

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/2024

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par :

M^{elle} KECIR Fatima

En vue de l'obtention du diplôme de

Master Académique en Agronomie

Spécialité : AMÉNAGEMENT HYDRO-AGRICOLE

THÈME

**Evaluation de la fertilité physique d'un sol sableux sous mines
d'argile additionnées**

Soutenu publiquement le 27/06/2024

Devant le JURY :

Président	M^f BOUALEM AEK	M.C.A	Univ.Mostaganem
Examineur	M^{me} ADJODJ FATMA	M.C.A	Univ.Mostaganem
Encadreuse	M^{me} BENOUDAH Salima	M.C.B	Univ.Mostaganem

Année universitaire: 2023 - 2024



Remerciements



*Louange à **ALLAH** avant tout qui m'a donné la volonté, le courage et la patience pour élaborer ce modeste travail.*

Toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études.

*À Madame **BENOUADAH Salima**, mon encadreur pour son soutien, son conseil et son aide, sans lui ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour, on la remercie pour sa disponibilité durant la réalisation de ce mémoire.*

*Je tiens également à remercier Monsieur **BOUALEM AEK**, Docteur à l'université de Mostaganem, pour avoir accepté de présider le jury ;
Que Monsieur Madame **ADJOU DJ Fatma** soit remerciée pour avoir accepté de faire partie du Jury.*

Je tiens à exprimer mon profond remerciement aux personnels du laboratoire De pédologie qui nous a accompagnés tout au long de ce stage ainsi que pour ses soutiens et ses encouragements.

Tous mes remerciements aux ouvriers et aux paysans d'Atelier Agricole Mazagran (Mostaganem) et pour leur gentillesse.

Mes vifs remerciements aux personnels du département des Sciences Agronomiques.



Dédicace



Je dédie ce modeste travail

A mes parents, qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs ;

A ma chère grand-mère que je la souhaite une bonne santé ;

A mes frères.

A mes chères sœurs.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

À Toute ma promotion des Sciences Agronomiques et surtout celle de la spécialité :

Aménagement hydro-agricole :2023-2024

Résumé

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 du sol à savoir : la densité apparente, la perméabilité, la porosité, la rétention en eau et la stabilité structurale, et le rendement des cultures en vue d'une agriculture biologique et un développement durable. Pour se faire, nous avons choisi les doses suivantes : 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 15% et 20%. Les sols amendés à base de mélange ont amélioré les paramètres physiques du sol, et concernant le rendement, la dose de 10% de bentonite a donné le meilleur résultat suivi par les traitements F10% et AF20% respectivement en comparaison le témoin. Ces résultats mettent en évidence le rôle de la combinaison des amendements minéraux et organiques dans la stabilisation de la structure et l'amélioration de la fertilité du sol, 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 ce qui aboutit à l'augmentation du rendement.

Mots clés : Sols sableux, Bentonite, Fumier, fertilité physiques, Rendement.

Abstract

The soils of the Mostaganem area have a sandy texture overall and are poor in organic matter, therefore having a high permeability which induces leaching of fine elements, for this reason, we thought of making amendments (i) organic (manure), (ii) mineral (bentonite: raw clay) and (iii) a mixture (manure + bentonite) with appropriate doses in order to improve the physical fertility of the soil, namely: bulk density, permeability, porosity, water retention and structural stability, and crop yield for organic agriculture and sustainable development. To do this, we chose the following doses: 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 15% and 20%. Soils amended with a mixture improved the physical parameters of the soil, and for yield, the dose of 10% bentonite gave the best result followed by the F10% and AF20% treatments respectively in comparison to the control. These results highlight the role of the combination of mineral and organic amendments in stabilizing the structure and improving soil fertility, knowing that organic amendments increase the level of organic matter and mineral amendments protect it against the mineralizing activity of microorganisms and enrich the soil with fertilizing elements, which leads to an increase in yield.

Keywords: Sandy soils, Bentonite, Manure, physical fertility, Yield.

الملخص

تتميز تربة ولاية مستغانم بملس رملي بشكل عام تفتقر للمادة العضوية، وبالتالي فهي تتمتع بنفاذية عالية مما يؤدي إلى ترشيح العناصر الدقيقة، ولهذا السبب، فكرنا في إجراء تعديلات (1) عضوية (السماد)، (2) معدنية (البنتونيت : الطين الخام) و (3) على شكل خليط (السماد + البنتونيت) بجرعات مناسبة من أجل تحسين الخصوبة الفيزيائية للتربة وهي: الكثافة الظاهرية، النفاذية، المسامية، احتباس الماء وهيكلية الاستقرار و مدى تأثيرها على مردودية المحاصيل الزراعة من أجل تحقيق تنمية مستدامة. وللقيام بذلك، اخترنا الجرعات التالية: 2.5%، 5%، 7.5%، 10%، 15%، و20%. أدت الترب المعدلة بالخليط إلى تحسين الخصائص الفيزيائية للتربة، وفيما يتعلق بالمحصول، أعطت جرعة البنتونيت 10% أفضل نتيجة تليها معاملي السماد 10% و الخليط 20% على التوالي مقارنة بالشاهد. وتسلط هذه النتائج الضوء على دور مزيج التعديلات المعدنية والعضوية في تثبيت البنية وتحسين خصوبة التربة، علما أن التعديلات العضوية تزيد من مستوى المادة العضوية والمعدلات المعدنية تحميها من نشاط التمعدن للكائنات الحية الدقيقة وتثري التربة بالعناصر المخصبة، مما يؤدي إلى زيادة المحصول.

الكلمات المفتاحية: التربة الرملية، البنتونيت، السماد، الخصوبة الفيزيائية، مردودية المحاصيل الزراعية.

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Résumé

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des photos

Liste des tableaux

Introduction

1

Synthèse bibliographique

Chapitre I : Le sol

I.1. Définition du sol

3

I.2. Diverses phases du sol

3

I.2.1. Phase liquide du sol

3

I.2.2. Phase gazeuse du sol

4

I.2.3. Phase solide du sol

4

I.2.3.1. Éléments grossiers

4

I.2.3.2. Terre fine

4

I.2.3.3. Fractions constitutives du sol

5

I.3. Description de la phase solide du sol

5

I.3.1. Structure

5

I.3.2. Texture

6

I.4. Évolution de la matière organique dans le sol

7

Chapitre II : Les sols sableux

II.1. Généralités sur les propriétés des sols sableux

9

II.2. Propriétés physiques des sols sableux

9

II.2.1. Structure des sols sableux

9

II.2.2. Rétention en eau des sols sableux

10

II.2.3. Perméabilité hydraulique

10

Sommaire

II.3. Évolution des sols sableux	10
II.3.1. Évolution physique	10
II.3.1. Durcissement des sols	11
II.3.2. Compaction des sols	11
II.3.3. Croute de battance	11
II.3.2. Evolution chimique	12
II.3.2.1. Salinisation	12
II.3.2.2. Lixiviation des sels dans les sols sableux	13
Chapitre III : Caractérisation des argiles	
III.1. Définition de l'argile	14
III.2. Origine	14
III.3. Structure minéralogique des argiles	15
III.4. Classification des minéraux argileux	16
III.5. Les différents types d'argiles	16
III.5.1. Kaolinite	16
III.5.2. La monotmorillonite	17
III.5.3. L'illite	17
III.5.4. Bentonite	18
III.6. Principales caractéristiques des minéraux argileux	18
III.6.1. La densité de la charge spécifique	18
III.6.2. La forme des particules argileuses	18
III.6.3. La surface spécifique des particules argileuses	19
III.6.4. Les propriétés colloïdales	19
III.6.5. La capacité d'échange cationique (CEC)	19
III.6.6. Cations échangeables	19
III.7. Les principaux problèmes des sols argileux	20
III.7.1. Phénomène de gonflement	20

Sommaire

III.7.2. Phénomène de glissement	20
III.7.3. Phénomène de tassement	20
Chapitre IV : Les amendements minéraux (Bentonite) et organiques (Fumier)	
IV. 1. Les amendements	21
IV.2. Les amendements minéraux	21
IV.2.1. Exemple d'un minéral argileux : la Bentonite	21
a. Définition	21
b. Origine de la bentonite	22
c. Type de la bentonite	22
d. Structure de la bentonite	22
e. Domaines d'utilisations de la bentonite	23
f. La bentonite dans l'agriculture	23
g. La bentonite en Algérie	23
IV.3. Les amendements organiques	24
IV.3.1. Définition de la matière organique	24
IV.3.2. Impacts de la matière organique du sol	24
IV.3.2.1. La fertilité des sols agricoles	24
a. Influence sur les propriétés physiques du sol	24
b. Influence sur les propriétés biologiques du sol	25
c. Influence sur les propriétés chimiques du sol	25
IV.3.2.2. Le stockage des carbones atmosphérique dans les sols	25
IV.3.2.3. La contribution au maintien de la biodiversité des sols et des plantes	25
IV.3.3. Sources de matière organique	26
Chapitre V: La culture du poivron	
V.1. Définition	27
V.2. Systématique	27
V.3. Importance nutritionnelle, utilisations et vertus	28

Sommaire

V.4. Caractéristique de la culture	28
V.5. Cycle de la plante	29
V.6. Mise en place de la culture	29
V.7. Protection phytosanitaire	30
V.8. Récolte et conservation	30
V.9. Variétés du poivron les plus cultivées en Algérie	31
V.10. Choix variétaux	31
V.11. Zones de production	31
V.12. Production du poivron	31

Partie expérimentale

Chapitre I : Matériel et méthodes

I.1. Objectif du travail	32
I.2. La région de prélèvement	32
I.2.1. Situation géographique	32
I.2.2. Caractéristiques naturelles et conditions climatiques	32
I.3. Lieu du travail	34
I.4. Matériel et méthodes	34
I.4.1. Matériel	34
I.4.1.1. Verreries, appareils et produits utilisés	34
I.4.2. Méthodes	35
I.5. Échantillonnage	36
I.5.1. Échantillonnage du sol	36
I.5.1.1. Les analyses physicochimiques du sol témoin	36
a. Préparation des échantillons	36
b. Analyse granulométrique	37
c. Mesure du pH	39
d. Mesure de la conductivité électrique	39

Sommaire

e. Détermination du calcaire total et actif	40
f. Dosage de la matière organique	42
I.5.2. Les amendements	43
I.5.2.1. L'amendement minéral (Bentonite)	43
I.5.2.2. L'amendement organique (Fumier de bovins)	44
I.5.3. Mise en place du dispositif expérimental	44
I.5.4. Analyses physiques des sols reconstitués	48
A. Densité apparente	48
B. Porosité	49
C. La densité réelle	49
D. Stabilité structurale	50
E. Perméabilité	51
F. La rétention en eau	52
Chapitre II : Résultats et discussion	
II.1. Caractérisation physico-chimiques du sol témoin	53
II.2. Résultats de l'analyse granulométrique	54
a. Sols amendés par la bentonite	54
b. Sols amendés par le mélange (bentonite + fumier)	55
c. Sol amendés par le fumier	55
II.3. Résultats des analyses physiques des sols amendés	56
II.3.1. Densité apparente	56
II.3.2. Porosité	57
II.3.3. Perméabilité	58
II.3.4. Rétention en eau	60
II.3.5. Stabilité structurale	61
II.4. Estimation du rendement de la culture du poivron	62
Conclusion	63

Sommaire

Références bibliographiques	64
Annexes	74

Introduction générale

Introduction générale

Dans la région de Mostaganem, la pression démographique a entraîné la raréfaction des sols cultivés avec une diminution des jachères (**Anonyme, 1995**). Le plateau de Mostaganem compte une superficie de 128000 ha de terres sableuses sur 212000 ha de terres cultivables (**Anonymes, 1998**). Les sols sableux, du fait de leur squelette rigide, présentent une texture grossière et légère, un taux très faible en argile, et se caractérisent par une structure très aérée à l'état naturel, ils sont filtrants et présentent une faible rétention en eau et en éléments fertilisants, ce qui induit un fort lessivage en éléments minéraux et en fertilisants (**Morsli et al., 2004**). Leur fertilité est très réduite avec une capacité de rétention en eau faible (**Goa et al., 1998**), ainsi qu'une activité microbienne limitée ce qui explique le taux de matière organique très faible dans ces sols (**Abismail, 1999**).

Cette faible fertilité des sols sableux est l'une des contraintes dans cette région limitant la production agricole ce qui impose leur amélioration soit par des apports d'engrais industriels soit par des engrais verts pour augmenter les rendements des cultures. Cependant si les engrais minéraux sont généralement efficaces pendant les premières années de culture, ils modifient certaines propriétés physico-chimiques du sol car les engrais minéraux azotés sont notamment acidifiants, ce qui peut réduire la disponibilité en éléments nutritifs provoquant ainsi une baisse de rendements. En effet, les moyens techniques et théoriques pour les améliorer sont divers mais en pratique le choix est limité car la majorité des sols de la région sont sableux contenant une faible teneur en argile, ils sont mal structurés, présentant des propriétés physico-chimiques défavorables à la nutrition minérale de la plante et particulièrement l'azote (**Le Houerou, 1993; Djaber, 1999**).

Selon **Bruand et al. (2005)**, les sols sableux contenant moins de 18% d'argile et plus de 65% de sable, sont souvent considérés comme des milieux inertes qui se caractérisent par une forte porosité, une bonne perméabilité, et un enracinement profond. Ils sont les plus sensibles à la battance des pluies, cependant leur dégradation est plus variable en fonction de la structure, de la matière organique, de leur état de surface et du drainage (**Roose et Sarrailh, 1990**).

Selon **Girard et al. (2011)**, le sol joue un rôle essentiel en tant que réserve de nutriments et d'eau, tout en servant de filtre contre les polluants et les substances nocives.

Introduction générale

Dans le domaine agricole, les amendements enrichissent la terre et améliorent son rendement. Pour tirer le meilleur parti possible, ils sont ajoutés selon des programmes soigneusement élaborés, en ce qui concerne la quantité, la qualité et le moment de l'ajout de ces amendements, de manière proportionnelle avant la phase de semis et pendant la phase de croissance de la plante. Les amendements sont des matériaux à apporter au sol en vue d'améliorer ses qualités agronomiques (**Schvartz et al., 2005**). En agriculture, ils sont utilisés pour dynamiser la productivité des terres. Ils apportent au sol des bénéfices physiques, en lien avec sa structure, et chimiques, en lien avec sa composition (**Dicova, 1997**). Deux types d'amendements sont généralement utilisés en agriculture, le premier type est les amendements minéraux tels que la bentonite, qui améliorent certaines propriétés physico-chimiques du sol, telles que la correction de pH ou l'amélioration de la structure du sol, tout en facilitant son travail. Ils permettent ainsi aux plantes de mieux absorber les éléments nutritifs, et le deuxième type est l'utilisation d'amendements organiques tels que le fumier et le compost (**Siboukeur, 2013**).

La bentonite connaît beaucoup d'applications dans le domaine agricole parmi lesquelles: elle favorise la valorisation des terres à texture légère, elle permet de préserver les eaux souterraines de toute contamination par les substances chimiques provenant de l'agriculture (engrais) ou de l'industrie. De plus, elle est utilisée comme un agent de déshydratation pour se mélanger avec le fumier ou d'autres excréments d'animaux (**ENOF, 2024**).

Au niveau économique, l'utilisation de la bentonite dans l'agriculture a favorisé l'amélioration de la structure des sols sableux, ce qui peut entraîner une augmentation de la production et une économie d'eau et d'éléments fertilisants (**Reguieg, 2007**).

Les sols de la wilaya de Mostaganem ont une texture sableuse dans leurs ensembles et sont 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 (bentonite) avec des doses bien appropriées afin d'améliorer :(i) la fertilité physique du sol à savoir : la densité apparente, la perméabilité, la porosité, la rétention en eau et la stabilité structurale, et (ii) le rendement des cultures en vue d'une agriculture biologique et un développement durable.

Liste des abréviations

A : Argile

AFNOR: Association Française de la Normalisation

ANIREF : Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière

C: Carbone

CAM : Chambre d'Agriculture Martinique

CE: Conductivité électrique

CH₄: Méthane

CO: Carbone Organique

CO₂: Dioxyde de Carbone

COS: Carbone Organique du Sol

CRAD : Chambre Régionale d'Agriculture de Dosso

D : Densité réelle

Da: Densité apparente

DSA: Direction des Services Agricoles

EG: Eléments Grossiers

ENOF Spa : Entreprise Nationale des Produits Miniers non Ferreux et des Substances Utiles.

