrement viables et autonomes).

III.8 Impacts du changement climatique et mesures d'adaptation (bonnes pratiques)

La majorité des pays méditerranéens, et en particulier les pays arides et semi-arides, font face à un stress hydrique constant. Ce stress sera aggravé par la croissance démographique, l'urbanisation, le développement et le changement climatique, qui mettront une pression considérable sur les ressources en terres et en eau. Les recherches devraient donc s'étendre aux grandes questions de l'agriculture méditerranéenne, y compris celles concernant les conséquences du changement climatique sur les ressources en eau et la production agricole. Selon des études récentes basées sur le scénario A1B du Spécial Report on Emissions Scenarios (SRES, « rapport spécial sur les scénarios d'émissions ») du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), il est possible que l'élévation de la température de l'air soit particulièrement élevée dans certaines régions du Moyen-Orient, d'Afrique du Nord et au sud de la Turquie (Fig.04). Dans le sud-est de l'Europe et l'est de la Méditerranée, les températures hivernales seraient plus élevées que la moyenne. En revanche, pendant l'été, la région de l'ouest se réchaufferait plus rapidement que la moyenne (Saadi et al., 2015).



Figure 4. Distribution géographique de la différence entre températures annuelles moyennes et températures saisonnières (en °C) entre 2050 et 2000 (Saadi et al., 2015).

Au cours de la même période (2000-2050), les précipitations annuelles moyennes pourraient s'effondrer d'environ 6 % dans toute la région. La plupart de l'Europe, à l'exception de la Grèce, du sud de l'Italie et de la Turquie, pourraient subir une augmentation de l'humidité en hiver. Les précipitations estivales devraient diminuer dans la zone euro-méditerranéenne et augmenter en Afrique du Nord et au Moyen-Orient (Saadi et al., 2015). Ainsi, les manques d'eau du climat, qui sont le résultat de la disparité entre les précipitations et les niveaux de référence pour l'évapotranspiration, pourraient augmenter et engendrer des situations plus complexes à l'avenir qu'à l'heure actuelle.

Le déplacement des zones agroécologies sera l'un des premiers effets du changement climatique sur la disponibilité des terres et de l'eau, ainsi que sur la productivité agricole. D'une part, une augmentation des températures diminuera le cycle végétatif de certaines espèces cultivées, anticipera les dates de semis/repiquage, augmentera les taux de respiration, diminuera

la période productive, la production de biomasse et le rendement, et probablement diminuera la qualité de la production (par exemple, diminution des protéines des céréales). De plus, l'augmentation des températures prolongera la période favorable aux cultures et permettra à certaines régions de mener plus d'une campagne de culture par an. Dans la plupart des régions du pourtour méditerranéen, le changement climatique pourrait avoir un effet néfaste sur la production agricole, ce qui se traduirait par une plus grande variabilité et une diminution des rendements (**Olesen et al., 2011**). Il est prévu que les cultures d'automne et d'hiver connaissent une légère augmentation des rendements, tandis que celles de printemps-été connaissent une chute brutale des rendements en raison de l'augmentation des températures et du raccourcissement de la saison de végétation (**Saadi et al., 2015**). Selon (**Ferrara et al., 2010**), l'augmentation des pénuries d'eau et l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes pourraient entraîner une hausse de la variabilité des rendements et une réduction des surfaces adaptées aux cultures classiques. Les besoins moyens en eau des cultures dans l'ensemble de la région méditerranéenne devraient normalement baisser de 4 % à 8 % en automne-hiver et au printemps-été en raison de l'augmentation des températures et du raccourcissement de la saison de croissance (**Saadi et al., 2015**). Il est donc possible de prévoir une légère augmentation des besoins en eau et des apports par irrigation pour les cultures pérennes telles que l'olivier.

Le changement climatique pourrait avoir un impact négatif sur la plupart des systèmes de culture pluviale en raison de l'aggravation prévue du bilan hydrique climatique et d'une diminution générale de l'accès à l'eau destinée à l'agriculture. Ce dernier élément est dû à la hausse de la demande en eau dans d'autres domaines. Globalement, il est probable que le changement climatique aggravera les problèmes de pénurie d'eau et mettra en péril la durabilité de la production agricole.

L'objectif principal des mesures d'atténuation et d'adaptation au changement climatique est de préserver et d'utiliser de manière plus efficace les ressources naturelles par l'agriculture et les autres secteurs. L'objectif est notamment de prendre en compte les conséquences combinées de l'augmentation des températures, de la variation des précipitations, de l'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère et des avancées technologiques et génétiques (**CGIAR, 2012**). La recherche doit donc accorder une grande importance au bilan hydrique et au bilan carbone des systèmes, tout comme à l'adaptation aux événements météorologiques extrêmes et à différents stress abiotiques, qui jouent un rôle crucial dans la production agricole et la sécurité alimentaire. Il sera essentiel de sélectionner des méthodes de gestion et d'exploiter des cultivars capables de faire face à des conditions environnementales difficiles et de stabiliser/augmenter les rendements et la productivité de l'eau dans les zones arides et semi-arides de la région. L'un des projets basés sur cette approche est ACLIMAS (« Adaptation des systèmes agricoles méditerranéens au changement climatique »).

Partie deuxième
Etude expérimentale

Chapitre I

Matériels et méthodes

I. Matériel et méthodes

I.1 Objectif

Dans le cadre de notre étude, nous nous pencherons sur l'aménagement des infrastructures d'une ferme agricole de Si Mourad située dans la région de Sidi Ali. Nous analyserons les particularités du climat, du sol et des ressources disponibles pour élaborer un plan d'aménagement adapté à ce contexte spécifique.

I.2 Présentation de la ferme Si Mourad

La ferme pilote de Si Mourad est située dans la commune de Sidi Ali, dans la wilaya de Mostaganem, au Nord-Ouest de l'Algérie. Elle se trouve sur la latitude $36^{\circ}04'05''N$ et la longitude $00^{\circ}24'52''E$ et une altitude de 200m à environ 15 km de la mer, sur les monts du Dahra plus précisément dans le Djebel Traba (**Adda, 2011**). Elle s'étend sur une superficie de plus de 400 hectares, dont 14 hectares de vigne, 14.5 hectares d'oliveraie, et le reste destiné à la céréaliculture (**Adda, 2011**).

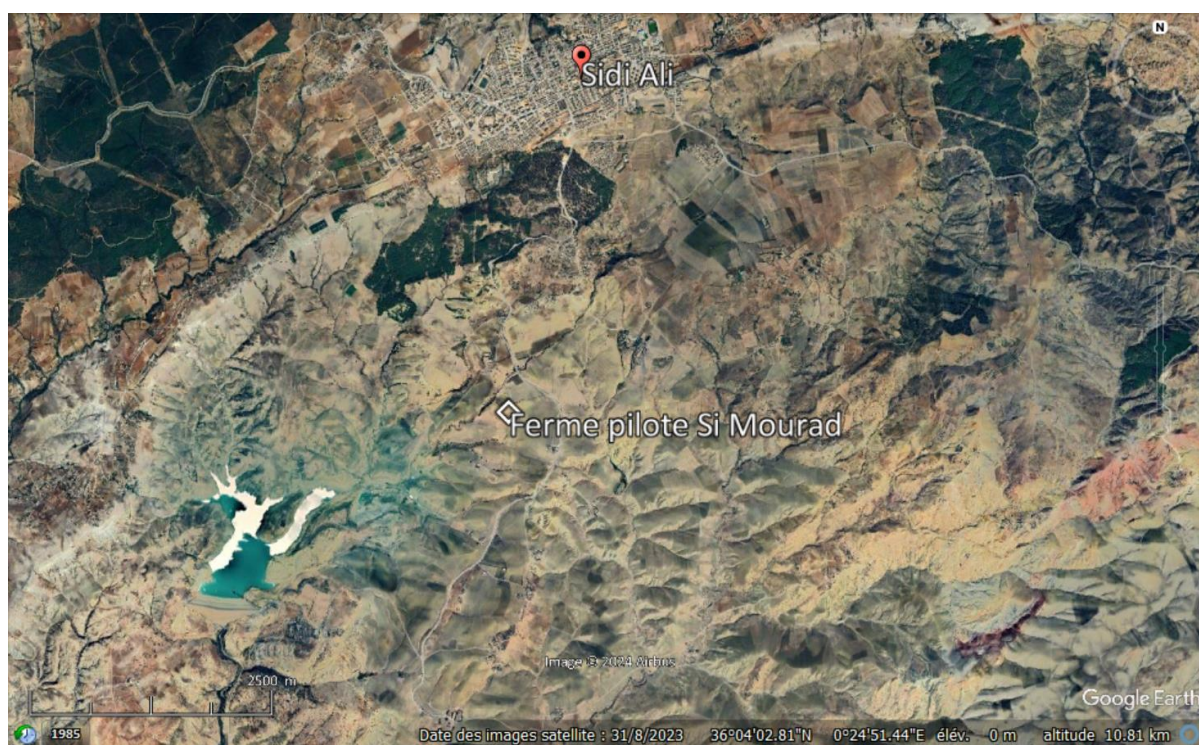


Figure 5. Localisation géographique de l'EURL Si Mourad (Sidi Ali-Mostaganem)



Figure 6. Délimitation de la ferme pilote Si Mourad

I.2.1 Travail du sol

Le travail du sol dans la ferme pilote de Si Mourad se fait selon un calendrier et des méthodes précises. À la fin du mois d'août, le sol est labouré en profondeur sur une superficie totale de 380 hectares, afin de préparer le terrain pour les semis. Au début du mois d'octobre, le sol est croisé, c'est-à-dire qu'il est labouré une deuxième fois dans le sens perpendiculaire au premier labour, afin de briser les mottes et d'homogénéiser le sol. Après le croisement, le sol est épandu d'engrais sur les 380 hectares, afin de fournir les nutriments nécessaires aux plantes. À la fin du mois de novembre, le sol est labouré une troisième fois, mais de façon plus superficielle, afin de former le lit de semence. Le travail du sol dans la ferme pilote de Si Mourad permet d'optimiser le rendement des cultures, mais il nécessite aussi un investissement en temps, en main-d'œuvre, et en carburant.

