

RÉPUBLIQUE ALGÈRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Université Abdelhamid ibn Badis
de Mostaganem**

**Faculté des Sciences de la Nature et
de la Vie**



جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم كلية علوم

الطبيعة و الحياة

DÉPARTEMENT D'AGRONOMIE

N° _____ /AGRO/2025

MÈMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par :

M^{elle} MERZOUGUI Fatma

En vue de l'obtention du diplôme de

Master Académique en Agronomie

Spécialité : PRODUCTION VÉGÉTALE

THÈME

**Contribution à l'étude de l'effet de la bentonite sur la séquestration
du carbone organique du sol sous climat semi-aride**

Soutenu publiquement le 24/06/2025

Devant le JURY :

Président	M^{me} MAGHNIA Djamilia	M.C.A	U.Mostaganem
Examineur	M^r BENGUENDOZ Abdenour	M.C.A	U.Mostaganem
Encadreuse	M^{me} BENOUDAH Salima	M.C.B	U.Mostaganem
Co-encadreur	M^r BENALI Sidahmed	M.C.B	U.Mostaganem

Année universitaire: 2024 - 2025



Remerciements

*Tout d'abord, je remercie **Dieu** pour m'avoir donné la force et le courage nécessaires pour poursuivre mes études jusqu'à ce stade.*


*Un sincère remerciement à mon encadreuse, Docteur **BENOUADAH Salima**, dont l'assistance et le soutien ont été d'une importance cruciale pour notre réussite. Ses conseils avisés, son investissement en temps et sa patience infinie ont été des facteurs déterminants dans la réalisation de ce travail. Je la remercie pour sa disponibilité durant la réalisation de ce mémoire.*

*Je tiens à remercier mon Co-encadrant le Docteur **BENALI Sidahmed** pour l'attention qu'il a bien voulu accorder à mon travail et pour sa participation à l'encadrement de ce mémoire.*

*Je remercie également Docteur **MAGHNIA Djamila** d'avoir accepté de présider le jury, ainsi que le Docteur **BENGUENDOZ Abdenour** pour son examen attentif de notre travail, témoignant ainsi de leur engagement envers notre réussite académique.*

*Je tiens à exprimer mon profond remerciement aux ingénieurs des laboratoires de recherche des universités de Tiaret et Mostaganem, en particulier **Saida et Soumia**, pour leur précieuse assistance et leurs aides.*

Enfin, je tiens à renouveler mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, y compris les enseignants et les personnels du département d'Agronomie de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, qui ont contribué dans ma formation.



Dédicace

Je dédie ce travail avec une profonde reconnaissance à mes chères parents, m'ont été une source de force et de persévérance tout au long de ma parcours.

*À **ma mère**, véritable pilier de ma vie, dont la tendresse et le courage m'inspirent chaque jour et leurs prières.*

*À **mon père**, pour sa sagesse, leurs sacrifices silencieux, ses encouragements constants et sa confiance inébranlable.*

*À mes chères sœurs **Kheira, Nour Elhouda, Romaiissa et Ines**, pour leur présence, leur humour et leur soutien affectueux, même à distance. Vous avez su, chacun à votre manière, apaiser mes moments de doute et célébrer mes petites victoires.*

À mes amis et mes proches sincères, compagnons de route fidèles, qui ont partagé avec moi les hauts et les bas de cette aventure, et qui m'ont toujours soutenue avec générosité, humour et affection.

*J'adresse également cette dédicace à toute la famille **MERZOUGUI** et la famille **BENYAHIA**.*

Et à tous ceux qui consulteront ce modeste travail.

Résumé

Le stockage du carbone organique dans le sol (SCOS) est un élément important dans les efforts internationaux de lutte contre le changement climatique, car il contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Le sol agit comme un réservoir naturel de carbone. Puisque les sols de la wilaya de Mostaganem ont une texture sableuse dans leurs ensembles et pauvres en matière organique, donc pourvus d'une grande perméabilité ce qui induit un lessivage des éléments fins, pour cette raison, on a pensé d'apporter des amendements (i) organique (fumier), (ii) minéral (bentonite : argile brute) et (iii) sous forme d'un mélange (fumier + bentonite) avec des doses bien appropriées afin d'améliorer la fertilité physique et chimique du sol à savoir : la densité apparente, le stockage du carbone organique dans le sol, la teneur en éléments nutritifs azote, phosphore et potassium et le rapport C/N. Pour se faire, nous avons choisi les doses suivantes : 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 15% et 20%. Donc la dose de 20% de fumier a donné le meilleur résultat dans tous les paramètres mais aussi la bentonite seule et la combinaison des traitements a donné des résultats remarquables en comparaison avec le témoin. Ces résultats mettent en évidence le rôle de fumier dans la fertilité de sol et la combinaison des amendements minéraux et organiques dans la stabilisation de la structure et l'amélioration du sol notamment le traitement AF 20%, sachant que les amendements organiques augmentent le taux de la matière organique et les amendements minéraux la protègent contre l'activité minéralisatrice des microorganismes et enrichissent le sol par les éléments fertilisants et le carbone organique à long terme.

Mots clés : Séquestration du carbone organique, Bentonite, Fumier, Mostaganem, Sols Sableux, Fertilité, Climat semi-aride.

Abstract

The organic carbon storage in the soil (SCOS) is an important element in international efforts to combat climate change, as it helps reduce greenhouse gas emissions. Soil acts as a natural carbon reservoir. Since the soils of the wilaya of Mostaganem have a sandy texture in their sets and poor in organic matter, therefore provided with a high permeability which induces a leaching of fine elements, for this reason, it was thought to make amendments (i) organic (manure), (ii) mineral (bentonite: raw clay) and (iii) in the form of a mixture (manure + bentonite) with appropriate doses to improve soil physical and chemical fertility namely: bulk density, storage of organic carbon in the soil, the nutrient content of nitrogen, phosphorus and potassium and the C:N ratio. To do this, we chose the following doses: 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 15% and 20%. Therefore the dose of 20% manure gave the best result for all parameters but also the bentonite alone and the combination of treatments gave remarkable results in comparison with the control soil. These results highlight the role of manure in soil fertility and the combination of mineral and organic amendments in stabilizing the structure and improving the soil specially with the AF 20% treatment, Organic soil amendments increase the content of organic matter and mineral amendments protect it from the mineralizing activity of microorganisms and enrich the soil with nutrients and long-term organic carbon.

Keywords: Organic carbon sequestration, Bentonite, Manure, Mostaganem, Sandy soils, Fertility, Semi-arid climate.

ملخص

يعد تخزين الكربون العضوي في التربة عنصرا مهما في الجهود الدولية لمكافحة التغير المناخي , لانه يساهم في تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة لان التربة تعمل كخزان طبيعي للكربون , و بما ان التربة في ولاية مستغانم ذات قوام رملي بشكل عام وفقيرة من حيث المادة العضوية فهي تتميز بنفاذية عالية مما يؤدي الى ترشيح العناصر الدقيقة , ولهذا السبب فكرنا في اجراء تعديلات : (1) عضوية (السماد) , (2) معدنية (البنتونيت الطين الخام) و (3) على شكل خليط (سماد + بنتونيت) , بجرعات مناسبة من اجل تحسين الخصوبة الفيزيائية و الكيميائية للتربة وهي : الكثافة الظاهرية , تخزين الكربون العضوي في التربة , نسبة العناصر الغذائية من الازوت , الفوسفور و البوتاسيوم و نسبة الكربون الى النيتروجين كذلك , و للقيام بذلك اخترنا الجرعات التالية : 2.5% , 5% , 7.5% , 10% , 15% و 20% , وكانت جرعة 20% من السماد هي الافضل من حيث النتائج في جميع المؤشرات , كما ان البنتونيت وحده و الخليط الممزوج اعطيا نتائج ملحوظة مقارنة بالشاهد من التربة العادية و المزروعة كذلك , تظهر هذه النتائج دور السماد في خصوبة التربة و اهمية الجمع بين التعديلات العضوية و المعدنية في تثبيت البنية و تحسين التربة , علما ان التعديلات العضوية تزيد من نسبة المادة العضوية , اما التعديلات المعدنية فتحميها من النشاط المعدني للكائنات الدقيقة و تغني التربة بالعناصر المغذية و بالكربون العضوي على المدى الطويل.

الكلمات المفتاحية : تخزين الكربون العضوي، البنتونيت، السماد، مستغانم، التربة الرملية، الخصوبة، المناخ شبه الجاف.

Plan de travail

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des photos

Liste des tableaux

Introduction 1

Synthèse bibliographique

Chapitre I : Généralité sur les sols

I.1. Le sol	3
I.1.1. Définition	3
I.1.2. Différents types de sols	3
I.1.3. Constituants du sol	3
I.1.4. Caractéristiques physico-chimiques du sol	4
I.2. Les Argiles	6
I.2.1. Structure et composition des argiles	6
I.2.2. Différents types des argiles	6
I.3. Sols sableux	7
I.3.1. Différents types de sols sableux	8
I.3.2. Caractéristiques physico-chimique des sables	8
a. Caractéristiques physiques	8
b. Caractéristiques chimiques	8

Chapitre II : Les amendements minéraux et organiques

II. Les amendements	10
II.1. Les amendements minéraux	10
II.1.1. Bentonite	10
II.1.2. Origine de la bentonite	10
II.1.3. Type de bentonite	11
a. La bentonite sodique naturelle	12
b. La bentonite calcique naturelle	12
c. Bentonites actives	12
II.1.4. Structure de la bentonite	12

Plan de travail

II.1.5. Composition Chimique	12
II.1.6. Propriétés fondamentales de la bentonite	13
a. Capacités d'échange cationique	13
b. La surface spécifique	13
c. La propriété du gonflement	13
II.1.7. Domaine d'utilisation de la bentonite	14
II.2. Les amendements organiques	14
II.2.1. La matière organique du sol (MOS)	14
II.2.2. Exemple d'un amendement organique « Fumier de bovins »	15
a. Définition	15
b. Les types de fumiers de bovins	15
c. Structure et composition	16
d. Caractéristiques et effets du fumier de bovins	16
e. Domaines d'utilisation de fumier de bovins	17
Chapitre III : Stockage du carbone organique dans le sol	
III. Généralité	18
III.1. Cycle du carbone des sols	18
III.2. Origine du carbone	19
III.3. Le stockage du carbone dans les sols	19
III.4. Dynamique du carbone organique dans le sol	19
III.5. Le rôle de la matière organique dans les sols	20
III.6. Facteurs influençant le carbone organique des sols	21
Chapitre IV : La culture de poivron	
IV.1. Historique et Origine	23
IV.2. Classification et Systématique	23
IV.3. Importance économique de la culture du poivron	24
IV.3.1. Dans le monde	24
IV.3.2. En Algérie	24
IV.3.3. Dans la Wilaya de Mostaganem	24
IV.4. Les variétés cultivées de poivron	25
IV.5. Les Stades Phréologiques du Poivron	25
IV.6. Les exigences de la culture du poivron	26
IV.7. Les opérations culturales	26
IV.7.1. Préparation de sol	26

Plan de travail

IV.7.2. Semis et plantation	26
IV.7.3. Irrigation	27
IV.7.4. Fertilisation	27
IV.7.5. Tuteurage	27
IV.7.6. Paillage	27
IV.8. Protection phytosanitaire	27

Étude expérimentale

Chapitre I : Matériel et méthodes

I.1. Objectif du travail	28
I.2. La région de prélèvement	28
I.2.1. Situation géographique	28
I.2.2. Caractéristiques naturelles et conditions climatiques	29
a. Relief	29
b. Climat	29
c. Sol	29
I.3. Lieu de travail	29
I.4. Matériel et méthodes	30
I.4.1. Matériel	30
I.4.1.1. Verreries, appareils et produits utilisés	30
I.4.2. Méthodes	30
I.5. Échantillonnage	32
I.5.1. Échantillonnage du sol	32
I.5.1.1. Les analyses physicochimiques du sol témoin	32
a. Préparation des échantillons	32
b. Analyse granulométrique	33
c. Mesure du pH	34
d. Mesure de la conductivité électrique	34
e. Détermination du calcaire total et actif	35
I.5.2. Les amendements	36
I.5.2.1. L'amendement minéral (Bentonite)	36
I.5.2.2. L'amendement organique (Fumier de bovins)	37
I.5.3. Mise en place du dispositif expérimental	37
I.5.4. Analyses physiques et chimiques des sols reconstitués	39
A. Densité apparente	39

Plan de travail	
B. Dosage du carbone et de la matière organique	40
C. Teneur en NPK du sol	41
I.6. Calcul du stock de carbone organique du sol	42
Chapitre II : Résultats et discussion	
II.1. Résultats des analyses physico-chimiques du sol témoin	43
II.2. Résultats des analyses physiques et chimiques des sols amendés	44
II.2.1. Discussion des résultats de la densité apparente	44
II.2.2. Discussion des résultats du carbone organique de sol	45
II.2.3. Discussion des résultats de séquestration du carbone organique de sol	46
II.2.4. Discussions des résultats de la teneur en NPK du sol	48
II.2.4.1. Résultats de la teneur en azote	48
II.2.4.2. Résultats de la teneur en phosphore	50
II.2.4.3. Résultats de la teneur en potassium	51
II.2.5. Discussion des résultats de rapport C/N	53
Conclusion	55
Limites et perspectives	56
Références bibliographiques	57
Annexes	68

Liste des abréviations

A : Argile

AF : Argile + Fumier

ANIREF : Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière

C : Carbone

C/N : Rapport Carbone/Azote

CAM : Chambre d'Agriculture Martinique

CE : Conductivité électrique

CEC : Capacité d'Échange Cationique

CO : Carbone Organique

CO₂ : Dioxyde de Carbone

COS : Carbone Organique du Sol

Da : Densité apparente

DSA : Direction des Services Agricoles

F : Fumier

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

g/cm³ : Gramme par centimètre cube (g/cm³), ou gram cm⁻³

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat

Gt : Gigatonnes

ITA : Institut de Technologie Agricole

ITCMI : Institut Technique des Cultures Maraichères et Industrielles

L.F : Limon Fin

L.G : Limon Grossier

MADR : Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural

MO : Matière Organique

MOS : Matière Organique du Sol

N : Azote

P : Phosphore

pH : Potentiel Hydrogène

S : Sable

SCOS : Stock du Carbone Organique dans le Sol

SDR : Service du Développement Rural

% : Pourcentage

Liste des Figures

Figure 1: Composition d'un sol	4
Figure 2 : Structure de la kaolinite	6
Figure 3: Structure de la montmorillonite	7
Figure 4: Structure d'illites	7
Figure 5: (a) Structure de la montmorillonite d'après Hoffmann (b) Structure de la montmorillonite	13
Figure 6 : Schéma pour les domaines d'utilisation des bentonites	14
Figure 7 : Schéma explique les différents domaines d'utilisation de fumier de bovins.	17
Figure 8 : Cycle du carbone dans le sol	19
Figure 9 : Modèle de la dynamique de carbone dans le sol	20
Figure 10 : Morphologie du poivron	23
Figure 11 : Le cycle de vie du poivron	25
Figure 12 : Situation géographique de la zone d'étude (Atelier Agricole de Mazagran, Mostaganem)	28
Figure 13 : Protocole expérimental	31
Figure 14 : Évolution de la densité apparente en fonction des doses de la bentonite, du fumier et du mélange.	45
Figure 15 : Évolution de la teneur en carbone organique en fonction des doses de la bentonite, du fumier et de mélange.	46
Figure 16 : Évolution de stockage du carbone organique en fonction des doses de la bentonite, du fumier et de mélange.	48
Figure 17 : Évolution de la teneur en azote en fonction des doses de la bentonite, du fumier et du mélange.	50
Figure 18 : Évolution de la teneur en phosphore en fonction des doses de la bentonite, du fumier et de mélange.	51
Figure 19 : Évolution de la teneur en potassium en fonction des doses de la bentonite, du fumier et de mélange.	53
Figure 20 : Évolution de rapport C/N en fonction des doses de la bentonite, du fumier et de mélange.	54
Figure 21 : Triangle des textures minérales	

Liste des photos

Photo 1 : Prélèvement des échantillons de sol	32
Photo 2 : Séchage des échantillons de sol	33
Photo 3 : Broyage et tamisage des échantillons de sol	33
Photo 4 : Analyse granulométrique par la méthode de la pipette de Robinson	34
Photo 5 : Mesure du pH d'un échantillon de sol à l'aide d'un pH mètre	34
Photo 6 : Mesure de la conductivité électrique du sol par le conductimètre	35
Photo 7 : Dosage du calcaire total	35
Photo 8 : Dosage du calcaire actif	36
Photo 9 : La bentonite	36
Photo 10 : Le fumier de bovin	37
Photo 11 : Mesure de la densité apparente à l'aide de cylindre	40
Photo 12 : Dosage du carbone organique par la méthode Anne	41
Photo 13 : Dosage du NPK dans le sol	42

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les principaux amendements minéraux	11
Tableau 2 : Rôles majeurs joués par les matières organiques du sol	15
Tableau 3 : Statistique de production et superficie du poivron dans le monde	24
Tableau 4 : Les principales régions productrices de poivrons plein champ en Algérie	24
Tableau 5 : Statistique de production et superficie du poivron dites de primeurs, sous serre et l'ensemble y compris de primeurs et sous serre à Mostaganem	25
Tableau 6 : La durée du cycle du poivron en fonction des différentes étapes culturales et biologiques de la plante	26
Tableau 7 : Matériel et produits	30
Tableau 8 : Caractéristiques de la bentonite	37
Tableau 9 : Les sols reconstitués.	38
Tableau 10 : Caractérisation physico-chimiques du sol témoin	43
Tableau 11 : Le calcaire total	73
Tableau 12 : Classes de la qualité des sols selon leur CE	73
Tableau 13 : Le pH du sol	73
Tableau 14 : Le carbone organique	74
Tableau 15 : L'azote total	74
Tableau 16 : Densité apparente du sol	74
Tableau 17 : Classements des sols en fonction de leur rapport C/N	75

Introduction générale

Introduction

Dans un contexte mondial où le changement climatique s'intensifie, la séquestration du carbone organique des sols agricoles est devenue cruciale pour maîtriser la hausse du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Depuis l'ère industrielle, les niveaux de CO₂ ont connu une augmentation, passant de 280 ppm à plus de 391 ppm entre 1850 et 2012 (**WMO, 2012 ; Andres *et al.*, 2012**). Cette croissance est attribuée à diverses actions humaines, y compris l'exploitation de combustibles fossiles, le déboisement et l'extension des superficies agricoles. Ces émissions, dont près de 20 % sont dues à la déforestation, s'élèvent à plus de 32 milliards de tonnes de CO₂ annuellement (**GIEC, 2007**). Donc il est désormais reconnu que les sols jouent un rôle important dans le cycle global du carbone, stockant entre 1500 et 2500 gigatonnes (Gt) de carbone soit plus de la double quantité présente dans l'atmosphère jusqu'à une profondeur de 1 mètre (**Smith, 2004 ; Lal, 2004**). Ainsi les terres agricoles, avec une estimation de près de 2,1 Gt de carbone par an, présentent donc un potentiel significatif pour la séquestration du carbone, en particulier celles gérées dans le cadre des pratiques agricoles durables (**Lal, 2010**).

Dans la région de Mostaganem, les difficultés liées à la fertilité des terres sont particulièrement prononcées. S'étendant sur environ 212 000 hectares cultivables, le plateau de Mostaganem serait constitué d'environ 128 000 hectares de terrains sablonneux (**Anonyme, 1998**). Ces terres présentent une argile en petite quantité, une porosité importante, une texture plutôt rugueuse et une capacité limitée à retenir l'eau et les nutriments (**Morsli *et al.*, 2004 ; Goa *et al.*, 1998**). Ces sols sont aussi dépourvus de matière organique, ce qui entraîne une diminution significative de leur fertilité (**Abismail, 1999**). L'expansion de la population dans cette zone a aussi diminué la superficie des terres non cultivées (**Anonyme, 1995**), mettant en relief l'importance d'une exploitation durable des terres agricoles.

Une méthode encourageante pour rehausser la qualité agricole des sols sablonneux et soutenir la séquestration de carbone consisterait à les fertiliser grâce à l'ajout de matières organiques et minérales. Plusieurs recherches indiquent que la bentonite, une argile du type smectite, est prisée pour sa faculté à enrichir la structure du sol, à accroître sa capacité de rétention des nutriments et d'eau, ainsi qu'à diminuer le lessivage (**Reguieg, 2007 ; ENOF, 2024**). Elle est souvent associée à des amendements organiques tels que le fumier de bovin, qui enrichit le sol en substances organiques et favorise l'activité microbienne, ce qui constitue une approche combinée. Ces deux sortes d'amendements influencent à la fois les propriétés physiques

Introduction

(comme la densité apparente, la porosité et la perméabilité) et chimiques (comme le contenu en azote, phosphore, potassium et carbone organique) du sol de manière simultanée. Cela renforce sa stabilité en matière de séquestration du carbone et sa fertilité.

La matière organique du sol (MOS) joue un rôle essentiel pour stabiliser les agrégats, gérer les polluants, assurer l'accessibilité des nutriments et limiter les émissions de gaz à effet de serre (**Hien, 2004 ; FAO, 2017 ; Bernoux et Chevallier, 2013**). Les plantes absorbent le dioxyde de carbone de l'atmosphère pour générer de la biomasse, ce qui signifie qu'elles produisent cette biomasse par le biais de la photosynthèse. Une fois dégradée, cette biomasse se transforme en une source importante de carbone organique dans le sol (**Arrouays *et al.*, 2008**). La capacité des agroécosystèmes semi-arides méditerranéens à stocker du carbone est influencée par la gestion des sols (**Chevallier *et al.*, 2019**).

Alors, les sols de la wilaya de Mostaganem ont une texture sableuse dans leurs ensembles et pauvres en matière organique, donc pourvus d'une grande perméabilité, ce qui induit un lessivage des éléments fins, pour cette raison, on a pensé d'apporter des amendements organique (fumier) et minéral (argile brute) seules ou combinées avec des doses bien appropriées, en intégrant des paramètres clés tels que la densité apparente, la teneur en NPK, et les stocks de carbone afin : (i) d'améliorer la fertilité physique, chimique et biologique en vue d'une agriculture biologique et un développement durable, et (ii) d'augmenter le stockage du carbone organique de ces sols afin d'atténuer le changement climatique.

Partie 1

Synthèse bibliographique

Chapitre I

Généralités sur les sols

Chapitre I : Généralités sur les sols

I.1. Le sol

I.1.1. Définition

Les définitions du sol sont liées à son utilisation. Une ressource naturelle non renouvelable, composée de minéraux, de matière organique, d'eau, d'air et d'organismes vivants. Il joue un rôle essentiel dans la production alimentaire, la filtration de l'eau, la régulation du climat et le maintien de la biodiversité (FAO, 2015). Un écosystème dynamique et vivant, essentiel pour la vie sur Terre, qui soutient la croissance des plantes, stocke le carbone et régule les cycles de l'eau et des nutriments (IPBES, 2018).

I.1.2. Différents types de sols

Selon FAO (2015), il y a plusieurs classifications de sols mais il existe 6 grands types :

- **Sols Argileux** : Ces sols sont riches en petites particules qui retiennent bien l'eau, mais ils peuvent devenir compacts et difficiles à travailler lorsqu'ils sont trop humides ou trop secs.
- **Sols Sableux** : Ils sont bien drainés et faciles à travailler, mais ils ne retiennent pas bien l'eau ni les nutriments.
- **Sols Limoneux** : Ils ont une texture fine, équilibrée entre le sable et l'argile, et sont généralement fertiles. Ces sols ont de bonnes capacités de rétention d'eau tout en étant bien drainés.
- **Sol Humifère** : C'est une terre très riche en humus qui est le résultat de la décomposition de matières organiques végétales. Facile à travailler, elle présente peu d'inconvénients.
- **Sols Calcaire** : Ces sols sont riches en calcaire, ce qui les rend basiques et parfois peu fertiles en raison de leur faible capacité à retenir les nutriments.
- **Sols Ferrallitiques** : Ils sont riches en fer et en aluminium, souvent caractéristiques des régions tropicales et subtropicales, et sont généralement rouges ou bruns.

I.1.3. Constituants du sol

D'après Stenggel (2009), le sol est en majeure partie constitué en masse, comme en volume, de particules minérales de taille et de nature minéralogique différentes (Figure 1). Secondairement, il est formé de constituants organiques allant de fragments de végétaux ou d'animaux à des macromolécules organiques complexes. Le sol est un corps vivant composé de deux fractions:

- **La fraction minérale** : Elle est principalement constituée de minéraux primaires (quartz, micas, feldspaths...) et de minéraux secondaire, les oxydes métalliques ou les argiles, rapporte que la fraction minérale n'intervient pas ou peu dans la sorption des polluants organiques sauf quand la teneur en carbone organique du sol est faible (Stenggel, 2009).