ESE : Encyclopydia of Soils in Environment

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

HAP: Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

Is : Indice d'instabilité

ISO: International Organization for Standardization

ITA : Institut de Technologie Agricole

ITCMI : Institut Technique des Cultures Maraichères et Industrielles

Ks : Coefficient de perméabilité

L.F : Limon Fin

L.G : Limon Grossier

MO: Matière Organique

Liste des abréviations

MOS: Matière Organique du Sol

N : Nord

pH: Potentiel Hydrogène

RE : Rétention en Eau

S : Sable

SDR : Service du Développement Rural

T0 : Prélèvement du sol témoin

T1 : Prélèvement des sols amendés avant la mise en culture

T2 : Estimation de la culture du poivron après récolte

USDA : Département américains de l'agriculture

Liste des figures

Figure 1: Schéma d'une coupe de sol	3
Figure 2 : Définition des fractions granulométriques du sol en fonction de la taille des éléments	6
Figure 3: Triangle des textures minérales	6
Figure 4: Schéma d'évolution de la matière organique dans le sol	7
Figure 5: Représentation visuelle comparative des tailles de sable, de limon, et de particules d'argile	9
Figure 6: Processus de formation de l'argile	14
Figure 7: Les différents types de phyllosilicates formés au cours de l'altération	15
Figure 8 : Schéma d'une couche octaédrique et d'une autre tétraédrique	15
Figure 9: Kaolinite	17
Figure 10: Illites	18
Figure 11: Forme des particules argileuses	19
Figure 12: Structure de la montmorillonite	22
Figure 13: Domaines d'utilisations de la bentonite	23
Figure 14 : Le poivron (<i>Capsicum annuum L.</i>)	27
Figure 15 : Situation géographique de la zone d'étude (Atelier Agricole de Mazagran, Mostaganem)	33
Figure 16: Protocole expérimental	35
Figure 17 : Évolution de la densité apparente en fonction des doses de la bentonite, du fumier et du mélange	56
Figure 18 : Évolution de la porosité en fonction des doses de la bentonite, du fumier et du mélange	58
Figure 19 : Évolution de la perméabilité en fonction des doses de la bentonite, du fumier et du mélange	59
Figure 20 : Évolution de la rétention en eau en fonction des doses de la bentonite, du fumier et du mélange	61
Figure 21 : Évolution de l'indice d'instabilité en fonction des doses de la bentonite, du fumier et du mélange	62
Figure 22 : Fiche technique de la culture du poivron	79
Figure 23: Rétention en eau	83

Liste des photos

Photo 1 : Prélèvement des échantillons de sol	36
Photo 2: Séchage des échantillons de sol	37
Photo3: Broyage et tamisage des échantillons de sol	37
Photo 4: Analyse granulométrique par la méthode de la pipette de Robinson	38
Photo 5: Mesure du pH d'un échantillon de sol à l'aide d'un pH mètre	39
Photo 6 : Mesure de la conductivité électrique du sol par le conductimètre	40
Photo 7 : Dosage du calcaire total	41
Photo 8 : Dosage du calcaire actif	41
Photo 9 : Dosage du carbone organique par la méthode Anne	42
Photo 10 : La bentonite	43
Photo 11 : Le fumier de bovin	44
Photo 12 : Préparation des pots de repiquage	44
Photo 13 : Sols reconstitués	45
Photo 14 : Arrosage des pots	47
Photo 15 : Prélèvement du sol avant la mise en culture	47
Photo 16 : Le repiquage des plants de poivron dans les pots	48
Photo 17 : Récolte du poivron	48
Photo 18 : Mesure de la densité apparente à l'aide de cylindre	49
Photo 19 : Mesure de la densité réelle par le pycnomètre	50
Photo 20 : Mesure de la stabilité structurale	51
Photo 21 : Mesure de la perméabilité	52
Photo 22 : Mesure de la rétention en eau	52

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification simplifiée des sols selon la texture	7
Tableau 2 : Classification des principaux groupes de minéraux argileux et de leurs Espèces	16
Tableau 3: Les principaux amendements minéraux	21
Tableau 4 : La durée du cycle du poivron en fonction des différentes étapes culturales et biologiques de la plante	29
Tableau 5 : Superficie, production et rendement de la culture du poivron (2022/2023)	31
Tableau 6 : Matériel et produits	34
Tableau 7 : Les sols reconstitués	43
Tableau 8: Les sols reconstitués	46
Tableau 9 : Caractérisation physico-chimiques du sol témoin	53
Tableau 10 : Fractions granulométriques en fonction des doses de bentonite	54
Tableau 11 : Fractions granulométriques en fonction des doses de mélange (bentonite + fumier)	55
Tableau 12 : Rendement du poivron	63
Tableau 13: Hauteur de prélèvement en fonction du temps de sédimentation	74
Tableau 14: Le calcaire total	80
Tableau 15: Classes de la qualité des sols selon leur CE	80
Tableau 16: Le pH du sol.	80
Tableau 17: Le carbone organique	81
Tableau 18: L'azote total	81
Tableau 19: Densité apparente du sol	81
Tableau 20: Porosité du sol	82
Tableau 21 : Classe de perméabilité du sol en fonction de la valeur de Ks	82
Tableau 22 : Classe de stabilité structurale en fonction de la valeur de Is	82

Synthèse bibliographique

Chapitre I :

Le sol

I.1. Définition du sol

Ce qu'on appelle couramment « sol » est beaucoup mieux désigné par le terme de couverture pédologique (**Baize et Jabiol, 1995**). C'est la couche superficielle meuble de la lithosphère terrestre, présentant une épaisseur variable de quelques centimètres à plusieurs mètres (**Rahaoui, 2009**). En outre, le sol fait partie de la biosphère, c'est le résultat d'une évolution lente au cours de laquelle le climat, le relief et les organismes ont participé à le façonner en altérant la roche mère et en la faisant interagir avec la matière vivante (**Soltner, 1992**). De ce fait, le sol contient des constituants minéraux auxquels s'ajoutent des constituants organiques vivants ou provenant de leur décomposition partielle (**Briat et Job, 2017**).

De la naissance à la mort, le sol sert de support (Figure 1), milieu naturel et habitat pour les milliards d'organismes animaux et végétaux (**Legros, 2007; Ruellan, 2010**).

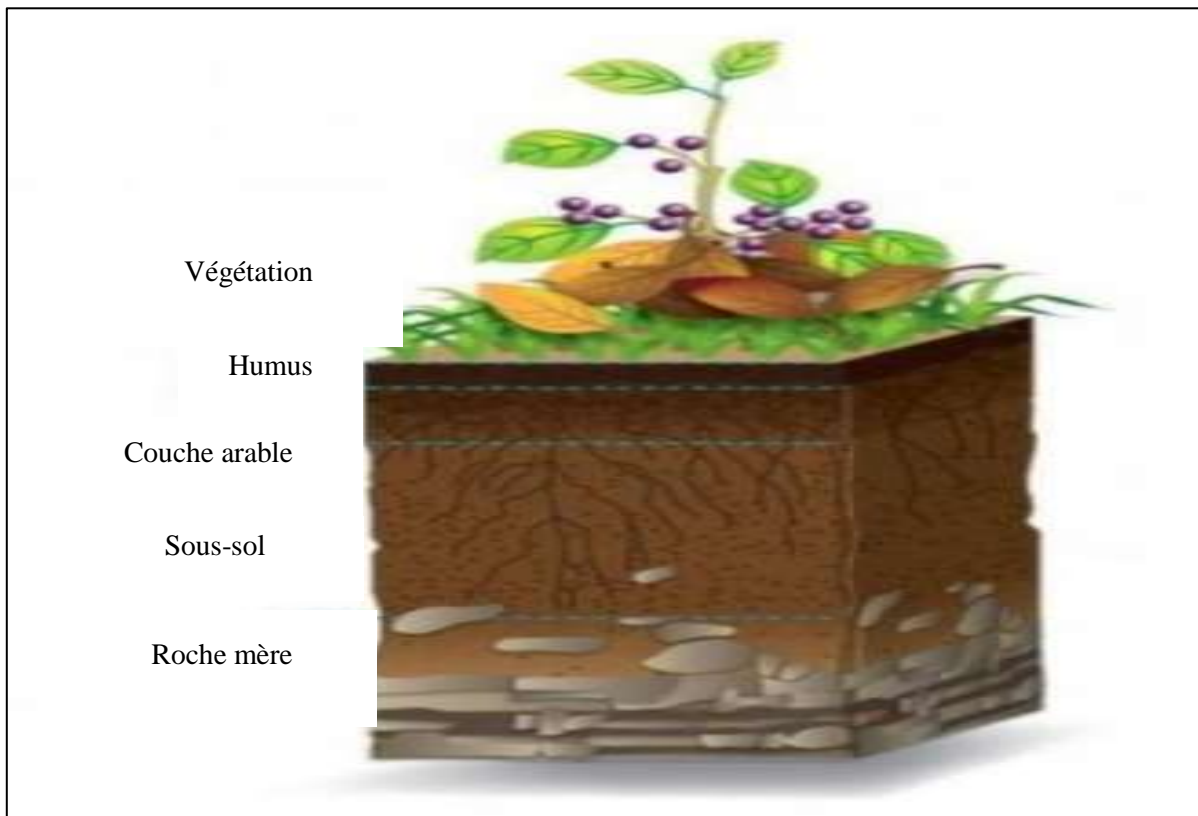


Figure 1: Schéma d'une coupe de sol (**Legros, 2007**).

I.2. Diverses phases du sol

I.2.1. Phase liquide du sol

D'après **Morel (1996)**, la phase liquide du sol est souvent désignée par le terme « solution du sol », occupe une partie plus ou moins importante de la porosité du sol, est constituée d'eau où se trouvent diverses substances organiques et minérales dissoutes et des particules en suspension.

La composition de la solution du sol varie selon:

- Le climat ;
- Les apports anthropiques (fertilisants, produits de traitement phytosanitaire ...etc.) ;
- L'activité biologique du sol (exsudats racinaires, produits de synthèse et de dégradation microbienne ...etc.).

I.2.2. Phase gazeuse du sol

Selon **Hillel (1982)**, les gaz qui règnent dans l'atmosphère d'un sol bien aéré sont :

- L'azote (78 à 80%) ;
- L'oxygène (18 à 20%) ;
- Le dioxyde de carbone (0,2 à 3%).

D'après **Calvet (2003)**, d'autres molécules gazeuses d'origine anthropique telles que les pesticides ou les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) peuvent également être détectées dans l'atmosphère du sol. Ces gaz peuvent exister dans le sol :

- Soit à l'état libre;
- Soit dissous dans la solution du sol.

I.2.3. Phase solide du sol

I.2.3.1. Eléments grossiers

Ce sont les éléments supérieurs à 2mm et on les classe par dimensions :

- 0,2 cm à 2 cm : graviers ;
- 2 à 5 cm : cailloux ;
- 5 à 20 cm : pierres ;
- > 20 cm : blocs.

Leur expression se fait en pourcentage, qu'on donne sur le terrain en fonction du volume et en laboratoire en fonction de la masse (au laboratoire, on estime le pourcentage après passage de l'échantillon du sol au tamis de 2mm) (**FAO, 2018**).

I.3.3.2. Terre fine

Selon **Morel (1996)**, la terre fine est la fraction de terre qu'il reste lorsqu'on retire les éléments grossiers (donc inférieur à 2 mm, au tamis). On peut classer les éléments de la terre fine par dimensions (Figure 2) :

- 2mm à 0,2 mm : sable grossiers ;
- 0,2 mm à 50 µm : sable fins ;
- 50 µm à 20 µm : limons grossiers ;
- 20 µm à 2 µm : limons fins ;

- $< 2 \mu\text{m}$: argiles.

Elle comprend aussi une fraction organique dont le taux varie selon le type de sol et les conditions de la pédogenèse. Les sols cultivés présentent des taux de matière organique compris dans une gamme allant de moins de 1% à 20% de la masse du sol (Calvet, 2003).

1.2.3.3. Fractions constitutives du sol

Le sol est un corps vivant composé de deux fractions : les fractions organiques et minérales (Briat et Job, 2017).

a. Fraction minérale

D'après Sposito (2008), il existe trois catégories majoritaires dans le sol :

- Les silicates sont des oxydes de silice qui ont des structures très diverses.
- Les oxydes, oxy-hydroxydes et hydroxydes les plus importants et les très abondants dans les sols.
- Les carbonates les plus abondants sont les carbonates de calcium (Calcite) et les carbonates de magnésium.

b. Fraction organique

D'après Pansu et Gautheyrou (2001), en ce qui concerne la matière organique ou phase organique du sol, elle correspond à tout ce qui est constitué de carbone organique, qu'il soit vivant ou non vivant (insectes, plantes, humus, microorganismes...etc.). L'humus est un terme qui regroupe l'ensemble de la matière organique non vivante du sol et qui peut être classé en deux catégories :

- Substances non humiques, correspondent à la fraction de matière organique dont les caractéristiques bio-physico-chimiques sont reconnaissables (exemple : les hydrates de carbone, les protéines, les acides aminés, les lipides,...etc.).
- Substances humiques, issues de la transformation chimique ou biologique (altération, polymérisation,...etc.) de la matière organique du sol.

I.3. Description de la phase solide du sol

Selon Gobat *et al.* (2010), deux notions fondamentales décrivent la phase solide du sol : texture et structure.

I.3.1. Structure

La structure correspond au mode d'assemblage de ces éléments entre eux, c'est-à-dire à leur mode d'agrégation sous l'effet de liaisons physiques ou chimiques à différents échelles (Cedra, 1993).

Une bonne structure (structure favorable) permet la pénétration des racines qui se développent dans le sol et un bon déplacement de l'eau et les éléments fertilisants vers les racines (Soltner, 2004).

I.3.2. Texture

Selon Morel (1996), la texture du sol est à la base de toutes les autres propriétés, c'est la propriété du sol qui traduit de manière globale la composition granulométrique de la terre fine (Figure 2).

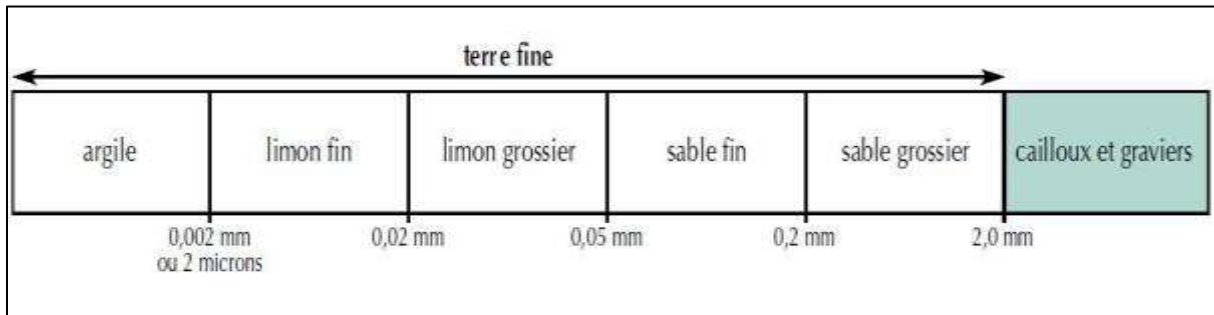


Figure 2 : Définition des fractions granulométriques du sol en fonction de la taille des éléments (Morel, 1996).

La texture ou la granulométrie fait référence à la répartition des sédiments en fonction de leur taille. C'est une propriété fixe du sol qui est de loin la propriété la plus importante (Gobat *et al.*, 2010). Le triangle des textures indique à quel type appartient le sol considéré (Figure 3).

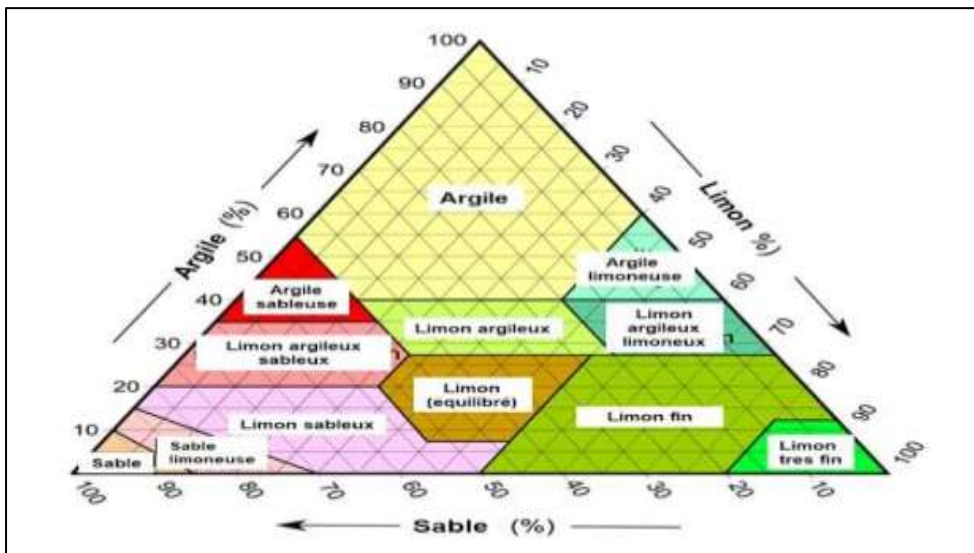


Figure 3: Triangle des textures minérales (Gobat *et al.*, 2010).

La texture d'un sol est déterminée par la granulométrie des éléments de sa phase solide. Dans un sol, le seuil de 2mm sert à séparer les cailloux et les graviers, d'un diamètre supérieur, de la terre fine, d'un diamètre inférieur. Cette terre fine comporte trois classes texturales (argile,

limon et sable), selon leurs proportions, on parle de sols sableux, sols limoneux ou argileux (Tableau 1).

Tableau 1 : Classification simplifiée des sols selon la texture (Morel, 1996).

Type de sol	Argile	Limons	Sable
Sols argileux	≥ 30%	25 - 40%	30 - 45%
Sols limoneux	30 - 40%	≥ 50%	10 - 20%
Sols sableux	1 - 5%	10 - 15%	> 70%
Sols calcaires	≥ 5%		
Sols humifères	15 - 20% de matière organique		

I.4. Évolution de la matière organique dans le sol

La matière organique subit au cours de son évolution différentes transformations dans le sol comme illustré par la Figure 4 ci-après. En général, la teneur en matière organique des sols représente 0,5 à 10% de la masse du sol et varie selon le type et la profondeur (Musadji, 2013).

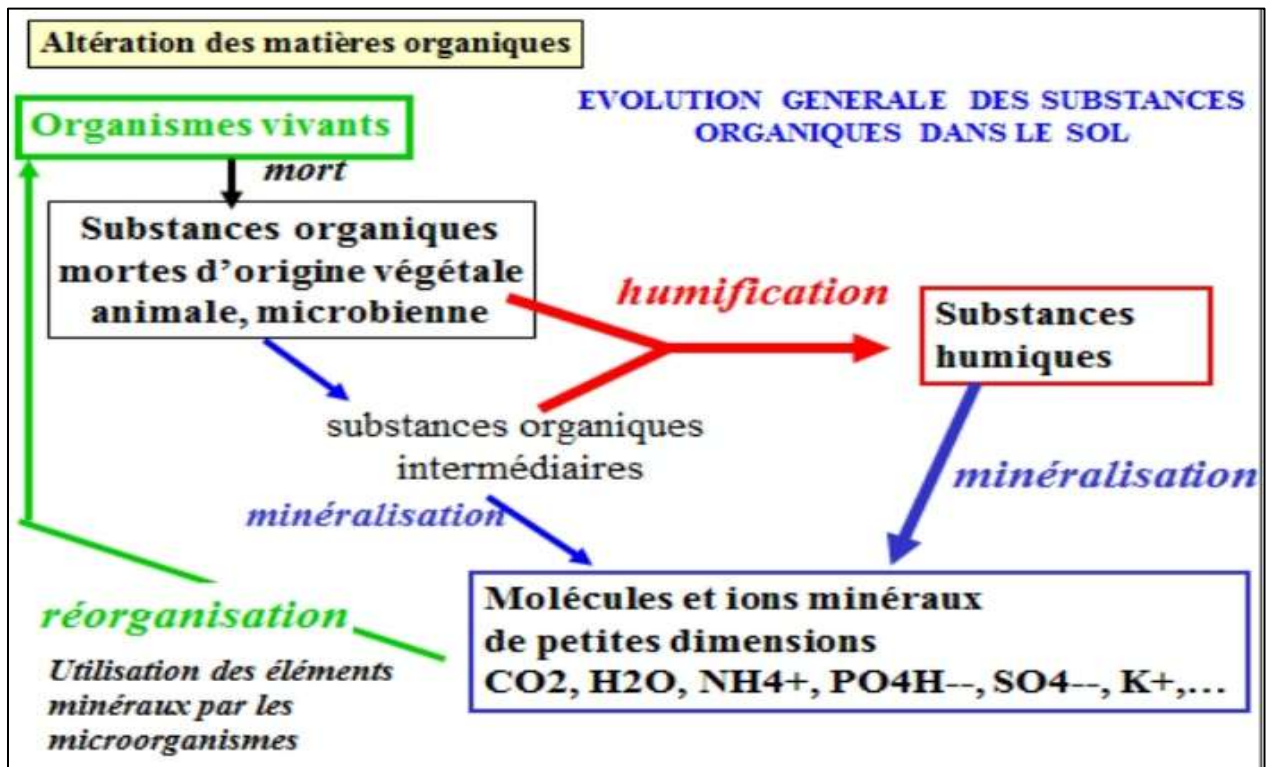


Figure 4: Schéma d'évolution de la matière organique dans le sol (Musadji, 2013).