I.2.2 Conditions climatiques de la station

La ferme pilote de Si Mourad bénéficie d'un climat semi-aride, caractérisé par des étés chauds et secs, et des hivers doux et pluvieux. La température moyenne annuelle est de 18°C, avec des variations saisonnières de 10°C à 26°C. La pluviométrie annuelle est de 369 mm, avec une répartition inégale entre les mois. Le mois le plus sec est juillet, avec 4 mm de précipitations, et le mois le plus humide est novembre, avec 68 mm de précipitations. L'ensoleillement annuel est de 2800 heures, avec une moyenne de 7.7 heures par jour.

La ferme pilote de SI Mourad pratique des cultures adaptées au climat semi-aride. Les légumes secs, tels que les pois chiches, les lentilles, et les haricots, sont des cultures résistantes à la sécheresse et capables de fixer l'azote dans le sol. Les orages, tels que le trèfle, la luzerne, et le sainfoin, sont des cultures fourragères qui servent à nourrir le bétail et à enrichir le sol en

matière organique. Le blé tendre et le blé dur sont des céréales qui fournissent de la farine et du couscous, des aliments de base de la population locale. Les olives sont des fruits qui donnent de l'huile et des conserves, des produits à forte valeur ajoutée. La vigne est une culture qui produit du raisin et du vin, des produits à forte demande sur le marché national et international (Adda, 2011).

La ferme pilote de SI Mourad fait face à des défis et des opportunités liées au climat. Parmi les défis, on peut citer la rareté et l'irrégularité des ressources en eau, la dégradation et l'érosion du sol, les risques de sécheresse, de gel, et de maladies des plantes. Parmi les opportunités, on peut citer la diversification et la valorisation des productions, la promotion de l'agriculture biologique, l'adaptation aux changements climatiques, et la contribution au développement durable (Adda, 2011).

I.2.3 Plan de production 2023/2024

Le plan de production vise à cultiver des légumes secs, des orages, des forages, du blé tendre, du blé dur, et des olives sur une superficie totale de 380 hectares. Le blé dur occupe la plus grande partie du terrain avec 192 hectares, suivis par les légumes secs avec 80 hectares. Les orages, les forages, le blé tendre, et les olives se partagent le reste du terrain avec respectivement 40, 9.5, 30, et 14.5 hectares.

Le plan de production tient compte des besoins du marché local et régional, ainsi que des conditions climatiques et pédologiques de la zone. Les légumes secs sont des cultures adaptées au climat semi-aride et à la faible fertilité du sol. Les orages sont des cultures fourragères qui servent à nourrir le bétail. Les forages sont des puits qui permettent d'irriguer les cultures en cas de sécheresse. Le blé tendre et le blé dur sont des céréales qui fournissent de la farine et du couscous. Les olives sont des fruits qui donnent de l'huile et des conserves.

Le plan de production présente des avantages économiques, sociaux, et environnementaux.

Il permet de diversifier les sources de revenus des agriculteurs, de créer des emplois, et de renforcer la sécurité alimentaire. Il favorise aussi la rotation des cultures, la préservation des ressources en eau, et la lutte contre l'érosion du sol.

I.2.4 Equipement et matériel

- L'équipement et le matériel sont des éléments indispensables pour la réalisation des activités agricoles. Ils permettent de travailler le sol, de semer, de récolter, de transporter, et de stocker les produits. Ils facilitent aussi le travail des agriculteurs, en réduisant le temps, la main-d'œuvre, et les coûts.

- L'équipement et le matériel utilisés dans la ferme pilote de SI Mourad sont les suivants : 3 tracteurs pneumatiques, 1 tracteur chenillé, une faucheuse, une râteau-faneur-botteuse, une semoir en ligne, un moteur 2 cylindres espadon, un bouteur 1 cylindre d'eau, 4 cylindres dette, un moteur pompe, et 3 pompes énergies. Ces équipements et matériels sont adaptés aux différentes cultures pratiquées dans la ferme, telles que les légumes secs, les orages, les forages, le blé tendre, le blé dur, et les olives.

- L'équipement et le matériel présentent des avantages et des inconvénients selon leur type et leur utilisation. Les avantages sont : une meilleure performance, une plus grande précision, une plus grande sécurité, et une plus grande durabilité. Les inconvénients sont : un

coût élevé, une maintenance régulière, une dépendance énergétique, et un impact environnemental.

- L'équipement et le matériel nécessitent un investissement financier important, qui peut être financé par différentes sources. Parmi ces sources, on peut citer : les fonds propres, les crédits bancaires, les subventions publiques, les aides internationales, et les partenariats privés.

I.3 Matériel

I.3.1 Verreries, appareils et produits utilisés

Verreries, appareils et produits utilisés Tout le matériel utilisé est réuni dans le tableau 03.

Tableau 3. Matériel et produits.

Matériel et produits	
Appareillage	Agitateur magnétique - Etuves (60°C – 105°C) - Balance de précision - Plaque chauffante- pH mètre – Conductimètre - Calcimètre de Bernard– Four à moufle.
Verrerie	Béchers - Entonnoirs - Eprouvettes graduées Erlenmeyer - Pipettes graduées - Verres à mesure - Seringue en verre – Creusets - Fiole jaugée - Burette graduée – Bouteilles en verre.
Produits	Eau distillée - Carbonate de calcium – Acide sulfurique - Bicarbonate de Potassium - Eau oxygénée - Oxalate d'ammonium - Acide chlorhydrique – Permanganate de potassium- Eau oxygénée.
Autre matériel	Tarière – Sachets - Etiquetage - Pilon et mortier - Tamis (2mm) - Piécette - Cylindres - spatules.

I.4 Méthodes

I.4.1 Echantillonnage

I.4.1.1 Techniques prélèvement

Plusieurs prélèvements élémentaires doivent être effectués dans un champ pour obtenir un résultat fiable (Fig 6).

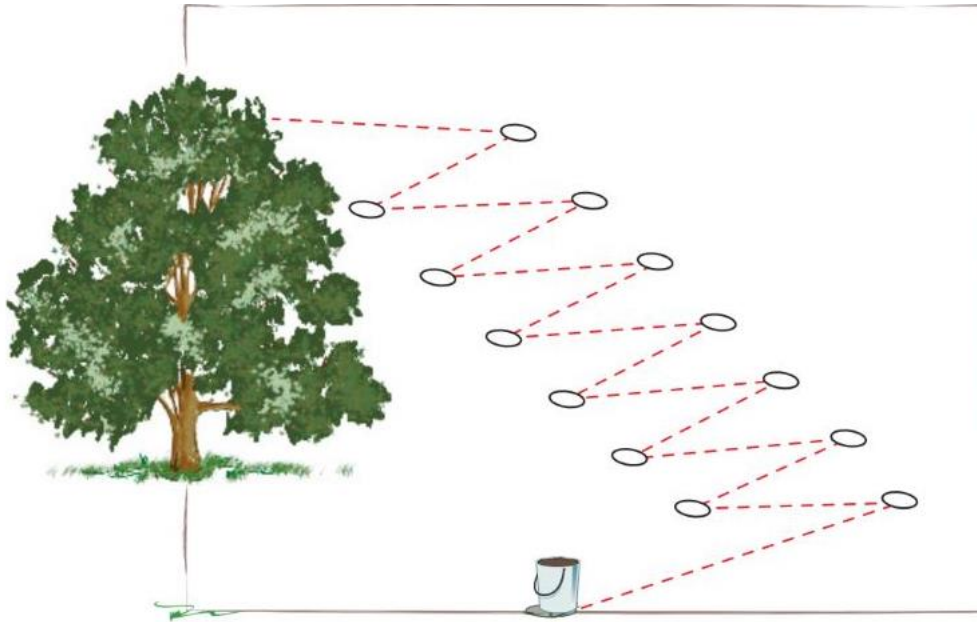


Figure 7. Technique de prélèvement en zigzag

Prélèvement en zigzag : marcher en zigzag à travers le champ, le long de la diagonale. Prendre un échantillon à chaque virage.

Stocker dans le seau 1 ou 2 poignées de chaque prélèvement préalablement émietté et mélangé.

I.4.1.2 Epoque de prélèvement

À tout moment, à l'exception des épandages d'engrais, d'amendements variés ou de matières organiques (attendre quelques mois après l'épandage).

I.4.1.3 Eviter les zones particulières

La zone ancienne a été décapée ou aménagée, ainsi que les anciens chemins, les talus, les remblais et les mouillères, le long des chemins, des haies ou des andains.

I.4.1.4 Prélever dans une tranche de sol déterminée

On effectue les prélèvements dans une zone de sol (ou "horizon" de sol) qui est déterminée en fonction de l'épaisseur de l'horizon organique travaillé et de la densité de l'enracinement de la culture (0-15, 0-20, 0-25 ou 0-30 cm). Il ne faut pas confondre le sol de deux niveaux distincts.

I.4.1.5 Utiliser de préférence une tarière

Cependant, une bêche ou une pelle peuvent également être utilisées, à condition de prélever un volume de terre équivalent à un cube de sol.

La surface du sol doit être nettoyée des résidus organiques ou autres avant de prélever. Opter pour une profondeur de la tarière sélectionnée (15, 20, 25, ou 30 cm). Le sol en bout de tarière de l'horizon inférieur doit être retiré et jeté (si on remarque une

modification de couleur ou de texture).

Collecter le reste de la tarière dans un seau, émietter, retirer les cailloux et mélanger. Placer une ou deux poignées de chaque prélèvement dans le seau ou la cuvette destiné à fabriquer l'échantillon moyen.

I.4.1.6 Dans le cas d'une parcelle comprenant deux ou plusieurs types de sol

Si l'hétérogénéité n'est pas un problème dans la culture, il convient de réaliser un échantillon moyen correspondant à la zone de sol la plus étendue.

Si des disparités sont évidentes dans la culture, il est recommandé de réaliser un échantillon moyen par zone représentative afin de comparer à l'analyse.

I.4.1.7 Dans le cas d'une parcelle homogène mais présentant des accidents de culture dans des zones bien définies

Pour comparer à l'analyse, il est nécessaire de repérer les principales zones distinctes (2 ou 3) et de réaliser un échantillon moyen par zone.