- **La fraction organique** : Elle est formée en grande partie de cellulose, d'hémicellulose, de lignine et de tanins en plus faibles pourcentages, venant de la matière décomposée. Cette matière organique contient également de petites quantités de protéines et des fragments d'hydrates de carbone, des composés aminés, phénoliques ou aromatiques issus de l'activité biologique attestent que cette fraction intervient fortement dans la sorption des composés organiques tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (Stenggel, 2009).

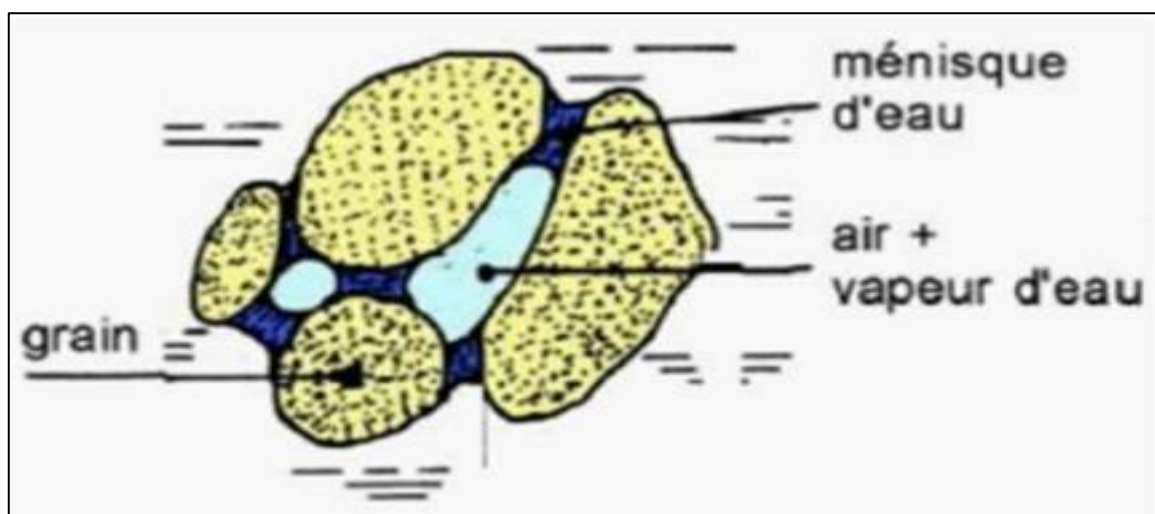


Figure 1 : Composition d'un sol (Gabet, 2004).

I.I.4. Caractéristiques physico-chimiques du sol

- **Texture** : La texture varie de sableuse à limono – argilo selon le triangle textural de Henin. La texture du sol correspond à la répartition dans ce sol des minéraux et de la matière organique par catégorie de grosseur (en fait, diamètre des particules supposées sphérique, elle est déterminée par l'analyse granulométriques) indépendamment de la nature et de la composition de ces minéraux. La texture régule directement la structure du sol et donc la porosité et le régime d'humidité. Le rapport argile affecte la formation du complexe argilo-humique, la capacité d'échange cationique, la fertilité et la profondeur d'enracinement. La texture est une propriété stable qui ne changera qu'au cours de l'évolution à long terme (Gobat *et al.*, 2010).

- **Structure** : Elle est l'arrangement des particules minérales du sol en agrégats sous l'effet de liaisons par des colloïdes ou des hydroxydes de fer ou d'aluminium. Cette structure peut être particulière, comme pour le sable meuble ; fragmentaire ou grumeleuse, les

Chapitre I : Généralités sur les sols

constituants étant rendus solidaires par le complexe argilo-humique qui forme des agrégats (sol à structure sphérique, angulaire, lamellaire) et des mottes (éléments structuraux formés par les actions de fragmentation et de compactage des outils. Sa formation dépend à la composition minérale, la matière organique, l'activité biologique, le climat et les pratiques agricoles (**Rattan et al., 2018**).

- **L'acidité du sol** : Le pH exprime la réaction acide, neutre ou basique d'un corps selon qu'il renferme beaucoup ou peu d'ions H^+ libres en solution. Au niveau du sol, le pH est variable et il influe sur les propriétés du sol. Ces variations sont cependant limitées car si, en chimie, le pH varie de 0 à 14 (7 étant la neutralité), le pH des sols a pour extrêmes 4,5 à 5 pour les sols plus acides et 8 pour les terres très basiques, le pH est fortement influencé par la roche mère et la composition de la litière joue aussi un rôle en particulier à travers son rapport C/N (**Prevost, 2006**).

- **La conductivité électrique (CE)** : mesure la capacité d'un sol à conduire un courant électrique, exprimée en décisiemens par mètre (dS/m) ou en millisiemens par centimètre (mS/cm). Elle dépend principalement de la concentration des sels dissous dans la solution du sol, ce qui en fait un indicateur clé de la salinité et de la fertilité (**Lesch et al., 2018**).

- **Capacité d'échanges cationique** : est la quantité totale de cations qu'un sol peut retenir et échanger avec la solution du sol, exprimée en centimoles de charge par kg de sol (cmolc/kg), et mesurent la capacité d'un sol à fournir des éléments nutritifs à une culture, Un sel minéral en dissolution dans l'eau du sol s'y trouve en partie à l'état dissocié, scindé en deux ions : l'anion, chargé négativement (Cl^- , SO_4 , NO_3^- , PO_4H^{-2}) et le cation, chargé positivement (K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe^{+2} , Mn^{+2} , Zn^{+2} , etc.). Les cations continuellement en mouvement représentent les éléments minéraux à l'état échangeable et ses bio disponibles pour la plante. L'hydrogène est le cation le plus retenu par le complexe argilo humique (**Miller et al., 2018**).

- **Matière organique** : La matière organique est une substance qui n'a pas une composition chimique bien définie, elle comprend en proportions variables selon les situations écologiques les éléments suivants : des débris organiques plus ou moins décomposés, des matières humifères ou en voie d'humification à des stades divers d'évolution, en matière agricole, il convient de faire la distinction entre la matière organique fraîche et celle humifiée. C'est cette dernière qui joue un rôle important dans la fertilité des sols par l'évolution biochimique qu'elle y subit et par les propriétés physico-chimiques qui en découlent (**Huber, 2011**).

Chapitre I : Généralités sur les sols

I.2. Les Argiles

L'argile est une roche sédimentaire siliceuse composée pour une large part de minéraux argileux par désagrégation physique et mécanique puis par altération chimique, en général des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés présentant une structure feuilletée (phyllosilicates) expliquant leur plasticité, ou fibreuse expliquant leurs qualités d'absorption. L'argile brute contient des particules élémentaires dont les diamètres des grains sont inférieurs à 2 micromètres (**Duchaufour, 2001**). Les argiles jouent un rôle essentiel dans la rétention d'eau et la cohésion des sols influençant sa structure, sa perméabilité et sa capacité à stocker et libérer les nutriments nécessaires aux plantes (**Weil et al., 2019**).

I.2.1. Structure et composition des argiles

Les argiles sont formées de fines particules qui mesurent généralement moins de 2 microns de diamètre. La structure des argiles repose sur un arrangement complexe de couches de tétraèdres de silice (SiO_4) et d'octaèdres d'aluminium (AlO_6) qui s'organisent en feuillets, où chaque couche est maintenue par des liaisons de type Van der Waals ou par des ponts hydrogène (**Brigatti et al., 2003**).

La composition chimique des argiles dépend du type de minéraux argileux qu'elles contiennent. Les principaux éléments présents dans la composition des argiles sont le silicium (Si), l'aluminium (Al), l'oxygène (O), ainsi que d'autres éléments comme le fer (Fe), le magnésium (Mg) et le calcium (Ca) (**Guggenheim et al., 2020**).

I.2.2. Différents types des argiles

Les types d'argiles les plus fréquents :

- **Kaolinite** : Elle est constituée d'une succession alternée de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite). Les deux feuillets sont liés de telle manière que les sommets du feuillet de silice et ceux d'une des couches du feuillet en octaèdre ne forment qu'une seule couche (**Kuster, 2001**) (**Figure 2**).

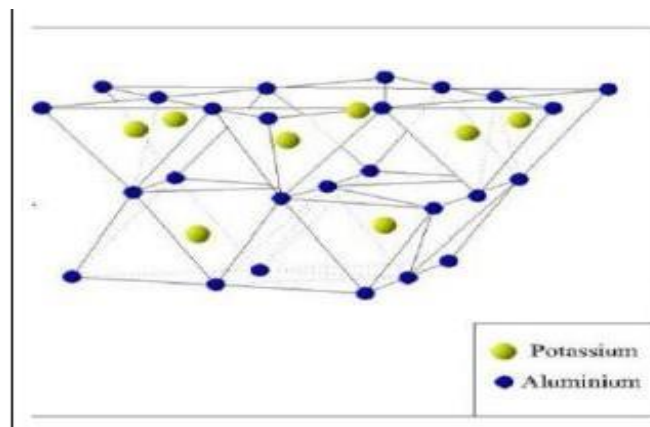


Figure 2 : structure de la kaolinite (**Zeghache, 2012**).

Chapitre I : Généralités sur les sols

- **Montmorillonite** : Parfois appelée Smectite, composé de deux feuillets de Silice et d'un feuillet d'Alumine (Gibbsite). Les feuillets en octaèdres se trouvent entre deux feuillets de Silice et les sommets des tétraèdres se confondent avec les hydroxyles du feuillet en octaèdre pour ne former qu'une seule couche. Les sols qui contiennent de montmorillonite peuvent être gonflants lorsque leur teneur en eau augmente (**Morel, 1989**) (**Figure 3**).

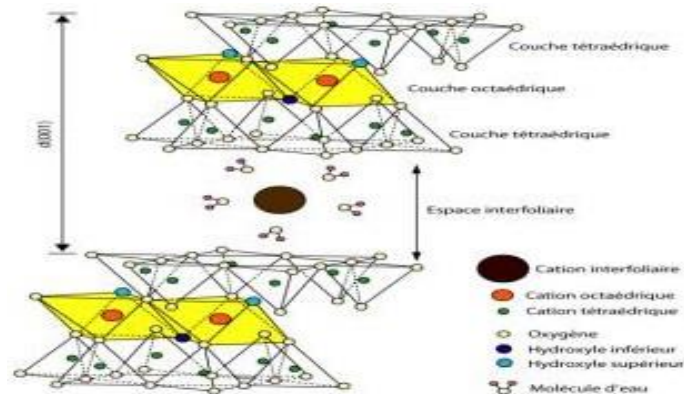


Figure 3 : Structure de la montmorillonite (**Zeghache, 2012**).

- **Illite** : elle a une structure analogue à la montmorillonite mais il y a des ions de potassium intercalés entre les feuillets tétraédriques. Grâce à ces ions, la liaison est relativement forte et les molécules d'eau ne peuvent pratiquement plus s'intercaler. Aux extrémités de la particule d'argile, il y a également des déséquilibres électriques et adsorption de cations (**Morel, 1989**) (**Figure 4**).

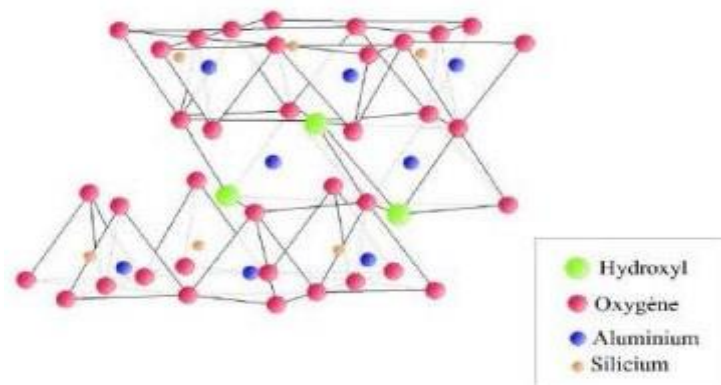


Figure 4 : Structure d'illite (**Zeghache, 2012**).

I.3. Sols sableux

Le sol sableux (appelé sol siliceux) se compose d'au moins 70% de sable (un matériau granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation de matériaux d'origine minérale ou organique), n'est ni trop clair ni trop foncé et a une texture rugueuse. Il est facile à

Chapitre I : Généralités sur les sols

utiliser, mais ne retient pas d'eau. Très difficile, impossible à compacter, il glisse entre les doigts (Lizbith, 2019).

La fraction de sable est souvent subdivisée en sous fractions telles que le sable grossier, moyen, fin et très fin (Lal *et al.*, 2004).

I.3.1. Différents types de sols sableux

Pour Brady *et al.* (2016), on distingue plusieurs types de sols sableux :

- **Sols sableux grossiers** : Composés de particules de grande taille, ils sont très drainants mais retiennent peu l'eau.
- **Sols sableux fins** : Composés de particules plus petites, ils retiennent un peu plus d'eau mais restent pauvres en nutriments.
- **Sols sablo-limoneux** : Mélange de sable et de limon, ils offrent une meilleure rétention d'eau et de nutriments tout en restant bien drainés.
- **Sols sablo-argileux** : Contenant une certaine proportion d'argile, ils présentent une meilleure capacité de rétention d'eau tout en gardant une bonne aération.

I.3.2. Caractéristiques physico-chimique des sables

D'après Duchaufour (2001), les sols sableux présentent des propriétés spécifiques qui influencent leur fertilité et leur aptitude à l'agriculture.

a. Caractéristiques physiques

Les principales caractéristiques physiques selon Duchaufour (2001) sont :

- **Granulométrie** : Constituée majoritairement de particules de sables (> 70 %), de taille comprise entre 0,05 et 2 mm.
- **Structure** : Faible cohésion entre les particules, ce qui entraîne une faible agrégation.
- **Porosité** : Forte porosité mais avec de grands espaces entre les particules, ce qui favorise le drainage rapide.
- **Rétention d'eau** : Très faible, car l'eau s'infiltré rapidement en profondeur, rendant ces sols souvent secs.
- **Aération** : Très bonne, facilitant le développement des racines et l'activité microbienne aérobie.

b. Caractéristiques chimiques

Les caractéristiques chimiques les plus fréquents d'après Duchaufour (2001) sont :

- **Capacité d'échange cationique (CEC)** : Très faible (généralement < 10 meq /100g de sol), ce qui signifie une faible rétention des nutriments.
- **Matière organique** : Souvent faible en raison du lessivage rapide et de la décomposition rapide de la matière organique.

Chapitre I : Généralités sur les sols

- **pH** : Généralement neutre à légèrement acide (pH entre 5 et 7), bien que cela puisse varier selon l'environnement.
- **Nutriments** : Pauvres en éléments nutritifs essentiels comme l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K), nécessitant des amendements pour l'agriculture.
- **Salinité** : Généralement faible, sauf dans les zones arides où l'évaporation peut concentrer les sels en surface.

Chapitre II

Les amendements minéraux et organiques

Chapitre II : Les amendements minéraux et organiques

II. Les amendements

Ce sont des additifs de substance pour améliorer les propriétés du sol. L'objectif est de rendre le sol plus meuble, plus perméable à l'eau et à l'air, plus chaud, plus accessible aux racines et mieux arrosé. Aussi créer dans sa masse les conditions physico-chimiques nécessaires à la vie microscopique, végétale et animale, lui donner une meilleure aptitude à retenir les engrais, à les mettre facilement à la disposition des plantes tout en évitant leur perte vers les nappes d'eau (**Slimane, 2021**). En effet, Ils enrichissent le sol en matière organique, améliorent sa structure et jouent également un rôle très important dans l'activité biologique du sol, notamment par la pédofaune de type microorganismes (**Benamara et Djotni, 2018**).

II.1. Les amendements minéraux

Les amendements minéraux (**Tableau 1**) sont des substances inorganiques ajoutées au sol pour améliorer ses propriétés physiques, chimiques et biologiques, dans le but d'optimiser la croissance des plantes (**Duchaufour, 1998**). Ces amendements agissent principalement sur la structure du sol, son pH, sa capacité de rétention d'eau et sa fertilité à long terme. Contrairement aux engrais, qui apportent des nutriments directement utilisables par les plantes, les amendements minéraux ont pour objectif de modifier l'environnement du sol afin de favoriser l'absorption des nutriments par les plantes (**Marschner, 2012**).

II.1.1. Bentonite

Elle s'agit d'une argile naturelle dont le constituant principal est la montmorillonite appartenant à la famille des smectiques, qui est formée par le vieillissement de cendres volcaniques et aussi un minéral du groupe des phyllosilicates. Cette argile douée de propriétés de surface (caractère affinité pour l'eau, capacité d'adsorption de composés électropositifs...) (**Isildak et al., 2006**). La bentonite est une roche argileuse, friable, tendre et onctueuse au toucher, sa teinte dépend des composés minéraux et impuretés qui lui sont étroitement associés. Elle est blanche, grise ou jaune. Dans l'eau, la bentonite gonfle de 10 à 15 fois de son volume original et absorbe 6,5 fois son poids en eau. Il s'agit donc d'une argile à grande surface interne avec une capacité d'échange cationique de 80 à 150 méq/100g (**Benguella, 2009**).

II.1.2. Origine de la bentonite

La bentonite obtenue par altération des roches volcaniques, ce matériau doit son nom à la ville de Fort Benton, dans le Wyoming, aux États-Unis situé à 650 Km environ au Nord de Rock River, où il a été identifié pour la première fois à la fin du 19^e siècle (1888) (**Mering, 1975**). Les principales régions productrices de bentonite sont situées aux États-Unis (environ 4 millions de tonnes par an), en Grèce et l'Allemagne, la Chine et en Turquie, mais elle est

Chapitre II : Les amendements minéraux et organiques

également présente dans d'autres parties du monde, telles que l'Inde et l'Argentine. En Algérie, les gisements de bentonite les plus importants économiquement se trouvent dans l'Oranie (Ouest Algérien). On relève en particulier la carrière de Maghnia (Hammam Boughrara) dont les réserves sont estimées à un million de tonnes et de celle de Mostaganem (M'zila) avec des réserves de deux millions de tonnes (Bouras, 2003).

Tableau 1 : Les principaux amendements minéraux (Dicova, 1997).

Types	Effets sur propriétés physiques	Effets sur propriétés Chimiques	Effets sur propriétés biologiques
Amendements calcaires (Chaux, Dolomie)	Améliore l'aération et la structure du sol Réduit la compaction du sol et améliore la rétention d'eau	Augmente le pH des sols acides, neutralise l'acidité et augmente la disponibilité de certains nutriments	Favorise l'activité microbienne bénéfique, stimule la dégradation de la matière organique
Amendements siliceux (Sable, Silice cristalline)	Améliore la structure du sol et augmente la porosité et la perméabilité, améliore la rétention d'eau	Faible impact chimique direct mais peut affecter la rétention d'eau	Peu d'impact biologique direct, mais peut influencer des micro-organismes qui préfèrent les sols aérés
Amendements phosphatés (Roche phosphaté, Superphosphate)	Peut légèrement améliorer la structure du sol en modifiant la texture	Apporte du phosphore soluble ou peu soluble, essentiel pour la croissance des plantes, la photosynthèse et peut affecter le pH du sol.	Stimule la croissance des plantes, améliore la nutrition en phosphore, influence la composition microbienne
Amendements magnésiens (Magnésie, Dolomie)	Améliore l'agrégation du sol et sa perméabilité à l'eau et l'aération	Fournit du magnésium, améliore l'équilibre des éléments nutritifs, et peut légèrement augmenter le pH	Impact sur la microflore, favorise certaines bactéries et champignons associés au magnésium

II.1.3. Type de bentonite

Chapitre II : Les amendements minéraux et organiques

a. La bentonite sodique naturelle

Où le sodium est le cation échangeable majoritaire, elles ont un fort pouvoir de gonflement et d'adsorption, riche en ions sodium, qui augmente de volume lorsqu'elle est humide et qui peut absorber plusieurs fois sa masse en eau. Cette propriété est mise en valeur dans les mastics pour l'enfouissement de matières polluantes dans le sol (Cattaneo *et al.*, 2009).

b. La bentonite calcique naturelle

Où le calcium est le cation échangeable majoritaire, a une capacité de gonflement moins important que la sodique, mais elle est plus stable thermiquement, a des applications parapharmaceutiques dont les résultats restent à prouver, notamment dans le domaine du système digestif et dans des applications telles que la filtration...etc (Carretero, 2002).

c. Bentonites actives

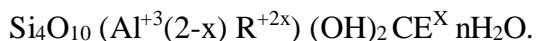
Les propriétés de ces bentonites activées ou permutées sont moins stables dans le temps et dépendent de l'activation. Ces différents types de bentonites se présentent sous forme de poudre ou de granulés. Elles ont des couleurs variables du blanc, gris, beige ou vert (Moussaoui, 2012).

II.1.4. Structure de la bentonite

D'après Chesworth (2013), la structure cristalline de bentonite est caractérisée par une organisation en couches, dans lesquelles des feuillets de silicate d'aluminium sont intercalés avec l'eau ou les cations comme le sodium, le calcium, ou le magnésium. Ces structures en couches sont responsables des propriétés absorbantes de la bentonite, qui lui permettent de se gonfler et d'adsorber une grande quantité d'eau aussi bentonite possède une texture fine. La composition minéralogique varier selon les gisements, mais les montmorillonites restent le composant principal dans les bentonites. La structure de base de la montmorillonite est composée de couches tétraédriques et octaédriques.

II.1.5. Composition Chimique

La composition chimique de la bentonite (Figure 5) peut varier légèrement d'un gisement à l'autre, mais elle est généralement exprimée par la formule suivante :



Avec : R^{+2} : Mg^{+2} , Fe^{+2} , Mn^{+2} ; Al peut être remplacé par Fe^{+3} , Cr^{+3}

x : charge du feuillet ; CE : Cation interfoliaire Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} ; Si: Silicium dans les tétraèdres.

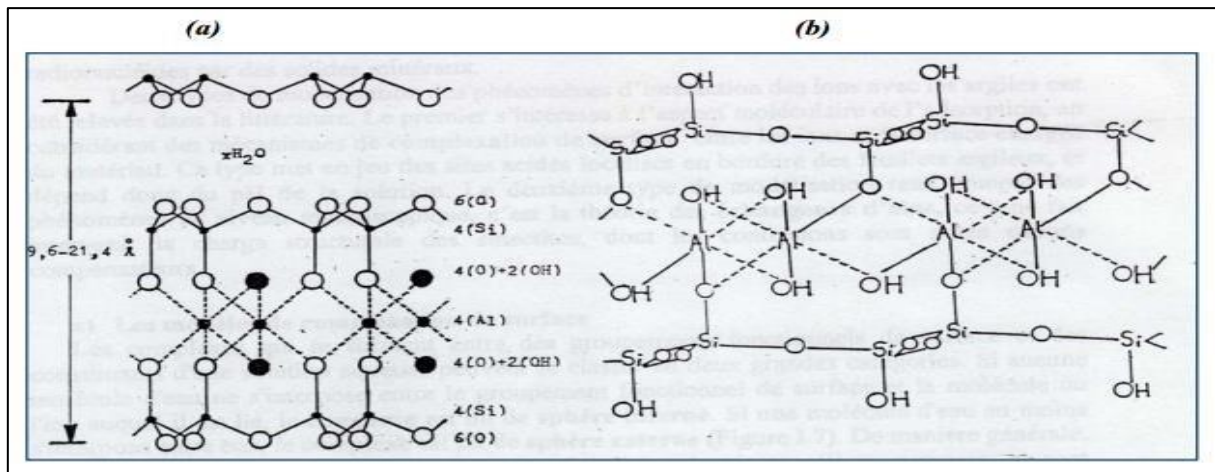


Figure 5 : (a) Structure de la montmorillonite d'après Hoffmann (b) Structure de la montmorillonite (Edelman *et al.*, 1940).

II.1.6. Propriétés fondamentales de la bentonite

Les propriétés particulières des minéraux argileux sont dues à la petite taille, à la structure en feuillet et à la charge négative des particules (Sposito *et al.*, 1999).

a. Capacités d'échange cationique

C'est la somme du nombre d'ions absorbés entre les feuillets de l'argile et de ceux adsorbés sur la surface externe. Les argiles ont la propriété de fixer de façon réversible des cations des métaux lourds, des cations organiques et quelques hydrocarbures contenus. La capacité d'échange cationique est définie comme la quantité de cations monovalents et divalents susceptibles d'être substitués par des cations compensateurs pour compenser la charge négative de 100 grammes d'argiles (mék/100g) (Azzouz, 2006).

b. La surface spécifique

Les argiles sont largement utilisées comme des adsorbants à cause de leur grande surface spécifique, qui comprend la somme de deux surfaces, l'externe comprise entre les particules et l'interne correspondant à l'espace inter foliaire (Ozcan *et al.*, 2007). Elle est exprimée en m² par gramme d'argile. En effet, plus le sol est fin plus la surface spécifique est élevée (Demirbas, 2009).

c. La propriété du gonflement

La propriété de gonfler dans l'eau pour former des masses visqueuses et gélatineuses. Pour qu'une argile soit vraiment une bentonite au sens commercial du terme, elle doit gonfler au moins cinq fois l'équivalent de son volume au contact de l'eau (Borisover *et al.*, 2011).