Les constituants organiques du sol proviennent de la décomposition de la matière organique végétale, animale et bactérienne. Ces substances sont en constante évolution dans le sol et sont transformées par divers processus géochimiques à travers le temps. Comme elle joue un

rôle majeur sur les propriétés du sol, il est important que la matière organique soit constamment renouvelée (**Musadji, 2013**).

D'ailleurs, la matière organique est un important indicateur de fertilité et de qualité des sols, c'est pourquoi ce paramètre est souvent le premier à mesurer lors de l'étude d'un sol et de son écosystème (**Pansu et Gautheyrou, 2001**).

La matière organique augmente la capacité d'échange cationique des sols en plus de constituer un réservoir de nutriments assimilables pour la végétation. Lorsqu'elle se décompose, la matière organique fournit les divers nutriments sous forme d'ions, les rendant ainsi disponibles pour la végétation. Enfin, la matière organique animale et végétale constitue la principale source d'énergie et de carbone pour les organismes du sol. L'activité biochimique du sol serait impossible sans ces apports (**Musadji, 2013**). En outre, la matière organique et l'activité biologique qui en découle ont une influence majeure sur les propriétés physiques et chimiques des sols (**Pansu et Gautheyrou, 2001**).

Chapitre II :

Les sols sableux

II.1. Généralités sur les propriétés des sols sableux

D'après **Hénin (1976)**, les sols sableux correspondent à des matériaux donnant au toucher une impression rugueuse souvent appelés sols squelettiques car ils sont composés de fractions relativement inertes plus ou moins grossières (Figure 5). L'expression « sol léger » est utilisée pour décrire le comportement physique de ce type de sol, parce qu'il tend à être lâche, bien drainé, bien-aéré, et facile à cultiver (**Hartmann et al., 1999**).

Le sable est généralement le groupe de particules le plus identifié comme matériel de sol. Il correspond aux particules du sol dont le diamètre varie de 2000 μm (2 mm) à 50 μm (classification USDA) ou à 20 μm (classification ISSS). La fraction de sable est souvent subdivisée en sous fractions telles que le sable grossier, moyen, fin et très fin (Figure 5) (**Lal et Shukla, 2004**).

Les grains de sable se composent généralement de quartz, mais peuvent également être des fragments de feldspath, mica et occasionnellement, de minéraux lourds tels que le zircon, la tourmaline et la hornblende, cependant le dernier est plutôt rare (**Hillel, 1998**).

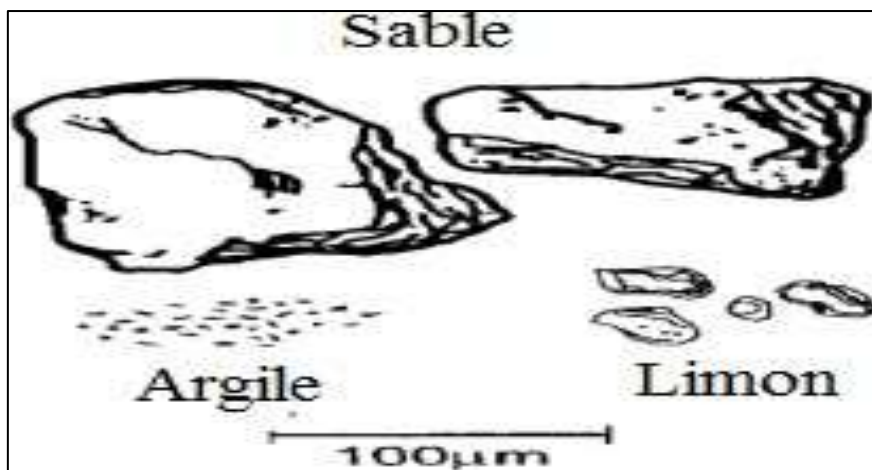


Figure 5: Représentation visuelle comparative des tailles de sable, de limon, et de particules d'argile (**Hillel, 1998**).

II.2. Propriétés physiques des sols sableux

II.2.1. Structure des sols sableux

La structure est une propriété fondamentale du sol car elle conditionne sa qualité physique, chimique et biologique. L'importance de la structure est liée à sa conséquence directe consistant en un ensemble d'espaces lacunaires ou porosité (**Chamayou et Legros 1989**). Cependant, la faible teneur d'argile et de limon limite la formation des agrégats des sols sableux (**Degens et al., 1996**).

Grace à la présence d'une abondante macroporosité, es sols sableux sont fortement aérée présentent des agrégats fragiles et friables (**Lesturgez, 2005**).

II.2.2. Rétention en eau des sols sableux

La capacité d'un sol à retenir de l'eau dépend de son affinité à l'eau. Elle est en fonction de sa teneur en argile, de la surface spécifique, de la nature des cations fixés sur le complexe d'échange et de la taille de pores déterminée par le mode d'arrangement des particules (**Lal et Shukla, 2004**). En effet, la rétention en eau est plus élevée dans les sols à texture fine, soit des sols contenant des taux d'argile (propriétés de gonflement-retrait) et de constituants finement divisés plus forts que dans les sols à texture grossière (**Bigorre, 2000**).

Le sol sableux a une porosité très forte mais sa capacité de stockage en eau est très faible, ceci s'explique par la présence d'une macroporosité qui se vide de l'essentiel de son contenu en eau (**Halilat et Tessier, 2006**).

II.2.3. Perméabilité hydraulique

La perméabilité hydraulique (K_s) est une propriété physique importante du sol, particulièrement pour la détermination de la vitesse d'infiltration, les pratiques d'irrigation, le drainage, le ruissellement et la simulation de la lixiviation surtout les recharges des eaux souterraines et d'autres processus agricoles et hydrologiques. Les caractéristiques des sols qui influencent la perméabilité hydraulique K_s sont la porosité totale, la distribution de la taille de particules et la tortuosité, soit, la géométrie des pores (**Lal et Shukla, 2004**).

Divers auteurs ont montré qu'il existe une relation linéaire entre la perméabilité hydraulique et la porosité (**Aimrun et al., 2004**), et que les sols à texture fine sont les moins perméables (**Mathieu et al., 2003**).

II.3. Évolution des sols sableux

II.3.1. Évolution physique

Il est évident que l'aménagement agricole inapproprié des terres conduit à la dégradation des propriétés physiques de sols sableux dans plusieurs régions arides et semi-arides dans le monde (**Wei et al., 2006; Alvaro-Fuentes et al., 2007**). Le durcissement, les croûtes de battance et la compaction sont les formes de dégradation des terres, associées à une faible agrégation et une faible stabilité structurale, qui causent une diminution de la macroporosité et par conséquent diminution de la rétention en eau et de la perméabilité ainsi une limitation de la croissance racinaire (**Materchera, 2009**). Le travail du sol et les techniques d'irrigation peuvent également contribuer à la dégradation des sols.

Les sols sableux, initialement organisés dans une structure particulière fortement aérée présentent des densités apparentes moyennes et une abondante porosité structurale et texturale. Cette porosité rend ces sols faiblement résistants à la pénétration à l'état naturel. Cependant, leur mise en valeur engendre une évolution qui se manifeste par des contraintes

physico-chimiques qui peuvent affecter les rendements des cultures et la durabilité de l'utilisation de ces terres (**Lesturgez, 2005**).

II.3.1. Durcissement des sols

Le durcissement se réfère au processus par lequel le sol se durcit et passe à un état déstructuré après une ultra dessiccation de ce sol qui a subi une saturation rapide par une irrigation excessive ou de fortes précipitations (**Mullins et al., 1990**). Lorsque, le sol se dessèche et se durcit, il présente une densité apparente élevée, une grande résistance à la pénétration et une grande résistance à la traction (**Lal et Chukla, 2004**).

II.3.2. Compaction des sols

La compaction du sol est un processus par lequel les particules du sol se réarrangent, se resserrent l'une à l'autre et réduisent les vides, ce qui favorise l'augmentation de la densité apparente et la résistance à la pénétration (**Hamza et Anderson, 2002**). Cette déformation qui résulte de la compaction est dû à la diminution de la macroporosité, de la circulation de l'eau et des échanges gazeux. Le degré de sévérité de la compaction du sol est exprimé en termes de densité apparente, de porosité totale et d'indice des vides. Cela peut induire par conséquent une augmentation de la résistance à la pénétration et la diminution de la rétention en eau du sol (**Mouazen et al., 2003**).

II.3.3. Croûte de battance

Il a été prouvé par **Yair et al. (2011)** que les sols sableux sous les conditions de pluies orageuses et le mode d'irrigation par aspersion, développent une épaisse croûte de battance, cette croûte peut absorber et retenir une grande quantité d'eau et limite la profondeur que l'eau peut atteindre et sa disponibilité aux plantes.

D'après **Bissonnais et al. (2005)**, la battance traduit la sensibilité des sols à la fermeture de la porosité, formant une croûte superficielle qui colmate la surface du sol et réduit l'infiltration de l'eau. Il a par ailleurs été démontré que sous l'effet de la pluie et de l'irrigation, la battance se traduit par une augmentation de la densité apparente de la couche superficielle du sol, dûe à une réorganisation des particules qui ont tendance à se déposer parallèlement à la surface (**Escadafal, 1981; Boifin, 1976**). En effet, la disponibilité de l'eau aux plantes a une grande dépendance de la relation entre l'eau d'irrigation et les propriétés physique de la surface du sol (**Yair et al., 2011**).

La croûte de battance est riche en particules fines et en microorganismes de toutes variétés. Certains auteurs comme **Verrechia et al. (1995)** et **Yair et al. (2011)** considèrent que les fines particules et les microorganismes de types cyanobactéries qui ont la propriété de se gonfler rapidement après leur contact avec l'eau. Le gonflement de ce type de

microorganismes peut bloquer la porosité du sol et limiter l'infiltration de l'eau. Ces auteurs ont montré que plus de 40 % des micropores peuvent être bloqués par le gonflement de cyanobactéries.

La distribution de la taille des particules d'après les travaux de **Verrechia et al. (1995)** dans les sols sableux montre qu'il y a une concentration plus importante de limon et d'argile dans la croûte de battance que dans le reste du profil.

Plus de 70 % de sols sont affectés par la croûte de battance dans les régions arides et semi arides. Certains auteurs comme **Belnap (2002)** et **Zhao et al. (2010)** considèrent que ce phénomène joue un rôle important dans plusieurs écosystèmes désertiques lorsqu'il protège le sol contre l'érosion éolienne ; en gardant le sol avec des particules fines riches en éléments nutritifs et en carbone organique.

II.3.2. Evolution chimique

II.3.2.1. Salinisation

La salinisation est l'accumulation excessive des sels solubles (chlorures, sulfates, carbonates, de calcium, de sodium, de potassium ou de magnésium) dans la partie superficielle des sols (**Forges, 1972**). Lorsqu'elle est liée à la nature géologique du terrain, on parle de salinisation primaire par opposition à la salinisation secondaire, liée aux pratiques anthropiques telles que l'irrigation.

Les facteurs de la formation des sols salés sont nombreux. Ils peuvent être purement climatiques et naturels (température, niveau des précipitations, absence du drainage, composition de la roche mère) ou induits par l'homme (utilisation de l'eau saline dans l'irrigation, amendements excessifs) (**Salim et Tessier, 1998**).

a. Effet de la salinité sur le sol

Les cations sodium tendent à provoquer la destruction de la structure en favorisant la dispersion des colloïdes minéraux. D'une façon générale, la dispersion dépend de la quantité de cations Na^+ adsorbés par rapport aux autres cations échangeables en particulier le Ca^{++} . Donc cette augmentation favorise la dispersion

b. Effet sur les plantes

Les grandes concentrations en sels dissous dans la solution du sol ont des effets indirects sur les végétaux par leur action sur la structure du sol et la circulation des fluides et de l'oxygène. Elles ont des effets directs sur la croissance et le développement des plantes. Les effets néfastes des sels sur les végétaux ont plusieurs causes dont aucune ne semble être dominante :

- ✓ La pression osmotique élevée de la solution du sol qui limite la biodisponibilité de l'eau.

- ✓ La pression osmotique intracellulaire élevée due à l'absorption des sels et qui aurait des effets inhibiteurs sur la croissance.
- ✓ La toxicité propre de certains éléments chimiques liée à leur quantité excessive, comme le bore et surtout l'anion chlore (**Rouahna, 2007**).

Les sols affectés par les sels sont souvent pauvres en éléments nutritifs essentiels. La croissance et le rendement des cultures sont plus faibles lorsque la nutrition minérale est insuffisante ou déséquilibrée. Par exemple, l'assimilation des éléments minéraux par le blé, qui est une culture modérément tolérante aux sels, peut être inhibée en présence de fortes teneurs en sels accumulées en fonction du temps.

II.3.2.2. Lixiviation des sels dans les sols sableux

Les sols sableux sont caractérisés par une fertilité réduite et une capacité de rétention en éléments minéraux très faible, cette faible fertilité constitue une des contraintes de la production agricole pour ce type de sol, elle est due essentiellement à l'entraînement des éléments minéraux en solution par les eaux de drainage. L'irrigation des sols sableux contribue à l'entraînement et à l'accumulation de l'azote nitrique et autres éléments en solution des couches supérieures vers les couches profondes, l'augmentation de la lixiviation est directement liée aux épisodes d'irrigation et aux taux de fertilisation (**Silva, 2006**)

Chapitre III :
Caractérisation des
argiles

III.1. Définition de l'argile

Les minéraux argileux sont fondamentalement constitués de silicium, aluminium, oxygène et ions hydroxyles. Ce sont des phyllosilicates d'alumine hydratés, le préfixe «phyllo» désignant des minéraux qui prennent des formes de feuillets (**Morel, 1989**).

Selon **Bouras (2003)**, les argiles sont composées d'un ensemble de particules minérales de taille inférieure à deux microns.

L'argile brute est généralement composée d'un minéral essentiel (kaolinite, montmorillonite, etc...). Et de certaines substances impures secondaires comme le quartz, la calcite et les composés organiques (**Caillère et al., 1982 ; Duchaufour, 1988**).

Du fait de leurs propriétés physico-chimiques, de leur variété et de leur abondance, les argiles sont utilisées dans des secteurs très divers (agricole, bâtiment, industrie, pharmacie ...) (**Bouras, 2003**).

III.2. Origine

Les minéraux argileux résultant de la destruction des roches, peuvent soit restés sur place, soit être transportés sur de longues distances. Les argiles sont issues d'une érosion naturelle, effectuée pendant des milliers d'années (**Tucker, 2001**). Les reliefs qui forment la surface de la terre sont composés de différentes roches, pour certaines magmatiques (issues directement du magma) pour d'autres, métamorphiques (seconde cristallisation de sédiments ou de roches magmatiques) (Figure 6).

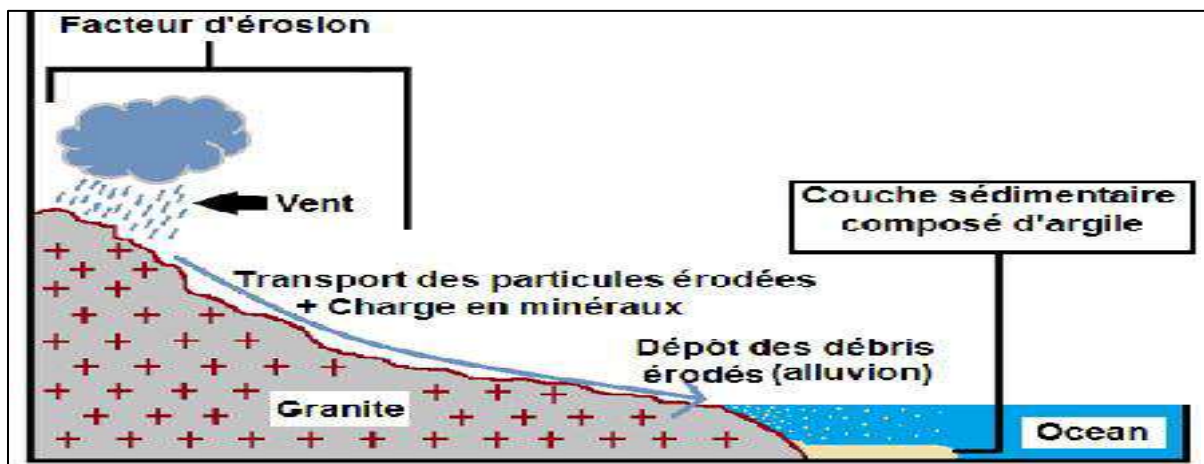


Figure 6: Processus de formation de l'argile (**Dananaj et al., 2005**).

En fonction des roches mères et du climat, les minéraux argileux résultant sont différents (**Tucker, 2001**). En climat froid : l'altération est faible, les minéraux argileux sont identiques ou peu différents des minéraux de la roche (illite et chlorite), ils sont hérités de la roche d'origine. En climat chaud et humide, l'hydrolyse est poussée, la kaolinite se forme en milieu drainé, les smectites en milieu confiné (Figure 7).



Figure 7: Les différents types de phyllosilicates formés au cours de l'altération (Tucker, 2001).

III.3. Structure minéralogique des argiles

Une couche tétraédrique constituée d'un atome central (Figure 8), généralement du silicium, entouré de quatre atomes d'oxygène est présente. Chaque tétraèdre partage trois angles avec les autres tétraèdres voisins. Six tétraèdres sont associés pour former une cavité hexagonale (Tucker, 2001).

Une structure octaédrique (Figure 8) est principalement constituée de cations Al^{3+} ou Mg^{2+} , avec des octaèdres de coordination qui ne partagent que des arêtes entre eux.