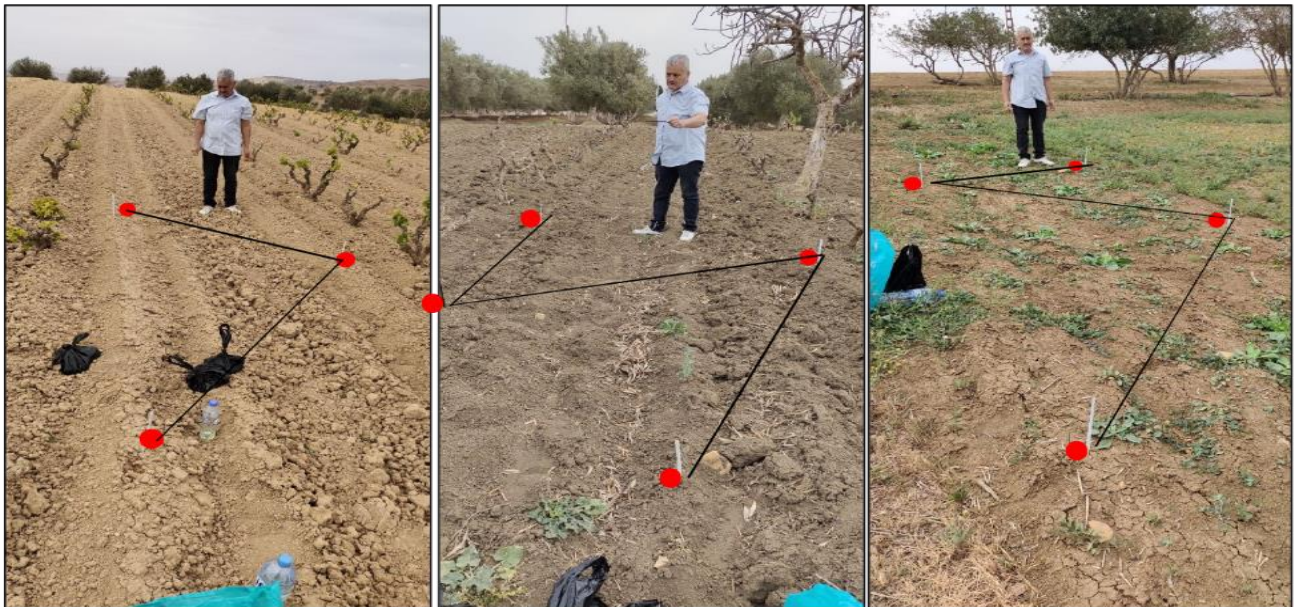


Figure 8. Prélèvement d'échantillons de sol en zigzag

I.4.1.8 Préparation des échantillons

a. Broyage et tamisage

Les échantillons ont été broyés à l'aide d'un pilon et un mortier, ils ont ensuite été passés dans un tamis de 2mm de diamètre (Photo 02). On a conservé les échantillons de terre fine dans des sachets pour pouvoir servir aux différentes analyses du sol.

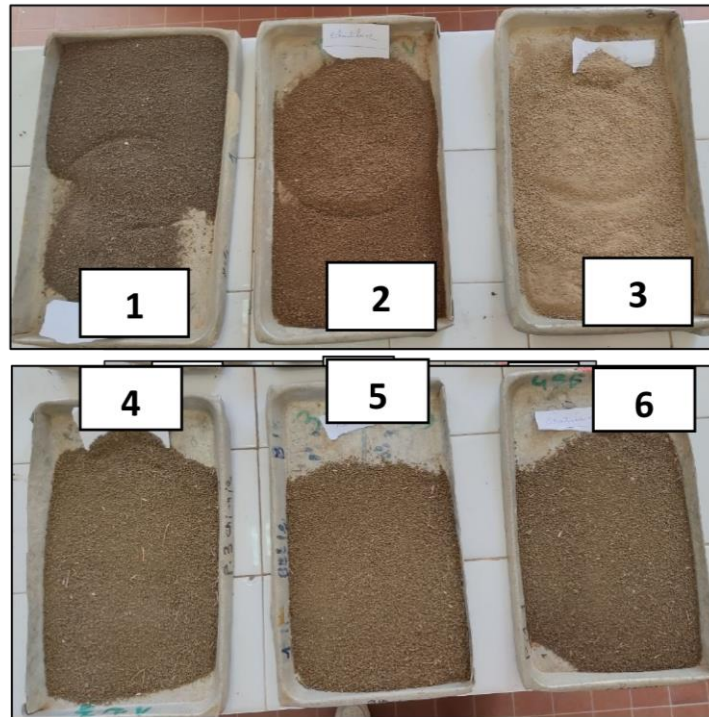


Figure 9. Les 6 échantillons de sol après le tamisage.

I.4.2 Les analyses physicochimiques

Selon (Schvartz *et al.*, 2005) et (Dicova, 1997), ces analyses ont pour objectif d'évaluer, d'une part, les conditions physicochimiques de l'horizon travaillé de la parcelle et, d'autre part, les quantités d'éléments minéraux ou éventuellement polluants disponibles pour les cultures dans le contexte d'une exploitation agricole.

I.4.2.1 Taux d'humidité

Cette analyse ne nécessite pas le broyage et le tamisage des échantillons. L'analyse du taux d'humidité des échantillons doit se faire le même jour que leur prélèvement, ceci est un renseignement important pour la connaissance de l'état hydrique du sol.

I.4.2.2 La matière organique

- Après calcination à une température plus élevée (505°), on obtient la masse de sol calciné (Photo 03).
- La différence entre la masse de sol sec et la masse de sol calciné donne la teneur en matière organique



Figure 10. Les 6 échantillonnées en four pendant 24 heures.

I.4.2.3 Analyse granulométrique

- Principe

L'analyse granulométrique, selon la norme **AFNOR X 31-107 (Association Française de la Normalisation)**, permet de déterminer la répartition des particules minérales dans la terre fine (fraction inférieure à 2 mm). Cette répartition inclut les argiles, les limons fins et grossiers, ainsi que les sables fins et grossiers (**Gee et Or, 2002**) (voir Photo 04). Dans le cas des sols calcaires, il est essentiel de vérifier si cette analyse a été réalisée avec ou sans décarbonatation préalable (**Schwartz et al., 2005**).

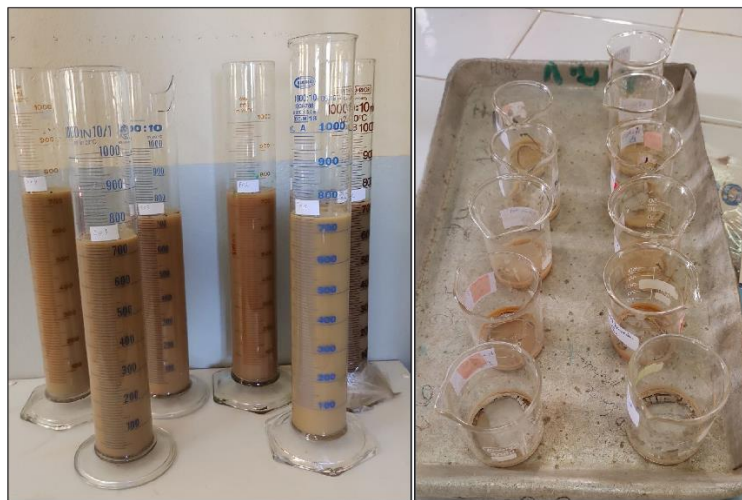


Figure 11 . Analyse granulométrique par la méthode de la pipette de Robinson

I.4.2.4 Mesure du pH

- Principe

L'appréciation du pH (Photo 05) au laboratoire (**NF ISO 10390**) est obtenue en mesurant le pH d'une suspension de sol dans l'eau déminéralisée (pHeau), dans un rapport pondéral terre/solution égal à 2/5 (**Schwartz et al., 2005**).



Figure 12. Mesure du pH d'un échantillon de sol à l'aide d'un pH-mètre

I.4.2.5 Mesure de la conductivité électrique

La solution liquide du sol est composée de différents ions qui donnent au sol une conductivité électrique spécifique. Elle est également influencée par les minéraux et les composants organiques qui présentent davantage des caractéristiques isolantes. En général, la conductivité est une constante. Selon (Calvet, 2003), la capacité électrique d'un matériau terreux est influencée par sa composition, sa structure et sa teneur en eau.

- **Principe**

L'évaluation de la salinité d'un sol (Photo 06) repose sur l'extraction d'un électrolyte dont la concentration en éléments dissous est mesurée. Dans le laboratoire, l'électrolyte est prélevé sous vide à partir d'un échantillon de sol préalablement séché à l'air, tamisé à une taille de 2 mm et porté à une quantité d'eau spécifique, qui varie en fonction du mode de préparation de l'extrait. L'extrait dilué est une méthode d'extraction fréquemment employée. Le rapport entre la quantité de sol et la quantité d'eau peut différer selon les laboratoires, mais il est généralement de 1/5 : la quantité d'eau ajoutée est égale à 5 fois la masse de sol (10g), ce qui équivaut à un volume d'eau d'environ 50ml (Montoroi, 1997). (Voir le protocole dans l'Annexe I).

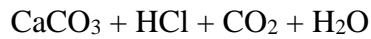


Figure 13. Mesure de la conductivité électrique du sol par le conductimètre.

I.4.2.6 Détermination du calcaire total et actif

Principe

D'après (Schvartz et ses collègues 2005), on peut évaluer le calcaire total du sol (AF ISO 10693) en attaquant une quantité connue de terre avec de l'acide chlorhydrique. Le dioxyde de carbone libéré par la réaction produit est rapidement libéré par la dissociation des carbonates de calcium et/ou l'existence de magnésium.



On calcule alors la quantité totale de calcaire dans le sol (Photo 07) en se basant sur le volume de CO₂ émis. Les différentes fractions granulométriques du calcaire sont réparties en fonction de sa nature et de son origine. Le calcaire actif est celui qui se trouve dans la fraction inférieure à 20 µm, qui peut facilement se dissoudre et être responsable d'une forte teneur en Ca²⁺ dans la solution du sol.

Celui-ci est mesuré globalement au moyen de l'oxalate d'ammonium par la méthode Drouineau-Galet selon la norme AFNOR X 31-106 (Drouineau, 1942) . (Voir les deux protocoles dans l'Annexe I).



Figure 14. Dosage du calcaire total.



Figure 15. Dosage du calcaire actif.

Partie troisième
Résultats et discussion

I. Partie troisième : Résultats et discussion

I.1 Interprétation des résultats

1. Granulométrie

La composition granulométrique du sol en pourcentage d'argiles, de limons fins, de limons grossiers et de sables pour les 6 différents échantillons a été comme suit :

Concernant l'argile, les teneurs varient de 24 à 33%, ce qui est relativement élevé et confère une texture argileuse au sol. Les **limons fins** ont montré une grande variabilité entre 0 à 61%, où l'échantillon 3 a été très riche en limons fins. Pour les limons grossiers, les teneurs ont été faibles à négatives, allant de 0 à 3%.