Chapitre II : Les amendements minéraux et organiques

II.1.7. Domaine d'utilisation de la bentonite

La bentonite utilisée dans larges applications (**Figure 6**), toujours plus nombreuses et dans différents domaines (forage, fonderie, céramique, peinture, pharmacie, terres décolorantes,...etc (**Dupuis, 2023**).

La bentonite est également utilisée dans l'agriculture comme amendement du sol. En raison de ses propriétés de rétention d'eau, elle est ajoutée aux sols sableux pour améliorer leur capacité à retenir l'humidité et à faciliter la croissance des plantes. De plus, la bentonite aide à améliorer la structure du sol en augmentant sa porosité et sa capacité à retenir les nutriments, ce qui est bénéfique pour l'agriculture dans les régions arides et semi-arides (**Fournier, 2021**).

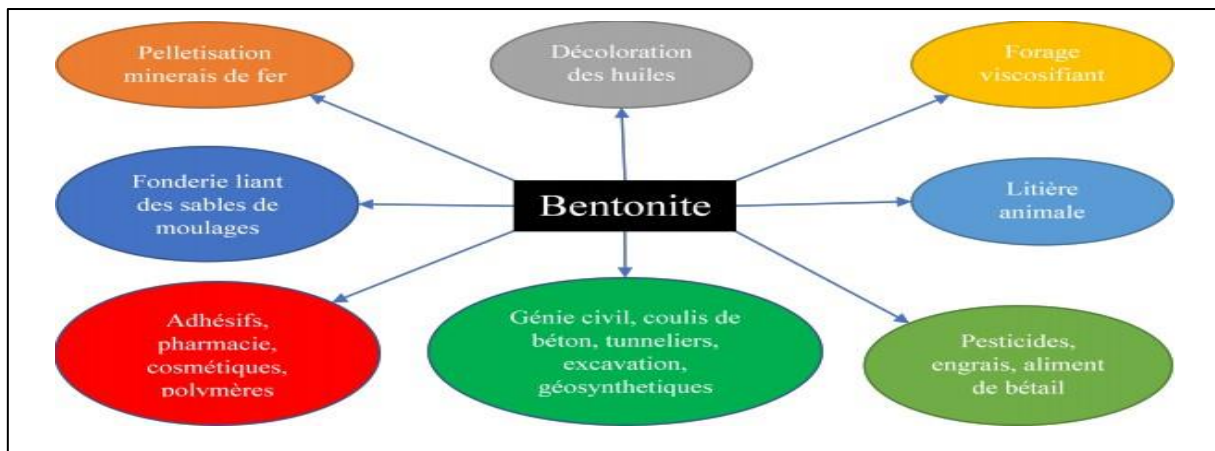


Figure 6 : Schéma pour les domaines d'utilisation des bentonites.

II.2. Les amendements organiques

Les amendements organiques sont destinés à entretenir ou à améliorer les propriétés physiques et chimiques et l'activité biologique des sols (**Schwartz et al., 2005**). Ce sont des produits qui améliorent l'état structural du sol avec des apports limités. Le but de cet apport est l'obtention d'un produit stable riche en humus. Il s'agit des matières fertilisantes composées principalement de combinaisons carbonées d'origine végétale fermentées ou fermentescibles destinées à l'entretien ou à la reconstitution du stock de la matière organique du sol (**Soltner, 2003**).

Parmi les types courants, on trouve le compost, le fumier, les boues de station d'épuration, les matières végétales broyées, les engrais vert et le vermicompost (**Tessier et al., 2003**).

II.2.1. La matière organique du sol (MOS)

Paul (1999) décrit la matière organique du sol (**Tableau 2**) comme "l'ensemble des substances organiques présents dans le sol, résultant de la décomposition de résidus végétaux, d'animaux et de micro-organismes ou provenant de la dégradation de la matière vivante, influençant les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol".

Chapitre II : Les amendements minéraux et organiques

Tableau 2 : Rôles majeurs joués par les matières organiques du sol (Guilbault, 2009).

Rôles	Action	Bénéfices
Physiques	Structure, porosité, rétention en eau	pénétration de l'eau et de l'air, stockage de l'eau, limitation de l'hydromorphie, limitation du ruissellement, limitation de l'érosion, limitation du tassement, réchauffement, meilleure alimentation hydrique
Chimiques	dégradation, minéralisation, capacité des échanges cationiques, rétention des micropolluants organiques et des pesticides	Fourniture d'éléments minéraux (N, P, K, ...), stockage et disponibilité des éléments minéraux, limitation des toxicités.
Biologiques	stimulation de l'activité biologique (vers de terre, biomasse microbienne)	dégradation, minéralisation, réorganisation, humification, aération

II.2.2. Exemple d'un amendement organique « Fumier de bovins »

a. Définition

Pour **Barrington *et al.* (1997)**, le fumier de bovin est composé de bouses et de paille, riche en matières organiques (azote et potassium) de par la grande quantité d'herbe absorbée par les vaches. De plus, c'est un fumier qui apporte une grosse quantité d'humus au sol. Il est dit « froid » car il se décompose assez lentement. Un fumier jeune avec une phase de maturation inférieure à 2 mois.

Ce fumier est issu de la vidange et du raclage des étables d'élevages de bovins. Matière brune, plus ou moins pailleuse et compacte, hétérogène, à odeur caractéristique, relativement humide.

b. Les types de fumiers de bovins

-Fumier frais de bovins : Directement collecté des étables, il est riche en azote mais peut-être trop fort pour les cultures et contient des agents pathogènes. Il doit généralement être composté avant utilisation. (**Smith *et al.*, 2017**).

Chapitre II : Les amendements minéraux et organiques

-Fumier composté : Après décomposition aérobie, il devient plus stable, réduit-les risques sanitaires et est plus facile à appliquer, avec des nutriments mieux disponibles pour les plantes (**Dupont et al., 2019**).

-Fumier bien décomposé : Il a subi une dégradation prolongée, ce qui le rend moins agressif et bénéfique pour améliorer la structure du sol et la rétention d'eau (**Lemoine, 2015**).

-Fumier liquide : Principalement composé d'urine et de matières fécales liquides, il est riche en azote, mais nécessite une gestion rigoureuse pour éviter la perte de nutriments (**Roux et al., 2020**).

c. Structure et composition

La structure chimique du fumier comprend principalement des composés comme l'azote (sous forme d'ammonium NH_4^+ et de nitrate NO_3^-), le phosphore (sous forme de phosphates H_2PO_4^- ou HPO_4^{2-}), et le potassium (K^+), qui sont essentiels pour la croissance des plantes. L'azote peut se convertir en nitrate via une réaction de nitrification. Le phosphore est libéré par l'hydrolyse des phosphates organiques, et le potassium est directement disponible pour les plantes. Le fumier contient aussi des composés organiques complexes, comme les acides humiques et fulviques, qui améliorent la structure du sol (**Denny et al., 2012**).

d. Caractéristiques et effets du fumier de bovins

-Rapport C/N (Carbone/Azote) : varie entre 20:1 et 30:1, ce qui en fait un matériau à décomposition relativement lente. Un rapport C/N élevé signifie que la dégradation du fumier libère de l'azote progressivement dans le sol, ce qui peut réduire les risques de pertes d'azote par volatilisation (**Dupont et al., 2019**).

-pH du fumier de bovin : Le pH du fumier de bovin varie généralement entre 7 et 8, ce qui le rend légèrement alcalin. Cette propriété peut avoir un impact sur la composition du sol, en particulier en fonction du pH initial du sol. Un fumier légèrement alcalin peut aider à équilibrer l'acidité des sols acides (**Bresson, 2017**).

-Teneur en eau : Le fumier de bovin est généralement humide, avec une teneur en eau qui varie entre 70 et 85 % (**Bresson, 2017**).

-Amélioration de la structure du sol : est un amendement organique efficace qui améliore la structure des sols. Il augmente la porosité du sol, ce qui favorise l'aération et le développement des racines des plantes (**Bresson, 2017**).

-Teneur en matières organiques : est également riche en matière organique, ce qui améliore la structure du sol, aide à la rétention d'eau et fournit un habitat favorable pour les microorganismes du sol. La dégradation de cette matière organique libère progressivement des nutriments, améliorant la fertilité à long terme (**Farge et al., 2020**).

Chapitre II : Les amendements minéraux et organiques

-Rétention d'eau et gestion de la sécheresse : L'ajout de fumier de bovin au sol améliore sa capacité à retenir l'eau, ce qui est particulièrement bénéfique dans les sols légers et sableux. Cela permet une gestion plus efficace de l'eau, en particulier pendant les périodes de sécheresse (Martin *et al.*, 2019).

-Réduction de l'érosion : Grâce à ses effets sur la structure du sol, le fumier de bovin contribue à la stabilité du sol, réduisant ainsi les risques d'érosion causée par l'eau ou le vent, notamment dans les zones sensibles (Martin *et al.*, 2019).

e. Domaines d'utilisation de fumier de bovins

Le fumier de bovin est couramment utilisé comme engrais de fond avant la plantation et comme engrais d'entretien pour maintenir la santé du sol (Figure 7). Le fumier peut également être composté pour réduire les risques d'odeurs et d'infections, tout en améliorant la texture du sol. En agriculture biologique, il joue un rôle clé en fournissant des nutriments sans recourir à des produits chimiques, contribuant ainsi à des autres pratiques agricoles durables (Garonne *et al.*, 2018).

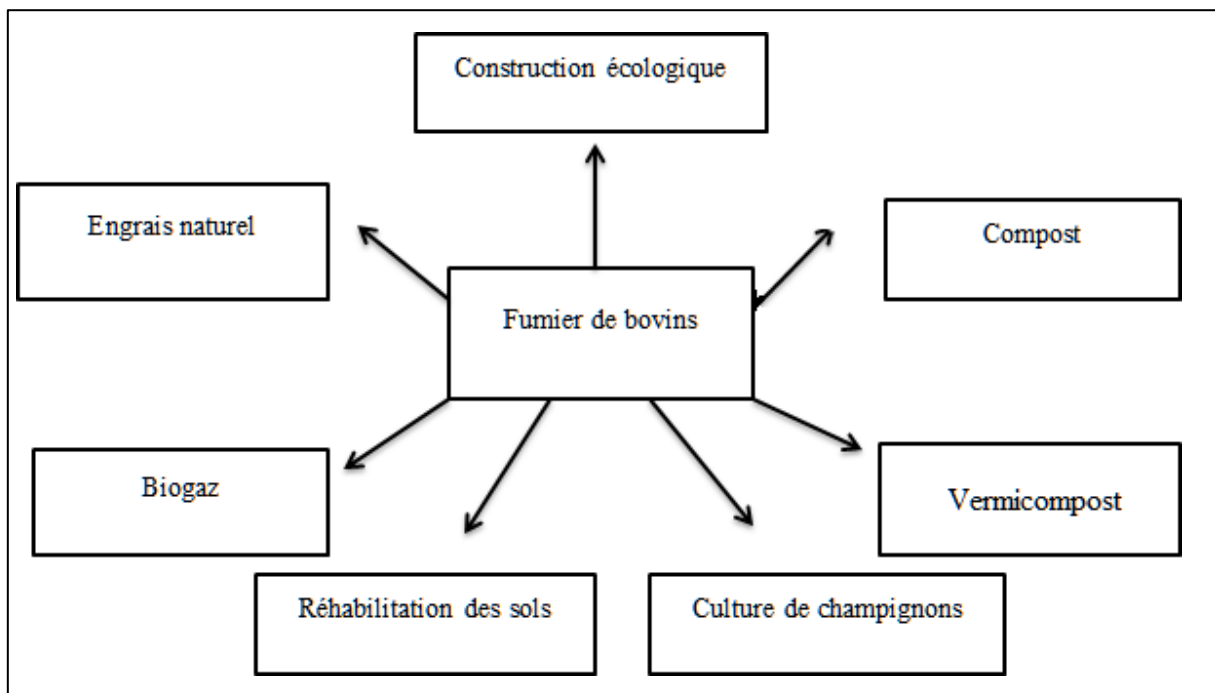


Figure 7 : Schéma explicatif des différents domaines d'utilisation de fumier de bovins (Garonne *et al.*, 2018).

Chapitre III

Stockage du carbone organique dans le sol

Chapitre III : Stockage du carbone organique dans le sol

III. Généralité

Le réchauffement climatique et l'augmentation des gaz à effet de serre soulèvent la question du rôle des sols en tant que source ou puits de carbone. Les sols constituent un réservoir majeur de carbone, stockant environ 1500 gigatonnes, près de trois fois plus que la biomasse terrestre et deux fois plus que l'atmosphère. Tout changement dans l'utilisation des terres, y compris dans les systèmes agricoles, peut modifier les stocks de carbone dans les sols (**Bernoux *et al.*, 2004**). La séquestration du carbone dans les sols, sous ses aspects économiques, environnementaux et agricoles, représente une solution clé pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les sols jouent un rôle central dans la crise climatique, notamment par leur capacité à réguler le cycle du carbone et à échanger des nutriments. Le dioxyde de carbone (CO₂), principal gaz à effet de serre d'origine humaine, est fortement influencé par les stocks de carbone organique dans les sols (**Le Quéré *et al.*, 2016**). Ces stocks résultent d'un équilibre entre les apports et les pertes, influencés par des processus naturels et humains (**Amundson, 2001**). Les changements d'usage des sols peuvent altérer ces stocks, avec des pertes de carbone souvent plus rapides que les accumulations. Une diminution même légère du carbone organique peut affecter les propriétés du sol, comme la rétention d'eau ou la fertilité. Ainsi, la gestion durable des sols est cruciale pour les politiques climatiques, la sécurité alimentaire et l'adaptation au changement climatique (**FAO, 2015**).

III.1. Cycle du carbone des sols

Le cycle de carbone est la transformation continue du carbone inorganique et des composés organiques par les plantes et les micro et macroorganismes entre le sol, les plantes et l'atmosphère (**Georges, 2011**).

Comme schématisé en (**Figure 8**), le cycle du COS se déroule en quatre étapes. Dans un premier temps, par le processus de la photosynthèse, la végétation absorbe le CO₂ atmosphérique. Par la suite, la végétation (feuille, branche, racine, etc.) et la faune morte s'accumulent sur/dans le sol et forment la litière. Cette litière subit un processus de dégradation/stabilisation par la faune du sol et s'incorpore ainsi au complexe organo minéral sous forme de bio polymère. Les microorganismes transforment ensuite ces composés en monomère organiques. Enfin, les microorganismes assimilent ces molécules puis par respiration autotrophe libèrent du CO₂ dans l'atmosphère. Cette quantité libérée est généralement inférieure à la quantité entrée dans le système grâce à la difficulté de dégradation de certaines molécules. C'est pour cela que les sols sont considérés comme des puits de carbones (**Cambou *et al.*, 2020; Pellerin. S, Bamière. L *et al.*, 2019**).

Chapitre III : Stockage du carbone organique dans le sol

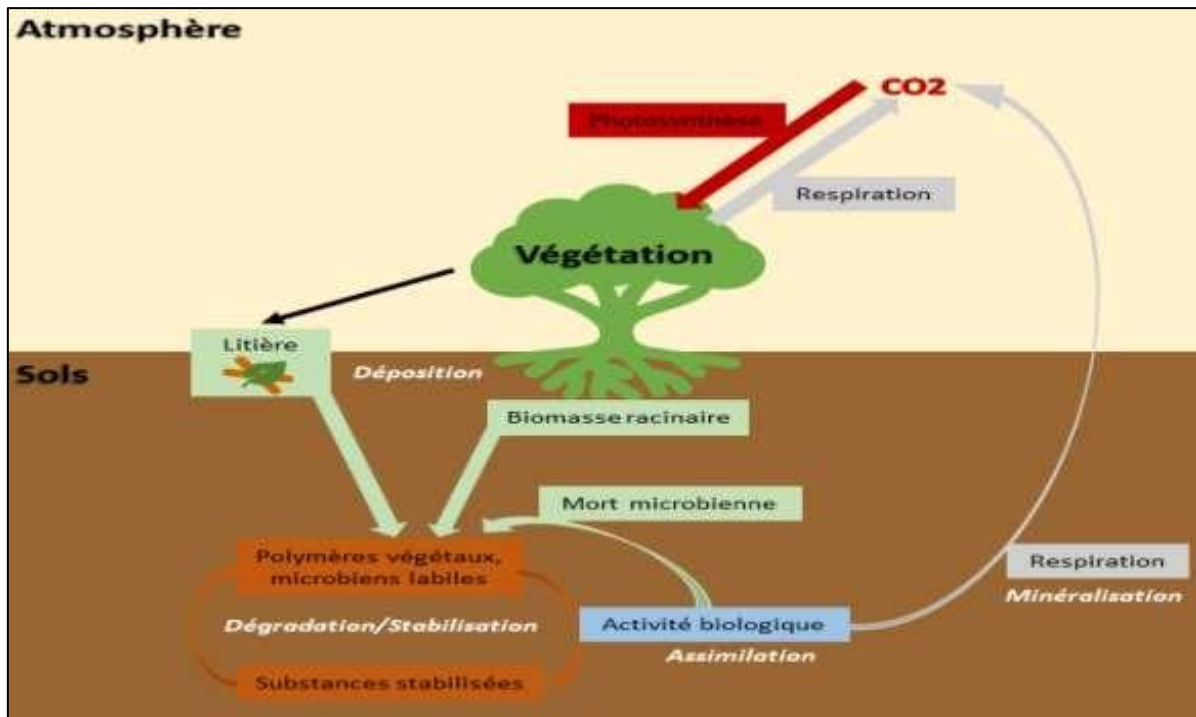


Figure 8 : Cycle du carbone dans le sol (Cambou *et al.*, 2020).

III.2. Origine du carbone

Le carbone organique est le principal constituant des matières organiques, qui sont composés à 95% de MO mortes et à 5% d'organismes vivants. Ces proportions peuvent varier selon le type de sol et l'horizon. Les matières organiques proviennent directement ou indirectement de la production photosynthétique des plantes sont composées d'environ 50% de carbone. (Dupont, 2010).

III.3. Le stockage du carbone dans les sols

Le sol constitue un réservoir de carbone à l'échelle planétaire, il contient environ 700 à 750 Gt de carbone inorganique, provenant des carbonates géologique (Sparks, 2003). En parallèle, il stock une quantité considérable de carbone organique estimée de 2 400 Gt sur 2 mètres de profondeur. C'est 3 fois la réserve de carbone atmosphérique et plus de 4 fois la réserve biotique (Derrien *et al.*, 2016). Le transfert du carbone de l'atmosphère vers le sol se fait principalement par les animaux et les végétaux, tandis que la photosynthèse constitue le mécanisme par lequel le carbone entre dans les écosystèmes (Jacques, 2008).

III.4. Dynamique du carbone organique dans le sol

Le stock de carbone organique dans les sols naturels est en équilibre dynamique entre les apports de débris végétaux et leur décomposition (Figure 9). Dans des conditions normales, la majorité du carbone est labile et une petite fraction (1 %) s'accumule sous forme stable, principalement dans la fraction humique (Balesdent, 1996). La MOS est complexe et souvent

Chapitre III : Stockage du carbone organique dans le sol

associée aux minéraux du sol. Des méthodes comme le fractionnement en fonction des particules ou des agrégats permettent de séparer des fractions ayant des cycles différents (Feller *et al.*, 1979; Balesdent, 1996). La matière organique particulaire, sensible à l'usage des terres, est un exemple (Cambardella, 1998; Gregorich *et al.*, 1996). La biomasse microbienne, qui représente 1 à 5 % de la MOS, est aussi une fraction labile et réagit rapidement aux changements d'utilisation des terres.

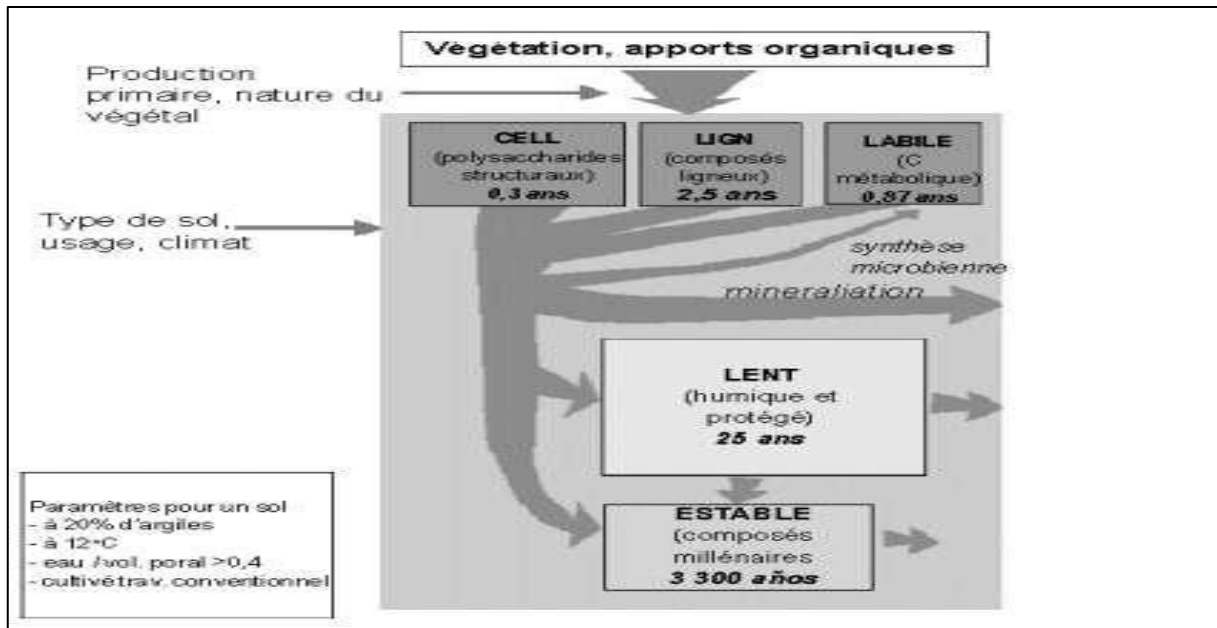


Figure 9 : Modèle de la dynamique de carbone dans le sol (Balesdent *et al.*, 2000).

Les méthodes isotopiques, comme la datation au carbone 14 et la mesure de l'abondance naturelle du carbone 13, permettent de mesurer le temps de résidence des matières organiques dans le sol, allant d'un an à plusieurs millénaires. Elles aident à suivre l'évolution du carbone après un changement de végétation (Cerri *et al.*, 1995). Les différents compartiments de carbone dans le sol ont des temps de résidence variés en fonction de leur composition biochimique et des types de protection (physique ou chimique). La protection physique se fait par encapsulation dans des particules de sol, tandis que la protection chimique implique des liaisons spécifiques avec d'autres constituants du sol, principalement des composés organiques très stables (Puget *et al.*, 1995; Balesdent *et al.*, 2000).

III.5. Le rôle de la matière organique dans les sols

- La matière organique du sol joue plusieurs rôles :
- Elle assure le stockage et la mise à disposition, pour la plante, par minéralisation des éléments nutritifs dont elle a besoin, aussi elle retient sur leur capacité d'échange cationique ; des éléments minéraux, tels que Mg, Ca, Mn, Fe... (Citeau *et al.*, 2008).
- La CEC des matières organiques est très élevée (200 à 300 meq/100 g), et

Chapitre III : Stockage du carbone organique dans le sol

essentiellement due à leurs constituants très fins, biomolécules et substances humiques (Chenu, 2003).

- Elle stimule l'activité biologique, étant à la fois source d'énergie et d'éléments nutritifs pour les organismes du sol (Robert, 2002; Citeau *et al.*, 2008).
- Elle a un rôle central dans la structuration du sol et participe à sa stabilité vis à vis des agressions extérieures. Elle contribue à la perméabilité, l'aération du sol et la capacité de rétention en eau (Citeau *et al.*, 2008), où deux types de constituants organiques sont actifs pour ça : les colloïdes et les êtres vivants. Les colloïdes organiques, biomolécules produites par les racines et les microorganismes du sol et substances humiques, s'adsorbent sur les particules des êtres vivants du sol et les lient entre elles ou les rendent moins mouillables ; les champignons filamenteux et les racines retiennent mécaniquement les particules entre leurs filaments (Chenu, 2003).
- Elle joue un rôle fondamental pour les autres compartiments de l'environnement en participant au maintien de la qualité de l'eau par leur forte capacité de rétention des polluants organiques et minéraux (Citeau *et al.*, 2008).
- Source de polluants potentiels, comme les nitrates et les phosphates. Elle influence également la qualité de l'air, par le stockage ou l'émission de gaz à l'effet de serre (Citeau *et al.*, 2008).