Selon Pedro (1994), la couche octaédrique est partagée par chaque tétraèdre. Selon Tucker (2001), les oxygènes de la couche octaédrique qui ne sont pas liés aux tétraèdres sont protonés.

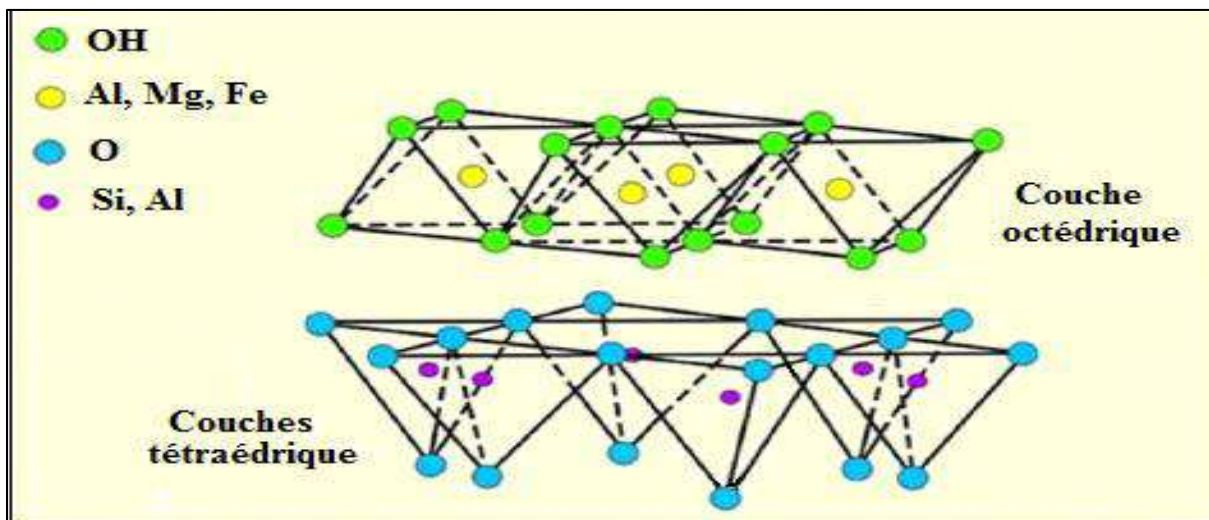


Figure 8 : Schéma d'une couche octaédrique et d'une autre tétraédrique (Pedro, 1994).

Le feuillet est constitué d'une ou deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique, séparées par des espaces interfoliaires qui peuvent être vide ou occupés par différents cations.

Chapitre III : Caractérisation des argiles

L'ensemble feuillet-espace interfoliaire est connu sous le nom d'« unité structurale » (Caillere *et al.*, 1982).

III.4. Classification des minéraux argileux

Les recherches menées par l'AIPEA (Association Internationale Pour l'Étude des Argiles) (Caillère, 1982) et par la suite par Pedro (1994) ont abouti à une typologie des argiles en fonction de la structure et de l'épaisseur du feuillet (Tableau 2).

Tableau 2 : Classification des principaux groupes de minéraux argileux et de leurs Espèces (Tucker, 2001).

Groupe de Minéraz Argileux	Espèce Minérale	Structure T = Couche de tétraèdres O=Couche d'octaèdres
Kaolinites	Kaolinite Halloysite Dickite	Minéraux à 2 couches T-O O-T
Smectites Illites Vermiculites Micas	Montmorillonite Saponite Beidellite Nontronite Illite Vermiculite Muscovite Biotite	Minéraux à 3 couches T-O-T T-O-T
Chlorites	Chlorite	Minéraux à 4 couches T-O-T-O T-O-T-O

III.5. Les différents types d'argiles

III.5.1. Kaolinite

La kaolinite $Al_2 [Si_2.O_5].(OH)_4$, ou représentée par des oxydes équivalents $2SiO_2.Al_2O_3.2H_2O$, est un minéral composé de deux couches T-O.

Le feuillet présente une couleur neutre et l'espace entre les feuilles est vide (Figure 9). La structure a une épaisseur de 7,2 angströms. Les feuillets sont reliés entre eux par des liens hydrogène. La structure est solide : l'eau ne peut s'adsorber qu'autour des particules et cette argile ne gonfle pas. La présence de kaolinite est courante dans les sédiments argileux issus de l'altération de roches acides riches en feldspath, comme les granites par exemple. Elle est riche en alumine (46 %) et présente des caractéristiques de plasticité, de faible retrait lors du séchage et de la cuisson. Elle nécessite des températures de cuisson élevées et elle présente une résistance assez importante après sa cuisson. La Halloysite Nacrite et la Dickite présentent des modifications mineures de structure. Dans la Serpentine, le Magnésium prend la place de l'aluminium. Les argiles kzoliniques sont de couleur gris-blanchâtres légèrement, jaunâtres (Kuster, 2001).

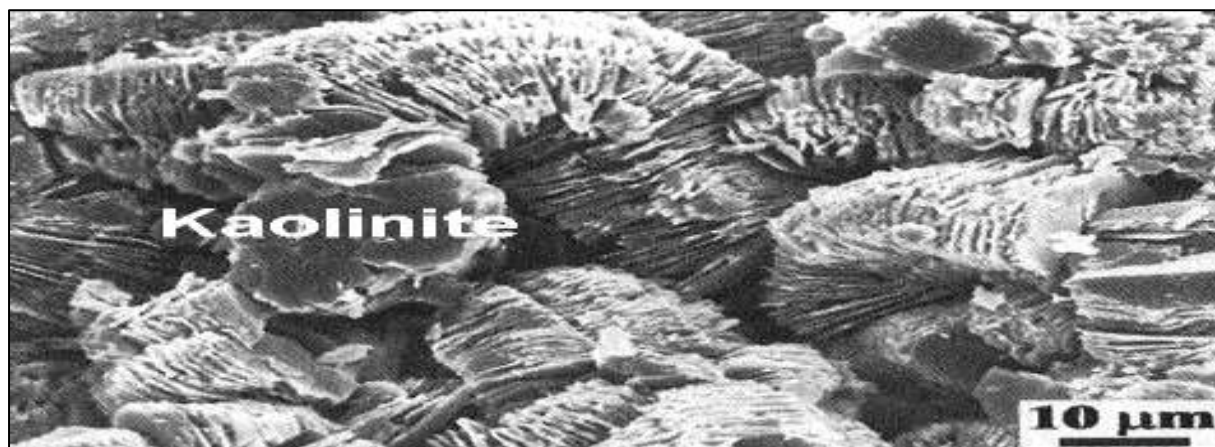


Figure 9: Kaolinite (Kuster, 2001).

III.5.2. La montmorillonite

La montmorillonite est une roche de la famille des smectites. Il s'agit d'un phyllosilicate à feuillet 2 :1 ou feuillet TOT, où une couche di-octaédrique est positionnée entre deux couches tétraédriques. La substitution isomorphe de Si^{4+} par Al^{3+} dans les couches tétraédriques et de Al^{3+} par Fe^{3+} et/ou Fe^{2+} , Mg^{2+} ... dans les couches octaédriques est observée dans les mamelons. L'effet de ces substitutions est donc la formation d'une charge négative permanente dans le réseau cristallin, qui est alors compensée par des cations compensateurs qui se « fixent » sur les surfaces basales. Les substitutions dans les montmorillonites se trouvent principalement dans les couches octaédriques et avec une charge de 0,3 à 0,6 par demi-maille (Caillère *et al.*, 1982). Par conséquent, la charge ne s'écoule que de manière dispersée aux surfaces basales. Ainsi, les cations compensateurs ne sont que très peu liés et donc pratiquement échangeables avec les cations de la solution. En général, à mesure que la charge du feuillet diminue, les cations sont plus échangeables. La capacité d'échange cationique, également connue sous le nom de CEC, est mesurée en cmole charge/kg de solide ou en meq/100g de solide. La densité énergétique des montmorillonites varie de 80 à 120 meq/100g (Morel, 1989).

III.5.3. L'illite

Illites : $(\text{K}, \text{H}_2\text{O})_2, \text{Si}_8 (\text{Al}, \text{Fe}, \text{Mg})_{4,6} \text{O}_{20} (\text{OH})_4$, le minéral argileux (Figure 10) le plus commun de la terre cuite est également un membre du groupe à trois couches mica avec potassium et est connu sous le nom d'Illite (de l'Illinois). Il est fréquent que les illites soient des mélanges et ne sont probablement pas un groupe distinct des micas. Dans la plupart des sites tétraédriques, Si^{4+} a été substitué par Al^{3+} . Une charge négative importante (de 0,8 à 1 par formule) est compensée principalement par des ions K^+ comportant de fortes liaisons. L'Illite est composée de différentes parties selon les conditions de formation. Son pouvoir d'échange est restreint et l'espace entre les feuilles demeure constant (Morel, 1989).

La quantité de potassium dans ce produit est légèrement inférieure à celle de la muscovite. Parfois, l'illite est considéré comme un « hydro mica ». Avec la présence de potassium qui agit comme un flux, la température de début de fusion peut descendre à 1050 °C. La plasticité de l'illite est apportée. Il s'agit de la forme d'argile la plus courante dans la terre cuite. Glauconite est une illite à concentration élevée de fer. Le potassium est remplacé dans la Paragonite par le sodium. C'est donc ce genre d'argile qui est moins susceptible de gonfler.

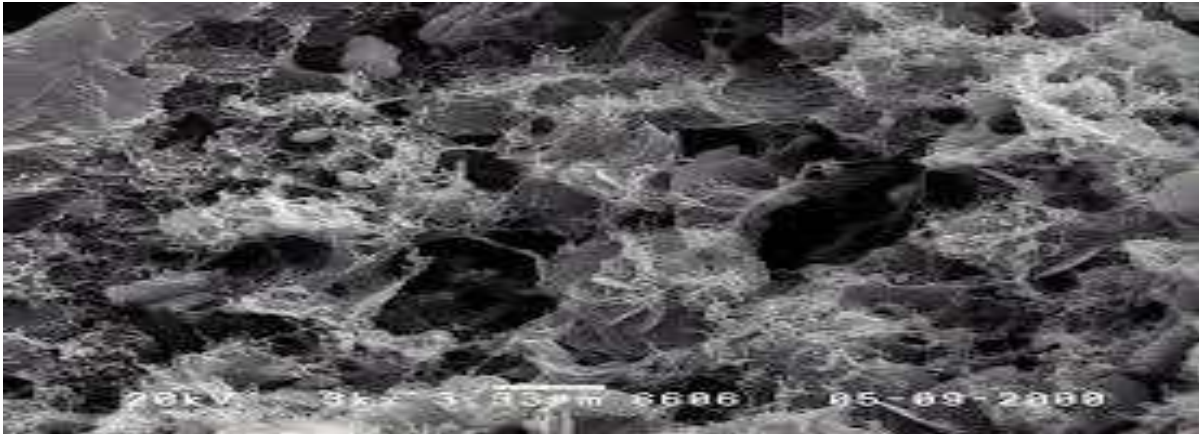


Figure 10: Illites (Morel, 1989).

III.5.4. Bentonite (voir Chapitre IV)

III.6. Principales caractéristiques des minéraux argileux

III.5.1. La densité de la charge spécifique

La densité de charge spécifique (σ) correspond à la relation entre la capacité d'échange cationique CEC et la surface spécifique S de la particule argileuse : σ (meq /m²) = CEC/ S .

Deux types de charge existent dans les milieux argileux:

- Une charge permanente ou structurelle associée aux substitutions ioniques (Al^{3+} pour Si^{4+} dans la couche tétraédrique ; Mg^{2+} ou Fe^{2+} pour Al^{3+} dans la couche octaédrique).
- Une charge de surface qui varie en fonction du pH du milieu en fonction des réactions chimiques qui se déroulent à la surface des minéraux.

Pour les matériaux argileux, l'augmentation de la densité de charge spécifique diminue le gonflement ou la pression de gonflement. En raison de cette augmentation, les ions sont attirés, ce qui entraîne une condensation de la double couche, ce qui entraîne une réduction de son épaisseur. À mesure que cette concentration augmente, la couche devient plus mince ou comprimée, ce qui entraîne une réduction du gonflement (Velde, 2013).

III.6.2. La forme des particules argileuses

Les argiles sont disponibles sous trois formes différentes (Figure 11). Les flocons se distinguent par une même taille dans les deux directions et une épaisseur équivalente à 1,20

fois la longueur. Les aiguilles ont deux dimensions identiques et le troisième est beaucoup plus grand (Velde, 2013).

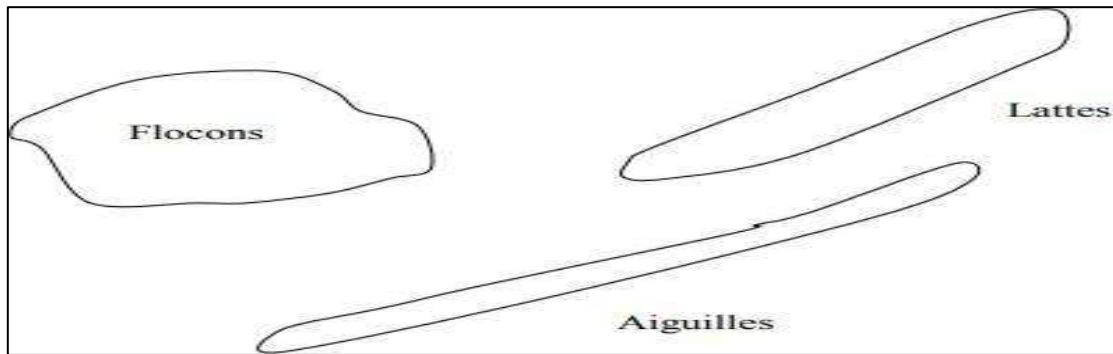


Figure 11: Forme des particules argileuses (Velde, 2013).

III.6.3. La surface spécifique des particules argileuses

La composition des argiles est constituée de la surface externe située entre les particules et la surface interne correspondant à l'espace interfoliaire. Le renforcement de la surface spécifique entraîne une augmentation du pouvoir de gonflement, ce qui entraîne un potentiel de gonflement accru (Velde, 2013).

III.6.4. Les propriétés colloïdales

La valeur de cette propriété est cruciale pour les méthodes de purification des argiles. On peut la rattacher à la présence de charges négatives à la surface de chaque grain d'eau. Le caractère colloïdal se manifeste par le fait que chaque grain d'argile est recouvert par une double couche d'ions hydrosolubles de charges incompatibles (Velde, 2013).

III.6.5. La capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange de cation (CEC) se définit comme le nombre de charges qui peuvent être échangées par une masse d'argile spécifique. La quantité exprimée est de 100 g d'argile en milléquivalent. Cette caractéristique varie en fonction de la nature de l'argile (type d'argile), de ses propriétés cristallographiques, de ses cations et du pH local. Lorsqu'on recherche une kaolinite idéale, la valeur de la CEC à un pH spécifique ne va dépendre que du degré de dissociation des différents sites amphotères présents sur les faces latérales. Le comportement rhéologique des suspensions est influencé par cette propriété (Velde, 2013).

III.6.6. Cations échangeables

Les argiles possèdent la capacité d'adsorber certains anions et cations et de les maintenir dans un état où ils peuvent être échangés avec d'autres ions en solution. Les cations échangeables les plus fréquents dans les argiles sont les suivants, par ordre décroissant : Ca^{+2} , Mg^{+2} , H^+ , K^+ , NH^+ et Na^+ . Comme mentionné précédemment pour la montmorillonite, le motif cristallin présente une charge négative dans le feuillet en raison de la substitution des ions Al^{+3} par des

ions Mg^{+2} en couche octaédrique et des ions Si^{+4} par des ions Al^{+3} en couche tétraédrique. Il est clair que cette charge négative est compensée par un nombre équivalent de cations.

Pour des raisons de neutralisation électrique, ces cations s'installent dans les interstices des feuillets et à la surface des parois. En grande partie, les propriétés physico-chimiques des bentonites sont influencées par le cation dominant. L'analyse des cations permet ainsi de définir la nature de l'argile : sodique, calcique ou magnésienne (Velde, 2013).

III.7. Les principaux problèmes des sols argileux

III.7.1. Phénomène de gonflement

Un sol argileux évolue en volume en fonction de son niveau d'humidité, tout comme une éponge : il gonfle lorsque l'humidité est présente et se rétracte lorsque la sécheresse est présente. Le gonflement se produit lorsque l'humidité est présente et l'hydratation se produit soit par l'hydratation des espaces interfoliaires (attraction des particules d'eau) soit par la répulsion des particules argileuses, également appelée gonflement osmotique, comme mentionné précédemment (Kuster, 2001).

III.7.2. Phénomène de glissement

Le glissement de terrain est un déplacement lent par gravité d'un versant instable pouvant s'accélérer pour aller jusqu'à la rupture. Il peut-être superficiel ou profond.

Les glissements se caractérisent par la translation latérale d'une certaine masse de matériaux au niveau d'une surface de rupture nettement individualisée et se produisent généralement dans des matériaux faiblement cohérents (marnes, argiles..). Ce sont les mouvements qui affectent le plus fréquemment les ouvrages de génie civil (Velve, 2013).

III.7.3. Phénomène de tassement

D'après le Kuster (2001), le tassement d'une construction est causé par la déformation du sol de base, la cause de cette déformation peut résulter d'un ou plusieurs facteurs suivants.

- On appelle "mouvement" ou "déplacement" : la déformation sous une charge totale croissante.

La diminution du volume d'air, résultant d'un effet dynamique ou d'un chargement statique, est connue sous le nom de "compactage".

- On appelle "consolidation" les variations de volume graduelles liées à une diminution de la teneur en eau du sol.

- La variation sous une contrainte effective constante est connue sous le nom de "fluage"

Chapitre IV :

**Les amendements
minéraux (Bentonite)
et organiques (Fumier)**

IV. 1. Les amendements

D'après **Schwartz *et al.* (2005)**, les amendements sont des matériaux à apportés au sol en vue d'améliorer ses qualités agronomiques. En agriculture, ils sont utilisés pour dynamiser la productivité des terres. Ils apportent au sol des bénéfices physiques, en lien avec sa structure, et chimiques, en lien avec sa composition. D'une façon générale, il existe deux types d'amendements :

IV.2. Les amendements minéraux

Ils améliorent certaines propriétés physico-chimiques du sol, telles que la correction de pH ou l'amélioration de la structure du sol, tout en facilitant son travail. Ils permettent ainsi aux plantes de mieux absorber les éléments nutritifs. Les principaux amendements minéraux sont (Tableau 3) : des argiles, du sable, des limons ou des oligo-éléments. Dans le cas de la modification du pH, il faudra privilégier le calcaire, la chaux et le gypse (**Dicova, 1997**).