Le **sable** a présenté des pourcentages compris entre 14 et 67,5%, ce qui a donné une composante sableuse.

Ces données ont donné une texture "limon argileux sableux" pour tous les échantillons. Cela signifie un mélange équilibré d'argiles, de limons et de sables avec des proportions proches. Cette texture limono-argilo-sableuse confère généralement de bonnes propriétés au sol :

- Bonne rétention en eau et en éléments nutritifs grâce aux argiles et limons
- Bon drainage et aération grâce à la fraction sableuse
- Structure physique équilibrée

Cependant, l'échantillon 3 avec 61% de limons fins et seulement 14% de sables aura une texture beaucoup plus limoneuse, plus battante et compacte que les autres.

Dans l'ensemble, ces sols présentent une texture équilibrée favorable pour la plupart des cultures, à l'exception de l'échantillon 3 qui pourrait nécessiter des aménagements spécifiques.

Tableau 4. Résultats des analyses granulométriques des sols étudiés.

	Échantillons					
Particules (%)	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Argiles	24	33	25	27	26.5	26.5
Limons fins	8.5	0	61	13	9	13.5
Limons grossiers	0	1.5	0	0	3	0
Sables	67.5	65.5	14	60	61.5	60
Classe texturale	Limon argileux sableux	Limon argileux sableux	Limon fin	Limon argileux sableux	Limon argileux sableux	Limon argileux sableux



Figure 16. Composition granulométrique des 6 échantillons de sol étudiés.

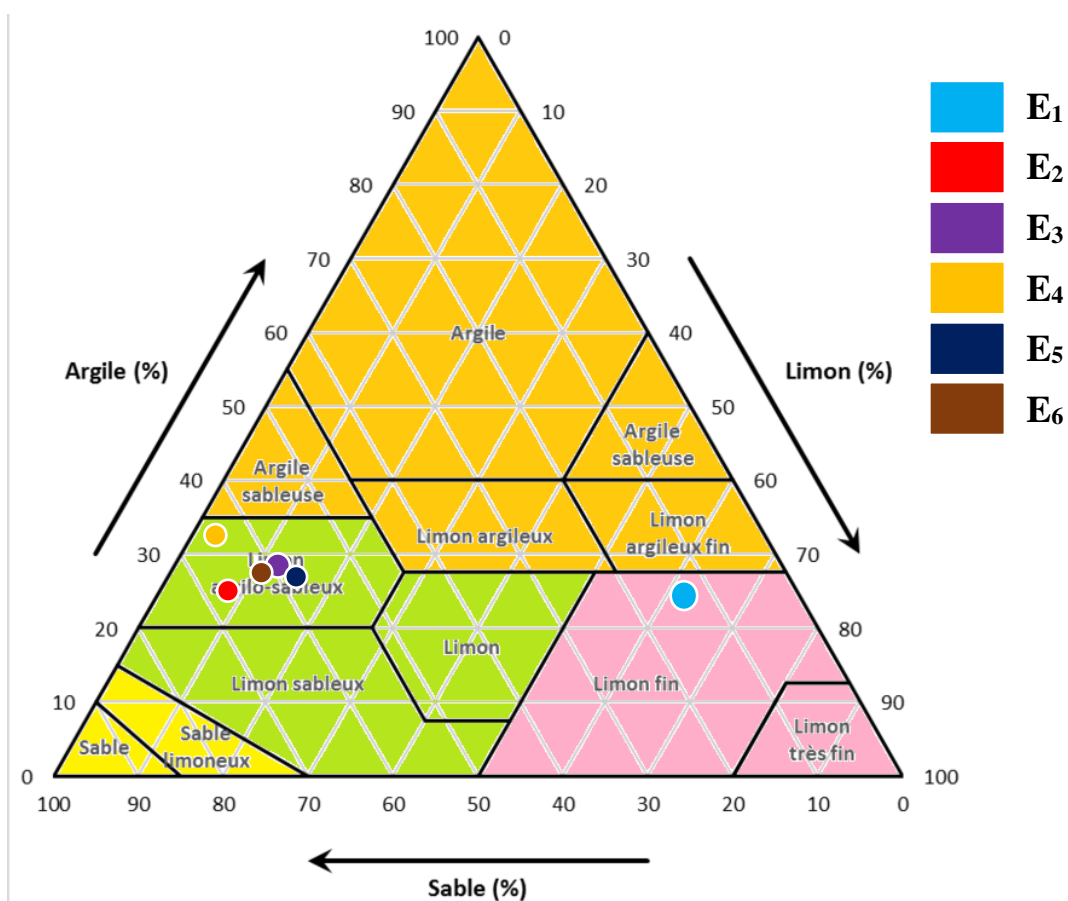


Figure 17. Triangle des textures minérales (Gobat et al., 2010).

2. Calcaire total

Les résultats du dosage du calcaire total pour les différents échantillons de sol E1 à E6.

Colonne 1 : Valeurs de $V_s = V_1 \text{ sol} - V_0 \text{ sol}$ (voir protocole Annexe I) Exemple pour E1 : $V_s = 32 \text{ ml}$ de CO_2 dégagé

Colonne 2 : Pourcentage de CaCO_3 (calcaire total) calculés à partir de la formule : $\text{CaCO}_3\% = (V_s \times m_{\text{CaCO}_3}) / (V_t \times m_{\text{sol}}) \times 100$

Avec les valeurs données dans le protocole : $m_{\text{CaCO}_3} = 0,3 \text{ g}$ $m_{\text{sol}} = 1 \text{ g}$ $V_t = \text{Volume du témoin}$
Exemple pour E1 : Si $V_t = 100 \text{ ml}$ (valeur théorique courante) $\text{CaCO}_3\% = (32 \times 0,3) / (100 \times 1) \times 100 = 13\%$

Tableau 5. Résultats Calcaire total.

Échantillon	CaCO_3 total (%)	Interprétation
E1	13	Sol moyennement calcaire
E2	5	Sol légèrement pourvu en calcaire
E3	21	Sol moyennement calcaire
E4	23	Sol notablement calcaire
E5	17	Sol moyennement calcaire
E6	13	Sol moyennement calcaire

Selon le tableau 10 :

- E1, E3, E5, et E6 sont classés comme "moyennement calcaires" avec des teneurs en CaCO_3 entre 13 et 21%.
- E2 est "légèrement pourvu en calcaire" avec seulement 5% de CaCO_3 .
- E4 a la teneur la plus élevée (23%) et est classé comme "notablement calcaire".

Ces classifications suggèrent que la plupart des échantillons ont des niveaux modérés de calcaire, ce qui peut influencer le pH du sol (tendance à être plus basique) et la disponibilité de certains nutriments. Le sol E4, étant notablement calcaire, pourrait présenter des défis pour les plantes qui préfèrent des sols moins calcaires, tandis que E2 pourrait convenir à une gamme plus large de plantes.

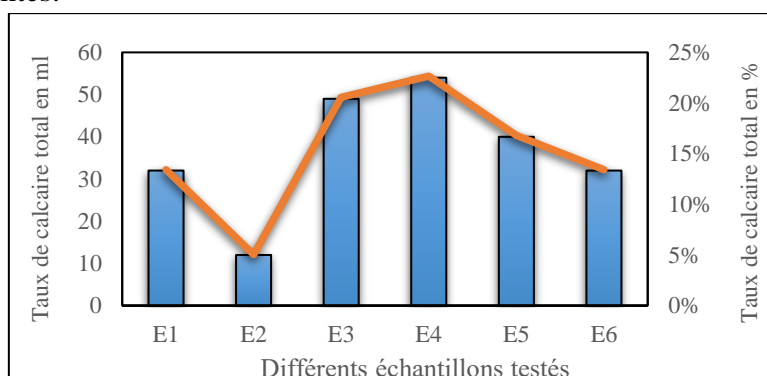


Figure 18. Résultats du calcaire total des 6 échantillons de sol étudiés

1. Calcaire actif

Ces résultats montrent des niveaux de calcaire actif élevés à très élevés dans tous les échantillons de sol étudiés (tableau 11).

- Échantillons E5 et E6 : Avec 31% de calcaire actif, ces sols ont les niveaux les plus élevés, classés comme "Très élevé". Cela peut poser des problèmes significatifs pour de nombreuses cultures.
- Échantillon E1 : Avec 25% de calcaire actif, ce sol est également classé comme "Très élevé", bien que légèrement moins que E5 et E6.
- Échantillons E2, E3 et E4 : Ces sols ont des niveaux "Élevés" de calcaire actif, variant de 13% à 19%. Bien que moins extrêmes que les autres échantillons, ces niveaux sont toujours considérés comme élevés.

Tableau 6. Qualité du sol en calcaire actif des 6 échantillons de sol étudiés

Échantillons	CaCO ₃ actif (%)	Qualité du sol (calcaire actif)
E1	25	Très élevé
E2	13	Elevé
E3	19	Elevé
E4	19	Elevé
E5	31	Très élevé
E6	31	Très élevé

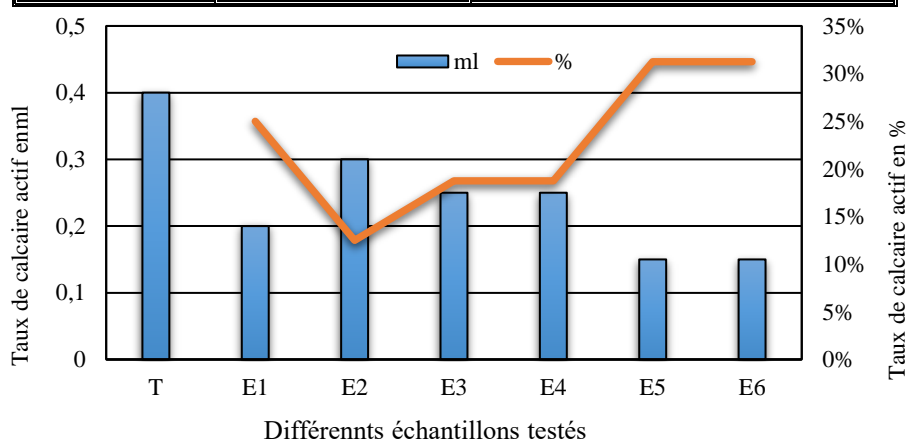


Figure 19. Résultats calcaire actif de 6 échantillons de sol étudiés

2. pH

Les résultats affichés dans le tableau 8 indiquent que le pH du sol varie d'un échantillon à un autre :

E1 : pH 8,4 - Sol basique

E2 : pH 8,35 - Sol basique

E3 : pH 8,15 - Sol basique

E4 : pH 9,18 - Sol très basique

E5 : pH 8,71 - Sol basique

E6 : pH 8,54 - Sol basique

Nous remarquons que la plupart des échantillons (E1, E2, E3, E5, E6) ont un pH compris entre 7,5 et 8,7, ce qui correspond à la classe des sols basiques selon l'échelle. Seul l'échantillon E4 avec un pH de 9,18 se classe dans la catégorie des sols très basiques (pH > 8,7).