III.6. Facteurs influençant le carbone organique des sols

D'après Bamière *et al.* (2019); Cambou *et al.* (2020), plusieurs facteurs peuvent influencer la quantité de COS, comme le climat et certaines caractéristiques du sol :

- **Température** : Une température élevée augmente l'activité microbologique et favorise la dégradation de la MO morte. Cependant, une température trop élevée ou trop basse réduit cette activité.
- **Pluviométrie** : Elle favorise la croissance végétale qui augmente la production de litière et donc de COS. Celle-ci joue également sur la teneur en eau du sol qui favorise l'activité biologique. Néanmoins, une trop grande humidité des sols diminue la disponibilité en oxygène pour la faune du sol.
- **Texture du sol** : Notamment la fraction argileuse, favorisent la stabilité du COS : une augmentation de la teneur en argile augmente la concentration en COS. En revanche, un sol trop argileux diminue la disponibilité en dioxygène et en eau.
- **pH** : Le pH a une importance significative sur le COS. En effet, entre 4.5 et 8.3, l'activité microbienne est favorisée. De plus, un pH acide ou basique favorise les liens au complexe organo-minérale.

Chapitre III : Stockage du carbone organique dans le sol

- **Nutriments** : L'azote et le carbone sont liés par le rapport C/N qui permet de connaître la capacité de décomposition de la MO. Un rapport élevé révèle une accumulation du COS dû à une diminution de la capacité de décomposition.

- **Végétation** : Elle produit une grande partie de la MO, qui influence le stock de COS. La composition biochimique et la vitesse de croissance des espèces impactent la quantité ainsi que le temps de décomposition de la MO morte et donc la teneur en COS.

Chapitre IV

La culture du poivron

Chapitre IV : La culture de poivron

IV.1. Historique et Origine

Le poivron (*Capsicum annuum*) est originaire des régions tropicales d'Amérique du Sud, où il était cultivé depuis des milliers d'années par les peuples précolombiens. Après la découverte de l'Amérique par Christophe Colomb en 1492, le poivron a été introduit en Europe, où il a été initialement utilisé comme plante ornementale en raison de ses fruits colorés. Cependant, sa saveur unique et ses propriétés médicinales ont rapidement attiré l'attention des cuisiniers et des herboristes européens, et sa culture s'est répandue en Europe et en Asie (Montanari, 1996).

Au cours des siècles suivants, de nombreuses variétés de poivrons ont été développées par les jardiniers et les sélectionneurs, donnant naissance à une grande diversité de formes, de couleurs et de saveurs. Au 16^{ème} siècle, les poivrons étaient déjà largement cultivés en Europe pour leur utilisation culinaire, et ils ont été introduits en Afrique et en Asie par les explorateurs et les commerçants européens (ERARD, 2002).

Au fil du temps, le poivron est devenu une culture importante dans de nombreuses régions du monde, notamment en Espagne, en Italie, en Turquie, en Inde et en Chine, où il est largement utilisé dans la cuisine locale. Il est cultivé dans toutes les régions tropicales du monde, ainsi que dans les régions tempérées chaudes (Polese et Devaux, 2007).

IV.2. Classification et Systématique

D'après CAM (2014), L'espèce poivron « *Capsicum annuum* L.» est une solanacée de type annuel, la classification moderne du poivron en tant qu'espèce (Figure 10) :

Règne : *Plantae* (plantes).

Division : *Magnoliophyta* (plantes à fleurs).

Classe : *Magnoliopsida* (dicotylédones).

Ordre : *Solanales*.

Famille : *Solanaceae* (Solanacées).

Genre : *Capsicum*.

Espèce : *Capsicum annuum*.

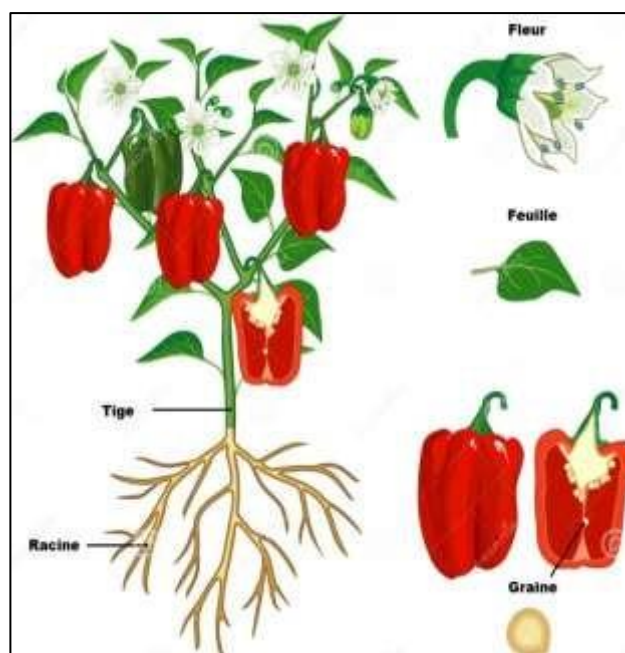


Figure 10 : Morphologie du poivron (SDR, 2016).

Chapitre IV : La culture de poivron

IV.3. Importance économique de la culture du poivron

IV.3.1. Dans le monde

Selon la **FAO**, la production mondiale de poivrons en **2022** a atteint **52,14** millions de tonnes. Cela représente une légère augmentation par rapport à **2021**, où la production était de **51,2** millions de tonnes. La superficie cultivée peut inclure des poivrons cultivés en plein champ et en serre. La Chine est de loin le premier producteur mondial de poivrons, représentant plus d'un tiers de la production mondiale totale (**Tableau 3**).

Tableau 3 : Statistique de production et superficie du poivron dans le monde (**FAO, 2022**).

Classement	Pays	Production (tonnes)	Superficie (Ha)
1	Chine	16,81 millions	680000
2	Mexique	3,11 millions	120000
3	Turquie	2,46 millions	100000
4	Indonésie	1,96 millions	80000
5	Espagne	1,08 millions	50000

IV.3.2. En Algérie

Selon les données publiées par le (**MADR**) dans sa série statistique **B** de **2022**, la production de poivron en Algérie en **2022** a atteint **1,15** million de quintaux. Cela représente une augmentation de **7%** par rapport à l'année **2021**, où la production était de **1,07** million de quintaux (**Tableau 4**).

Tableau 4 : Les principales régions productrices de poivrons plein champ en Algérie (**MADR, 2022**).

Wilaya	Production (Qx)
Wilaya de Msila	250 000
Wilaya de Boumerdès	180 000
Wilaya de Blida	150 000
Wilaya de Tizi Ouzou	120 000

IV.3.3 Dans la Wilaya de Mostaganem

Le (**Tableau 5**) représente la superficie, la production et le rendement de la culture du poivron à Mostaganem (**DSASI, 2019**).

Chapitre IV : La culture de poivron

Tableau 5. Statistique de production et superficie du poivron dites de primeurs, sous serre et l'ensemble y compris de primeurs et sous serre (DSASI, 2019).

	Dites de Primeurs	Sous serre	Ensemble (primeurs et sous serre)
Superficie Ha	925,50	305,50	1231
Production Qx	273150	183300	456450
Moyen de rendement Qx/ Ha	295,1	600	370,8

IV.4. Les variétés cultivées de poivron

Le choix variétal est très important, en particulier lorsqu'une ou plusieurs résistances aux maladies complètent une bonne adaptation au climat. Dans ce cas, les risques au champ sont fortement limités (Saint Louis *et al.*, 2001).

D'après l'ITCMI (2022), les variétés les plus cultivées en Algérie sont : Messaouda, Dina, Kento, Estefan, Zili (type doux), Corne de chèvre, Doubara, Sultan, Tonus, Biskra (type piquant).

IV.5. Les Stades Phénologiques du Poivron

La vie d'un poivron, depuis la graine jusqu'à la récolte, qui dure environ 5 mois est un voyage fascinant marqué par une série de transformations remarquables (Figure 11 & Tableau 6).

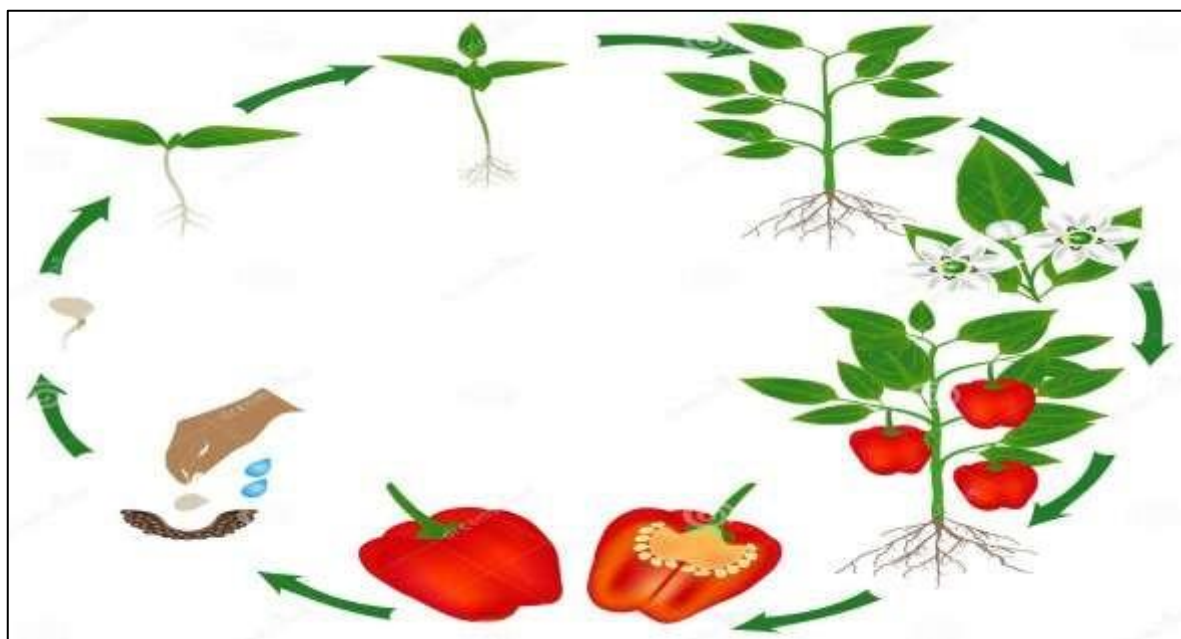


Figure 11 : Le cycle de vie du poivron (SDR, 2016).

Chapitre IV : La culture de poivron

Tableau 6 : La durée du cycle du poivron en fonction des différentes étapes culturales et biologiques de la plante (SDR, 2016).

Levée	Repiquage	Plantation	1 ^{eres} fleurs	Début récolte	Fin récolte
10 jours	2 à 3 Semaines	1 mois	2,5 mois	3 mois	5 mois

IV.6. Les exigences de la culture du poivron

D'après CRAD (2015); ITCMI (2022), le poivron est une culture qui rapporte mais difficile :

- **Texture de sol** : Le poivron se développe bien dans un sol bien drainé, meuble et riche en matière organique. Un sol sableux limoneux présente un équilibre optimal entre la capacité de rétention d'eau et le drainage. Il est généralement considéré comme le type de sol idéal pour la culture du poivron (CRAD, 2015).

- **Température**: est une plante thermophile qui prospère dans des climats chauds et ensoleillés. La température optimale pour la germination est de 20 à 25°C, tandis que la croissance végétative et la fructification se déroulent idéalement entre 25 et 30°C (ITCMI, 2022).

- **Humidité** : Une humidité relative ambiante comprise entre 50 et 70% est favorable à la croissance du poivron. Une humidité trop élevée peut favoriser le développement de maladies fongiques, tandis qu'une humidité trop faible peut causer du stress hydrique (Elattir et Skiredj, 2009).

IV.7. Les opérations culturales

IV.7.1. Préparation de sol

Un labour précoce, quelques semaines avant la plantation, permettre une décomposition adéquate des matières organiques. La profondeur de labour idéale se situe entre 25 à 30 cm, permettant de créer une couche arable meuble et favorable au développement racinaire, au cours duquel sera enfouie la fumure organique et minérale de fond (ITCMI, 2015).

IV.7.2. Semis et plantation

- **Date de semis et plantation** : Le semis sous serre et semis en pot de septembre jusqu'à le mois de novembre et le semis en plein champ les mois de mars- avril. Concernant la plantation sous serre depuis le mois de septembre à janvier et en plein champ d'avril à mai (ITCMI, 2022).

- **Densité de semis** : 20 000 à 25 000 plants / ha (ITCMI, 2022).

Chapitre IV : La culture de poivron

Le repiquage en place définitive sera effectué entre 25 et 40 jours après semis presque en stade 5 à 6 feuilles (ITCMI, 2015), en distance espacées de 0.9 à 1 m entre rangs avec des écartements variant entre 0,4 et 0,8 m entre les plants. (ITCMI, 2022).

IV.7.3. Irrigation

Les besoins de la culture se situent aux environs de 400 mm pendant la période végétative et de 200 à 400 mm pendant la période de cueillettes, ça veut dire soit 600 à 800 mm pour le cycle entier (Skiredj *et al.*, 2005).

IV.7.4. Fertilisation

Selon ITCMI (2022), les besoins de fertilisation durant le cycle est comme c'est de suite :

Fumure de fond :

- Organique : 30 à 35 t / ha.
- Minérale : 180 à 200 unités de N / ha ; 80 à 100 unités de P / ha ; 200 à 250 unités de K / ha.

Fumure couverture (04 apports) :

- 1^{er} apport : 40 unités de N avant floraison ; 30 unités de K.
- 2^{ème} apport : 40 unités de N durant la nouaison ; 60 unités de K.
- 3^{ème} apport : 30 unités de N durant la fructification ; 60 unités de K.
- 4^{ème} apport : 20 unités de N ; 60 unités de K après 1^{er} récolte.

IV.7.5. Tuteurage

Le placement des tuteurs espacés de 2 mètres sur lignes devant servir de support aux traverses en roseau, ensuite placement de première traverse à une hauteur de 40 cm (ITCMI, 2015).

IV.7.6. Paillage

Le poivron supporte bien le paillage plastique du sol, couleur noire en saison fraîche, blanche sur fond noir en saison chaude, à condition d'assurer une irrigation localisée en goutte-à-goutte (Saint Louis *et al.*, 2001).

IV.8. Protection phytosanitaire

a. Insecticide

Pucerons : Acétampride (Wide), Oxamyl (Vydate) (ITCMI, 2022).

b. Fongicide

Botrytis : Chlorotalonil (Thiram Chim), Cyprodinil (Chorus).

Oïdium : hexaconazole (Agrivil, Azoxystrobine).

Mildiou : Acide Phosphorique +Hydroxyde de Cuivre (Agrifos), Propinèbe (Rivacole).

Alternaria : Azoxystrobine+Diféconazole (Amistar Top),Chlorotalonil (Thiram Chim) (ITCMI, 2022).

Partie 2

Étude expérimentale

Chapitre I

Matériel et méthodes

Chapitre I : Matériel et méthodes

I.1. Objectif du travail

Les sols de la wilaya de Mostaganem ont une texture sableuse dans leurs ensembles et pauvres en matière organique, donc pourvus d'une grande perméabilité, ce qui induit un lessivage des éléments fins, pour cette raison, on a pensé d'apporter des amendements organique (fumier) et minéral (argile brute) avec des doses bien appropriées afin : (i) d'améliorer la fertilité physique, chimique et biologique en vue d'une agriculture biologique et un développement durable, et (ii) d'augmenter le stockage du carbone organique de ces sols afin d'atténuer le changement climatique.

I.2. La région de prélèvement

L'expérimentation s'est déroulée à l'Atelier Agricole de la commune de Mazagran (**Figure 12**), localisé à 4 km au sud de la wilaya de Mostaganem entre les points coordonnées Lambert : 35°53' 37'' N, 0°4' 52'' O et 35° 53' 04'' N avec une altitude variant de 125 à 151 m. La superficie de la ferme est de 62,74 hectares, elle est limitrophe des communes de Mazagran (Ouest), Hassi Mamèche (Sud) et Douar Djedid (Est) (**DSA, 2024**).

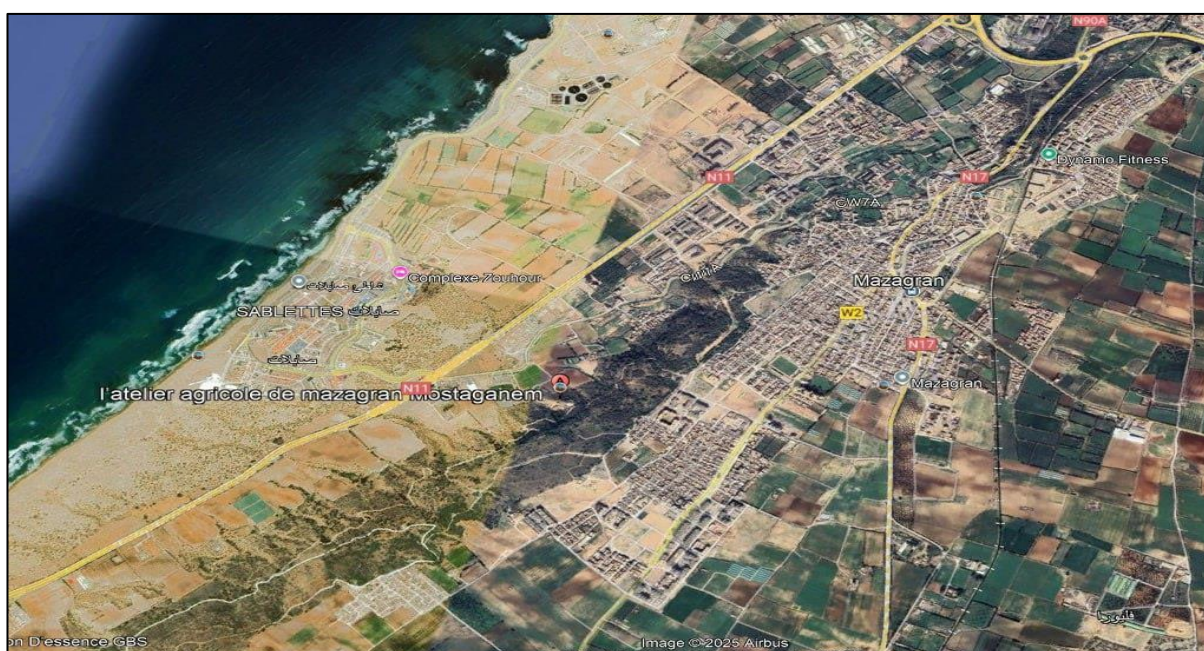


Figure 12 : Situation géographique de la zone d'étude (Atelier Agricole de Mazagran, Mostaganem) (**Google Earth, 2025**).

I.2.1. Situation géographique

La wilaya de Mostaganem Située au nord-ouest de l'Algérie sur la côte méditerranéenne, couvre une superficie de 2269 km². Elle se trouve à 365 km à l'ouest d'Alger et à 80 km à l'est d'Oran, en la positionnant comme une zone de transition entre le nord et l'ouest du pays

Chapitre I : Matériel et méthodes

(ANIREF, 2018). Ses limites géographiques sont définies par la mer Méditerranée au nord, la wilaya de Chlef à l'est, la wilaya de Relizane au sud-est, la wilaya d'Oran à l'ouest et la wilaya de Mascara au sud-ouest (ANIREF, 2018).

I.2.2. Caractéristiques naturelles et conditions climatiques

a. Relief

Le relief de la wilaya de Mostaganem, présente une grande diversité morphologique. Selon ANIREF (2018), la wilaya est entièrement inscrite dans le littoral oranais et s'étend sur plusieurs zones naturelles : les monts du Dahra forment une zone montagneuse marquée par des collines et vallées à l'est, le plateau de Mostaganem de forme triangulaire et à dominante sablonneuse s'étend jusqu'au fleuve Chélif au centre, et enfin, deux unités de plaines complètent ce relief, l'une à l'est autour de la vallée du Chélif, et l'autre à l'ouest au pied du plateau, s'étendant jusqu'aux marais de la Macta.

b. Climat

Mostaganem bénéficie d'un climat méditerranéen caractérisé par des hivers doux et humides et des étés chauds et secs. La pluviométrie annuelle varie entre 350 et 500 mm, avec une répartition irrégulière des précipitations concentrée entre les mois d'octobre et avril. La température moyenne annuelle est estimée à 18,3 °C, avec des pics pouvant atteindre 35 °C en été, notamment dans les zones intérieures, tandis que les régions côtières bénéficient d'un effet modérateur dû à la proximité de la mer Méditerranée (ANIREF, 2018).

c. Sol

Selon des études géologiques spécialisées, les sols de la wilaya sont, en général, légers, meubles et fertiles. La perméabilité est faible et on note une battance importante d'où une mauvaise stabilité structurale (DSA, 2024). On distingue une mosaïque de textures à savoir :

- Sols limono –argileux ;
- Sols argilo-limoneux ;
- Sols calci –magnésique ;
- Sols fer-sialitiques ;
- Sols limono-sableux ;
- Sols sablo-limoneux ;

I.3. Lieu de travail

L'expérimentation a été réalisée dans le laboratoire d'agriculture de précision de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, de l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret et le laboratoire

Chapitre I : Matériel et méthodes

de pédologie de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.

I.4. Matériel et méthodes

I.4.1. Matériel

I.4.1.1. Verreries, appareils et produits utilisés

Tout le matériel utilisé est réuni dans le **Tableau 7**.

Tableau 7 : Matériels et produits.

Matériels et produits	
Appareillage	Agitateur magnétique – Etuves (60°C – 105°C) – Balance de précision – Plaque chauffante - pH mètre – Conductimètre – Calcimètre de Bernard- Bain de sable – thermomètre - Extracteurs chimiques - Portatif numérique du sol NPK.
Verrerie	Béchers - Entonnoirs - Erlenmeyer graduées - Pipettes graduées - Verres à mesure - Creusets - Fiole jaugée - Burette graduée – Bouteilles en verre - Pipette de Robinson - Verre de montre.
Produits	Eau distillée - Carbonate de calcium – Acide sulfurique - Bichromate de Potassium - Sel de Mohr - Eau oxygénée - Oxalate d'ammonium - Acide chlorhydrique – Permanganate de potassium – Réactif diphénylamine – Fluorure de sodium – Méta phosphate de sodium.
Autres matériels	Sachets - Boîtes d'échantillons - Etiquetage - Pince - Tamis - Picette – Spatules – Gants – Bavette – La blouse – Papier aluminium – Papier absorbant.

I.4.2. Méthodes

Le protocole expérimental est représenté dans la **Figure 13** comme suite :

Chapitre I : Matériel et méthodes

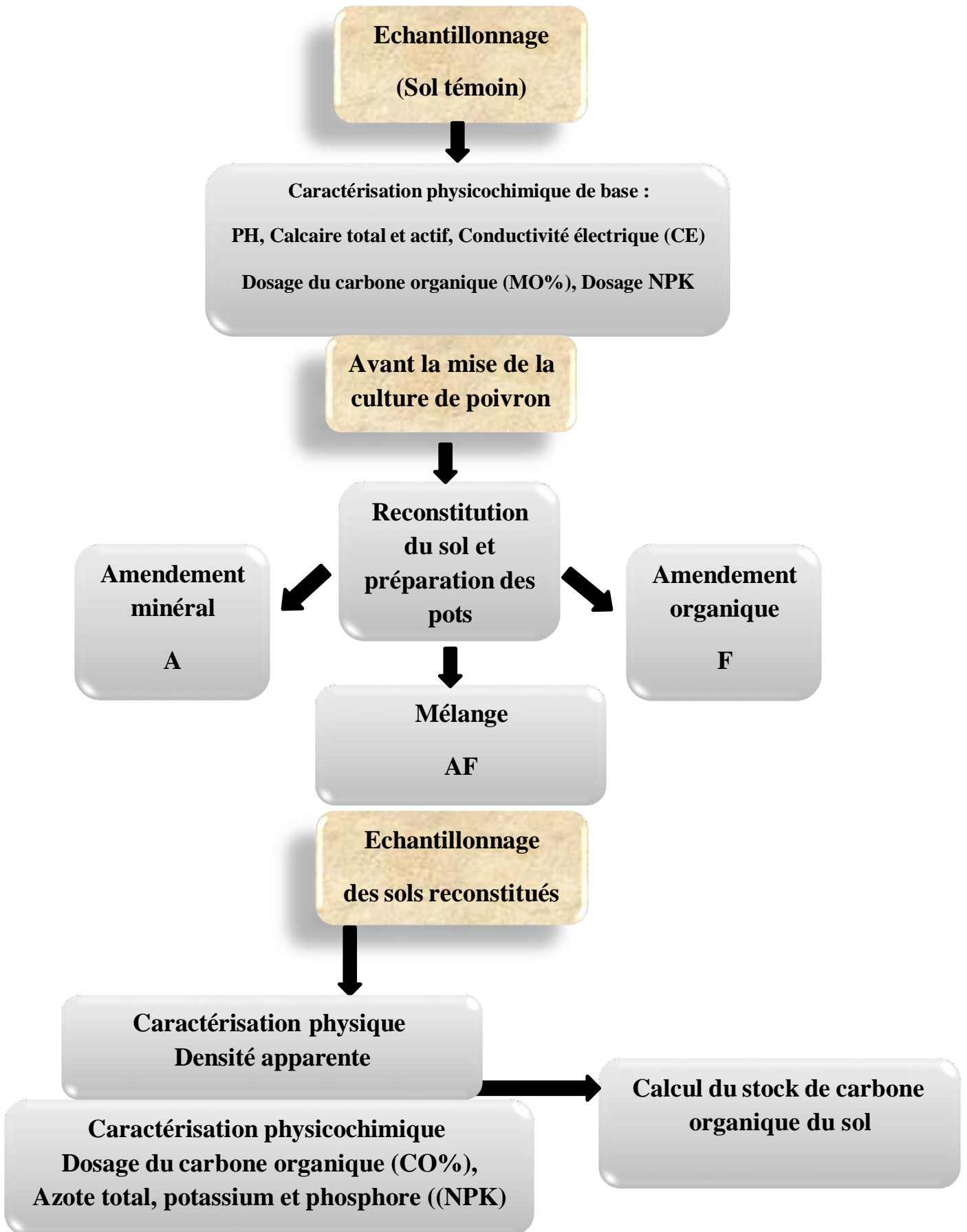


Figure 13 : Protocole expérimental (Benouadah *et al.*, 2020).