Contrairement aux engrais, qui apportent des nutriments aux plantes, les amendements enrichissent la terre et améliorent son rendement.

Tableau 3: Les principaux amendements minéraux (**Dicova, 1997**).

Produit	Action
Argile	Mise en valeur des terres à textures légère, augmente la capacité de stockage de l'eau et des éléments fertilisants, il fertilise le sol.
Chaux	Élève le pH d'un sol trop acide (à éviter en sol calcaire) et allège les sols lourds et fertilise le sol.
Gypse	Assouplit les sols lourds et neutralise les excès de sodium.
Cendres de bois	Élève le pH d'un sol trop acide (à éviter en terre de bruyère) et enrichit le sol en éléments minéraux.
Soufre	Acidifie le sol (baisse le pH).
Sulfate de fer	Action rapide pour acidifier un sol (baisse le pH).
Sable	Allège les sols lourds.

IV.2.1. Exemple d'un minéral argileux : la Bentonite

a. Définition

Le terme bentonite désigne une argile à contenu élevé en montmorillonite, du groupe des smectiques, habituellement caractérisée par une forte capacité de gonflement (pouvoir absorbant) après absorption d'un liquide : souvent utilisée pour imperméabiliser des étangs lorsque les pertes d'eau par infiltration sont trop élevées (**Boukadah, 2007**).

b. Origine de la bentonite

L'expression « bentonite » a été introduite par le géologue américain « WC. KRRIGHT » en 1898 d'après la forteresse (forte bentonite) dans la région de Rock Greent à Wyoming aux Etats-Unis. Elle contient plus de 80 % de montmorillonite ; cette dernière fut découverte pour la première fois en 1847 près de Montmorillon, dans le département de la Vienne (France) par « A. Damour » et « D. Selvetat » (Batouchek, 2010).

c. Type de la bentonite

Bentonites naturelles

En fonction de la nature du cation échangeable présent, il existe à l'état naturel deux types de bentonites :

- **Les bentonites sodiques**, où le sodium est le cation échangeable majoritaire, elles ont un fort pouvoir de gonflement et d'adsorption.
- **Les bentonites calciques**, où le calcium est le cation échangeable majoritaire, elles ont un pouvoir de gonflement et d'adsorption plus faible que les bentonites sodiques.
- **Bentonites activées**, où ces différents types de bentonites se présentent sous forme de poudre ou de granulés sphériques ou cylindriques. Elles ont des couleurs très variables allant du blanc pour les produits les plus purs au gris, beige ou vert pour les autres (Moussaoui, 2012).

d. Structure de la bentonite

La montmorillonite $(OH)_4 Si_8(Al_{10/3}, Mg_{2/3}) O_{20}, nH_2O$: est le constituant principal de la bentonite (Figure 12). C'est un phyllosilicates 2 : 1 (famille de smectites) dans lequel la charge négative de la couche est électriquement équilibrée par une charge égale, des cations échangeables (Ca^{++} , Mg^{++} , Fe^{++} , Al^{++} , H^+ , K^+ , NH et Na^+) situés principalement entre ces couches silicates ; ces cations ne font pas partie de la structure et gardent une certaine mobilité (Kanouri et Labide, 2013).

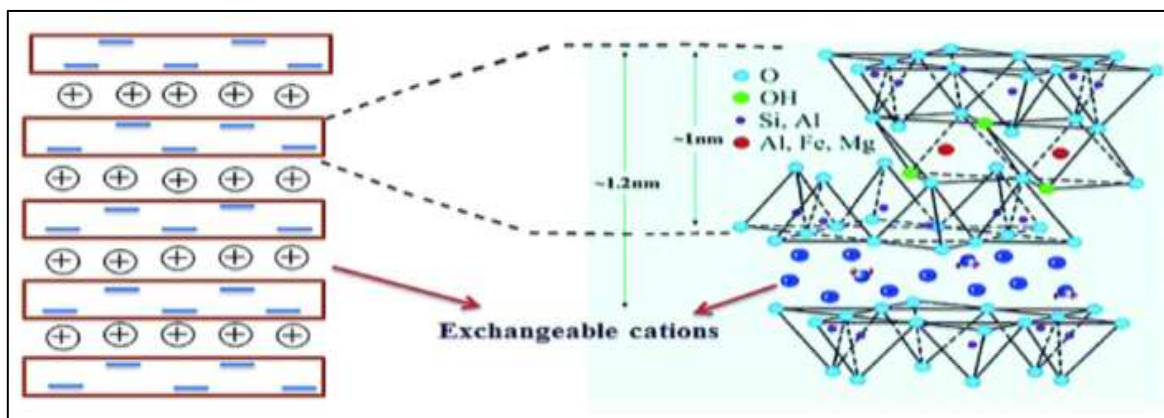


Figure 12: Structure de la montmorillonite (Kanouri et Labide, 2013).

e. Domaines d'utilisations de la bentonite

D'après l'ENOF (2024), la bentonite possède un large éventail d'utilisation dans les divers domaines tel que (Figure 13):

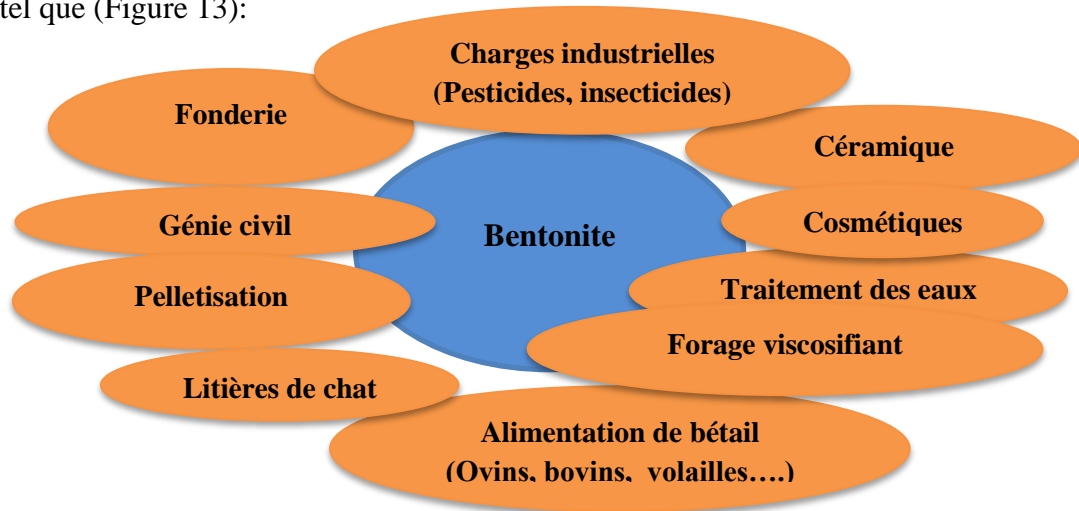


Figure 13: Domaines d'utilisations de la bentonite (ENOF, 2024).

f. La bentonite dans l'agriculture

Selon l'ENOF (2024), la bentonite a beaucoup d'application dans le domaine agricole :

- La bentonite appliquée à un sol sableux a donné d'excellents résultats :
 - ✓ Amélioration de la fertilité du sol et augmentation de sa capacité de stockage en eau ;
 - ✓ Son amendement représente un apport minéral, il protège également les éléments fertilisants du lessivage profond par la formation du complexe argilo-humique.
- Elle peut se mélanger avec le fumier ou autre excréments d'animaux, elle est utilisée comme agent de déshydratation.
- Elle permet la mise en valeur des terres à textures légère, comme additif dans l'élevage car atténue la vitesse de décomposition de l'urée après injection.
- Elle protège contre les insectes et dans la médecine vétérinaire (enrobage des engrais), comme couche imperméables, permet de protéger les eaux souterraines contre toute contamination par les éléments chimiques dus à l'utilisation agricoles (engrais) ou industrielle.

g. La bentonite en Algérie

En Algérie, les gisements de bentonite les plus importants économiquement se trouvent à l'ouest algérien. On relève en particulier la carrière de Maghnia (Hammam Synthèse 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, onctueuse au toucher, sa teinte est blanche, grise ou légèrement jaune. Elle provient de la dévitrification des couches volcaniques sous l'influence des eaux à réaction alcaline ou acide. En plus de la montmorillonite, cette terre peut contenir d'autres minéraux argileux (kaolinite, illite,...) ainsi que des impuretés sous forme de gypses, de carbonates,...etc (Chikhi, 2013).

IV.3. Les amendements organiques

Selon Soltner (2003), les amendements organiques sont des matières organiques exogènes qui améliorent l'état structural du sol avec des apports limités. Cet apport est destiné à l'obtention d'un produit organique riche en humus. Il s'agit des matières fertilisantes destinées à l'entretien ou à la reconstitution du stock de la matière organique du sol (Samreen et al., 2017).

IV.3.1. Définition de la matière organique

La matière organique du sol (MOS) correspond à l'ensemble des substances organiques, vivantes et mortes, fraîches ou décomposés, simples ou complexes présentes dans le sol, à l'exclusion toutefois des animaux vivants dans le sol et des racines vivantes (Oulbachir, 2010). La MOS est ainsi constituée d'éléments majeurs: le carbone (C), l'hydrogène (H), l'oxygène (O) et l'azote (N) qui sont tous essentiels à la nutrition des plantes, ainsi que des éléments secondaires et des oligoéléments. En effet, elle est renouvelable, car alimentée en permanence par les végétaux et animaux morts, par les exsudats racinaires issus du métabolisme des êtres vivants et par les matières organiques exogènes, telles que le compost ou le fumier (Bernoux et Chevallier, 2013).

IV.3.2. Impacts de la matière organique du sol

La matière organique intervient à toutes les articulations du système sol-plante-climat (Oulbachir, 1997). Une fois mise, dans le sol, la matière organique est essentielle à :

IV.3.2.1. La fertilité des sols agricoles

D'après Doucet (2006), la matière organique remplit une multitude de fonctions qui sont toutes aussi indispensables les unes des autres. Sans elle, aucune production n'est possible.

Ces fonctions sont assurées grâce à leurs propriétés physiques, biologiques et chimiques :

a. Influence sur les propriétés physiques du sol

L'humus prévient le tassement des particules, rend les sols plus légers, plus poreux et donc mieux aérés. Il rend les sols plus meubles et augmente leur perméabilité à l'air et à l'eau. En même temps, il est un régulateur de l'humidité du sol. En effet, il maintient une meilleure réserve d'eau, grâce à son pouvoir d'absorption élevé, et tend, du même coup à réduire l'évaporation. L'humus augmente la cohésion des agrégats du sol et diminue leur

mouillabilité ; c'est donc un élément stabilisant de la structure du sol, puisqu'il agit notamment contre son pire ennemi : l'eau (Doucet, 2006).

b. Influence sur les propriétés biologiques du sol

D'après Lefèvre (2015), la matière organique du sol stimule l'activité biologique qui s'y trouve : elle représente la source principale d'énergie et d'éléments nutritifs indispensables aux microorganismes du sol qui, en la décomposant, libère du CO₂ et des éléments nutritifs assimilable par les plantes. La MOS permet de ce fait le maintien de l'activité biologique du sol ainsi que la productivité des écosystèmes (Bernoux et Chevallier, 2013).

c. Influence sur les propriétés chimiques du sol

Selon Doucet (2006), l'humus, comme l'argile, peut fixer les cations indispensables, par son pouvoir d'adsorption, et les libérer pour alimenter les plantes en croissance, grâce au mécanisme de l'échange des ions. Cette propriété, désignée, capacité d'échange cationique (CEC) contribue au stockage et à la mise à disposition ultérieure d'éléments nutritifs pour les plantes. La CEC permet en outre de lutter contre les pertes en éléments nutritifs par lixiviation (Calvet *et al.*, 2011). Grâce à son pouvoir tampon, l'humus prévient en outre les variations subites et néfastes du degré d'acidité dans le sol (Doucet, 2006).

IV.3.2.2. Le stockage des carbones atmosphérique dans les sols

Les échanges de carbone entre sols, végétation et atmosphère sont intenses : les sols à la fois émettent du CO₂ (via la respiration des racines et des microorganismes) et piègent du carbone organique (via la photosynthèse et la transformation des résidus des plantes en humus). Au final, les sols puisent globalement plus de CO₂ qu'ils n'en rejettent, constituant ainsi un puits de carbone de 1 à 3 Gt par an qui participe à l'atténuation du changement climatique au niveau global (Le Quéré *et al.*, 2015).

IV.3.2.3. La contribution au maintien de la biodiversité des sols et des plantes

D'après Bernoux et Chevallier (2013), la MOS favorise une grande diversité d'habitats pour la faune (lombrics, acariens, nématodes...) et la microflore (champignons, algues, bactéries...) du sol. La plupart des espèces se retrouve dans les 2-3 premiers centimètres de sol où les concentrations en matières organiques et en racines sont les plus élevées. Des sols plus riches en matière organique permettent également de supporter une végétation plus diversifiée, ce qui en général permet l'établissement d'une biodiversité plus riche sur la parcelle.

IV.3.3. Sources de matière organique

a. Fumiers

Le fumier est une matière organique plus en mois fermentée, composée par un mélange de litière (paille, foin, ...) et de déjections d'animaux, considérée comme fumure organique de référence (Dridi and Toumi, 1999).

b. Fientes

Les fientes sont les déjections des volailles, sans litière (Znaïdi, 2002).

c. Purins

D'après Siboukeur (2013), les purins sont des mélanges qui ne comprennent que des exsudats liquides de déjections.

d. Engrais verts

L'engrais vert correspond à une culture de végétation destinée à protéger et améliorer le sol par la fourniture d'éléments fertilisants (Siboukeur, 2013).

e. Compost

Le compost est un produit stable riche en humus, obtenu après le passage de la matière organique de l'état brut à l'état stabilisé par le biais d'un processus de compostage (Siboukeur, 2013).

f. Paille ou mulch

Il s'agit des résidus de culture pailleux ou non, les déchets végétaux ligneux ou non (Adden, 2004).

g. Déchets industriels ou urbains

On note essentiellement : les écumes de sucrerie et les boues de station d'épuration (Siboukeur, 2013).

h. Ordures ménagères et les écorces concassées

Ce sont des matières fertilisantes du sol, apportées au sol de préférence à l'état composté (Siboukeur, 2013).

Chapitre V :

La culture du poivron

V.1. Définition

Le poivron (*Capsicum annuum* L.), une espèce de la famille des *Solanaceae* (Figure 14) qui regroupe d'autres espèces comme la tomate, l'aubergine, le piment et la pomme de terre, il est de la même espèce que le piment cultivé mais est issu de la sélection de variétés dites "douces". C'est une plante annuelle présente sur tous les continents. L'espèce est très prisée pour ses fruits à chair épaisse avec une saveur douce et parfumée. C'est une culture très rentable mais très sensible à l'attaque de nombreux ravageurs aux coups de soleil mais exigeant en température (Legba *et al.*, 2020). Son développement maximal se situe aux alentours de 15 à 25° C et des températures trop élevées (28-30°C) peuvent entraîner une importante coulure des fleurs. Il est donc recommandé de la cultiver durant les mois les plus frais de l'année (de mai à septembre) (SDR, 2016).

Le poivron peut atteindre 1 m à 1,5 m de hauteur et donne des fruits, de différentes formes (carré, long, conique...), verts durant leur croissance mais dont la couleur peut varier à maturité selon la variété (jaune, rouge, orange...) (SDR, 2016).



Figure 14 : Le poivron (*Capsicum annuum* L.) (SDR, 2016).

V.2. Systématique

Selon CAM (2014), la position systématique des agrumes est connue comme suit :

- Règne :** *Plantae*
Sous-règne : *Tracheobionta*
Division : *Magnoliophyta*
Classe : *Magnoliopsida*
Sous-classe : *Asteridae*
Ordre : *Solanales*
Famille : *Solanaceae*
Genre : *Capsicum*

Espèce : *Capsicum annuum L*

V.3. Importance nutritionnelle, utilisations et vertus

D'après **Legba *et al.* (2020)**, la consommation des fruits du poivron constitue une importante source :

- ✓ d'éléments nutritifs: protéines, glucides et fibres ;
- ✓ de vitamines: A, B2, B3, B6, B9, C, K ;
- ✓ de minéraux: manganèse, potassium, cuivre, sodium, calcium, fer, phosphore, magnésium ;
- ✓ et de substances diverses : flavonoïdes, caroténoïdes.

Il est riche en antioxydants, réduit le risque de cancer et stimule efficacement le transit intestinal

Selon **Legba *et al.* (2020)**, tous les poivrons sont verts à la base. Ils ne changent de couleur qu'en pleine maturité. Il est utilisé selon ses différents niveaux de maturité :

- **Le vert** : croquant, plus apprécié pour sa chair ferme pour faire de la salade et aussi dans la préparation de riz et de la sauce ;
- **Le rouge**: doux, presque sucré, il est le plus adapté à la cuisson et peut remplacer la tomate pour la préparation d'une sauce ;
- **Le jaune**: très tendre et particulièrement juteux, très utilisé comme condiment pour parfumer les sauces ou les salades mais également pour décorer les plats.

V.4. Caractéristique de la culture

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

- Le poivron demande un sol profond, meuble, bien drainé et riche en matière organique. Il est plus exigeant que la tomate ;
- Les sols silico-argileux sont conseillés aux cultures de primeur et les terres argilo siliceuses pour les cultures de saison ;
- Température : plante exigeante en chaleur, aime les climats tempérés 20 à 30°C le jour et 15 à 20°C la nuit ;
- Il n'aime pas l'ombrage, c'est une plante de pleine lumière (plante héliophile);
- pH : 6,5 à 7 ;
- Salinité : moyennement tolérante : 1,92 à 3,2 g / l (3 à 5 mmhos/cm⁻¹) ;
- Humidité : sol 80 à 85%, air : 60 à 70% ;
- Sensible aux forts vents ;
- Sensible à l'attaque de nombreux ravageurs ;

Chapitre V: La culture du poivron

- Il ne doit pas être cultivé après une plante de la même famille avant trois ans (tomate, aubergine, piment, pomme de terre).