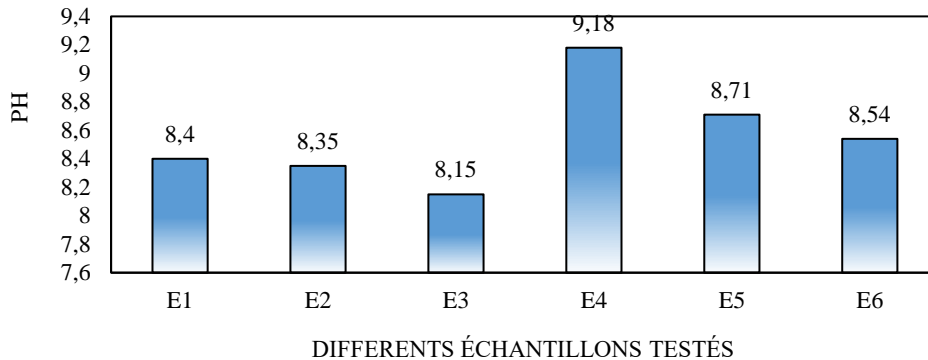


Figure 20. Le pH des 6 échantillons de sol étudiés.

3. Conductivité

En référant au tableau 9, le classement des sols selon leur CE comme suit :

E1 : 125,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ Cette valeur classe cet échantillon dans la Classe I (0 à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) correspondant à un sol non salé. L'effet sur le rendement des cultures est négligeable.

E2 : 117,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ Également dans la Classe I, sol non salé sans impact sur les rendements.

E3 : 275 $\mu\text{S}/\text{cm}$ Cette valeur se situe dans la Classe II (500 à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) qui correspond à un sol légèrement salé. On peut s'attendre à une diminution du rendement pour les cultures très sensibles au sel.

E4 : 237 $\mu\text{S}/\text{cm}$ Dans la Classe I, sol non salé sans problème de salinité.

E5 : 158 $\mu\text{S}/\text{cm}$ Classe I, sol non salé.

E6 : 227 $\mu\text{S}/\text{cm}$ Classe I, sol non salé.

En résumé:

- Les échantillons E1, E2, E4, E5 et E6 ne présentent pas de problème de salinité avec une CE inférieure à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Seul l'échantillon E3 avec 275 $\mu\text{S}/\text{cm}$ peut être considéré comme légèrement salé, avec un risque de baisse de rendement pour les cultures les plus sensibles.

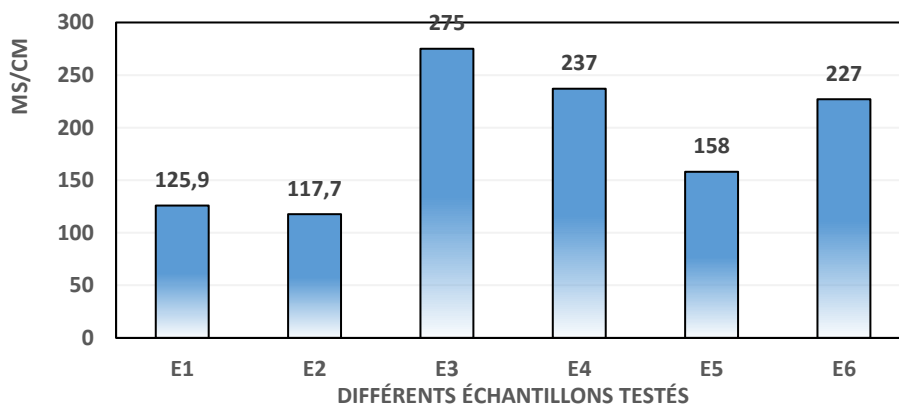


Figure 21. La CE des 6 échantillons de sol étudiés.

4. Matière Organique

Les teneurs en matière organique (MO%) et en carbone organique (C%) pour les échantillons E1 à E6 (tableau 12, II).

Tableau 7. Taux de la matière et du carbone organique des différents échantillons testés

Échantillon	MO (%)	C (%)	C (g/kg)	Interprétation
E1	6.26	3.64	36.4	Sol riche en matière organique
E2	6.36	3.70	37.0	Sol riche en matière organique
E3	6.95	4.04	40.4	Sol riche en matière organique
E4	7.15	4.16	41.6	Sol riche en matière organique
E5	7.18	4.17	41.7	Sol riche en matière organique
E6	7.30	4.24	42.4	Sol riche en matière organique

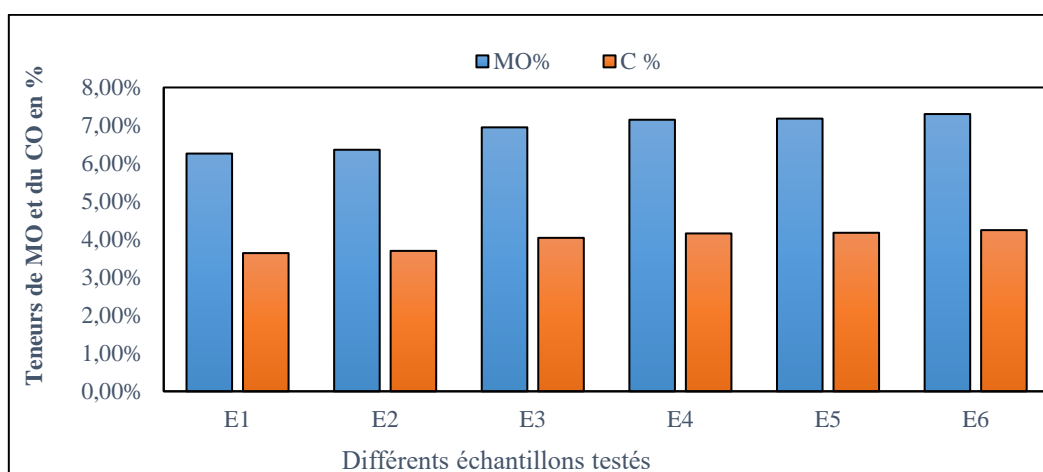


Figure 22. Teneurs en matière organique et en carbone organique des 6 échantillons de sol étudiés.

5. Humidité

Les taux d'humidité enregistrés sont relativement faibles, ils sont compris entre 3.57 et 6.79%.

L'échantillon E6 a le taux d'humidité le plus élevé (6.79%), suivi de près par l'échantillon E1 (6.43%). E3 a le taux d'humidité le plus bas (3.57%), significativement inférieur aux autres échantillons. En revanche, les échantillons E2, E4, et E5 ont des taux d'humidité similaires, variant entre 5.14% et 5.84%.

D'une manière générale, un sol est considéré comme sec lorsque son taux d'humidité est inférieur à 10%. Ces échantillons peuvent donc être qualifiés de secs à légèrement humides.

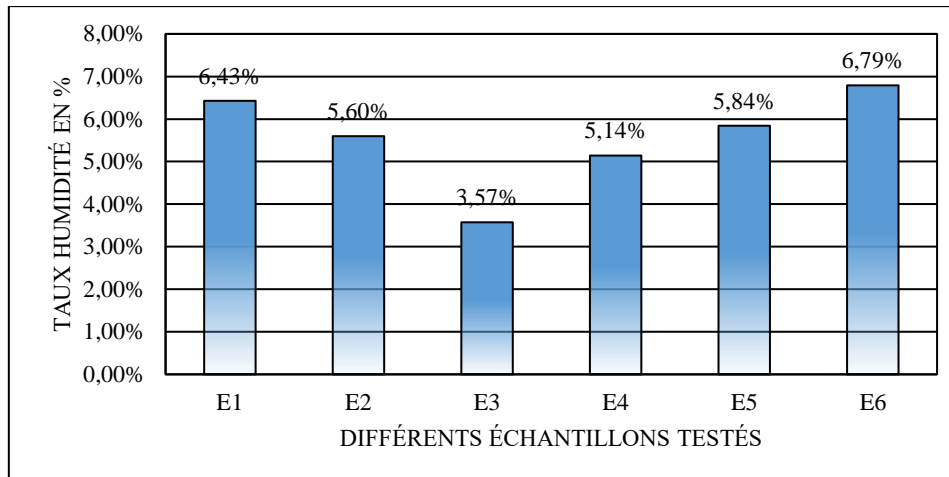


Figure 23. Taux d'humidité enregistrés de 6 échantillons de sol étudiés.

I.2 Discussion

1. Granulométrie

L'analyse des données relatives à l'étude du projet a donné des résultats comme la granulométrie selon le diagramme textural (**fig. 17**), tous les échantillons sont classés dans la catégorie "Limon argileux sableux". Cette texture limon argileux sableux présente certaines caractéristiques :

- Bonne rétention en eau grâce aux argiles et limons
- Drainage correct apporté par les sables
- Structure généralement favorable aux cultures

Cependant, une forte proportion de sables peut rendre le sol filtrant et pauvre en nutriments. Selon (**Bougaci et Sadouki, 2018**) qui a signalé que les argiles apportent une bonne réserve en eau mais peuvent poser des problèmes de battance. Ainsi, il faudra croiser cette analyse avec les autres paramètres comme la teneur en matière organique pour avoir une vision d'ensemble et éventuellement préconiser des amendements. Mais d'une manière générale, la texture limon argileux sableux reste convenable pour une large gamme de cultures à condition d'avoir des pratiques culturales adaptées.

Le pH a montré que tous les échantillons ont un pH basique. Les échantillons E3 et E4 ont un pH supérieur à 7. Ce type de sol est considéré comme moyennement à fortement alcalin. Cette basicité élevée peut s'expliquer par la présence de calcaire ou d'autres minéraux basiques dans la composition du sol. D'après (**Barrow et Hartemink, 2023**), un pH trop basique peut entraîner plusieurs problèmes pour les cultures comme :

- Carence en oligoéléments comme le fer, le manganèse, le bore, le zinc qui deviennent peu assimilables.
- Toxicité potentielle pour les plantes sensibles à un pH élevé.
- Impact négatif sur l'activité biologique du sol.