Chapitre I : Matériel et méthodes

I.5. Échantillonnage

I.5.1. Échantillonnage du sol

Afin de garantir l'intégrité et la comparabilité des analyses ultérieures, les échantillons de sol doivent être prélevés dans des conditions physiques homogènes, en maintenant des niveaux de température et d'humidité uniformes, et au cours d'une seule journée et au même temps (**Dari, 2013**). L'obtention d'un échantillon représentatif, reflétant fidèlement la composition globale du sol de la parcelle, constitue un impératif méthodologique. Bien que cela puisse s'avérer complexe, cette étape est essentielle pour assurer la fiabilité des résultats expérimentaux (**Es-Skalli, 2015**). Pour l'ensemble des dispositifs expérimentaux en pots, le prélèvement a été systématiquement effectué au niveau de la couche superficielle du sol (30 cm) à l'aide d'une truelle de maçon (**Photo 1**).



Photo 1 : Prélèvement des échantillons de sol (**Merzougui, 2025**).

I.5.1.1. Les analyses physicochimiques du sol témoin

D'après les travaux de **Schvartz *et al.* (2005)** et **Dicova (1997)**, ces analyses servent à regarder de près le sol cultivé de notre parcelle. On veut savoir quelles sont ses caractéristiques physiques et chimiques, mais aussi combien d'éléments nutritifs sont à disposition des plantes dans une ferme normale.

Avant reconstitution (AF0), un échantillon de sol (20 février 2025) a fait l'objet d'une caractérisation physico-chimique, considérée comme base de référence pour l'étude.

a. Préparation des échantillons

• Séchage

On a mis la terre dans un plat et on l'a laissée sécher à température ambiante pendant une semaine (**Photo 2**).

Chapitre I : Matériel et méthodes



Photo 2 : Séchage des échantillons de sol (Merzougui, 2025).

- **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 3**). On a conservé les échantillons de terre fine dans des sachets pour pouvoir servir aux différentes analyses du sol.



Photo 3: Broyage et tamisage des échantillons de sol (Merzougui, 2025).

b. Analyse granulométrique

- **Principe**

La granulométrie (**Photo 4**) est un paramètre physique qui permet de qualifier des échantillons de sol, l'analyse granulométrique (**AFNOR X 31-107**) détermine la répartition des particules minérales de la terre fine (fraction inférieure à 2mm) entre les argiles, les limons fins et grossiers et les sables fins et grossiers (**Gee et Or, 2002**) (**Le protocole dans l'Annexe I**).

Chapitre I : Matériel et méthodes



Photo 4: Analyse granulométrique par la méthode de la pipette de Robinson
(Merzougui, 2025).

c. Mesure du pH

- Principe

Pour connaître le pH du sol, on a suivi une méthode standard en laboratoire (**Photo 5**), selon la norme **NF ISO 10390**, en mélangeant la terre avec de l'eau pure dans un rapport pondéral terre/solution égal à 2/5 ensuite on mesure le pH de ce mélange (**Schwartz et al., 2005**) (**Le protocole dans l'Annexe I**).

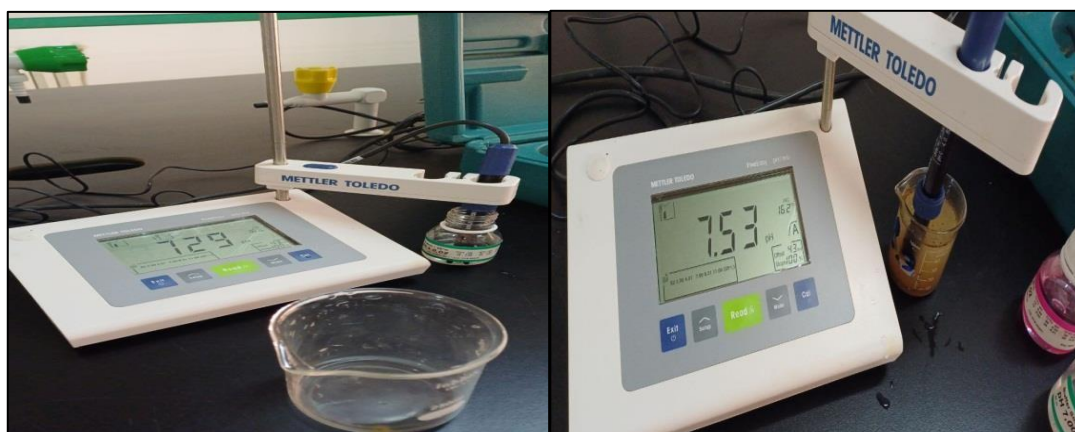


Photo 5: Mesure du pH d'un échantillon de sol à l'aide d'un pH mètre
(Merzougui, 2025).

d. Mesure de la conductivité électrique

- Principe

Pour déterminer la salinité d'un sol (**Photo 6**), le principe est d'extraire d'un électrolyte et de mesurer leur concentration dans l'eau. Au laboratoire, on extrait ces sels sous vide à partir

Chapitre I : Matériel et méthodes

d'un échantillon de terre qu'on a d'abord laissé sécher à l'air, puis tamisé (2 mm). On ajoute une quantité précise d'eau, et cette quantité peut varier un peu selon les laboratoires. Une méthode courante est d'utiliser 5 fois plus d'eau que de terre (**Montoroi, 1997**) (**Le protocole dans l'Annexe I**).



Photo 6 : Mesure de la conductivité électrique du sol par le conductimètre (**Merzougui, 2025**).

e. Détermination du calcaire total et actif

- **Principe**

Selon **Schwartz *et al.* (2005)**, le **calcaire total** du sol (**AFNOR X 31-106**) est déterminé en faisant réagir une quantité de sol avec de l'acide chlorhydrique, ce qui libère du dioxyde de carbone (CO_2) par la dissociation des carbonates de calcium et de magnésium. La quantité de CO_2 dégagé permet de calculer la teneur en calcaire total (**Photo 7**). Le calcaire est ensuite classé selon sa granulométrie. Le **calcaire actif** (**Photo 8**), présent dans les fractions fines ($<20 \mu\text{m}$) et facilement soluble, est mesuré avec l'oxalate d'ammonium selon la méthode **Drouineau-Galet (1942)** (**Le protocole dans l'Annexe I**).



Photo 7 : Dosage du calcaire total (**Merzougui, 2025**).

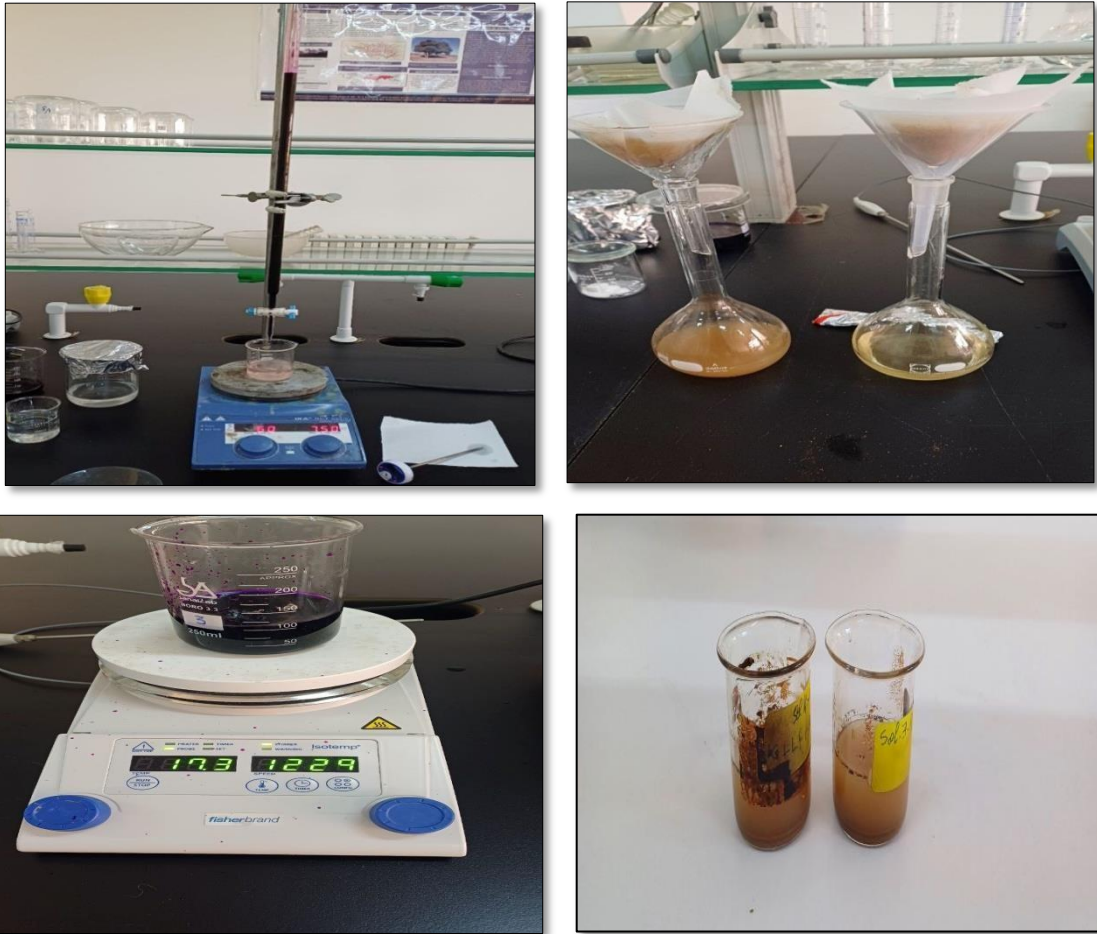


Photo 8 : Dosage du calcaire actif (Merzougui, 2025).

I.5.2. Les amendements

I.5.2.1. L'amendement minéral (Bentonite)

Il s'agit de l'argile brute « Bentonite », il a été ramené de l'Unité de traitement de Bentonite « BENTAL Spa », qui se situe dans l'enceinte du port de Mostaganem à 350 km au nord-ouest d'Alger, et qui fait partie de l'ENOF Spa « Entreprise Nationale des Produits Miniers non Ferreux et des Substances Utiles (Photo 9, Tableau 8).



Photo 9 : La bentonite (Merzougui, 2025).

Chapitre I : Matériel et méthodes

Tableau 8 : Caractéristiques de la bentonite (ENOF, 2024).

Bentonite		
Composition chimique	SiO ₂	55-65 %
	Al ₂ O ₃	12-18 %
	Na ₂ O	1-3 %
	CaO	1-5 %
	K ₂ O	0,5-1,8 %
	MgO	2-3 %
	Fe ₂ O ₂	0-2 %
Caractéristiques physiques	Humidité	13% max
	Perte au feu à 1000°C	7,5 % max
	Viscosité	30Cp min
	Filtrat	20 cm ³ max
	Ratio	6 max
Granulométrie	Résidu 75μ	4% max

I.5.2.2. L'amendement organique (Fumier de bovins)

Il s'agit d'un Fumier de ferme bien décomposé (12 à 24 mois), constitué d'un mélange de déjections et de paille. Il a été prélevé d'un tas de fumier d'une exploitation privée d'un élevage de bovins de la région de Sidi Lakhdar, Mostaganem (**Photo 10**).



Photo 10 : Le fumier de bovin (Merzougui, 2025).

I.5.3. Mise en place du dispositif expérimental

Pour à petit échelle, le repiquage en pots et culture sous serre sont conseillés. Le dispositif expérimental est basé sur la méthode des blocs aléatoires à trois répétitions, à raison de trois pots par traitement.

Chapitre I : Matériel et méthodes

- **Préparation des pots de repiquage (trous de drainage) :** percer des pots de 15 L à raison de 22 trous/pot à la base qui permettent tout simplement d'éviter l'accumulation d'eau.
- **Reconstitution du sol :** remplir les pots avec 10kg de sol reconstitué : sol + un amendement minérale « Argile » et/ou un amendement organique « Fumier » dans un ratio respectivement de 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 15%, 20% (**Tableau 9**).

Tableau 9 : Les sols reconstitués.

Traitement/Dose		Composition (kg)		
		Amendement		Sol
		Minérale (Argile)	Organique (Fumier)	
		10kg/pot		
Témoin : sol nu sans amendement	AF0	0	0	10
Sol cultivé, sans amendement	CAF0	0	0	10
A : Argile	A2.5	0.250	0	9.750
	A5	0.500	0	9.500
	A7.5	0.750	0	9.250
	A10	1	0	9
	A15	1.5	0	8.5
	A20	2	0	8
AF : Mélange (Argile +Fumier)	AF2.5	0.125	0.125	9.750
	AF5	0.250	0.250	9.500
	AF7.5	0.375	0.375	9.250
	AF10	0.500	0.500	9
	AF15	0.750	0.750	8.5
	AF20	1	1	8
F : Fumier	F2.5	0	0.250	9.750
	F5	0	0.500	9.500
	F7.5	0	0.750	9.250
	F10	0	1	9
	F15	0	1.5	8.5
	F20	0	2	8

Chapitre I : Matériel et méthodes

- **Arrosage** : arroser les pots deux fois par semaine pour permettre aux amendements de bien se tasser.
- **Prélèvement du sol avant la mise en culture** : prélever de chaque pot un échantillon de sol reconstitué (04/03/2025), afin de réaliser les analyses du sol physiques avant la mise en culture à savoir : la densité apparente, la densité réelle, la porosité, la perméabilité, la rétention et la stabilité structurale.
- **Le repiquage** : le repiquage des plants de poivron dans les pots, à raison d'un plant par pot afin de se développer dans des conditions les plus favorables possibles.

Les plans de poivrons ont été ramenés de la pépinière el-Merdja de la commune de Ain Nouissy, Mostaganem (**Fiche technique : Figure 22, Annexe II**).

I.5.4. Analyses physiques et chimiques des sols reconstitués

A. Densité apparente

- **Principe**

La densité apparente est déterminée en mesurant le volume occupé par un poids connu de matériau sec (**Grosbollet, 2008**), à l'aide de la méthode du cylindre calibré de 252,2 cm³ (**Blake et Hartge, 1986**).

- **Mode opératoire**

La mesure de la densité apparente (**Photo 11**) repose sur l'utilisation d'un cylindre de volume connu (252,2 cm³) selon le protocole suivant :

- Enfoncer le cylindre dans le sol pour prélever un échantillon.
- Sécher l'échantillon à l'étuve pendant 24 heures à 105 °C.
- Après refroidissement à température ambiante dans un dessiccateur, peser l'échantillon sec (P).

- **Calcul**

$$Da \text{ (g/cm}^3\text{)} = P/205,04$$

Da : Densité apparente en g/cm³.

P : Poids sec (g).

205,04 : Volume du cylindre en cm³.



Photo 11 : Mesure de la densité apparente à l'aide de cylindre (Merzougui, 2025).

B. Dosage du carbone et de la matière organique

- **Principe**

D'après **Schwartz et al. (2005)**, la quantification du carbone organique (CO) dans un échantillon est réalisée en appliquant la méthode Anne. Cette technique analytique, qui suit rigoureusement la norme **NF ISO 14235 (Photo 12)**, repose sur le principe de l'oxydation de la matière organique présente dans l'échantillon. L'oxydant utilisé est le dichromate de potassium en milieu acide sulfurique. Cette réaction d'oxydation peut être effectuée soit à chaud, soit à froid, en fonction des spécificités de l'échantillon et du protocole suivi. Une fois la teneur en carbone organique déterminée par cette méthode, la quantité totale de matière organique (MO) est ensuite estimée par un calcul simple ($MO \% = CO \% \times 1.72$) (**Le protocole dans l'Annexe I**).

- **Calcul du taux de carbone organique du sol**

Le taux du carbone organique du sol (COS) est calculé selon la formule suivante : $CO \% = (V_T - V) \times 0,3$ Avec :

CO : Carbone Organique.

V_T : Volume de solution de sel de Mohr versée dans le témoin (ml).

V : Volume de solution de sel de Mohr versée dans le bêcher (ml).

Chapitre I : Matériel et méthodes

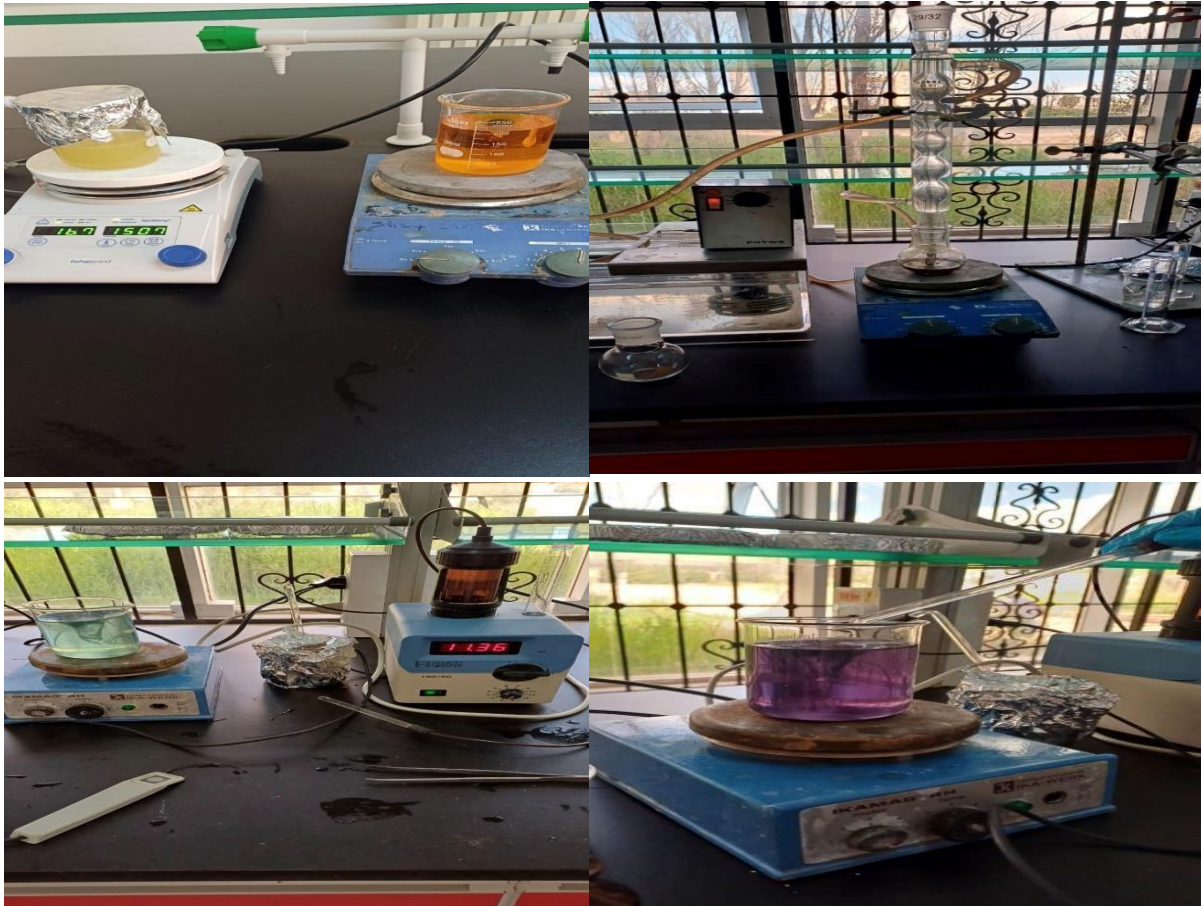


Photo 12 : Dosage du carbone organique par la méthode Anne (Merzougui, 2025).

C. Teneur en NPK du sol

- **Principe**

L'analyse de NPK du sol, réalisé à l'aide d'un appareil numérique portable, repose sur l'extraction des éléments nutritifs (azote, phosphore, potassium) par une solution aqueuse (**Photo 13**). Pour cela la méthode est comme suit : agitation d'une solution contenant de 1g de sol et 10 ml d'eau distillée pendant 2h ensuite pour mesurer les concentrations de N,P et K on introduit l'appareil dans la solution. Les résultats s'affichent directement à l'écran en unités de mg/kg.



Photo 13 : Dosage du NPK dans le sol (Merzougui, 2025).

I.6. Calcul du stock de carbone organique du sol

D'après (FAO, 2018), le stock du carbone organique du sol (COS) est calculé selon la formule suivante : **stock du COS (Mg C ha⁻¹) = 0.1 × CO × Da × p × (1-EG)**

Avec :

CO : Carbone Organique (g kg⁻¹).

Da : Densité apparente (g cm⁻³).

p : profondeur (cm).

EG : Eléments Grossiers (g g⁻¹).

Chapitre II

Résultats et discussion

Chapitre II : Résultats et discussion

II.1. Résultats des analyses physico-chimiques du sol témoin

Les résultats dégagés de cette étude (**Tableau 10**) révèlent que notre sol témoin se caractérise comme suite :

- Une dominance de la fraction sableuse (81,22 %) avec une présence de faibles proportions de limons (3,85 %) et d'argiles (14,92 %). D'après le triangle des classes texturales, notre sol présente une texture **Sableuse** ;
- Moyennement calcaire (**Tableau 11, Annexe II**), il est peu calcaire (CaCO_3 total 24,41 % et CaCO_3 actif 12 %) ;
- Non salé ($124 \mu\text{S cm}^{-1}$) (**Tableau 12, Annexe II**) ;
- Un pH basique (**Tableau 13, Annexe II**) ;
- Pauvre en matière organique ($19,023 \text{ g kg}^{-1}$) et carbone organique ($11,06 \text{ g kg}^{-1}$) (**Tableau 14, Annexe II**) ;
- Pauvre en azote (840 mg kg^{-1}) (**Tableau 15, Annexe II**).

Tableau 10 : Caractérisation physico-chimiques du sol témoin

Caractéristiques		Sol témoin
Profondeur (cm)		0-20
Granulométrie	S (%)	81,22
	L.G (%)	1,05
	L.F (%)	2,8
	A (%)	14,92
Classe Texture		Sableuse
pH		7,61
CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)		124
CO (g kg^{-1})		11,06
MO (g kg^{-1})		19,023
Azote (mg kg^{-1})		840
Phosphore (mg kg^{-1})		75,7675
Potassium (mg kg^{-1})		317,08
CaCO_3 total (%)		24,41
CaCO_3 actif (%)		12

Chapitre II : Résultats et discussion

II.2. Résultats des analyses physiques et chimiques des sols amendés

Les analyses des différents échantillons révèlent des effets contrastés selon le type d'amendement utilisé : bentonite seule (A), fumier de bovin seul (F), ou leur combinaison (AF). Les échantillons AF0 et CAF0 servent de références pour évaluer l'efficacité des apports.

II.2.1. Discussion des résultats de la densité apparente

La densité apparente constitue un indicateur clé de la structure physique du sol, reflétant son niveau de compaction et, par conséquent, sa porosité (Alongo & Kombele, 2009). Une densité élevée peut limiter la circulation de l'air et de l'eau, entraver la pénétration des racines et nuire à la croissance des plantes (Chauvel, 1977).

D'après la Figure 14 et le Tableau 16 (Annexe II), les densités apparentes mesurées sont globalement inférieures au seuil critique de $1,60 \text{ g cm}^{-3}$, ce qui indique une structure favorable au développement racinaire. La moyenne observée est de $1,26 \text{ g/cm}^3$, caractéristique d'un sol meuble, bien aéré, et donc adapté aux exigences agronomiques. L'analyse des traitements montre que :

- Les sols amendés avec bentonite seule présentent des valeurs comprises entre 1,18 et $1,37 \text{ g cm}^{-3}$,
- Ceux amendés avec le fumier de bovin varient entre 1,09 et $1,27 \text{ g cm}^{-3}$,
- Et, les mélanges bentonite + fumier oscillent entre 1,13 et $1,25 \text{ g cm}^{-3}$.