V.5. Cycle de la plante

Le cycle de culture du poivron dure en moyenne 5 mois et demi. La levée n'est pas très rapide puisque les graines mettent une dizaine de jours avant de sortir de terre. Il est recommandé ensuite d'élever les jeunes plantules en pépinière durant un peu plus d'un mois et de les replanter en plein champ au stade 8-10 feuilles, lorsque les plants ont atteint environ 20 cm, soit à peu près 1 mois et demi après le semis. Après la plantation, il faudra encore aux plants de poivrons 1 mois avant de fleurir puis un second mois afin que les fruits grossissent avant de pouvoir récolter.

La récolte peut donc avoir lieu 2 mois après le repiquage, soit 3 mois et demi après le semis. Elle s'étale généralement sur 2 mois mais peut être facilement prolongée dans de bonnes conditions de culture. Le poivron peut se cultiver toute l'année en Polynésie française, mais en raison des températures élevées et des fortes intempéries que l'on rencontre en saison des pluies et qui peuvent causer d'importants dégâts, il est conseillé de cultiver le poivron durant la saison fraîche. Le tableau 4 présente un récapitulatif de la durée du cycle du poivron en fonction des différentes étapes culturales et biologiques de la plante (SDR, 2016).

Tableau 4 : La durée du cycle du poivron en fonction des différentes étapes culturales et biologiques de la plante (SDR, 2016).

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

V.6. Mise en place de la culture

Afin de faire des économies en semences et de permettre une meilleure implantation de la culture, la production de plants en pépinière suivie d'un repiquage en plein champ est à privilégier.

a. Préparation du sol

Labour : 25 à 30 cm.

Passage herse et fraise rotative.

b. Semis et plantation

- ✓ **En pépinière :** Sous serre, semis en pot, septembre octobre novembre.

En plein champ, mars-avril.

- ✓ **Plantation** : Sous serre, septembre à janvier.

En plein champ : avril à mai.

- ✓ **Distances** : Entre rangs : 0,90 à 1 m.

Entre plants : 0,40 à 0,45 m.

- ✓ **Densité** : 20 000 à 25 000 plants/ha.

c. Travaux d'entretien

Paillage, tuteurage, binage, buttage (culture sans paillage).

d. Fertilisation

- ✓ **Fumure de fond**

Organique : 30 à 35 t/ha

Minérale : 180 à 200 unités de N/ha, 80 à 100 unités de P/ha et 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 nouaison et 60 unités de K)
- 3^{ème} apport (30 unités de N fructification et 60 unités de K)
- 4^{ème} apport (20 unités de N et 60 unités de K après 1ère récolte).

e. Irrigation

- A la raie

- Goutte à goutte, **4000 à 5000 m³ / ha** doses et fréquences selon le stade végétatif et la demande climatique.

V.7. Protection phytosanitaire

a. Insecticide

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

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).

V.8. Récolte et conservation

La récolte peut commencer deux mois après plantation et doit être effectuée régulièrement afin de favoriser la fructification sur les ramifications, environ deux fois par semaine durant 2 mois, mais elle peut être prolongée en fonction de l'état sanitaire de la culture (SDR, 2016).

Chapitre V: La culture du poivron

Il est conseillé de récolter le poivron au stade fruits verts, lorsque ceux-ci sont durs et craquants au toucher, ce qui coïncide avec un changement de teinte du fruit mais tout en restant dans le vert. Les fruits récoltés avant d'atteindre ce stade se conservent mal et flétrissent plus vite. Il faut compter plus de trois semaines entre le stade vert et la pleine maturité (lorsque les fruits sont bien colorés pour les poivrons rouges, jaunes,...) (SDR, 2016).

V.9. Variétés du poivron les plus cultivées en Algérie

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).

V.10. Choix variétaux

Le choix variétal s'oriente sur les caractéristiques agronomiques et qualitatives de la variété mais il est aussi recommandé de choisir une variété résistante à la cercosporiose, la seule maladie fongique (due à un champignon) qui cause des dégâts sur le poivron.

V.11. Zones de production

Selon l'ITCMI (2022), Toutes les régions d'Algérie : littoral, sublittoral, plaines intérieures et le sud.

Primeur : Littoral.

Sous serres : littoral et sud.

Saison : toutes les régions du pays

V.12. Production du poivron

Le (Tableau 5) représente la superficie, la production de la culture du poivron à Mostaganem et en Algérie (DSA, 2024).

Tableau 5 : Superficie, production et rendement de la culture du poivron (2022/2023) (DSA, 2024).

	Superficie (ha)	Production (qx)	Rdt (qx/ha)
Mostaganem	1231	456450	370.8
Algérie	11381	3668857	370.4

Étude expérimentale

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 sont 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 (bentonite : argile brute) avec des doses bien appropriées afin d'améliorer : (i) la fertilité physique du sol à savoir : la densité apparente, la perméabilité, la porosité, la rétention en eau et la stabilité structurale, et (ii) le rendement des cultures en vue d'une agriculture biologique et un développement durable.

I.2. La région de prélèvement

L'étude a été effectuée à l'Atelier Agricole de la commune de Mazagran (Figure 15), situé à 4 km au sud de la Wilaya de Mostaganem entre les points cordonnés Lambert 35°53' 37'' N, 0°4' 52'' et 35° 53' 04'' N avec une altitude de 125 à 151 m, il est délimité par la commune de Mazagran à l'Ouest, Hassi Mamèche au Sud et Douar Djedid à l'Est. La superficie de la ferme est de 62,74 ha (DSA, 2024).

I.2.1. Situation géographique

La wilaya de Mostaganem est située au nord de l'Algérie. Elle s'étend sur une superficie de 2269 Km² et est distante de 365 Km de la capitale Alger et de 80 Km la ville d'Oran, donc elle se présente comme une zone de contact entre le Nord et l'Ouest (ANIREF, 2018).

La wilaya de Mostaganem est limitée (ANIREF, 2018) :

- Par la mer Méditerranée au nord ;
- Par la wilaya de Chlef à l'est ;
- Par la wilaya de Relizane au sud-est ;
- Par la wilaya d'Oran à l'ouest ;
- Par la wilaya de Mascara au sud-ouest.

I.2.2. Caractéristiques naturelles et conditions climatiques

a. Le relief

D'après ANIREF (2018), Les limites de la wilaya de Mostaganem sont inscrites entièrement dans le littoral oranais dont elle comprend les principales caractéristiques. En effet, elle chevauche sur plusieurs unités physiques plus ou moins homogènes :

- Une zone montagneuse située à l'Est qui correspond aux monts du Dahra ;
- Une zone de plateau, celui de Mostaganem ;

- Deux unités de plaines : la première, à l'Est, au contact du Dahra de part et d'autre de la vallée du Chélif. La seconde, à l'Ouest, au pied du plateau à cheval sur les marais de la Macta.



Figure 15 : Situation géographique de la zone d'étude (Atelier Agricole de Mazargan, Mostaganem) (Google Earth, 2024)

b. Le climat

Le climat de la wilaya de Mostaganem est un climat méditerranéen à hiver tempéré. La pluviométrie varie entre 350 et 500 mm/Année et la température moyenne annuelle de 18,3°C (ANIREF, 2018).

c. Le sol

Selon des études géologiques spécialisées, les sols de la wilaya sont, en général, léger, 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 du travail

L'expérimentation a été effectuée au sein des laboratoires de pédologie et de biochimie au niveau de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, 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 6.

Tableau 6 : Matériel et produits.

Matériel et produits	
Appareillage	Agitateur magnétique – Etuves (60°C – 105°C) – Balance de précision – Plaque chauffante- pH mètre – Conductimètre – Calcimètre de Bernard- Bain de sable.
Petit outillage	Tarière à sonde – Cylindre à volume connu (densimètre).
Verrerie	Béchers - Entonnoirs - Eprouvettes graduées Erlenmeyer - Pipettes graduées - Verres à mesure - Creusets - Fiole jaugée - Burette graduée – Bouteilles en verre – Pycnomètre – Tube de percolation – Tubes à essais.
Produits	Eau distillée - Carbonate de calcium – Acide sulfurique-Bichromate de Potassium - Sel de Mohr - Eau oxygénée - Oxalate d'ammonium Acide chlorhydrique – Permanganate de potassium.
Autre matériel	Sachets - Etiquetage - Pilon et mortier - Tamis (2mm) - Piécette - Spatules.

I.4.2. Méthodes

Le protocole expérimental est représenté dans la Figure 16 comme suite :

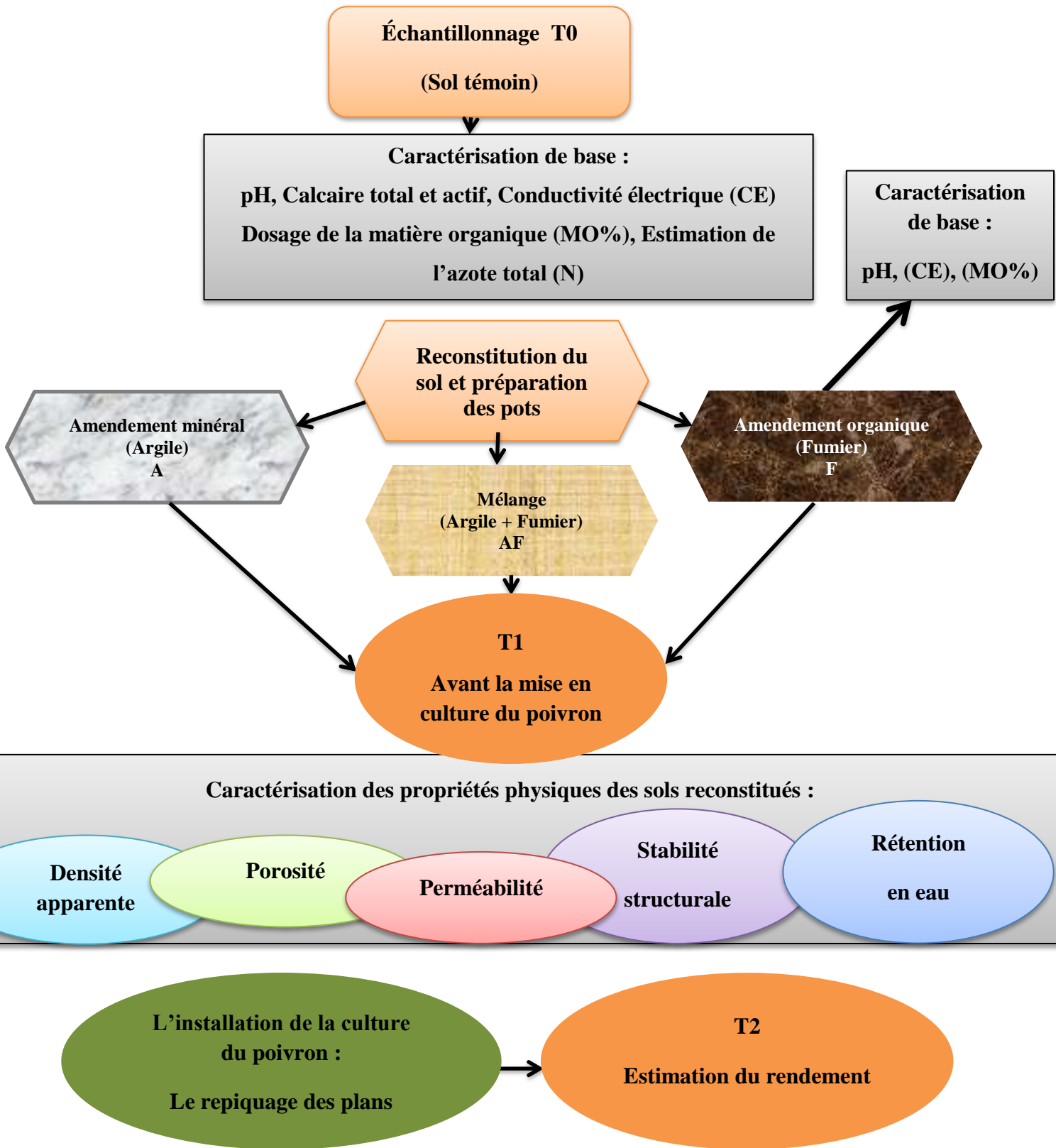


Figure 16: Protocole expérimental (Benouadah *et al.*, 2020).

I.5. Échantillonnage

I.5.1. Échantillonnage du sol

Il faut les prélever dans les mêmes conditions physiques (température humidité) et toujours le même jour (Dari, 2013). L'échantillon doit représenter le mieux possible le sol de la parcelle. Cela n'est pas facile mais nécessaire pour que les résultats soient corrects (Es-Skalli, 2015). Pour l'ensemble des pots, le prélèvement a été effectué dans la couche superficielle du sol (20cm) grâce à une truelle de maçon (Photo 1).



Photo 1 : Prélèvement des échantillons de sol (Cliché Kecir, 2024).

I.5.1.1. Les analyses physicochimiques du sol témoin

Selon Schwartz *et al.* (2005) ; Dicova (1997), elles ont pour but d'évaluer, pour l'horizon travaillé de la parcelle, d'une part les conditions physicochimiques, d'autre part les quantités d'éléments minéraux ou éventuellement polluants, disponibles pour les cultures dans les conditions d'une exploitation agricole.

Un échantillon de sol avant traitement, (T0 : 20/02/2024) a fait l'objet d'une caractérisation physico-chimique, considérée comme base de référence pour l'étude.

a. Préparation des échantillons

• Séchage

On met l'échantillon de terre dans un bac et on le laisse sécher à la température ambiante de la salle pendant 7 jours (Photo 2).



Photo 2: Séchage des échantillons de sol (Cliché Kecir, 2024).

- **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 (Cliché Kecir, 2024).

- b. Analyse granulométrique**

- **Principe**

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) (Photo 4). Dans le cas des sols calcaires, il est important de savoir si cette analyse a été réalisée avec ou sans décarbonatation préalable (Schvartz *et al.*, 2005). (Voir le protocole dans l'Annexe I).

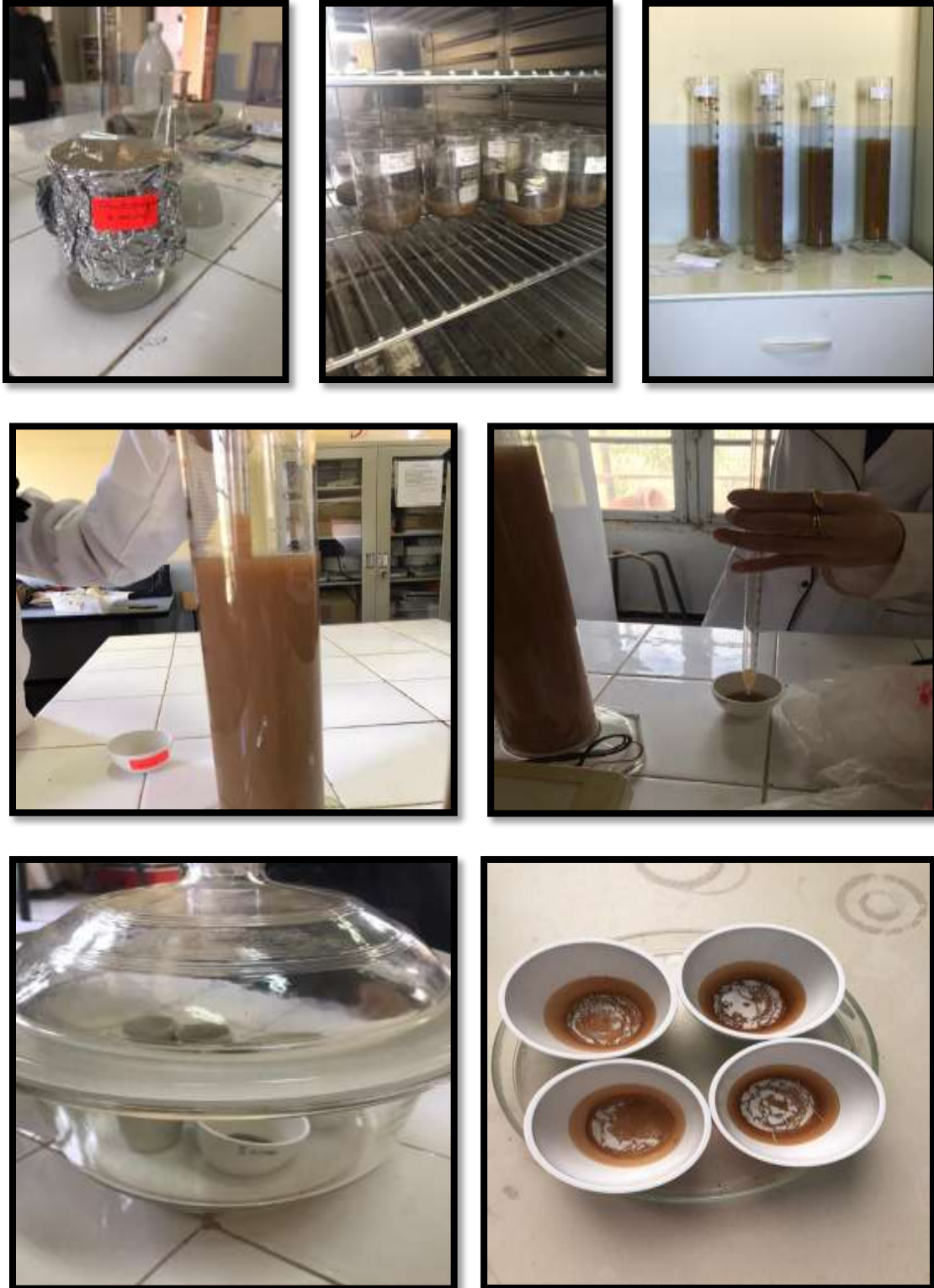


Photo 4: Analyse granulométrique par la méthode de la pipette de Robinson
(Cliché Kecir, 2024).

c. Mesure du pH

▪ Principe

L'appréciation du pH (Photo 5) au laboratoire (NF ISO 10390) est obtenue en mesurant le pH d'une suspension de sol dans l'eau déminéralisée (pH_{eau}), dans un rapport pondéral terre/solution égal à 2/5 (Schvartz *et al.*, 2005). (Voir le protocole dans l'Annexe I).



Photo 5: Mesure du pH d'un échantillon de sol à l'aide d'un pH mètre
(Cliché Kecir, 2024).

d. Mesure de la conductivité électrique

La phase liquide du sol est une solution contenant divers ions qui confèrent au sol une certaine conductivité électrique. Elle dépend également des minéraux et des constituants organiques qui ont plutôt des propriétés isolantes. D'une façon générale, la conductivité électrique d'un matériau terreux dépend de sa composition, de sa structure, et de sa teneur en eau (Calvet, 2003).