Idéalement, un pH compris entre 6 et 7,5 est généralement optimal pour la plupart des cultures. Des corrections de l'acidité avec des amendements du soufre, du gypse ou des engrais acidifiants pourraient être envisagées, en fonction des cultures prévues et de leur tolérance au pH basique. L'échantillon E4 avec un pH de 9,18 semble particulièrement alcalin et devra faire l'objet d'une attention particulière (**Petrović, 2020**).

2. Calcaire total

On constate aussi qu'une assez grande variabilité des teneurs en calcaire total entre ces échantillons, allant de légèrement pourvu (E2) à notablement calcaire (E4). La majorité des échantillons (E1, E3, E5, E6) se classe cependant dans la catégorie "moyennement calcaire" avec des teneurs comprises entre 10 et 25%. Une teneur trop élevée en CaCO_3 peut poser des problèmes de pH basique excessif et de carences en oligo-éléments. Mais un sol trop pauvre en calcaire peut aussi manquer de calcium, un élément nutritif important pour les plantes. Ces résultats devront être croisés avec les autres paramètres (pH, calcaire actif, etc.) pour évaluer d'éventuels besoins en amendements organiques ou minéraux.

3. Calcaire actif

Valeurs brutes de calcaire actif :

- Elles varient de 0,15 (E5 et E6) à 0,3 (E2)
- E1 a une valeur de 0,2
- E3 et E4 ont une valeur intermédiaire de 0,25

Pourcentages de calcaire actif par rapport au calcaire total :

- E5 et E6 ont 31% de leur calcaire total sous forme active, ce qui est élevé
- E2 n'a que 13% de son calcaire total sous forme active, malgré une valeur brute plus élevée
- E1, E3 et E4 ont des pourcentages intermédiaires de 19% à 25%

Observations clés:

- Bien que E5 et E6 aient les valeurs brutes les plus faibles (0,15), 31% de leur calcaire est actif, ce qui est une forte proportion susceptible d'impacter le pH du sol.
- A l'inverse, l'échantillon E2 avec 0,3 de calcaire actif n'en a qu'une faible part (13%) de son calcaire total qui est réellement réactive.
- Les autres échantillons se situent dans une gamme moyenne.

Comparaison avec le pH :

- E1 (pH 8,4), E5 (pH 8,71), E6 (pH 8,54) : pH basiques explicables par les taux très élevés de calcaire actif.
- E4 (pH 9,18) : pH très basique malgré un taux "seulement" élevé (19%). D'autres facteurs pourraient jouer (cations basiques).
- E2 (pH 8,35) et E3 (pH 8,15) : pH basiques cohérents avec leurs taux élevés.

Contexte pédoclimatique :

- Climat semi-aride : Chaleurs estivales et pluviométrie irrégulière (369 mm/an).
- Texture du sol : Limon argileux sableux (bon équilibre entre rétention d'eau et drainage).
- Matière organique : Taux élevés (6-7%), un atout pour ces sols.

le taux élevé de calcaire actif est le principal défi agronomique de ces sols. Il exige une gestion fine, adaptée à chaque parcelle et chaque culture. Cependant, les autres propriétés du sol (matière organique, texture) sont favorables. Avec une approche précise et une surveillance continue, il est tout à fait envisageable de maintenir une agriculture productive et durable sur la ferme de Si Mourad.

4. La conductivité

La conductivité électrique est un indicateur de la salinité du sol, c'est-à-dire de la concentration en sels solubles présents. Une salinité élevée entraîne un stress hydrique et ionique pour les plantes, limitant leur croissance. Les sols salins peuvent également présenter des problèmes de structure. Selon (**Kazouz et Rouabeh, 2020**) Les causes de salinisation peuvent être naturelles (présence de sels dans la roche-mère) ou liées aux pratiques (eau d'irrigation salée, apports excessifs d'engrais, etc.). En résumé, à l'exception de E3 qui semble salé, la plupart des échantillons ont une conductivité électrique indiquant des niveaux de salinité acceptables. Mais une surveillance et une gestion de la salinité resteront nécessaires, notamment pour E4 qui frôle les seuils critiques.

5. pH

On constate que la plupart des échantillons (E1, E2, E3, E5, E6) ont un pH compris entre 7,5 et 8,7, ce qui correspond à la classe des sols basiques selon l'échelle. Seul l'échantillon E4 avec un pH de 9,18 se classe dans la catégorie des sols très basiques (pH > 8,7). Les sols basiques à très basiques peuvent poser certains problèmes :

- Carence en oligo-éléments (fer, manganèse, zinc, cuivre, etc.) qui deviennent moins assimilables
- Mauvaise structure du sol (battance)
- Toxicité pour les cultures sensibles (ex : pois, lentilles, pomme de terre)

Un pH trop élevé est souvent lié à la présence importante de calcaire actif dans le sol. Pour les échantillons très basiques comme E4, il serait recommandé d'envisager un amendement avec de la matière organique (compost, fumier, etc.) pour faire légèrement baisser le pH et améliorer la structure. Pour les sols basiques, une surveillance est conseillée. Dans tous les cas, il faudra croiser ces résultats avec les teneurs en calcaire total et actif pour avoir une vision d'ensemble et proposer des solutions correctives adaptées (apport de soufre, dissolution du calcaire, etc.) si nécessaire. Mais de manière générale, un pH basique à légèrement basique reste acceptable pour la plupart des cultures dans les régions calcaires comme celle étudiée.

6. Matière organique

Les teneurs en matière organique (MO%) et en carbone organique (C%) pour les échantillons E1 à E6. Basée sur le tableau 12 "Le carbone organique" fourni dans l'Annexe II.

Tous les échantillons sont classés comme "riches en matière organique" selon l'échelle fournie, avec des teneurs en carbone organique supérieures à 2,32% (23,2 g/kg).

(**Huber et al.,2011**), précisent que cette richesse en matière organique est un atout majeur pour ces sols :

1. Amélioration de la structure du sol : la matière organique favorise la formation d'agrégats stables, réduisant les risques de battance et d'érosion.
2. Rétention en eau : elle augmente la capacité de rétention en eau, ce qui est crucial en climat semi-aride.
3. Réserve nutritive : elle constitue une réserve d'éléments nutritifs (N, P, K) libérés progressivement.
4. Activité biologique : elle stimule l'activité des micro-organismes bénéfiques.

5. Effet tampon : elle aide à stabiliser le pH du sol.

Nos sols ont des teneurs élevées en matière organique sont particulièrement intéressantes, selon (Huber et al.,2011), elles peuvent aider à atténuer les effets négatifs du pH basique (carence en oligo-éléments), améliorer la rétention en eau dans un climat semi-aride, enrichir naturellement le sol et réduire les besoins en engrais.

7. Humidité

La mesure du taux d'humidité peut éclaircir la nature des sols, car un sol agricole avec un taux d'humidité faible peut poser certains problèmes comme :

- Moindre disponibilité en eau pour les plantes
- Risque de stress hydrique pendant les périodes sèches
- Dégradation de la structure du sol (battance)
- Difficultés pour l'enracinement et l'absorption des nutriments

L'explication des taux d'humidités faibles des sols de la ferme par sa situation en climat semi-aride.

Conclusion

Conclusion

Ce projet a permis d'explorer en profondeur les enjeux liés à l'aménagement des infrastructures et à la gestion des ressources en eau dans le cadre de fermes agricoles. Nous avons pu constater l'importance cruciale de ces aspects pour assurer une productivité et une durabilité optimales des exploitations.

Les résultats ont souligné le rôle central des infrastructures physiques comme les bâtiments d'élevage, les systèmes d'irrigation, les chemins, etc. Leur conception et leur aménagement judicieux permettent d'optimiser l'utilisation de l'espace, d'améliorer les conditions de travail, et de réduire les pertes. Nous avons également insisté sur l'importance des infrastructures "immatérielles" comme les savoir-faire, l'accès aux marchés et la réglementation.

Concernant la gestion de l'eau, des défis majeurs ont été identifiés, notamment l'adaptation au changement climatique, la réduction des gaspillages et la nécessité d'accroître la productivité de l'eau. Des solutions innovantes alliant nouvelles technologies (capteurs, SIG, modélisation) et approches participatives (gestion participative de l'irrigation) ont été proposées.

Cependant, ce projet comporte certaines limites, notamment un manque de données chiffrées détaillées et d'études de cas spécifiques qui auraient permis d'étayer davantage les recommandations. De plus, l'aspect économique lié aux coûts des infrastructures et aux financements n'a été qu'effleuré.

Dans les perspectives, il serait intéressant d'approfondir les synergies entre aménagement des infrastructures et gestion de l'eau, ces deux aspects étant étroitement liés. Il faudrait également réaliser des évaluations technico-économiques de solutions innovantes identifiées, simuler différents scénarios de changement climatique, et développer des outils d'aide à la décision à l'intention des exploitants.

En termes de recommandations générales, l'adoption d'une approche systémique prenant en compte tous les aspects (techniques, agronomiques, économiques, réglementaires, environnementaux) semble primordiale. La formation des agriculteurs aux nouvelles technologies et aux bonnes pratiques est également un prérequis indispensable. Enfin, des efforts importants en matière de recherche, de transfert de connaissances et d'accompagnement sur le terrain sont nécessaires pour relever les défis de l'agriculture durable dans un contexte de changements globaux.