Une réduction notable de la densité est observée dans les traitements F15 % ($1,09 \text{ g cm}^{-3}$), F20 % ($1,11 \text{ g cm}^{-3}$), AF20 % ($1,13 \text{ g cm}^{-3}$) et AF15% ($1,15 \text{ g cm}^{-3}$), traduisant un effet allégeant du fumier sur la structure du sol. Cet effet est lié à l'apport de matière organique, qui favorise l'agrégation des particules, améliore la porosité et limite les phénomènes de tassement (Haynes *et al.*, 1998).

La bentonite, exerce un effet plus modéré, mais elle joue un rôle dans la stabilisation de la structure et la rétention hydrique, en particulier lorsqu'elle est associée au fumier (Fang *et al.*, 2016). Ainsi, les sols traités, en particulier avec les mélanges organo-minéraux, présentent une densité bien inférieure aux seuils limitants, ce qui suggère une bonne aptitude à la culture. Ces résultats confirment les observations de Mermound (2010), selon lesquelles une faible densité apparente est associée à un sol plus poreux, moins compact, et donc plus favorable à la croissance végétale, cela veut dire que les sols étudiés sont légers.

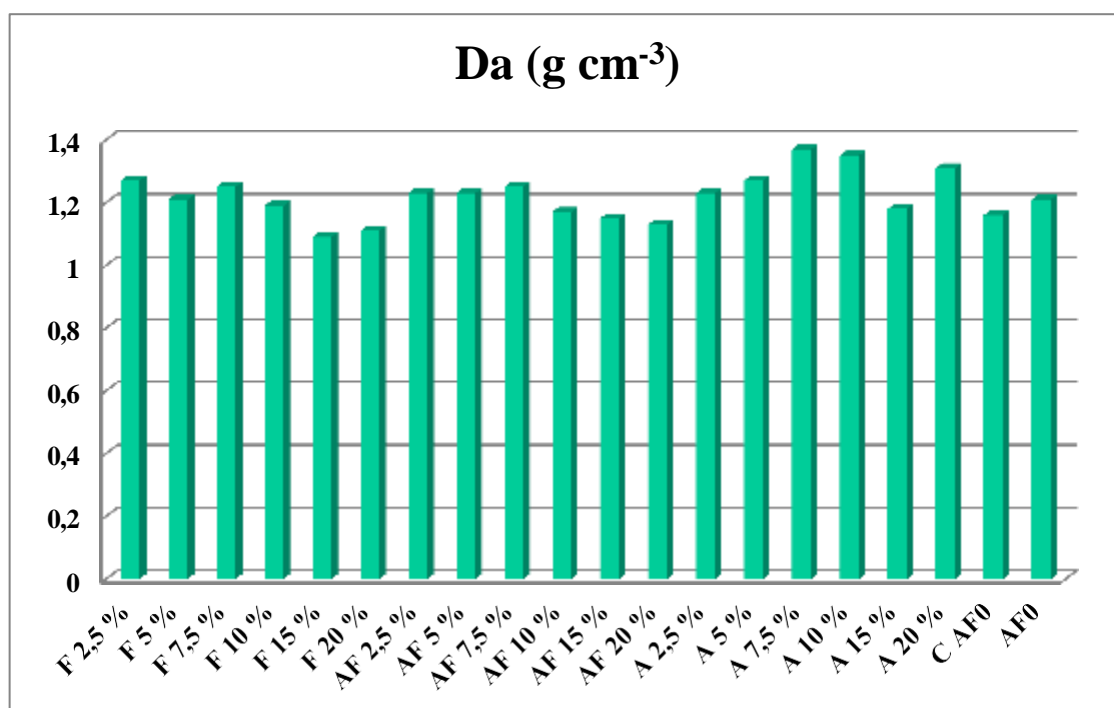


Figure 14 : Évolution de la densité apparente en fonction des doses de la bentonite, du fumier et du mélange.

II.2.2. Discussion des résultats du carbone organique de sol

Le carbone organique du sol (COS) est un indicateur rentable et informatif de la qualité du sol et de la durabilité de l'agriculture car il favorise les propriétés physiques, biologiques et chimiques du sol (Ananyeva, 2019).

D'après la **Figure 15**, on constate que la teneur en CO du sol témoin AF0 est de 11,06 g kg⁻¹, ce qui signifie que le sol de la zone étudiée est pauvre en MO (**Tableau 14, Annexe II**). Une légère élévation a été observée pour le CO du sol cultivé sans amendements (CAF0) avec une teneur de 13,52 g kg⁻¹, ce qui lui rend moyen en MO, cela suggère que l'activité biologique induite par la culture seule peut favoriser une minime accumulation de matière organique (**Six et al., 2006**).

Les traitements à base de fumier montrent une nette augmentation du carbone organique, confirmant l'efficacité de fumier comme source directe de matière organique. Une nette évolution remarquable du CO a été observée dès le traitement F 5 % (11,76 g kg⁻¹) jusqu'à le traitement F 20% (24,27 g kg⁻¹), ce qui classe ces sols comme riches en MO. Cette amélioration importante s'explique par l'apport direct de matière organique facilement décomposable et assimilable par le sol.

Les traitements à base de bentonite seuls présentent une évolution plus modérée. Les teneurs varient entre 9,83 g kg⁻¹, (A 7,5 %) et 13,60 g kg⁻¹, (A 15 %), classant globalement ces sols

Chapitre II : Résultats et discussion

dans la catégorie moyenne, à l'exception de A 7,5 % ($9,83 \text{ g kg}^{-1}$) qui est pauvre. Cela montre que la bentonite, bien qu'utile pour ses propriétés physico-chimiques (rétention d'eau, stabilisation des nutriments), n'est pas une source significative de carbone organique. Elle peut toutefois jouer un rôle indirect en limitant les pertes de matière organique par lessivage (Zhang *et al.*, 2003).

Les résultats des traitements combinés sont hétérogènes. À faible dose, AF 2,5 % présente une teneur de CO de $7,2 \text{ g kg}^{-1}$, (pauvre en MO), mais des doses intermédiaires comme AF 7,5 % atteignent $17,92 \text{ g kg}^{-1}$, (moyenne en MO), et AF 20 % atteint une teneur de $20,16 \text{ g kg}^{-1}$, se rapprochant du seuil des sols riches en MO. Toutefois, une baisse marquée est notée à AF 15 % ($9,80 \text{ g kg}^{-1}$), ce qui le ramène en catégorie pauvre. Cette variabilité suggère que l'interaction entre bentonite et fumier n'est pas toujours additive. À certaines concentrations, la bentonite pourrait freiner la minéralisation rapide de la matière organique apportée par le fumier (Petersen *et al.*, 2016).

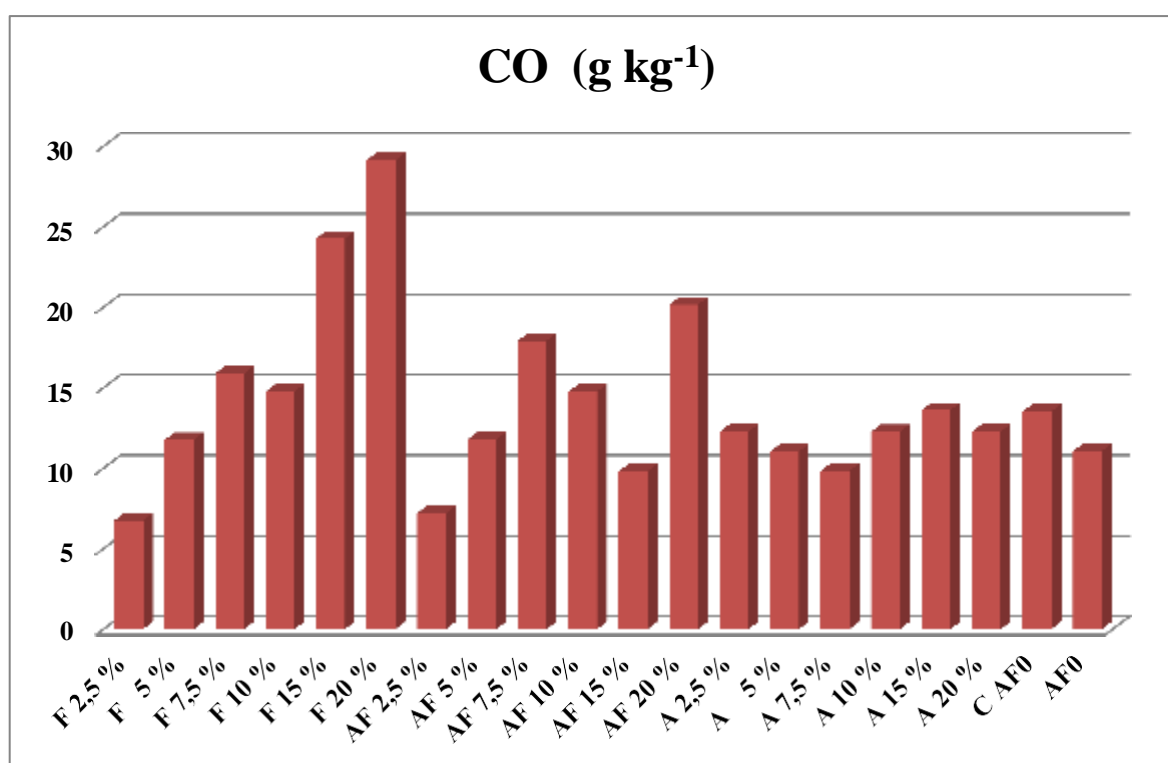


Figure 15 : Évolution de la teneur en carbone organique en fonction des doses de la bentonite, du fumier et de mélange.

II.2.3. Discussion des résultats de séquestration du carbone organique de sol

Les résultats du stockage de carbone organique (SCO) révèlent une nette influence du type et du pourcentage d'amendement appliqué (Figure 16). Le témoin AF0 présente un stockage de $40,148 \text{ Mg C ha}^{-1}$, ce qui représente la base de comparaison et le CAF0 enregistre un stockage

Chapitre II : Résultats et discussion

de 47,036 Mg C ha⁻¹, supérieur au T0, ce qui indique une influence bénéfique, possiblement liée à une amélioration des propriétés physiques du sol ou à des apports résiduels précédents. Les traitements au fumier de bovin seul montrent une amélioration marquée du SCO, proportionnelle au taux appliqué. Le stockage passe de 25,717 Mg C ha⁻¹, pour le traitement F 2,5 % jusqu'à un maximum de 97,003 Mg C ha⁻¹, pour le traitement F 20 %. Cette évolution témoigne un fort apport de matière organique labile et stable provenant du fumier, qui enrichit le sol en carbone. Plusieurs études (**Lal, 2004 ; Chantigny *et al.*, 2007 ; Benouadah *et al.*, 2022**) confirment que les amendements organiques d'origine animale améliorent la séquestration du carbone, en raison de leur teneur élevée en carbone organique total et de leur potentiel de transformation en humus stable.

Les traitements combinant fumier et bentonite révèlent des résultats globalement favorables, bien que moins réguliers. Le SCO augmente de 26,568 Mg C ha⁻¹ pour le traitement AF 2,5 % à 67,2 Mg C ha⁻¹ pour le traitement AF 7,5 %, confirmant l'effet complémentaire des deux amendements. Une baisse est cependant observée pour le traitement AF 10 % (51,772 Mg C ha⁻¹), suivie d'un creux plus marqué pour le traitement AF 15 % (33,817 Mg C ha⁻¹) qui pourrait être attribuée à une redistribution verticale du carbone dans le profil ou à un effet antagoniste ponctuel dans la stabilisation de la matière organique. L'augmentation du SCO pour le traitement AF 20 % (68,342 Mg C ha⁻¹) suggère une reprise du stockage, potentiellement due à un équilibre entre les apports et la capacité de rétention de la matrice argileuse. Selon **Bronick et Lal (2005)**, les argiles peuvent favoriser la protection physique du carbone dans les agrégats, mais ce mécanisme dépend étroitement de la proportion et du type d'argile utilisé. En l'occurrence, la bentonite semble agir favorablement, sans toutefois compenser une éventuelle baisse de biodégradation ou d'activité microbienne.

Concernant les traitements à la bentonite seule, les valeurs de stockage sont plus variables, comprises entre 40,401 et 49,673 Mg C ha⁻¹. Le SCO est relativement élevé pour le traitement A 2,5 % (45,276 Mg C ha⁻¹), mais connaît une baisse pour A 5 % (42,047 Mg C ha⁻¹) et A 7,5 % (40,401 Mg C ha⁻¹), avant d'augmenter pour A 10 % (49,673 Mg C ha⁻¹). Par la suite, les valeurs se stabilisent légèrement au-dessus de 48 Mg C ha⁻¹ pour les traitements A 15 % (48,165 Mg C ha⁻¹) et A 20 % (48,24 Mg C ha⁻¹) respectivement. La bentonite n'apporte pas directement de carbone, mais elle joue un rôle de structuration et de rétention, favorisant une meilleure stabilité de la matière organique déjà présente. Selon **Six *et al.* (2002) ; Derrien *et al.* (2013)**, les argiles expansives telles que la bentonite peuvent limiter les pertes de carbone par minéralisation rapide, en encapsulant partiellement la matière organique dans des structures micro-agrégées.

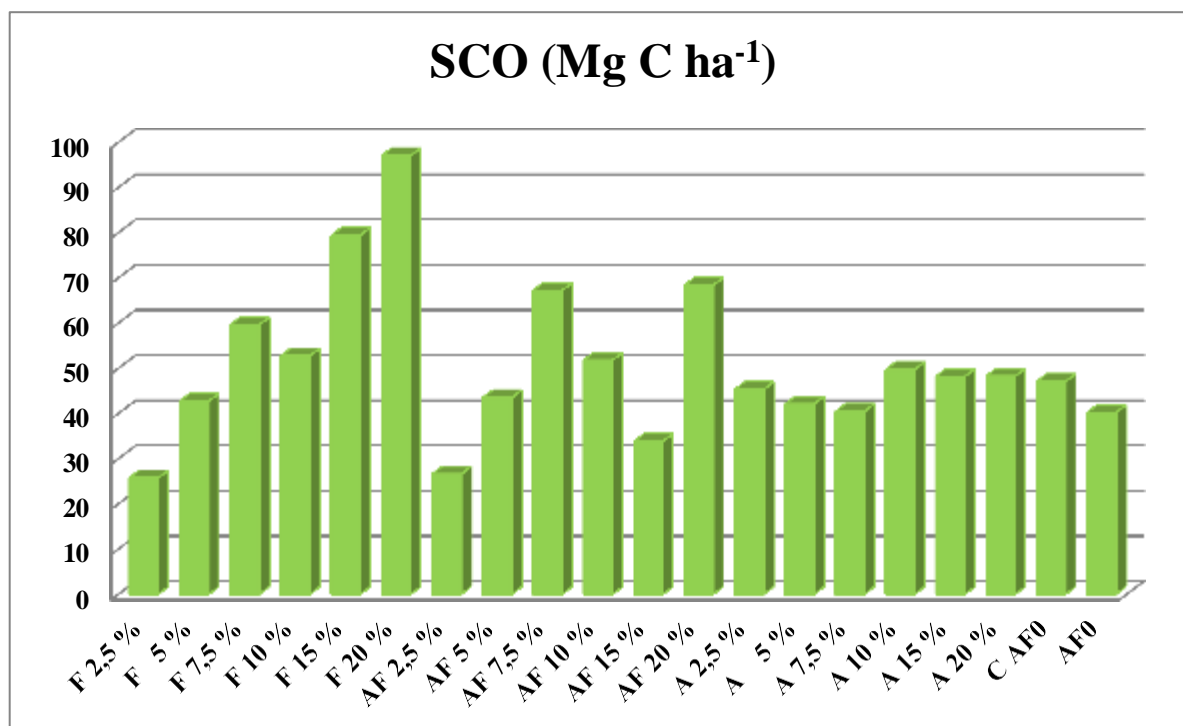


Figure 16 : Évolution de stockage du carbone organique en fonction des doses de la bentonite, du fumier et de mélange.

II.2.4. Discussions des résultats de la teneur en NPK du sol

II.2.4.1. Résultats de la teneur en azote

Les teneurs en azote varient en fonction du traitement appliqué (**Figure 17**). Le sol AF0 présente une valeur de base de 840 mg kg⁻¹, traduisant la pauvreté typique des sols sableux en matière organique (**Tableau 15, Annexe II**). En comparaison, le sol témoin cultivé CAF0 montre une augmentation à 1036 mg kg⁻¹, ce qui suggère que la présence de végétation favorise une meilleure conservation de l'azote, probablement par stimulation de l'activité microbienne ou réduction des pertes (**Drinkwater et al., 1998**).

L'introduction de bentonite seule à faible dose A 2,5 % conduit à une teneur plus élevée en azote 896 mg kg⁻¹ que le AF0, mais toujours inférieure au CAF0. Cependant, une baisse est observée à A 5 % (854 mg kg⁻¹) et A 7,5 % (686 mg kg⁻¹), ce qui pourrait s'expliquer par un phénomène d'immobilisation temporaire de l'azote par les colloïdes argileux, ou encore par la dilution minérale du sol due à la nature physiquement bénéfique mais peu nutritive de la bentonite (**Li et al., 2016**). Aux doses plus élevées, une remontée est notée : A 10 % (924 mg kg⁻¹), A 15 % (1106 mg kg⁻¹), suggérant un effet tampon de la bentonite, qui favorise la rétention d'azote ammoniacal dans le sol. Toutefois, à A 20 % (711 mg kg⁻¹), la baisse reprise indique une saturation ou un déséquilibre temporaire (**Nouri et al., 2008**).

Chapitre II : Résultats et discussion

Le fumier de bovin, riche en azote organique, se révèle particulièrement efficace. Les teneurs augmentent régulièrement avec la dose : 875 mg kg⁻¹ à F 2,5 %, 924 mg kg⁻¹ à F 5 %, 1015 mg kg⁻¹ à F 7,5 %, puis culminent à 1176 mg kg⁻¹ à F 10 %, 1484 mg kg⁻¹ à F 15 %, et atteignent un pic à 1645 mg kg⁻¹ à F 20 %, indiquent une forte minéralisation de la matière organique, assurant une libération progressive de l'azote. Aucune baisse n'est observée aux doses élevées, ce qui suggère une bonne capacité de rétention du sol, malgré sa texture sableuse (**Maftoun et al., 2004**).

Les traitements combinés montrent une dynamique intermédiaire et offrent une performance en termes de stabilisation et de disponibilité de l'azote. Dès AF 2,5 %, la teneur atteint 805 mg kg⁻¹, puis augmente à 1050 mg kg⁻¹ à AF 5 %, avant de redescendre à 840 mg kg⁻¹ à AF 7,5 %. Les doses suivantes montrent une nette amélioration : 1400 mg kg⁻¹ à AF 10 %, mais une stabilisation est notée à AF 15 % (1050 mg kg⁻¹). Cette évolution reflète une synergie modérée, où la bentonite stabilise l'azote organique libéré par le fumier, mais peut aussi ralentir sa minéralisation à certaines concentrations (**Hussain et al., 2022**).

Ces tendances confirment les résultats de **Koull (2007)** à Ouargla, qui a démontré l'effet positif du fumier sur la minéralisation de l'azote dans les sols sableux. Par ailleurs, **Yssaad et Belkhodja (2007)** ont montré que l'ajout de bentonite augmente l'azote assimilable en améliorant sa rétention dans la zone racinaire. Ainsi, la combinaison organo-minérale offre un double avantage : apport et rétention de l'azote, ce qui améliore l'efficacité nutritive.

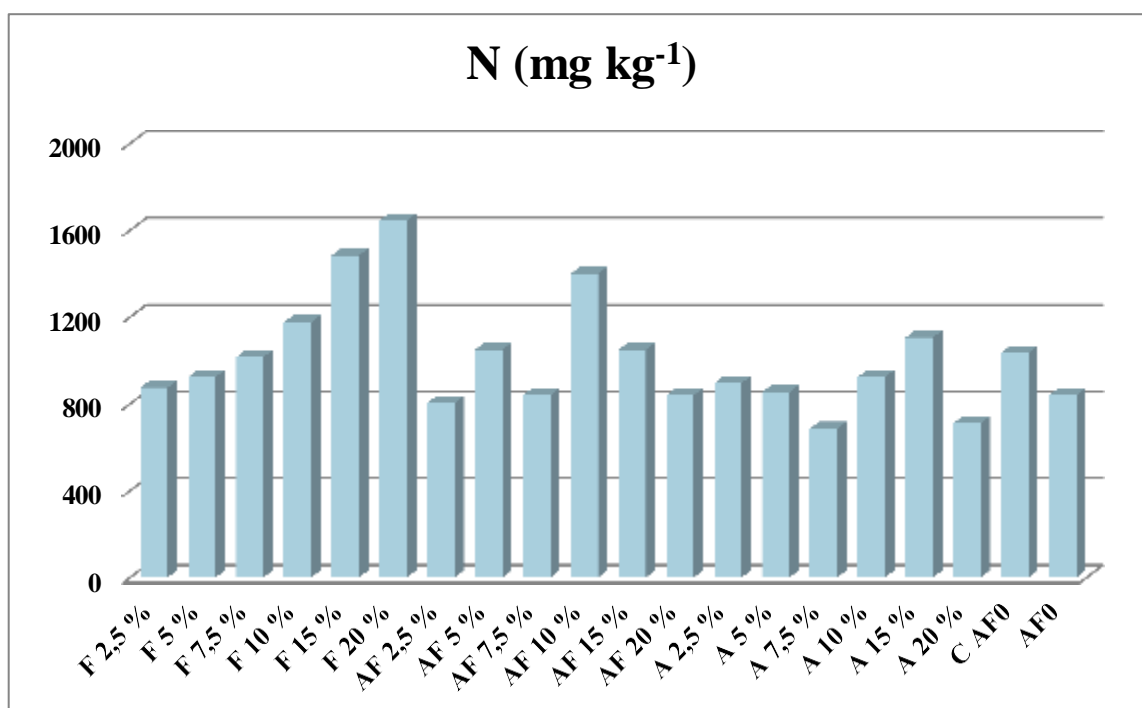


Figure 17 : Évolution de la teneur en azote en fonction des doses de la bentonite, du fumier et du mélange.

II.2.4.2. Résultats de la teneur en phosphore

Le phosphore est relativement stable dans les sols, mais fortement influencé par la nature des amendements (**Figure 18**). L'AF0 affiche une teneur de 75,77 mg kg⁻¹, tandis que le CAF0 présente une légère amélioration à 81,58 mg kg⁻¹, soulignant l'impact bénéfique de la mise en culture sur la disponibilité du phosphore dans le sol.

Les échantillons amendés uniquement à la bentonite montrent une évolution modeste du P, atteignant un maximum de 79,12 mg kg⁻¹ pour le traitement A 15 %. Ce comportement peut s'expliquer par le rôle passif de la bentonite : elle n'apporte pas directement de phosphore, mais en limite probablement la fixation sur les oxydes métalliques du sol, améliorant légèrement sa disponibilité (**Li & Mao 2023**).

À l'inverse, le fumier de bovin induit une amélioration nette et rapide des teneurs en phosphore. Dès F 10 %, on atteint 129,41 mg kg⁻¹, puis la concentration augmente à 169,62 mg kg⁻¹ à F 15 %, pour culminer à 186,30 mg kg⁻¹ à F 20 %, représentant la valeur la plus élevée. Cela confirme l'apport direct et efficace de phosphore biodisponible contenu dans le fumier. L'absence de baisse à forte dose montre ici une bonne assimilation du P par le sol (**Zhang et al., 2023**).

Les traitements combinés présentent également des résultats intéressants. Les teneurs augmentent régulièrement jusqu'à AF 10 % (124,83 mg kg⁻¹), mais une baisse est observée à

Chapitre II : Résultats et discussion

AF 15 % ($106,16 \text{ mg kg}^{-1}$) avant de remonter légèrement à AF 20 % ($131,47 \text{ mg kg}^{-1}$). Cette fluctuation suggère que l'interaction entre bentonite et fumier n'est pas strictement additive : la bentonite pourrait, à certaines doses, ralentir temporairement la libération du phosphore organique du fumier (Abd Alshammari *et al.*, 2024).

Selon Czaban & Siebielec (2013), la bentonite améliore la disponibilité en phosphore dans les sols sableux grâce à son effet sur le pH et la capacité d'échange cationique. En diminuant la fixation du phosphore par les oxydes de fer et d'aluminium, elle favorise son assimilation. Combinée au fumier, qui est une source organique riche en phosphore, la bentonite permet une meilleure rétention du P dans la zone racinaire.