▪ Principe

La détermination de la salinité d'un sol (Photo 6) est fondée sur le principe de l'extraction d'un électrolyte dont on mesure la concentration en éléments dissous. Au laboratoire, l'électrolyte est extrait sous vide à partir d'un échantillon de sol préalablement séché à l'air, tamisé à 2 mm et porté à une teneur en eau donnée, celle-ci variant selon le mode de préparation de l'extrait. Une des techniques d'extraction couramment utilisée est l'extrait dilué : le rapport entre la quantité de sol et la quantité d'eau peut varier selon les laboratoires, mais il est en général de 1/5 : la masse d'eau ajoutée est égale à 5 fois la masse de sol (10g), soit un volume d'eau d'environ 50ml (Montoroi, 1997). (Voir le protocole dans l'Annexe I).

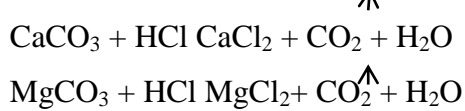


Photo 6 : Mesure de la conductivité électrique du sol par le conductimètre
(Cliché Kecir, 2024).

e. Détermination du calcaire total et actif

▪ **Principe**

Selon **Schwartz *et al.* (2005)**, le **calcaire total** du sol (**AF ISO 10693**) est déterminé par attaque d'une quantité connue de terre par l'acide chlorhydrique. La réaction provoquée libère rapidement du dioxyde de carbone provenant de la dissociation des carbonates de calcium et/ou magnésium présents.



La teneur de calcaire total du sol (Photo 7) est alors calculée à partir du volume de CO_2 dégagé. Suivant sa nature et son origine, le calcaire est reparti dans les différentes fractions granulométriques. Celui qui est présent dans la fraction inférieure à $20 \mu\text{m}$, susceptible de se solubiliser facilement et d'être à l'origine d'une teneur en Ca^{+2} élevée dans la solution du sol, correspond au **calcaire actif** (Photo 8). Celui-ci est mesuré globalement au moyen de l'oxalate d'ammonium par la méthode Drouineau-Galet selon la norme **AFNOR X 31-106 (Drouineau, 1942)**. (Voir le protocole dans l'Annexe I).



Photo 7 : Dosage du calcaire total (Cliché Kecir, 2024).



Photo 8 : Dosage du calcaire actif (Cliché Kecir, 2024).

f. Dosage de la matière organique

▪ Principe

D'après *Schwartz et al. (2005)*, la teneur en carbone organique (CO) est déterminée par la méthode Anne (oxydation par le dichromate de potassium en milieu sulfurique, à chaud ou à froid (NF ISO 14235) (Photo 9).

La quantité de matière organique est ensuite estimée en multipliant la formule suivante ($MO = CO * 1.72$).

L'azote totale (N) est obtenu en appliquant la formule ($N = MO * 0.05$). (Voir le protocole dans l'Annexe I).

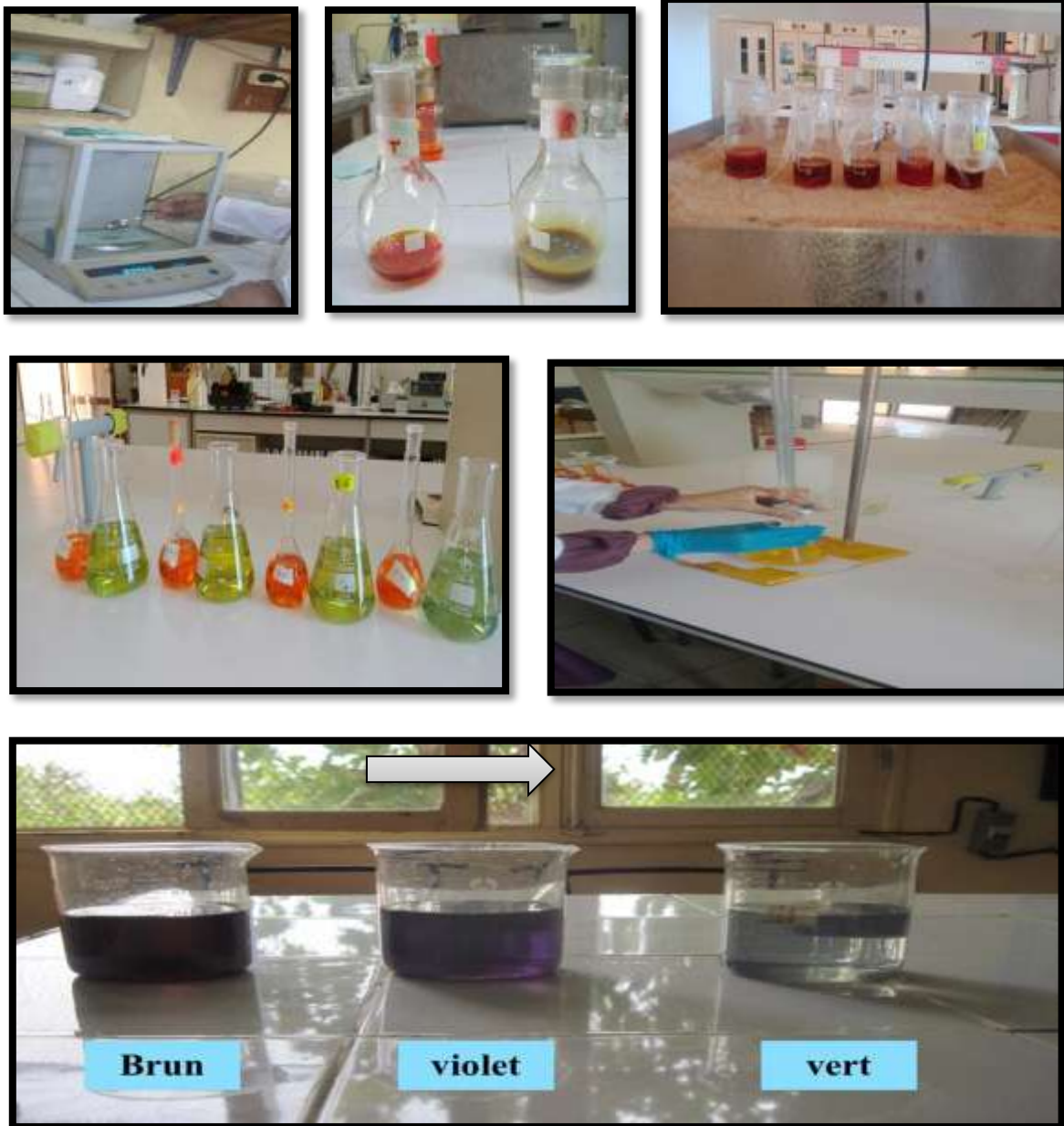


Photo 9 : Dosage du carbone organique par la méthode Anne (Cliché Kecir, 2024).

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 10, Tableau 7).



Photo 10 : La bentonite (Cliché Kecir, 2024).

Tableau 7 : 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 11).



Photo 11 : Le fumier de bovin (Cliché Kecir, 2024).

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.

- **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 (Photo 12).



Photo 12 : Préparation des pots de repiquage (Cliché Kecir, 2024).

- **Reconstitution du sol :** remplir les pots avec 10kg de sol reconstitué (Photo 13): 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 7).



Photo 13 : Sols reconstitués (Cliché Kecir, 2024).

Tableau 8 : Les sols reconstitués.

Traitement		Composition (kg)		
		Amendement		Sol
		Minéral (Argile)	Organique (Fumier)	
		10kg/pot		
Témoin	T : sol nu	0	0	10
A : Argile	A 2.5%	0.250	0	9.750
	A 5%	0.500	0	9.500
	A 7.5%	0.750	0	9.250
	A 10%	1	0	9
	A 15%	1.5	0	8.5
	A 20%	2	0	8
AF : Mélange	AF 2.5%	0.125	0.125	9.750
	AF 5%	0.250	0.250	9.500
	AF 7.5%	0.375	0.375	9.250
	AF 10%	0.500	0.500	9
	AF 15%	0.750	0.750	8.5
	AF 20%	1	1	8
F : Fumier	F 2.5%	0	0.250	9.750
	F 5%	0	0.500	9.500
	F 7.5%	0	0.750	9.250
	F 10%	0	1	9
	F 15%	0	1.5	8.5
	F 20%	0	2	8

- **Arrosage :** arroser les pots deux fois par semaine pour permettre aux amendements de bien se tasser (Photo 14).



Photo 14 : Arrosage des pots (Cliché Kecir, 2024).

- **Prélèvement du sol avant la mise en culture** : prélever de chaque pot un échantillon de sol reconstitué (T1 : 04/03/2024), 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 (Photo 15).



Photo 15 : Prélèvement du sol avant la mise en culture (Cliché Kecir, 2024).

- **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 (Photo 16).

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



Photo 16 : Le repiquage des plants de poivron dans les pots (Cliché Kecir, 2024).

- **Estimer le rendement de poivrons par pot :** estimer la quantité par kg après la récolte de poivron par pot (Photo 17).



Photo 17 : Récolte du poivron (Cliché Kecir, 2024).

I.5.4. Analyses physiques des sols reconstitués

A. Densité apparente

▪ Principe

La détermination de la densité apparente elle-même revient à mesurer le volume apparent occupé par poids connu de matériau sec (Grosbollet, 2008), par l'utilisation de la méthode du cylindre calibré (205.04 cm^3) (Blake et Hartge, 1986).

▪ Mode opératoire

La détermination de la densité apparente (Photo 18) est basée sur l'utilisation de la méthode du cylindre calibré ($252,2 \text{ cm}^3$). Le protocole se fait comme suite :

- Enfoncez le cylindre à volume connu dans le sol.
- Sécher le contenu du cylindre à l'étuve pendant 24 heures à 105°C .
- Peser l'échantillon séché (P), après l'avoir laissée refroidir à la température ambiante dans un dessiccateur.

- **Calcul**

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

D_a : Densité apparente en g/cm³.

P : Poids sec (g).

205,04 : Volume du cylindre en cm³.



Photo 18: Mesure de la densité apparente à l'aide de cylindre.

B. Porosité

- **Principe**

D'après **Grosbollet (2008)**, la porosité totale d'un sol, c'est-à-dire la fraction d'un volume unitaire qui n'est pas occupée par la phase solide permet de caractériser de façon globale et commode d'état physique d'une couche de sol. On sait qu'on la détermine le plus souvent de façon indirecte à partir de mesure de la densité apparente (D).

- **Calcul**

On calcule la porosité totale à partir de densité apparente (d_a), et la densité réelle (D) :

$$\text{Porosité totale (\%)} = 1 - D_a/D$$

C. La densité réelle (Méthode classique au pycnomètre)

- **Principe**

D'après **Mathieu et al. (2003)**, on effectue la mesure du poids et du volume de la phase solide d'un échantillon sec (Photo 19). La mesure du volume est réalisée par déplacement de liquide.

On peut opérer sur un échantillon humide dont l'humidité est connue ; ceci entraîne une correction dans le calcul. Mais c'est une procédure à éviter.

▪ Mode opératoire

La méthode consiste à faire une série de quatre pesées a, b, c, d dont on déduit le poids et le volume de l'échantillon.

a : Le pycnomètre vide ;

b : Le pycnomètre contenant le sol à étudier ;

c : Le pycnomètre + sol+ eau ;

d : Le pycnomètre rempli d'eau.

▪ calcul

On a: poids = b - a

Volume: (d - a) - (c - b)

d'où $D = (b - a) / ((b + d) - (a + c))$



Photo 19: Mesure de la densité réelle par le pycnomètre.

D. Stabilité structurale

▪ Principe

Cette méthode (Photo 20) repose sur une évaluation de la stabilité des agrégats (**Mathieu et al., 2003**).

▪ Mode opératoire

- 10 g de terre 0.2 mm \leftrightarrow 2 mm ;
- Dans un bécher de 250 ml on met 10 g de terre + 10 ml d'alcool de le 1^{er} bécher, 10 ml de benzène dans le deuxième bécher+ 250 ml eau distillée dans le 3^{eme} bécher ;
- 5 mn après, compléter le 1^{er} et 2^{eme} bécher avec l'eau distillée jusqu'à 250 ml ;
- Laisser reposer 25 mn ;
- 30 mn après vider le contenu dans un erlenmayer de 750 ml par entonnoir ;
- Rincer le bécher en évitant d'envoyer le jet sur les agrégats ;
- Agiter en 20 retournements successifs assez énergétiquement de l'erenmayer (avec tous les échantillons) ;

- Verser le contenu de l'erenmayer sur le tamis 0.2 mm ;
- D'un jet de pissette faire passer les agrégats dans une petite capsule de porcelaine de 5 ml ;
- Sécher les agrégats a l'étuve à 150 °C pesé même opération pour les béchers 2 et 3
Les poids obtenus multiples par 10 donnant le % d'agrégat stables à l'eau après prétraitement à l'alcool et au benzène ;
- Effectuer la moyenne des chiffres obtenus



Photo 20: Mesure de la stabilité structurale (Cliché Kecir, 2024).

▪ Calcul

$I_s = \% (\text{argile} + \text{limon}) / (\% \text{ moyen des agrégats grossier} - 0.99 \cdot (\% \text{ sable grossier}))$

I_s : indice d'instabilité.

E. Perméabilité

▪ Principe

D'après Grosbollet (2008), les échantillons saturés sont soumis à une charge d'eau constante (Photo 21). Une fois le régime permanent établi, on mesure le débit sortant.

Calcul

La conductivité hydraulique à saturation est obtenue par la formule suivante :

$$K_s = L V / A t \Delta H$$

Avec :

L : hauteur de sol dans l'anneau plastique (m)

V : volume d'eau circulant à travers l'échantillon (m³) pendant le temps t

A : section de l'échantillon traversée (m²)

t : temps pendant lequel on mesure le débit (s)

ΔH : charge hydraulique (m)

K_s : conductivité hydraulique, (m/s)



Photo 21: Mesure de la perméabilité (Cliché Kecir, 2024).

F. La rétention en eau

▪ Mode opératoire

Selon **Petard (1993)**, trente grammes (30g) de sol frais (Photo 22) ont été pesés dans un tube en verre (2 cm de diamètre, 10 cm de hauteur). De l'eau distillée a ensuite été ajoutée jusqu'à saturation du sol. Le cylindre et son contenu ont été placés à 4°C (12h) pour permettre le drainage de l'eau gravitaire, puis ils ont été pesés. La teneur en eau de cet échantillon saturé, dit à la capacité au champ, a finalement été déterminée par séchage du cylindre au four (105°C, 24h) et soustraction des masses de sol sec et de sol saturé.

▪ Calculs

$$RE (\%) = \frac{P1 - P2}{P2} \cdot 100$$

Dont :

RE : rétention en eau (%)

P1 : poids humide (g)

P2 : poids sec (g)



Photo 22: Mesure de la rétention en eau (Cliché Kecir, 2024).

Chapitre II :

Résultats et discussion

II.1. Caractérisation physico-chimiques du sol témoin

Les résultats dégagés de cette étude (Tableau 9) révèlent que le sol témoin se caractérise comme suite:

- Une dominance de la fraction sableuse (87%) avec une présence de faibles proportions de limons (8,5%) et d'argiles (4,5%). D'après le triangle des classes texturales (Figure 3, Chapitre I), notre sol présente une texture *Sableuse* ;
- Peu calcaire (Tableau 14, Annexe III), il contient de faibles proportions en CaCO₃ total (7,42 %) et CaCO₃ actif (2 %) ;
- Non salin (230,66 µS/cm) (Tableau 15, Annexe III) ;
- Un pH basique 7,60 (Tableau 16, Annexe III) ;
- Pauvre en matière organique (1,38 %) (Tableau 17, Annexe III) ;
- Très pauvre en azote total (0,070 %) (Tableau 18, Annexe III).

Tableau 9 : Caractérisation physico-chimiques du sol témoin.

Caractéristiques		Sol témoin
Profondeur (cm)		0 – 20
Granulométrie	S (%)	87
	L.G (%)	5
	L.F (%)	3,5
	A (%)	4,5
Classe Texture		<i>Sableuse</i>
pH eau		7,60
CE µS/cm		230,66
CO (%)		0,802
MO (%)		1,38
N total (%)		0,070
CaCO ₃ total (%)		7,42
CaCO ₃ actif (%)		2

II.2. Résultats de l'analyse granulométrique

a. Sols amendés par la bentonite

Les résultats de l'analyse granulométrique montrent que les modifications enregistrées, sur le plan textural, dans le sol sableux suite aux apports de doses croissantes de bentonite sont très importantes notamment pour le traitement A15 et significativement pour le traitement A20 (Tableau 10).

Des résultats contradictoires ont été trouvés par **Benkhelifa et Daoud (1998)**, qui n'ont trouvé aucun effet significatif de six doses de bentonite jusqu'à 15% (2.5%, 5%, 7.5%, 10%, et 15%) sur la modification de la classe texturale d'un sol sableux dans la même région d'étude (Mostaganem).

Tableau 10 : Fractions granulométriques en fonction des doses de bentonite.

Doses de bentonite	0%	2,5%	5%	7,5%	10%	15%	20%
Traitement	A0	A2.5	A5	A7.5	A10	A15	A20
Argiles (%)	4,5	6,89	9,28	11,66	14,05	18,82	23,60
Limons (%)	8,5	8,29	8,07	7,86	7,65	7,23	6,80
Limons fin (%)	3,5	3,41	3,32	3,24	3,15	2,98	2,80
Limons grossiers (%)	5	4,88	4,75	4,62	4,50	4,25	4,00
Sables (%)	87	84,82	82,65	80,48	78,30	73,95	69,60
SG (%)	60,08	58,58	57,08	55,56	54,06	51,07	48,05
SF (%)	26,92	26,24	25,57	24,92	24,24	22,88	21,55
Classe texturale	<i>Sableuse</i>	<i>Sablo-limoneuse</i>	<i>Sablo-limoneuse</i>	<i>Sablo-limoneuse</i>	<i>Sablo-limoneuse</i>	<i>Limono-sableuse</i>	<i>Limon argilo-sableuse</i>

b. Sols amendés par le mélange (bentonite + fumier)

Les résultats de l'analyse granulométrique montrent que les modifications enregistrées, sur le plan textural, dans le sol sableux suite aux apports de mélange (bentonite + fumier) ne sont pas importants (Tableau 11).

Tableau 11 : Fractions granulométriques en fonction des doses de mélange (bentonite + fumier).