L'IoT offre un potentiel immense pour améliorer l'efficacité, la productivité et la durabilité de l'agriculture. Espérons que des mesures seront prises pour revitaliser des fermes comme « Si Mourad » et exploiter pleinement les avantages de la technologie.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Adda, A.** (2011). Ferme pilote « Si Mourad » de Sidi Ali [Internet]. 2011. Disponible sur: <https://fermes-pilotes-en-algerie.blog4ever.com/ferme-pilote-a-si-mourad-a-de-sidi-ali>
- Alejandro M, Trujillo J and Mylopoulos J.** (2017). Specification and derivation of key performane indicators for busuness analytics : A semantic approach . data and knowledge engineering, 108(January) 30-49.
- Alexandratos N. and Bruinsma J.** (2012), “World Agriculture Towards 2030/2050: The 2012 Revision”, ESA Working Paper, 12-03.
- Baize, D.** (2000). Guide des analyses en pédologie. 2 ème Ed. INRA. Paris. 257P.
- Bank AD.** (2024). Banque africaine de développement. African Development Bank Group; 2022 [cité 27 mai 2024]. Tendances du financement des infrastructures en Afrique en 2019-2020 : le rapport est lancé. Disponible sur: <https://www.afdb.org/fr/news-and-events/press-releases/tendances-du-financement-des-infrastructures-en-afrique-en-2019-2020-le-rapport-est-lance-57398>
- Barrow NJ, Hartemink AE.** (2023). The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. Plant Soil [Internet]. 1 juin 2023 ;487(1):21-37. Disponible sur: <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05960-5>
- Bougaci A, Sadouki I.** (2018). Contribution à l'étude des propriétés physicochimique de l'argile rouge [Internet]. 2018. Disponible sur: <https://dspace.univ-medea.dz/bitstream/123456789/5141/1/M118091.pdf>
- Boulaine J.,** (1994). Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France, 1994, 80-67(4), p. 9-73.
- Calvet, R.** (2003). Le sol, Propriétés et fonctions : Constitution et structure, phénomènes aux interfaces. Tome1. Vol1. Ed. France agricole. Paris. 457P.
- Cédra C.** (1997). Les matériels de fertilisation et de traitement des cultures. Antony, Paris: Antony: CEMAGREF , Paris: Fédération nationale des Cuma; 1997. 343 p. (Formagri volumes 4/5).
- CGIAR** (2012), “Impacts of Climate Change on Agricultural and Aquatic Ecosystems and Natural Resources under the CIGAR’s Mandate”, CGIAR Working Paper, 23.
- Châtel F., Holst-Warhaft G. and Steenhuis T.** (2014), Water Scarcity, Security and Democracy: A Mediterranean Mosaic. Global Water Partnership Mediterranean, Ithaca (N.Y.), Cornell University-Atkinson Center for a Sustainable Future.
- Comprendre les besoins spécifiques des cultures [Internet]. 2023 [cité 27 mai 2024]. Disponible sur: <https://www.ngenesis.com/comprendre-les-besoins-specifiques-des-cultures-pour-une-fertilisation-optimale-en-azote>
- Daccache A, Elbana MA, Fouial A, Karajeh F, Khadra R, Lamaddalena N, et al.** (2016). Chapitre 3 - Gestion des ressources en eau. In: Mediterra 2016 : Zéro gaspillage en Méditerranée [Internet]. Paris: Presses de Sciences Po; 2016 [cité 27 mai 2024]. p. 71-94. (Hors collection). Disponible sur: <https://www.cairn.info/mediterra-2016-zero-gaspillage-en-mediterranee--9782724619201-p-71.htm>
- Dicova, C.** (1997). Les matériels de fertilisation et traitement des cultures. Ed. Tec & Doc. Lavoisier. 276P.

Drouineau, G. (1942). Dosage rapide du calcaire actif du sol: nouvelles données sur la séparation et les 477 natures des fractions calcaires. *Ann. Agron*, 12 : 441-450.

Durand, J.H. (1983). *Les sols irrigables, Etude pédologique*. Presses Universitaire de France. Editions Agence de Coopération Culturelle et Technique. Paris. 339P.

FAO (2002), *Crops and Drops: Making the Best Use of Water for Agriculture*, Rome, FAO.

FAO (2011a), *FAO in the 21st Century: Ensuring food security in a changing world*, Rome, FAO (www.fao.org/docrep/015/i2307e/i2307e.pdf).

FAO. (2015). *State of food and agriculture. Social protection and agriculture: Breaking the cycle of rural poverty*. Rome, Italy

Fernández García I., Rodríguez Díaz J.A., Camacho Poyato E., Montesinos P. and Berbel J. (2014), “Effects of Modernization and Medium Term Perspectives on Water and Energy Use in Irrigation Districts”, *Agricultural Systems*, 131, pp. 56-63.

Ferragina E. (2010), “The Water Issue in the Mediterranean”, in M. Scoullou, E. Ferragina and C. Narbona (eds), *Environmental and Sustainable Development in the Mediterranean*, Barcelona and Paris, European Institute of the Mediterranean (IEMed) and EU Institute for Security Studies (EUISS), vol. 8, pp. 53-79.

Démarques G., Aouriri I. (2024). Comprendre les besoins spécifiques des cultures [Internet]. 2023 [cité 28 mai 2024]. Disponible sur: <https://www.ngenesis.com/comprendre-les-besoins-specifiques-des-cultures-pour-une-fertilisation-optimale-en-azote>

Gee, G. and Or, D. (2002). Particle size analysis. In ‘Methods of soil analysis, Part 4. Physical methods’. 499 Soil Science Society of America Book Series, 5: 255-293.

Haniche M , Tabrait N. (2019). *Internet des objets dans le domaine de l’agriculture de demain*, 2019, p.35-78.

Kazouz Z, Rouabeh A. (2020). Caractérisation des eaux d’irrigation et leur influence sur la salinité du sol dans la région de Ouargla [Internet]. 2020. Disponible sur: <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/28755/1/Kazouz-Rouabeh.pdf>

Kijne J.W. (2003), *Unlocking the Water Potential in Agriculture*, Rome, FAO.

Internet des Objets pour une agriculture plus intelligente | Mutualia [Internet]. [cité 27 mai 2024]. Disponible sur: <https://www.mutualia.fr/agriculteur/infos/economie-et-societe/news/internet-des-objets-iot-pour-une-agriculture-plus-intelligente>

Lamaddalena N. and Sagardoy J.A. (2000), *Performance Analysis of On-demand Pressurized Irrigation Systems*, Rome and Paris, FAO-CIHEAM, “FAO Irrigation and Drainage Paper”, No. 59.

Levidow L., Zaccaria D., Maia R., Vivas E., Todorovic M. and Scardigno A. (2014), “Improving Water-efficient Irrigation: Prospects and Difficulties of Innovative Practices”, *Agricultural Water Management*, 146, pp. 84-94.

Mengel K. *La nutrition des plantes : d’Antoine Laurent de Lavoisier à nos jours. actualité chimique*. 2000;

Molden D., Oweis T., Steduto P., Bindraban P., Hanjra M.A. and Kijne J. (2010), “Improving Agricultural Water Productivity: Between Optimism and Caution”, *Agricultural Water Management*, 97 (4), pp. 528-535.

Montoroi, J-P. (1997). *Etude et gestion des sols. Conductivité électrique de la solution du sol et d'extraits aqueux de sol : application à un sol sulfaté acide salé de Basse-Casamance (Sénégal)*. Ed AFES. Montpellier. 298P.

NEEA (2015), Agricultural Irrigation Initiative: The Future of Agricultural Irrigation, document prepared by Marshall English, Portland (Or.), Northwest Energy Efficiency Alliance (NEEA).

Olesen J.E., Trnka M., Kersebaum K.C., Skjelva^og A.O., Seguin B., Peltonen Sainio P., Rossi F., Kozyra J. and Micale F. (2011), “Impacts and Adaptation of European Crop Production Systems to Climate Change”, *European Journal of Agronomy*, 34, pp. 96-112.

Omari C, Moisseron JY, Alpha A. (2012). L’agriculture algérienne face aux défis alimentaires. Trajectoire historique et perspectives. *Revue Tiers Monde* [Internet]. 2012 ; 210(2):123-41. Disponible sur: <https://www.cairn.info/revue-tiers-monde-2012-2-page-123.htm>

Pereira L.S., Cordery I. and Iacovides I. (2012), “Improved Indicators of Water Use Performance and Productivity for Sustainable Water Conservation and Saving”, *Agricultural Water Management*, 108, pp. 39-51.

Petrović M. (2020). Hanna Instruments Maroc. Importance du pH et de la disponibilité des éléments nutritifs du sol. 2020. Disponible sur: <https://blog.hannaservice.eu/fr/importance-du-ph-et-de-la-disponibilite-des-elements-nutritifs-du-sol/>

Portmann F.T., Siebert S. and Doll P. (2010), “MIRCA2000-Global Monthly Irrigated and Rainfed Crops Areas around the Year 2000: A New High-resolution Data set for Agricultural and Hydrological Modelling”, *Global Biogeochemical Cycles*, 24 (1), pp. 1-24

Regner J., Jochen H., Salman A.Z., Wolff H.P. and Al-Karablieh E. (2006), “Approaches and Impacts of Participatory Irrigation Management (PIM) in Complex, Centralized Irrigation Systems-experiences and Results from the Jordan Valley”, Conference on International Agricultural Research for Development, Bonn, 11-13 October.

Rijsberman F.R. (2006), “Water Scarcity: Fact or Fiction?” *Agricultural Water Management*, 80 (1-3), pp. 5-22.

Rockstrom J., Hatibu N., Oweis T. and Wani S.P. (2007), “Managing Water in Rainfed Agriculture”, in D. Molden (ed.), *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*, London and Colombo, Earthscan-International Water Management Institute (IWMI), pp. 315-334.

Rockstrom J., Louise K., Wani S.P., Barron J., Hatibu N., Oweis T., Bruggeman A., Farahani J. and Qiang Z. (2010), “Managing Water in Rainfed Agriculture: The Need for a Paradigm Shift”, *Agricultural Water Management*, 97 (4), pp. 543-550.

Saadi S., Todorovic M., Tanasijevic L., Pereira L.S., Pizzigalli C. and Lionello P. (2015), “Climate Change and Mediterranean Agriculture: Impacts on Winter Wheat and Tomato Crop Evapotranspiration, Irrigation Requirements and Yield”, *Agricultural Water Management*, 147, pp. 103-115.

Schvartz C., Muller J-C. and Decroux J. (2005). Agriculture et fertilisation. in Guide de la fertilisation raisonnée. France Agricole. Comifer, ISBN : 2-85557-120-0, 473P.

Thivet G. and Fernandez S. (2012), “Water Demand Management: The Mediterranean Experience”, Technical Focus Paper, prepared by the Plan Bleu for the GWP.

Wani S.P., Sreedevi T.K., Rockstrom J. and Ramakrishna Y.S. (2009), “Rainfed Agriculture: Past Trends and Future Prospectives”, in S.P. Wani, J. Rockstrom and T. Oweis (eds), *Rainfed Agriculture: Unlocking the Potential*, Wallingford, CAB International, pp. 1-35.

Wise Timothy A. Pourra-t-on Nourrir la Planète en 2050 ? Un Etat des lieux des Modèles de Prévisions actuels. (13).