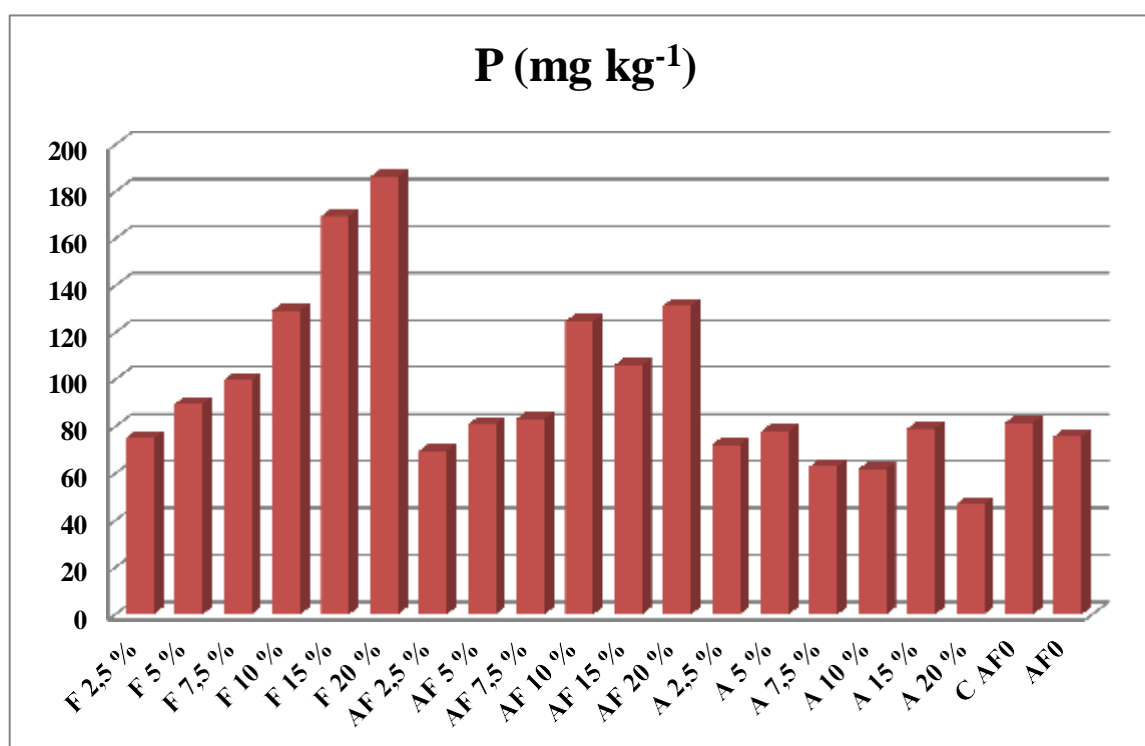


Figure 18 : Évolution de la teneur en phosphore en fonction des doses de la bentonite, du fumier et de mélange.

II.2.4.3. Résultats de la teneur en potassium

Le potassium suit une tendance similaire à celle du phosphore, bien que son comportement varie plus fortement en fonction du type et de la dose d'amendement appliqué (Figure 19). L'AF0 présente une teneur de $317,08 \text{ mg kg}^{-1}$, tandis que le CAF0 affiche $325,22 \text{ mg kg}^{-1}$, montrant un léger enrichissement dû à l'activité biologique induite par la culture, ce qui rejoint les constats de Brady & Weil (2016) sur le rôle des racines et de la microflore dans la libération du potassium.

L'application de bentonite seule entraîne des variations irrégulières: la teneur augmente jusqu'à $563,77 \text{ mg kg}^{-1}$ pour le traitement A 5 %, avant de chuter à $355,61 \text{ mg kg}^{-1}$ pour le

Chapitre II : Résultats et discussion

traitement A 7,5 %, puis encore à 339,64 mg kg⁻¹ et 341,03 mg kg⁻¹ pour les traitements A 10 % et A 20 % respectivement. Seul A 15 % montre une remontée à 472,73 mg kg⁻¹. Ces résultats traduisent l'effet non constant de la bentonite sur le potassium, possiblement en lien avec une interaction complexe entre les particules argileuses et la libération du K. Bien que la bentonite ne soit pas une source directe de K, ces fluctuations pourraient résulter de mécanismes de fixation ou de compétition avec d'autres cations (**Aleem *et al.*, 2000**).

En revanche, le fumier de bovin provoque une élévation marquée des teneurs en potassium. Dès le traitement F 2,5 %, on enregistre 511,98 mg kg⁻¹, avec un pic impressionnant pour le traitement F 20 % (2487,95 mg kg⁻¹). Cette forte augmentation confirme que le fumier est une source majeure de K rapidement disponible, en raison de sa solubilité et de la faible rétention du potassium dans les sols sableux (**CANC, 2018**).

Les traitements combinés montrent également des performances remarquables. Dès le traitement AF 5 %, la teneur en K atteint 829,11 mg kg⁻¹, pour culminer à 2139,83 mg kg⁻¹ à AF 20 %. Ces résultats témoignent d'une synergie entre les deux amendements : le fumier apporte le potassium en grande quantité, tandis que la bentonite améliore sa rétention dans la zone racinaire, réduisant les pertes par lixiviation (**Abdeen, 2020**).

De plus, **Czaban & Siebielec (2013)** soulignent que l'application de bentonite augmente la disponibilité du K assimilable et sa concentration dans la zone superficielle du sol grâce à sa capacité d'échange cationique. Le fumier étant une source naturelle de K, son association à la bentonite permet de limiter les pertes par lixiviation, maximisant ainsi la fertilité du sol à long terme.

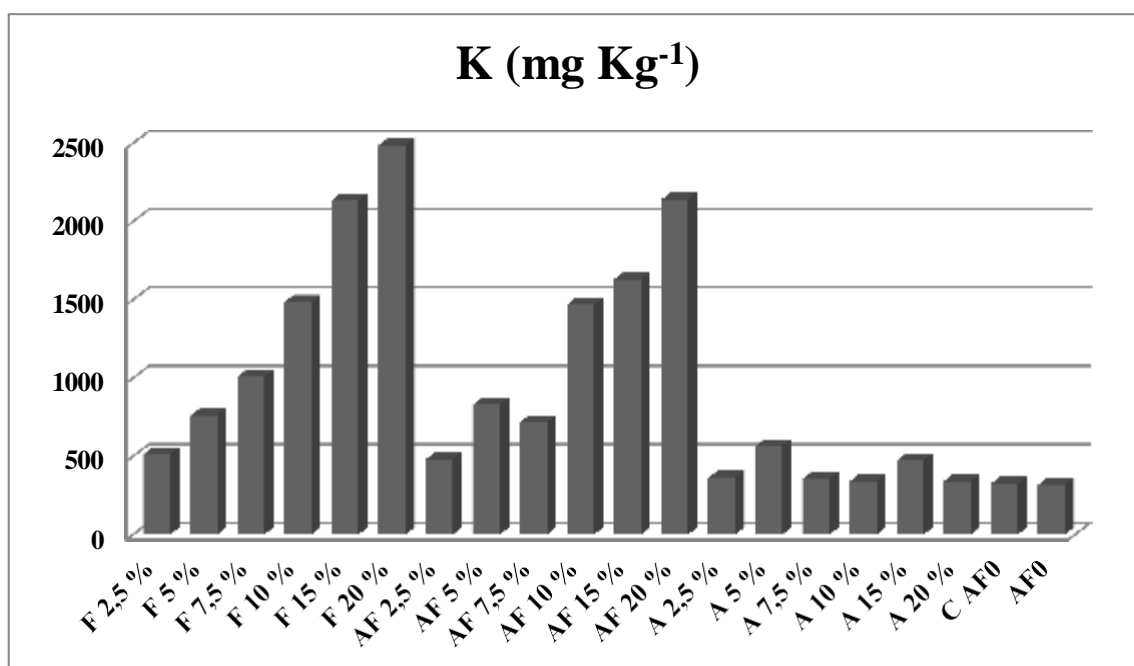


Figure 19 : Évolution de la teneur en potassium en fonction des doses de la bentonite, du fumier et de mélange.

II.2.5. Discussion des résultats de rapport C/N

Le rapport C/N est souvent utilisé pour prédire la stabilité d'une matière organique simple dans le sol. D'après le **Tableau 17 (Annexe II)**, une matière à faible C/N (4 à 12) va être rapidement minéralisée en fournissant beaucoup d'azote minéral. Donc le sol a une activité biologique importante ramenant à une décomposition rapide de la matière organique (**CRA, 2011**). La dégradation d'une matière à fort C/N (15 à 20) va à l'inverse provoquer l'immobilisation de l'azote du sol par les microorganismes (**Van De Kerchove et al., 2006**). Les témoins AF0 et CAF0 présentent des rapports autour de 13 (**Figure 20**), valeurs considérées comme normales pour un sol équilibré. Dans les traitements au fumier de bovin seul, le rapport C/N varie de 7,71 (F 2,5 %) à 17,71 (F 20 %), avec une progression régulière. À faibles doses (F 2,5 % et F 5 %), le rapport reste inférieur ou proche de 12, ce qui favorise une bonne minéralisation. Aux doses élevées, la matière organique devient plus stable, avec un risque modéré d'immobilisation, sans toutefois dépasser le seuil critique de 20. Ce comportement est typique des amendements organiques riches en carbone, comme le montre également **Lal (2005)**.

Pour les échantillons amendés avec bentonite seule, le rapport C/N reste relativement stable, entre 12,3 et 17,3. Les valeurs se maintiennent dans une zone intermédiaire (10–20), traduisant une matière organique modérément biodégradable. Aucune valeur ne dépasse le

Chapitre II : Résultats et discussion

seuil de 20, indiquant que la bentonite n'entraîne pas un déséquilibre important entre carbone et azote, mais plutôt une libération progressive (Czaban *et al.*, 2013).

En ce qui concerne les traitements combinés, les résultats sont plus contrastés. À faible dose (AF 2,5 %), le rapport C/N est de 8,94 (favorable à la minéralisation), mais il atteint 21,33 à AF 7,5 % et 24 à AF 20 %, dépassant le seuil critique. Ces valeurs suggèrent une accumulation de carbone non compensée par un apport proportionnel d'azote, probablement en raison de la rétention renforcée par la bentonite, réduisant ainsi la biodisponibilité immédiate de l'azote. Selon Whalen & Chang (2002), un tel excès de carbone peut entraîner une immobilisation temporaire de l'azote.

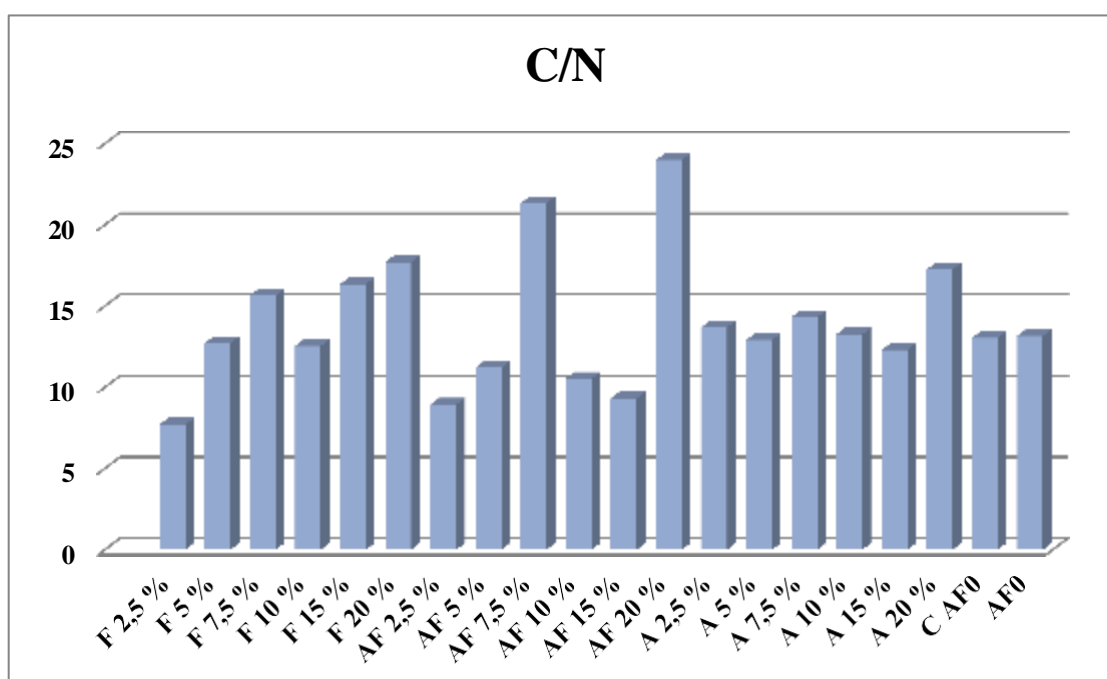


Figure 20 : Évolution de rapport C/N en fonction des doses de la bentonite, du fumier et de mélange.

Conclusion

Conclusion

Cette recherche a montré l'importance de la bentonite dans la gestion durable des sols sableux en zones semi-arides notamment sur la séquestration du carbone organique. L'application de la bentonite seule démontre un effet plus modéré en terme d'amélioration du carbone organique et le stockage du carbone grâce à ses propriétés physico-chimiques qui permettant de maintenir la rétention d'humidité et de nutriments, surtout à des doses intermédiaires (10 % et 15 %) ses propriétés colloïdales favorisent la stabilisation de la matière organique.

Les résultats les plus remarquables ont été obtenus avec le fumier de bovin à 20 %, qui a présenté des valeurs maximales de carbone organique total (29,13 g kg⁻¹), en carbone stocké (97,003) et les niveaux les plus élevés d'azote (1645 mg kg⁻¹), de phosphore (186,3 mg kg⁻¹) et de potassium (2487,95 mg kg⁻¹). Ces données confirment son rôle en tant qu'amendement organique riche et efficace. De plus, la baisse de la densité apparente observée à ce niveau d'amendement indique une meilleure structuration du sol et conditions favorables au stockage du carbone et à la circulation de l'eau et de l'air.

La combinaison bentonite et fumier a montré des performances très prometteuses, notamment le traitement 20 %, soulignant une synergie entre les deux amendements. La bentonite semble améliorer la rétention du carbone et réduire les pertes et permet de réduire la lixiviation du phosphore et du potassium, prolongeant leur disponibilité dans le sol, en stabilisant les matières organiques, puis que le fumier enrichit rapidement le sol, favorable à la séquestration à long terme.

L'évaluation du rapport C/N a révélé des valeurs généralement situées dans la plage optimale (10–15), traduisant une bonne biodégradabilité de la matière organique et un équilibre entre minéralisation et humification, avec quelques exceptions montrant une accumulation de matière organique plus stable.

En conclusion, le traitement F 20 % s'est avéré être le plus performant pour améliorer simultanément la fertilité du sol (NPK), le carbone organique et sa séquestration, ainsi que l'amélioration de la structure physique (baisse de la densité apparente et cette étude suggère que l'utilisation raisonnée de la bentonite, en particulier lorsqu'elle est combinée à des amendements organiques comme le fumier (AF 20 %), peut constituer une stratégie efficace et durable pour améliorer la fertilité des sols pauvres et renforcer leur rôle comme source de carbone dans les environnements semi-arides.

Conclusion

Limites et Perspectives

Cette étude ouvre plusieurs pistes de recherche pour approfondir les effets de la bentonite sur la séquestration du carbone organique. Des essais à plus long terme permettraient de mieux évaluer la stabilité du carbone stocké. Il serait également pertinent d'explorer les effets combinés de la bentonite avec d'autres amendements organiques comme le fumier. Par ailleurs, une approche microbiologique permettrait de mieux comprendre les mécanismes de stabilisation du carbone. Enfin, une évaluation agronomique et économique de cette pratique renforcerait son intégration dans les stratégies de gestion durable des sols.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- ❖ **Abd Alshammari, A. H. and Al-Wotaify, A. S. S. (2024).** *The Effect of Bentonite, Poultry Manure and Elements on Some Chemical Properties of Sandy Calcareous Soil.* IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1371(8), 082049.
- ❖ **Abdeen, S. A. (2020).** *Biochar, Bentonite and Potassium Humate Effects on Saline Soil Properties and Nitrogen Loss.* Annual Research & Review in Biology, 35(12), 45–55.
- ❖ **Abismail, D-J. (1999).** Effet de la bentonite sur les caractéristiques chimiques des sols sableux de la région de Mostaganem : étude du comportement d'une variété de tomate industrielle. Mémoire d'Ingéniorat. Université de Mostaganem. 52 p.
- ❖ **Aleem, A. A., et al. (2000).** *Effect of Potassium Humate and Bentonite on Some Soil Chemical Properties under Different Rates of Nitrogen Fertilization.* Journal of Soil Science and Agricultural Engineering, 1(1), 1–10.
- ❖ **Alongo, S. et Kombele, F. (2009).** Evolution de la densité apparente et du rapport C/N du sol sous les variétés exotiques et locale de manioc dans les conditions naturelles de Kisangani (Rd Congo). Annales de l'Institut Facultaires des sciences agronomiques de Yangambi, 1: 197-214.
- ❖ **Amundson, R. (2001).** The carbon budget in soils. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29, 535–562.
- ❖ **Ananyeva, N., Ivashchenko, K., Vasenev, V., Sushko, S., Seleznyova, S. and Kudayarov, V. (2019).** Microbial C-availability and organic matter decomposition in urban soils of megapolis depend on functional zoning. *Soil and Environment*, 38(1): 31-41.
- ❖ **Andres, R-J, Boden, T., Le Quéré, C., Conway, T., Houghton, R-A., House, J-L, ... et Zeng, N. (2012).** Le budget carbone mondial 1959-2011. Discussions sur les données scientifiques du système terrestre, 5(2) : 1107-1157.
- ❖ **ANIREF. (2018).** Monographie de la Wilaya de Mostaganem. 31p.
- ❖ **Anonyme. (1995).** Direction des Services Agricoles. Département des statistiques. Mostaganem. Algérie. 85p.
- ❖ **Anonyme. (1998).** Direction des Services Agricoles. Département des statistiques. Mostaganem. Algérie. 73p.
- ❖ **Arrouays, D. (2008).** Changement climatique et évolution du stockage de carbone dans les sols : Enjeux et incertitudes. *Environnement*, 15 : 1-3.
- ❖ **Azzouz, A. (2006).** Propriétés d'échange des argiles. *Revue des Matériaux*, 12(4), 33–39.

Références bibliographiques

- ❖ **Balesdent, J. (1996).** Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France, INRA, Paris, 260p.
- ❖ **Balesdent, J., Chenu, C., and Balabane, M. (2000).** Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*, 53(3–4), 215–230.
- ❖ **Bamière, L. et Pellerin, S., al. (2019).** Séquestration du carbone dans les sols agricoles français : quels potentiels au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? *INRA*.
- ❖ **Barrington, S., Others. (1997).** Properties and management of cattle manure. *Agricultural Waste Journal*, 23(1), 101–110.
- ❖ **Benamara, N., and Djotni, A. (2018).** Effets des amendements sur la vie biologique des sols. *Revue Algérienne des Sciences du Sol*, 5(2), 44–52.
- ❖ **Benazzoug, M. and Khelifi, L., & Yssaad, S. (2007).** *Effets des amendements organiques sur la qualité physique des sols sableux dans les régions semi-arides d'Algérie.* *Revue des Sciences de l'Environnement*, 10, 85–96.
- ❖ **Benguella, B. (2009).** Valorisation des argiles Algériennes: Application à l'adsorption des colorants textiles en solution. *Thèse de doctorat*, Université de Tlemcen.
- ❖ **Benouadah, S., Oulbachir, K., Benaichata, L., Miara, M.D., Labdelli, F. and Rezzoug, W. (2020).** Impact of organic amendments on soil physical properties under semi-arid climate (Tiaret, Algeria). *J. Fundam. Appl. Sci*, 12(3), 1386-1403.
- ❖ **Benouadah, S., Faraoun, F. and Oulbachir, K. (2022).** Incidence of manure amendment on soil organic stock under semi-arid environment. *Fresenius Environmental Bulletin*, 31(11): 10892-10902.
- ❖ **Bernoux, M. et Chevallier, T. (2013).** Le carbone dans les zones sèches. Des fonctions multiples indispensables. Les dossiers thématiques du CSFD. N°10. Agro polis International, 40p.
- ❖ **Bernoux, M., Arrouays, D., Cerri, C. E. P. and Volkoff, B. (2004).** Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation, facteurs de contrôle et implications pour la gestion des terres. *Comptes Rendus Geoscience*, 336(6), 479–490.
- ❖ **Besseghir, S. et Bouziane, H. (2024).** *Impact de l'arboriculture sur le statut organique du sol sous conditions semi-arides.* Mémoire de master, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.
- ❖ **Blake, G.R. and Hartge, K. (1986).** Bulk density. *Methods Soil Analysis*, 5: 363–375.

Références bibliographiques

- ❖ **Bouras, O. (2003).** Propriétés adsorbantes d'argiles pontées organophiles: Synthèse et caractérisation. *Thèse de doctorat*, Université de Limoges.
- ❖ **Brady, N. C. and Weil, R. R. (2008).** *The Nature and Properties of Soils* (14th ed). Pearson Education.
- ❖ **Brady, N. C., Weil, R. R. (2016).** *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education.
- ❖ **Bresson, L. M. (2017).** Le fumier et ses effets sur les propriétés des sols. *Bulletin de l'INRA*, 19, 45–52.
- ❖ **Brigatti, M. F., Galán, E. and Theng, B. K. G. (2003).** Structures and mineralogy of clay minerals. In *Handbook of Clay Science* (Vol. 1, pp. 19–86). Elsevier.
- ❖ **Bronick, C. J. and Lal, R. (2005).** Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1–2), 3–22.
- ❖ **Cambardella, C. A. and Elliott, E. T. (1998).** Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 777–783.
- ❖ **Cambou, J., Pellerin, S., et al. (2020).** La séquestration de carbone dans les sols : leviers et conditions de mise en œuvre. *INRAE*.
- ❖ **Carretero, M. (2002).** Bentonites and their medical applications. *Clay Minerals in Medicine*, 14(2), 77–83.
- ❖ **Cattaneo, M., et al. (2009).** Bentonite applications in waste containment. *Journal of Applied Clay Science*, 43(3), 320–327.
- ❖ **Cerri, C. C., Bernoux, M., Chaplot, V., Volkoff, B., Victoria, R. L., Melillo, J. M. and Cerri, C. E. P. (1995).** Application of isotopic techniques to evaluate carbon sequestration in soils in the Brazilian Amazon. *Nuclear Techniques in Soil-Plant Studies for Sustainable Agriculture and Environmental Preservation*, 217–233.
- ❖ **Chambre d'Agriculture du Nord-Pas-de-Calais. (2018).** *Les effluents d'élevage : mieux les connaître pour bien les valoriser*.
- ❖ **Chantigny, M. H. et al. (2007).** Short-term C and N dynamics in a soil amended with pig slurry and barley straw: A laboratory study. *Canadian Journal of Soil Science*, 87(3), 345–355.
- ❖ **Chauvel, A. (1977).** Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées : Office de la recherche scientifique et technique outremer.

Références bibliographiques

- ❖ **Chenu, C. (2003)**, Comment caractériser les matières organiques du sol ?, Actes des 6èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre, G Thevenet L Faedy Eds., 107-117p.
- ❖ **Chesworth, W. (2013)**. *Encyclopedia of Soil Science* (2nd ed.). Springer.
- ❖ **Chevallier, T., Fujisaki, K., Roupsard, O., Gui-dat, F., Kinoshita, R., Filho, V., Lehner, P. and Albrecht, A. (2019)**. Short-range-order minerals as powerful factors explaining deep soil organic carbon stock distribution: the case of a coffee agroforestry plantation on Andosols in Costa Rica. *Soil*, 5: 315–332.
- ❖ **Citeau, L., Bispo, A., Bardy, A. and King, D. (2008)**. Gestion durable des sols. Edit. Quae. 336p.
- ❖ **CRA (Chambre régionale de l'agriculture), (2011)**. Guide des produits organiques utilisables en Languedoc-Rousillon. Tome 1. 122p.
- ❖ **Czaban J. and Siebielec G. (2013)**. *Effects of Bentonite on Sandy Soil Chemistry in a Long-Term Plot Experiment (II): Effect on pH, CEC, and Macro- and Micronutrients*. Polish Journal of Environmental Studies 22(6): 1669–1676.
- ❖ **Czaban, J., Siebielec, G., Czyż, E. and Niedźwiecki, J. (2013)**. *Effects of Bentonite Addition on Sandy Soil Chemistry in a Long-Term Plot Experiment (I); Effect on Organic Carbon and Total Nitrogen*. Polish Journal of Environmental Studies, 1661–1667.
- ❖ **Dari. R. (2013)**. Dénombrement de la biomasse microbienne des sols arides, exemple d'un sol salé sous deux types de cultures. Mémoire d'Ingénieur, Université Ouargla. 53p.
- ❖ **Demirbas, A. (2009)**. Surface area and adsorption properties of clays. *Journal of Hazardous Materials*, 167(1–3), 664–670.
- ❖ **Denny, E. G., et al. (2012)**. Humic substances in cattle manure. *Soil Biology & Biochemistry*, 48, 32–41.
- ❖ **Derrien, D., Dignac, M-F., Basile-Doelsch, I., Barot, S., Cécillon, L., Chenu, C., ... et Barré, P. (2016)**. Stocker du C dans les sols. Quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs. 224p.
- ❖ **Derrien, D., Dignac, M-F., Basile-Doelsch, I., Barot, S., Cécillon, L., Chenu, C., Chevallier, T., Freschet, G-T., Garnier, P., Guenet, B., Hedde, M., Klumpp, K., Lashermes, G., Maron, P-A., Nunan, N., Roumet, C. et Barré, P. (2016)**. Stocker du C dans les sols : Quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs ? *Étude et Gestion des Sols*, 23 : 193 – 223.