WWAP (2015), The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World, United Nations World Water Assessment Program (WWAP), Paris, UNESCO.

Annexe I

Annexe I

I.1. Analyses physiques

I.1.3. Analyse granulométrique

- Dans un bécher de 500 ml, peser 15g de terre fine.
- Ajouter 50 ml d'eau oxygénée (20%), et laisser reposer pendant 1 heure.
- Séchage à l'étuve pendant 24h à 105°C.
- Ajouter 15ml de xématophosphate se sodium (50g/l).
- Agitation mécanique pendant 2 heures.
- Verser la suspension dans une éprouvette graduée de 1000ml.
- Compléter la solution versée dans l'éprouvette avec de l'eau distillée jusqu'au trait de 750 ml.
- On agite l'éprouvette et on laisse reposer pendant 48 secondes, ensuite on prend un prélèvement à 10 cm grâce à la pipette de Robinson (P1).
- On agite l'éprouvette et on laisse reposer pendant 4 minutes et 48 secondes, ensuite on prend un prélèvement à 10 cm grâce à la pipette de Robinson (P2).
- On agite l'éprouvette et on laisse reposer pendant 6 heures, ensuite on prend un prélèvement à une hauteur X qui sera désignée selon le tableau des temps de sédimentation (Tableau 7) grâce à la pipette de Robinson (P3).
- Les prélèvements sont mis dans des creusets à poids connus, puis ils sont séchés à l'étuve à 105°C/24heures.
- Après avoir ressorti tous les échantillons de l'étuve, on les laisse refroidir dans un dessiccateur, et on les pèse.
- Faire les calculs et déterminer la texture du sol grâce au triangle des textures (Figure 4).
- **Calculs**
- (P1) : Argiles + Limons fins + Limons grossiers
- (P2) : Argiles + Limons fins
- (P3) : Argiles
- % Argiles = $(P3) \times 750/10 \times 100/15$
- % Limons fins = $[(P2) - (P3)] \times 750/10 \times 100/15$
- % Limons grossiers = $[(P1) - (P2)] \times 750/10 \times 100/15$
- % Sables = $100 - (\% \text{Argiles} + \% \text{Limons fins} + \% \text{Limons grossiers})$

I.1.1. Détermination du taux d'humidité

Cette analyse ne nécessite pas le broyage et le tamisage des échantillons. L'analyse du taux d'humidité des échantillons doit se faire le même jour que leur prélèvement, ceci est un

Renseignement important pour la connaissance de l'état hydrique du sol. Le protocole est simple et se fait comme suite :

- Peser à l'aide d'une balance de précision, une capsule en verre vide.

- Faire le tarage du poids de la capsule et peser 10g d'échantillon de sol (P1).
- Mettre à l'étuve à 105°C, pendant 24 heures.
- Peser la capsule contenant l'échantillon séché (P2), après l'avoir laissée refroidir à la
- Température ambiante dans un dessiccateur.

- **Calculs**

$$H (\%) = (P1 - P2) / P2 \times 100$$

H : Taux d'humidité en %.

P 1 : Poids humide (g).

P 2 : Poids sec (g).

I.1.2. Teneurs du sol en carbone et en matière organique

1. Préparer l'échantillon de sol

- Prélever un échantillon de sol représentatif
- Le sécher à l'étuve à 104°C
- Le broyer finement et le tamiser à 2 mm

2. Peser l'échantillon sec

- Peser avec précision environ 10 g de l'échantillon de sol sec tamisé dans un creuset en porcelaine ou platine préalablement taré (P0)

3. Calcination

- Placer le creuset contenant l'échantillon dans un four à moufle
- Calciner à 505°C pendant 4 heures minimum
- Laisser refroidir le creuset dans un dessiccateur

4. Peser l'échantillon calciné

- Une fois refroidi, peser avec précision le creuset contenant le résidu calciné (P1)

5. Calculs

- La perte de masse P0 - P1 correspond à la masse de matière organique brûlée
- Le taux de matière organique (MO) en % est : $(P0 - P1) / P0 \times 100$

Il est assez facile de déterminer la teneur en carbone organique d'un sol ou d'une matière organique. Ces mesures, largement utilisées, ont été mises au point depuis longtemps.

Pour calculer la teneur en matière organique du sol (MO %, ou g/100 g de sol sec), la teneur en carbone du sol (C %, ou g/100 g de sol sec) est multipliée par un coefficient de valeur 1,72 : $C \% \times 1,72 = MO \%$.

Le coefficient 1,72 correspond à la proportion moyenne de carbone dans la matière organique du sol (cette proportion est de 58 %).

I.2. Analyses physicochimiques

I.2.1. Mesure du pH eau

- Peser 10 g de terre fine dans un bécher de 250 ml
- Ajouter 50 ml d'eau distillée au sol.
- Agiter pendant 5 min.
- Laisser reposer pendant 30 minutes.
- Allumer le pH mètre et faire l'étalonnage.
- Mettre l'électrode du pH mètre au contact du surnageant de la solution.
- Lire la valeur obtenue.

I.2.3. Mesure de la conductivité électrique

- Peser 10 g de sol dans un bécher de 100 ml.
- Ajouter 50 ml d'eau distillée.
- Agiter pendant 5min.
- Laisser reposer pendant 30 minutes.
- Allumer le conductimètre et rincer l'électrode par l'eau distillée et essuyer par du papier joseph.
- Mettre l'électrode dans le surnageant de la solution, et lire la valeur affichée.

I.2.4. Mesure du calcaire total

- Peser 1g de terre fine dans un erlen de 250ml.
- Tenir l'appendice latéral à l'aide d'une pince métallique, et la remplir par l'HCl à 37% au 3/4.
- Sécher les parois de l'eren avec du papier joseph pour éviter le contact HCl-terre.
- Ouvrir l'ampoule du calcimètre et ajuster le niveau du calcimètre à zéro.
- Relier l'eren au calcimètre, en prenant soin de bien fermer l'ouverture.
- Lire le volume du CO₂ dégagé (V0).
- Répandre l'acide sur la terre, et lire le niveau du volume de CO₂ dégagé sur le calcimètre (V1).
- Pour le témoin, on remplace la terre par 0,3g de CaCO₃ et on lit le volume V0 lorsqu'on relie l'eren avec le calcimètre, et le V1 après le contact du HCl avec le CaCO₃.

- **Calculs**

$$V_s \times mCaCO_3$$

$$CaCO_3 \% = \frac{\quad}{\quad} \times 100$$

$$V_t \times m_{\text{sol}}$$

- $m_{\text{sol}} = 1\text{g}$
- $m_{\text{CaCO}_3} = 0.3\text{g}$
- $V_s = V_1 \text{ sol} - V_0 \text{ sol}$
- $V_t = V_1 \text{ témoin} - V_0 \text{ témoin}$
- $V_0 = \text{Volume initial}$
- $V_1 = \text{Volume lu}$

I.2.5. Dosage du calcaire actif

Le dosage du calcaire actif ne s'effectue que pour les échantillons ayant 5% ou plus de calcaire total.

- Peser 10 g de terre fine.
- Introduire dans un flacon de 300 ou 500 ml.
- Ajouter 250 ml d'oxalate d'ammonium N/5 (à 0,2 N).
- Agiter durant 2 heures à l'agitateur mécanique (rotatif).
- Filtrer à l'aide d'un entonnoir en verre et du papier filtre la solution dans un bêcher de 300 ou 400 ml, en écartant les premiers millilitres du filtrat.
- Prélever avec une pipette 10 ml de liquide clair et les verser dans un bêcher de 250 ml.
- Ajouter 10 ml d' H_2SO_4 au 1/10 (à 0,1 N).
- Chauffer cette solution sur une résistance électrique (ou bec Bunzen) sans dépasser 60°C (mesurer avec un thermomètre la température).
 - Placer le bêcher sur un agitateur magnétique surmonté d'une burette graduée au 1/20 de ml et contenant du permanganate de potassium.
 - Titrer par le permanganate de potassium jusqu'à l'obtention d'une couleur rose persistante.
 - Soit n le nombre de ml de KMnO_4 versé ou obtenus (n volume en cm^3).

Essai témoin

- Titrer de la même façon, 10 ml de la solution d'oxalate d'ammonium utilisée.
- Soit N le nombre de ml de KMnO_4 versé pour le témoin (N volume en cm^3).

Calculs

$$\text{CaCO}_3 \text{ actif } \% = 1,25.(N - n)$$

Annexe II

Annexe II

Echelles d'interprétation des résultats

Tableau 8. Le pH du sol.

pH	< 3,5	3,5–4,2	4,2 - 5	5 - 6,5	6,5 -7,5	7,5 -8,7	> 8,7
Classe	Hyper acide	Très acide	Acide	Faiblement acide	Neutre	Basique	Très basique

(Baize, 2000)

Tableau 9. Classes de la qualité des sols selon leur CE.

Classe	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) à 25°C	Qualité des sols	Effet sur le rendement
Classe I	0 à 500	non salé	Négligeable
Classe II	500 à 1000	Légèrement salé	Diminution du rendement des cultures très sensibles au sel
Classe III	1000 à 2000	salé	Diminution du rendement de la plupart des cultures
Classe IV	2000 à 4000	très salé	Seules les cultures résistantes donnent un rendement satisfaisant
Classe V	Plus de 4000	extrêmement salé	Seules quelques cultures donnent des rendements satisfaisants

(Durand, 1983)

Tableau 10. Les normes de calcaire total.

CaCO ₃ total (%)	Qualité du sol
< 5	Légèrement pourvu en CaCO ₃
5 à 10	Peu calcaire
10 à 25	Moyennement calcaire
25 à 50	Notablement calcaire
> 50	Fortement calcaire

(ITA, 1977)

Tableau 11. Les normes calcaire actif.

CaCO ₃ actif (%)	Qualité du sol
< 5	faible
5 à 10	Assez élevé
10 à 20	élevé
> 20	Très élevé

(ITA, 1977)

Tableau 12. Les normes de carbone organique.

(MO% = CO% . 1,72) , CO% = CO(g/kg)/10

Taux de la matière organique (%)	Taux du carbone organique (%)	Qualité du sol
< 1	< 0,58 (< 5,8 g/kg)	Très pauvre
1 à 2	0,58 à 1,16 (5,8 à 11,6 g/kg)	Pauvre
2 à 4	1,16 à 2,32 (11,6 à 23,2 g/kg)	Moyenne
> 4	> 2,32 (>23,2 g/kg)	Riche

(ITA, 1977)