Références bibliographiques

- ❖ **Dicova, C. (1997).** Les matériels de fertilisation et traitement des cultures. Ed. Tec & Doc. Lavoisier. 276p.
- ❖ **Dicova. (1997).** *Guide des amendements minéraux*. Éditions Techniques Agricoles.
- ❖ **Drinkwater, L. E., Wagoner, P. and Sarrantonio, M. (1998).** *Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses*. *Nature*, 396(6708), 262–265.
- ❖ **DSA (Direction des Services Agricoles), 2024.**
- ❖ **DSASI. (2019).** *Statistiques agricoles de la Wilaya de Mostaganem : production et rendement du poivron*. Direction des Services Agricoles et de la Statistique de l'Investissement.
- ❖ **Duchaufour, P. (1998).** *Pédologie : éléments de science du sol*. Masson.
- ❖ **Duchaufour, P. (2001).** *Introduction à la science du sol* (6e éd.). Dunod.
- ❖ **Dupont, J., Martin, F. and Lefebvre, P. (2019).** Caractéristiques agronomiques du fumier de bovin et leur influence sur la gestion des sols agricoles. *Revue des Sciences Agronomiques*, 28(2), 102–115.
- ❖ **Dupont, N. (2010).** Valorisation du biogaz de fermentation: combustion catalytique (Doctoral dissertation, Université Claude Bernard-Lyon I).
- ❖ **Dupuis, A. (2023).** Applications industrielles de la bentonite. *Journal des Argiles Industrielles*, 30(1), 12–20.
- ❖ **Eddelmann, G. and Favejee, J. C. (1940).** On the Cristal structure of montmorillonite and hallosite. *Ed. Kriste*, 102, 417.
- ❖ **Elattir, M. and Skiredj, A. (2009).** *Pratiques culturales et contraintes de la production de poivron en milieu semi-aride*. Revue Marocaine d'Agronomie.
- ❖ **ENOF (Entreprise Nationale des Produits Miniers non Ferreux et des Substances Utiles), 2024.**
- ❖ **ERARD, C. (2002).** *Capsicum : histoire et diffusion du poivron et du piment dans le monde*. Éditions Agricoles.
- ❖ **Es-Skalli, A. (2015).** Analyse physico-chimique des sols agricoles. Mémoire de fin d'étude. Université de Maroc (Fès). 43p.
- ❖ **Fang, Q., Yu, D., Wang, E., Chen, Z., Zhang, Y. and Wang, J. (2016).** *Effects of bentonite on soil water retention and yield of wheat in a semi-arid environment*. *Field Crops Research*, 200, 38–45.
- ❖ **FAO, (2017).** Carbone organique du sol : une richesse invisible. FAO, Rome, Italie, 90p.

Références bibliographiques

- ❖ **FAO. (2015).** *Status of the world's soil resources (SWSR) – Main report.* Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- ❖ **FAO. (2022).** *Statistiques mondiales sur la production de poivrons.* Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- ❖ **Farge, D., et al. (2020).** Matière organique et fertilité des sols. *Revue Sols et Cultures*, 7(2), 55–63.
- ❖ **Feller, C., Albrecht, A., et al. (1979).** Caractéristiques des matières organiques associées aux différentes fractions granulométriques des sols. *Science du Sol*, 3, 159–171.
- ❖ **Fournier, A. (2021).** Utilisation de la bentonite dans les sols sableux. *Revue des Techniques Agronomiques*, 41(3), 98–104.
- ❖ **Gabet, S. 2004.** Remobilisation D'hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (Hap) Présents Dans Les Sols Contaminés A L'aide D'un Tensioactif D'origine Biologique, Thèse De Doctorat, Université De Limoges.
- ❖ **Garonne, L., et al. (2018).** Rôle du fumier dans l'agriculture durable. *Écologie et Techniques Agricoles*, 16(2), 22–29.
- ❖ **Gee, G. and Or, D. (2002).** Particle size analysis. In *Methods of soil analysis, Part 4. Physical methods.* Soil Science Society of America Book Series, 5: 255-293.
- ❖ **Georges, M. (2011).** *Le cycle du carbone : comprendre les échanges et les enjeux.* IRD Éditions.
- ❖ **GIEC, (2007).** Changements climatiques 2007 : Synthèse du Rapport de contribution du Groupe de travail I du GIEC au Quatrième rapport d'évaluation du GIEC.
- ❖ **Goa, S., Pan, W-L. and Koeining, R-T. (1998).** Integrated root system age in relation to plant nutrient uptake activity. *Agron.J*, 90 (4): 505-510.
- ❖ **Gobat, J.-M., Aragno, M. and Matthey, W. (2010).** *Le sol vivant : Bases de pédologie – Biologie des sols* (3e éd.). Presses polytechniques et universitaires romandes.
- ❖ **Gregorich, E. G. and Janzen, H. H. (1996).** Storage of soil carbon in the light fraction and macroorganic matter. In *Evaluation of Soil Organic Matter Models* (pp. 167–182). Springer.
- ❖ **Grosbellet, C. (2008).** Evolution and effects on soil structure of organic matter brought in large quantities. INRA, Sagah Angers. Paris. 203p.

Références bibliographiques

- ❖ **Guggenheim, S., Martin, R. T., & Bailey, S. W. (2020).** Mineralogy of clays and clay minerals. In *Clays and Clay Minerals: Encyclopedia of Earth Sciences*. Springer.
- ❖ **Guilbault, C. (2009).** Matières organiques du sol. *Revue Agro-Environnementale*, 5(3), 66–72.
- ❖ **Haynes, R. J. and Naidu, R. (1998).** *Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review.* Nutrient Cycling in Agroecosystems, 51(2), 123–137.
- ❖ **Hien, E. (2004).** Dynamique du carbone dans un Acrisol ferrugineux du Centre Ouest Burkina Faso : Influence des pratiques culturales sur le stock et la qualité de la matière organique. Thèse de Doctorat en Sciences du Sol. 138p.
- ❖ **Huber, D. (2011).** Soil organic matter and its importance in agriculture. *Soil Biology Series*, 24, 55–67.
- ❖ **Hussain, Z., Cheng, T., Irshad, M., Khattak, R. A., Yao, C., Song, D., et al. (2022).** Bentonite clay with different nitrogen sources can effectively reduce nitrate leaching from sandy soil. *PLOS ONE*, 17(12), e0278824.
- ❖ **IPBES. (2018).** *The IPBES assessment report on land degradation and restoration.* Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.
- ❖ **Isildak, O., Demirbas, A. and Sari, O. (2006).** Adsorption thermodynamique of stearic acid onto bentonite. *Journal of Hazardous Materials B*, 135, 226–231.
- ❖ **ITCMI. (2015).** *Fiche technique de culture du poivron en Algérie.* Institut Technique des Cultures Maraîchères et Industrielles.
- ❖ **ITCMI. (2022).** *Guide de la culture du poivron : variétés, pratiques culturales et protection phytosanitaire.* Institut Technique des Cultures Maraîchères et Industrielles.
- ❖ **Jacques, D. (2008).** *Le carbone dans les sols agricoles – Séquestration, dynamique et rôle dans la qualité des sols.* Éditions Quae.
- ❖ **Jozja, N. (2003).** Étude de matériaux argileux albanais. Caractérisation multi-échelle d'une bentonite magnésienne. Impact de l'interaction avec le nitrate de plomb sur la perméabilité. *Thèse de doctorat*, Université d'Orléans.
- ❖ **Kecir, F. (2024).** *Evaluation de la fertilité physique d'un sol sableux sous mines d'argile additionnées.* Mémoire de master, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.
- ❖ **Koull N. (2007).** *Effet de la matière organique sur les propriétés physiques et chimiques des sols sableux de la région d'Ouargla.* Thèse de magistère, Université Kasdi Merbah (Ouargla, Algérie).

Références bibliographiques

- ❖ **Kuster, T. (2001).** Kaolinite structure and characteristics. *Clay Mineralogy Review*, 8(2), 134–142.
- ❖ **Lakhache, S.** Adsorption de Bleu Méthylène sur des argiles brute et sodée. *Mémoire de Master*, Université de Saïda.
- ❖ **Lal, R. (2004).** Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627.
- ❖ **Lal, R. (2010).** Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *Bio Science*, 60: 708–721.
- ❖ **Lal, R. (2005).** *Soil carbon sequestration in natural and managed tropical forest ecosystems*. *Journal of Sustainable Forestry*, 21(1), 1–30.
- ❖ **Lal, R., Kimble, J., Eswaran, H. and Stewart, B. A. (2004).** *Soil classification: A global desk reference*. CRC Press.
- ❖ **Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Pongratz, J., Manning, A. C. and Zhu, D. (2016).** Global Carbon Budget 2016. *Earth System Science Data*, 8(2), 605–649.
- ❖ **Lemoine, D. (2015).** Gestion du fumier de bovins et son rôle dans la fertilité des sols. *Actes du Symposium International sur la Fertilité des Sols*, 29, 195–210.
- ❖ **Lesch, S. M., Rhoades, J. D. and Corwin, D. L. (2018).** Monitoring soil salinity using electrical conductivity. *Agricultural Water Management*, 198, 150–160.
- ❖ **Li, L. and Mao, K. (2023).** *Phosphate, Lime and Bentonite Affect Heavy Metals and Phosphorus Availability in Acidic and Calcareous Soils*. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 54(13), 1–12.
- ❖ **Li, X., Sorensen, P., Olesen, J. E. and Petersen, S. O. (2016).** *Effects of clay minerals on mineralization of organic carbon in manure-amended soils*. *Geoderma*, 264, 59–66.
- ❖ **Lizbith, R. (2019).** Caractéristiques des sols sableux. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(3), 621–628.
- ❖ **Maftoun, M., Moshiri, F., Karimian, N. A. and Ronaghi, A. (2004).** *Effect of two organic manures and phosphorus on the growth and chemical composition of spinach and soil properties*. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35(11–12), 1537–1549.
- ❖ **Marschner, P. (2012).** *Mineral nutrition of higher plants* (3rd Ed.). Academic Press.
- ❖ **Martin, P., et al. (2019).** Effets du fumier sur la rétention d'eau. *Journal of Soil Use and Management*, 35(1), 88–97.

Références bibliographiques

- ❖ **Mering, J. (1975).** Smectites. *Encyclopedia of Soil Science*, USA.
- ❖ **Mermound, A. (2010).** Cours de physique du sol. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Ouagadougou & Lausanne. 234p.
- ❖ **Meroufel, B. (2015).** Adsorption des polluants organiques et inorganiques sur des substances naturelles : kaolin, racines de *Calotropis procera* et noyaux de dattes. *Thèse de doctorat*, Université de Lorraine.
- ❖ **Miller, R. W., Donahue, R. L. (2018).** *Soils: An introduction to soils and plant growth* (8th ed.). Pearson.
- ❖ **Montanari, M. (1996).** *La cuisine : Histoire culturelle*. Éditions Seuil.
- ❖ **Montoroi, J-P. (1997).** 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.
- ❖ **Morel, J. L. (1989).** Les propriétés physico-chimiques des argiles. *Revue Française de Pédologie*, 120, 23–40.
- ❖ **Morsli, B., Mazour, M., Medjedel, N. et Hamoudi, A. (2004).** Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi arides du Nord Ouest Algérien. *Sécheresse*, 15 (1): 96-104.
- ❖ **Moussaoui, Z. (2012).** Intercalation de dendromètres à travers la bentonite sodique. *Thèse de Magister*, Université de Tlemcen.
- ❖ **Nouri, A., Brechbühler, M., Gascuel-Oudou, C. (2008).** *Effet d'amendements argileux (bentonite, zéolithe) sur la rétention et la mobilité de l'azote ammoniacal dans un sol sableux*. *Revue des Sciences de l'Eau*, 21(4), 461–474.
- ❖ **Ozcan, A. S., et al. (2007).** Adsorption capacity of natural clays. *Applied Clay Science*, 37(3–4), 182–190.
- ❖ **Paul, E. A. (1999).** *Soil microbiology, ecology and biochemistry* (3rd ed.). Academic Press.
- ❖ **Pellerin, S., Bamière, L., et al. (2019).** La séquestration du carbone dans les sols agricoles : leviers, coûts et conditions de mise en œuvre. *INRA*.
- ❖ **Polese, F. and Devaux, J. (2007).** *Capsicum annuum : diversité variétale et adaptation*. *Revue Horticole Internationale*.
- ❖ **Prévost, D. (2006).** Acidité des sols et nutrition végétale. *Agronomie et Environnement*, 17(2), 45–59.

Références bibliographiques

- ❖ **Puget, P., Chenu, C., Balesdent, J. (1995).** Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *European Journal of Soil Science*, 46, 449–459.
- ❖ **Rattan, R. K., Datta, S. P., Katyal, J. C. (2018).** Soil fertility and nutrient management. In *Advances in Soil Science* (pp. 111–130). Springer.
- ❖ **Robert, M. (2002).** Le rôle de la matière organique dans les fonctions du sol. *Étude et Gestion des Sols*, 9(2), 123–135.
- ❖ **Rouz, G., Jeune, P. (2020).** Gestion des effluents d'élevage. *Revue Environnement & Agriculture*, 22(2), 93–102.
- ❖ **Saint Louis, R., Durand, A., Dupuis, M. (2001).** *Techniques de culture sous serre : le cas du poivron*. Institut Français d'Agriculture Tropicale.
- ❖ **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.
- ❖ **Schvartz, C., Muller, J.-C. et Decroux, J. (2005).** *Guide de la fertilisation raisonnée*. France Agricole, Comifer.
- ❖ **SDR (Service du Développement Rural). (2016).** Fiche technique : Le poivron – *Capsicum annum* L.12p.
- ❖ **Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. et Deneff, K. (2002).** Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241(2), 155–176.
- ❖ **Six, J., Frey, S. D., Thiet, R. K. and Batten, K. M. (2006).** *Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems*. Soil Science Society of America Journal, 70(2), 555–569.
- ❖ **Skiredj, A., et al. (2005).** *Gestion de l'irrigation dans les cultures maraîchères*. Revue Agronomique Maghrébine.
- ❖ **Slimane, A. (2021).** Rôle des amendements dans la fertilité des sols. *Bulletin d'Agronomie Algérienne*, 8(1), 19–27.
- ❖ **Smith, P., (2004).** Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *European Journal of Agronomy*, 20: 229–236.
- ❖ **Smith, T. M., et al. (2017).** Composting cattle manure: properties and guidelines. *Livestock Waste Management Journal*, 12(2), 101–109.
- ❖ **Soltner, D. (2003).** *Les bases de la production végétale. Tome 1 : Le sol* (23e éd.). Sciences et Techniques Agricoles.

Références bibliographiques

- ❖ **Sparks, D. L. (2003).** *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press.
- ❖ **Sposito, G., et al. (1999).** Cation exchange in clay minerals. *Soil Chemistry*, 17(3), 234–245.
- ❖ **Stenggel, P. (2009).** Le Sol. Éditorial. Institut Des Sciences De La Terre D'orléans.
- ❖ **Tessier, L., et al. (2003).** *Les amendements organiques en agriculture*. Éditions INRA.
- ❖ **Van De Kerchove, V., Chabaliér, P-F., Saint. and Macary, H. (2006).** Guide de la fertilisation organique à la Réunion. Editions CIRAD. La Réunion. 302 p.
- ❖ **Weil, R. R., Brady, N. C. (2019).** *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education.
- ❖ **Whalen, J. K. and Chang, C. (2002).** *Macroorganic matter characteristics in cultivated soils receiving repeated manure applications*. Soil Science Society of America Journal, 66(2), 531–538.
- ❖ **WMO, (2012).** World Meteorological Organization Greenhouse Gas Bulletin. Geneva.4p.
- ❖ **Yssaâd H.R. et Belkhodja M. (2007).** *Effet de la bentonite sur l'azote assimilable d'un sol sableux cultivé en céréale et en légumineuse*. European Journal of Scientific Research 17(2): 198–206.
- ❖ **Zeghache, H. et Bourara, H. (2012).** Etude de l'adsorption des colorants anioniques de tannerie par des argiles de la région Est d'Algérie. Mémoire master, Guelma.
- ❖ **Zhang, M., He, Z. L., Calvert, D. V., Stoffella, P. J., Yang, X. E. and Fan, J. Q. (2003).** *Phosphorus and heavy metal retention in sandy soil amended with clay materials*. Journal of Environmental Quality, 32(1), 239–247.
- ❖ **Zhang, Y., Li, X., Wang, J. and Chen, Y. (2023).** *Long-term cattle manure addition enhances soil-available phosphorus and alters phosphorus fractions in open-field vegetable systems*. Frontiers in Plant Science, 14, 1138207.

Annexes

Annexes

Annexe I : Modes opératoires

I.1. 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 13) 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/24 heures.
- 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 21**).
- **Calcul**
- (**P1**) : Argiles + Limons fins + Limons grossiers
- (**P2**) : Argiles + Limons fins
- (**P3**) : Argiles
- **% Argiles = (P3) X 750/10 X 100/15**
- **% Limons fins = [P2) – (P3)] X 750/10 X 100/15**
- **% Limons grossiers = [(P1) – (P2)] X 750/10 X 100/15**
- **% Sables = 100 – (%Argiles + %Limons fins + %Limons grossiers)**

Annexes

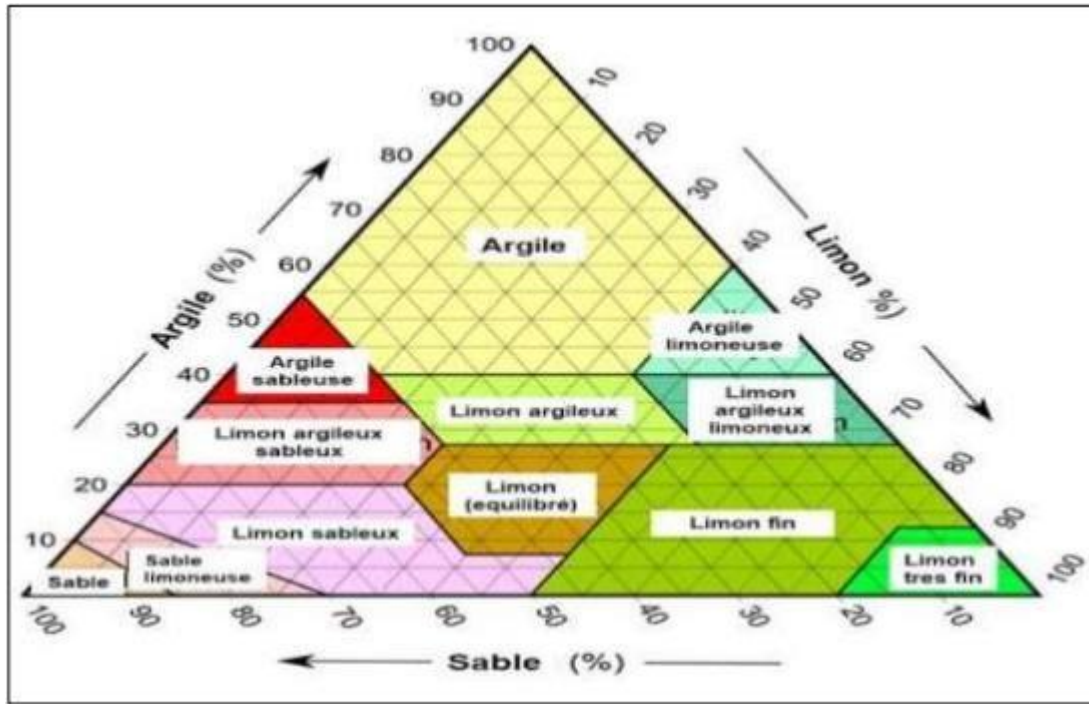


Figure 21 : Triangle des textures minérales (Gobat et al., 2010).

I.2. Analyses physicochimiques

I.2.1. Mesure du pH eau

- Peser 20 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

Annexes

- 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.

- **Calcul**

$$V_s \times m_{CaCO_3}$$

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

$$V_t \times m_{sol}$$

$$m_{sol} = 1g$$

$$m_{CaCO_3} = 0.3g$$

$$V_s = V1_{sol} - V0_{sol}$$

$$V_t = V1_{témoin} - V0_{témoin}$$

$$V_0 = \text{Volume initial}$$

$$V_1 = \text{Volume lu}$$

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).

Annexes

- 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).

Calcul

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

I.2.6. Le dosage du carbone organique

Le carbone organique est dosé par la méthode Anne. L'échantillon est oxydé par l'acide sulfurique concentré en présence du bichromate de potassium. La quantité de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ en excès est dosée en retour par une solution titrée de sel de Mohr (sulfate ferreux) en présence d'indicateur redox (feroïne).

Le pourcentage de la matière organique est obtenu en multipliant le taux du carbone organique obtenu par 1,72.

Le dosage du carbone organique s'effectue selon les étapes suivantes :

- Prendre 0,5 g de terre fine dans un ballon de 250 ml.
- Ajouter 10 ml de Dichromate de potassium à 08%.
- Ajouter à l'aide d'une éprouvette 15 ml d'acide sulfurique concentré (H_2SO_4).
- Chauffer le tout dans un bain de sable et poursuivre l'ébullition durant cinq (05) minutes (après la chute de la première goutte).
- Laisser refroidir,
- Transvaser dans une fiole de 100 ml et ajuster à 100 ml avec de d'eau distillée de rinçage jusqu'au trait de jauge.

Annexes

- Prélever à l'aide d'une pipette 20 ml de cette solution (Pipeter 20 ml du surnageant clair), les mettre dans un bécher de 400 ml en ajoutant 200 ml d'eau distillée + 1.5g de NAF +03 à 04 gouttes de Diphénylamine et agiter le tout.
- Titrer avec la solution de SEL DE MOHR à 0.2 N (Normalité).

La couleur passe du brun au violet puis au vert

Calculs :

- soit V1: le volume de solution de sel de Mohr versé dans le bêche.
- Soit VT: le volume de solution de sel de Mohr versée dans le témoin.

$$C \text{ (Carbone organique) \%} = (Vt - V1) \times 0,615$$

$$MO \text{ (Matière organique) \%} = C \% \times 1,72$$

Annexes

Préparation des solutions utilisées

1) Bichromate de potassium..... $K_2 Cr_2O_7$ (1) N.

- Mettre 49.04 g de bichromate de potassium séché à 105°C dans un litre d'eau distillée.

2) Solution de Sel de Mohr (0.25) N..... $(NH_4)_2 Fe (SO_4)_2$.

- Dissoudre 98.1 g de Sel de Mohr dans 500 ml d'eau distillée et compléter à 1000 ml.

* N.B:

-78.1g de sulfate de Fer et NH_4 + 20 ml H_2SO_4 et dissoudre le tous dans 1000 ml d'eau distillée.

3) Diphénylamine.

- 01 g de diphénylamine + 40 ml d'eau distillée + 60 ml H_2SO_4 concentré.

4) Acide sulfurique Concentré $H_2 SO_4$.

Annexes

Annexe II : Echelles d'interprétation des résultats

Tableau 11 : Le calcaire total.

CaCO ₃ total (%)	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 12 : Classes de la qualité des sols selon leur CE

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

(Durand,1983)

Tableau 13 : 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)

Annexes

Tableau 14 : Le carbone organique ($MO\% = CO\% \cdot 1,72$) / $CO\% = CO(g/kg)/10$.

Taux de la matière organique (%)	Taux du carbone organique (%)	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)

Tableau 15 : L'azote total.

N total (%)	Sol
$\leq 0,5$	Sol très pauvre
$0,5 < N \text{ total} \leq 1,0$	Sol pauvre
$1,0 < N \text{ total} \leq 1,5$	Sol moyen
$>1,5$	Sol bien pourvu

(Henin, 1969 *in* Bedjadj, 2011)

Tableau 16 : Densité apparente du sol.

Texture	Densité apparente idéale pour la croissance des plantes (g/cm^3)	Densité apparente qui limite le développement racinaire (g/cm^3)
Sableuse	<1,60	>1,80
Limoneuse	<1,40	>1,65
Argileuse	<1,10	>1,47

(USDA, 2008)

Tableau 17 : Classement des sols en fonction de leur rapport C/N.

Annexes

C/N		Minéralisation de MO
6	Très faible	Sol à décomposition rapide de la matière organique
8	Faible	
9	Normale	Bonne décomposition de la matière organique
10		
11		
12	Légèrement élevé	
14	Élevé	Sol d'activité biologique réduite ramenant à une décomposition lente de la matière organique
> 14	Très élevé	

(CRA,2011)