Doses du mélange (bentonite + fumier)	0%	2,5%	5%	7,5%	10%	15%	20%
Traitement	AF0	AF2.5	AF5	AF7.5	AF10	AF15	AF20
Argiles (%)	4,5	5,69	6,89	8,09	9,28	11,66	14,05
Limons (%)	8,5	8,39	8,29	8,18	8,07	7,86	7,65
Limons fin (%)	3,5	3,45	3,41	3,36	3,32	3,24	3,15
Limons grossiers	5	4,94	4,88	4,82	4,75	4,62	4,50
Sables (%)	87	85,92	84,82	83,73	82,65	80,48	78,30
SG (%)	60,08	59,33	58,58	57,83	57,08	55,57	54,06
SF (%)	26,92	26,59	26,24	25,9	25,57	24,92	24,24
Classe texturale	<i>Sableuse</i>	<i>Sablo-limoneuse</i>	<i>Sablo-limoneuse</i>	<i>Sablo-limoneuse</i>	<i>Sablo-limoneuse</i>	<i>Sablo-limoneuse</i>	<i>Sablo-limoneuse</i>

c. Sol amendés par le fumier

Les résultats de l'analyse granulométrique montrent qu'il n'y a aucune modification enregistrée, sur le plan textural, dans du sol sableux étudié.

II.3. Résultats des analyses physiques des sols amendés

II.3.1. Densité apparente

La densité apparente du sol traduit globalement l'état de compaction du sol et indirectement, la porosité totale (Alongo et Kombele, 2009). Elle est l'un des paramètres les plus importants dans les études portant sur la structure du sol (Chauvel, 1977).

En se référant au Tableau 19 (Annexe III) et d'après la Figure 17, on constate que le sol étudié a une densité apparente idéale pour la croissance des plantes puisqu'il a une densité apparente inférieure à $1,60 \text{ g/cm}^3$ de l'ordre de $1,26 \text{ g/cm}^3$.

De plus, il a une structure favorable au développement racinaire puisqu'il a une densité apparente inférieure à $1,80$ (Tableau 21, Annexe III).

Les valeurs de la densité apparente des sols amendés se situent entre $1,23 \text{ g/cm}^3$ et $1,37 \text{ g/cm}^3$ pour l'amendement minéral (bentonite), entre $1,13 \text{ g/cm}^3$ et $1,33 \text{ g/cm}^3$ pour le mélange (bentonite + fumier) et entre $1,09 \text{ g/cm}^3$ et $1,27 \text{ g/cm}^3$ pour l'amendement organique, donc une légère diminution a été observée pour les traitements suivants : AF10% ($1,17 \text{ g/cm}^3$), AF15% ($1,15 \text{ g/cm}^3$), AF20% ($1,13 \text{ g/cm}^3$), F10% ($1,19 \text{ g/cm}^3$), F15% ($1,09 \text{ g/cm}^3$) et F20% ($1,11 \text{ g/cm}^3$). Selon Mermound (2010), une valeur élevée de densité apparente signifie que les vides sont réduits et que les particules sont fortement compactées, cela veut dire que nos sols étudiés sont légers.

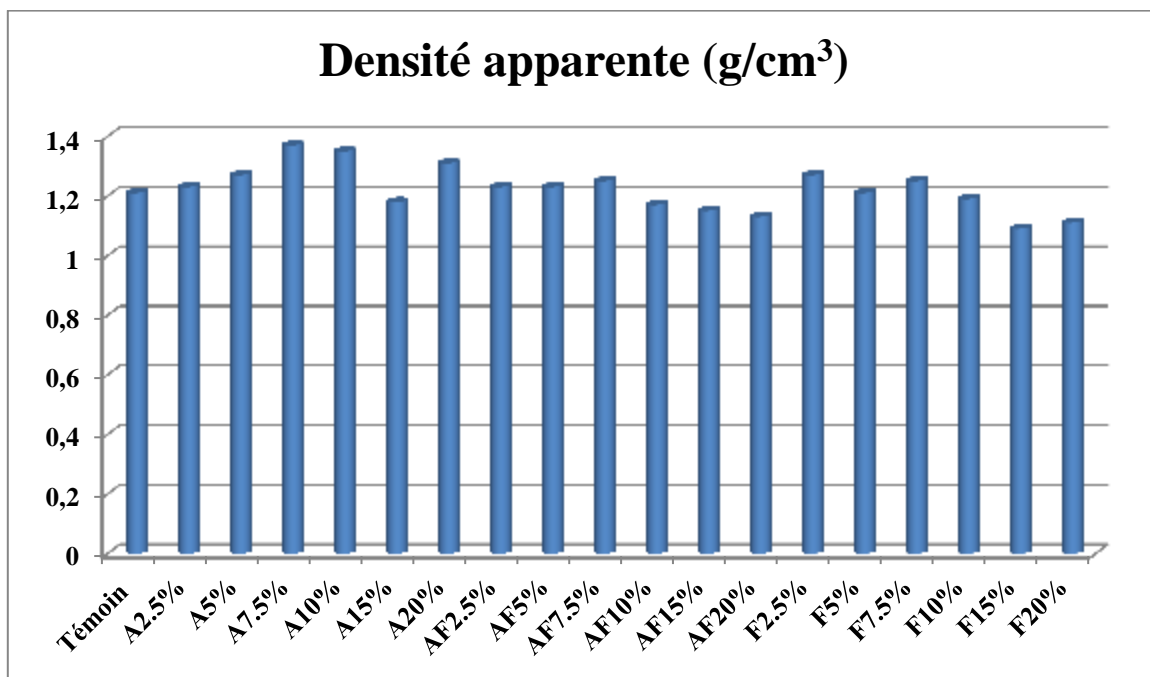


Figure 17 : Évolution de la densité apparente en fonction des doses de la bentonite, du fumier et du mélange.

II.3.2. Porosité

D'après la figure 18, la porosité augmente avec l'apport du fumier et du mélange (bentonite + fumier) en comparaison avec le témoin (45,08%). Cette évolution s'accroît avec l'augmentation des doses apportées. D'après les normes d'interprétation de la porosité (Tableau 20, Annexe III), notre sol est considéré comme très poreux.

L'amendement minéral (bentonite) a diminué la porosité significativement avec l'augmentation de la dose apportée de l'ordre de 44,09%, 42,37%, 38,04%, 39,60%, 36,21 et 34,50% pour respectivement A2.5%, A5%, A7.5%, A10%, A15%, et A20%, rendant le sol poreux. L'amendement organique a évolué la porosité significativement avec l'augmentation de la dose apportée. L'amélioration est plus remarquable pour les traitements AF10% (47,47%), AF15% (48,66%), AF20% (49,97%), F15% (46,78%) et F20% (53,01%), ceci s'explique par : (i) l'augmentation de la teneur en argile qui protège la matière organique contre la dégradation et la minéralisation, (ii) l'augmentation de la teneur en matière organique (qui rend le sol plus facile à travailler car il est plus léger) et (iii) par la texture du fumier et encore à l'activité biologique que leur incorporation provoque (**Grosbellet, 2008**). D'après **Doucet (2006)**, la matière organique exogène améliore la structure des sols car l'humus qui en résulte prévient le tassement en une masse solide et favorise la granulation des particules, rendant les sols plus légers, plus poreux et mieux aérés. D'après **Siboukeur (2013)**, la matière organique agit comme régulateur de l'humidité du sol et elle augmente sa porosité et favorise sa conductivité hydraulique. L'amélioration de la densité apparente et la porosité signifie que les amendements mixtes ont un effet de structuration (**Samreen et al., 2017**).

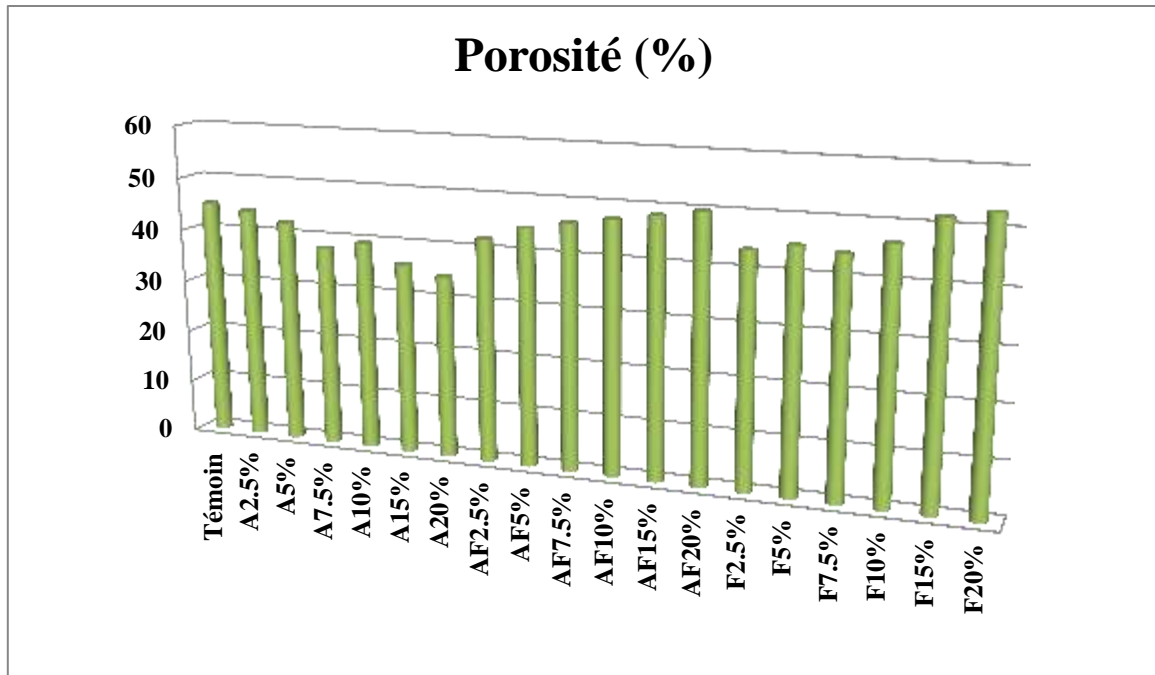


Figure 18 : Évolution de la porosité en fonction des doses de la bentonite, du fumier et du mélange.

II.3.3. Perméabilité

La perméabilité a été mesurée avec des échantillons non déstructurés et les valeurs ont été calculées à partir de la loi de Darcy. La mesure de la perméabilité réalisée sur le témoin est de l'ordre de $(45,08 \times 10^{-6} \text{ m/s})$. D'après les classes de la perméabilité en fonction de la valeur K_s (Tableau 21, Annexe III), notre sol est considéré comme perméable.

Selon les résultats de la figure 19, une nette réduction de la perméabilité est enregistrée pour l'ensemble des traitements à base de bentonite. Cette réduction s'accroît avec l'augmentation de la dose de bentonite. Il est important de remarquer que les différentes doses de bentonite n'affectent pas de la même manière la perméabilité du sol. Ainsi le taux de diminution relative au témoin de la perméabilité est de 2,2 %, 6,05%, 12,15%, 15,61%, 19,68% et de 23,47% pour les doses de 2,5%, 5%, 7,5% , 10%, 15% et 20% de bentonite respectivement, En effet, la distribution des pores selon les dimensions dépend étroitement de la texture du mélange (**Cmamayou, 1984**). De plus les sols à textures fines étant les moins perméables, mais pour un sol donné, la perméabilité dépend également de sa structure (**Grosbellet, 2008**). Pour les traitements à base de fumier et de mélange (bentonite + fumier), la perméabilité (figure 19) a évolué fortement et d'une façon très hautement significative ($P < 0.001$) à partir de la dose 7,5% (F 7,5% et AF 7,5%). Ce résultat est surprenant dans la mesure où ce type de fumier est riche en fragments grossiers, qui devraient permettre d'augmenter de façon

significative la perméabilité (Grosbellet, 2008). Selon CPVQ (2000), la paille de céréales est une excellente source de matière organique contenue dans les fragments grossiers de fumier. La matière organique peut influencer les mesures de perméabilité par la taille des particules, ainsi que par la dose apportée (Zeytin et Baran, 2003). L'amélioration de la perméabilité pourrait s'expliquer notamment par la quantité d'humus qui en résulte après la décomposition de la matière organique, rendant les sols plus meubles et augmentant ainsi leur perméabilité à l'air et à l'eau (Doucet, 2006). Elle dépend également du volume poral (macroporosité), plus ce dernier augmente et plus la perméabilité est susceptible d'augmenter (Bottinelli, 2010). La richesse des fumiers en particules grossières aurait pu entraîner un effet "mécanique" (Khaleel, 1981 ; Garcia-Orenes, 2005) en créant une macroporosité importante. En ce qui concerne l'importance de la dose de matière organique, globalement, la perméabilité augmente avec la teneur en matière organique, ce qui est cohérent avec nos résultats et conformes aux études (Zeytin et Baran, 2003 ; Grosbellet, 2008 ; Benouadah *et al.*, 2020). Hillel (1974) ; Khaleel (1981) ont montré que l'application du fumier de ferme a également amélioré la perméabilité et la densité apparente du sol. De plus Derrien *et al.*, (2013) ont montré que l'application des minéraux argileux protègent la matière organique de l'activité minéralisatrice des microorganismes du sol. Pour cette raison, il faut faire une combinaison entre les amendements organiques et minéraux.

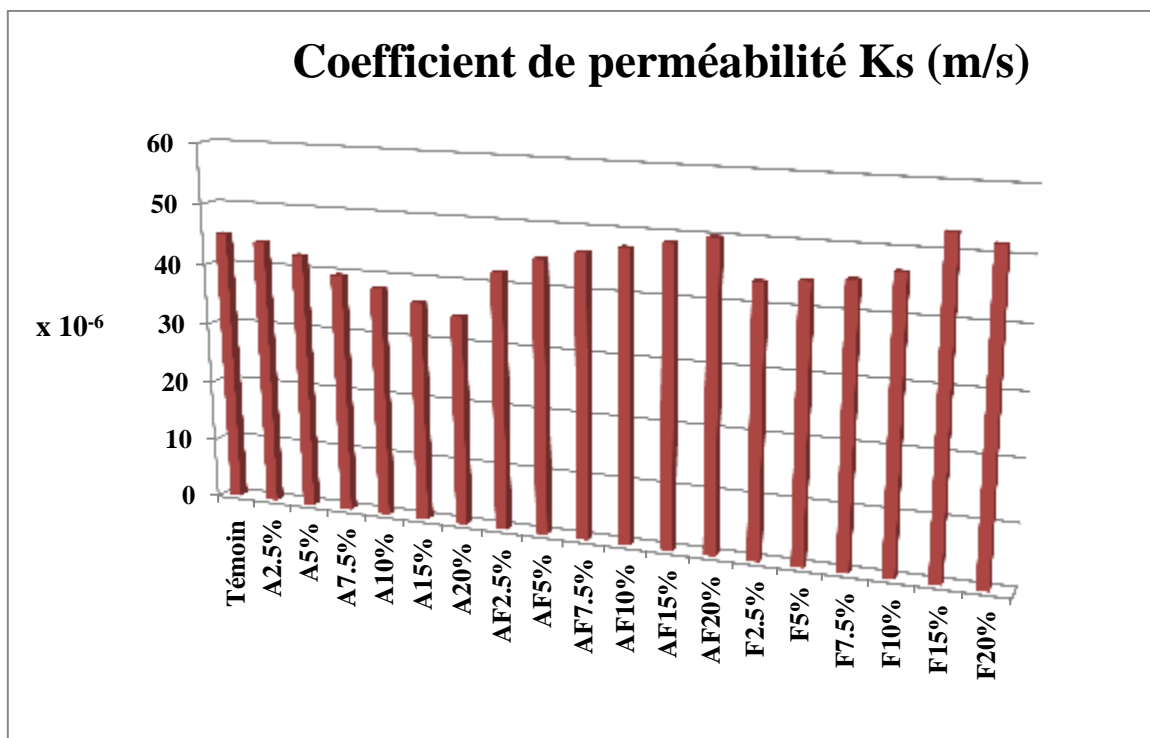


Figure 19 : Évolution de la perméabilité en fonction des doses de la bentonite, du fumier et du mélange.

II.3.4. Rétention en eau

La rétention en eau comme la perméabilité ont été mesurées dans des échantillons non déstructurés. Les résultats analytiques illustrés dans la figure 20 montrent qu'à partir de la dose de 10% de fumier et de mélange, on a enregistré une augmentation de la capacité de rétention en eau (AF10%, AF15%, AF20%, F10%, F15% et F20%, avec respectivement 30,23%, 30,45%, 32,49%, 29,06%, 30% et 32,38%), qui sont supérieures à celle du témoin de l'ordre de 28,47%. De plus, Il a été intéressant de constater que l'effet le plus hautement significatif a été observé par le traitement A20% avec une valeur de 33,35%.

Le fumier en cours d'humification comme toutes les autres sources de matière organique a amélioré significativement et durablement les propriétés de rétention en eau des sols amendés à base de fumier et de mélange, **Mohammad (2003)**, ont indiqué que la matière organique retient d'autant mieux l'eau qu'elle est humifiée car l'humus qui en résulte favorise une meilleure réserve en eau, grâce à son pouvoir d'absorption (caractère hydrophile) élevé, et tend, du même coup à réduire l'évaporation et à augmenter la résistance à la sécheresse (**Doucet, 2006 ; Citeau, 2008**). Selon **Sophie et Christian (2010)**, le taux d'acide fulvique de la matière organique augmente en fonction de son humification et par conséquent la quantité d'eau absorbée par la matière organique augmente. Nos résultats sont cohérents avec de nombreuses recherches qui montrent que la matière organique apportée améliore d'une façon déterminante les propriétés de rétention en eau (**Rawls et al., 2003 ; Benouadah et al., 2020**). Tandis que, **Dridi et Toumi (1999)** ont trouvé des résultats contradictoires qui révèlent que le fumier n'améliore pas de façon efficace la réserve en eau.

Les matières organiques sont de 2 à 5 fois plus absorbantes que les meilleures argiles (**Gobat et al., 2003**). Ceci est dû au fait que les composés humiques possèdent une charge négative supérieure à celle des colloïdes minéraux (**Soltner, 2003**). En général, la matière organique retient physiquement plus d'eau que les composés minéraux du sol (sable, limon et argile), ainsi elle augmente la rétention du sol en eau (**Koull et Halilat, 2016**). Ça n'a pas été le cas à partir de la dose de 20% de bentonite qui a fait améliorer la capacité de rétention en eau d'une façon très significative, cette amélioration de la capacité de rétention du sol sous apport bentonite à 20% est bien reflétée par l'évolution de la microporosité. La microporosité est formée des pores dont le diamètre est compris entre 6 pm et 0,2 pm. C'est elle qui retient l'essentiel de la réserve en eau utilisable par les plantes (**Callot, 1983 ; Rognon, 1994**).

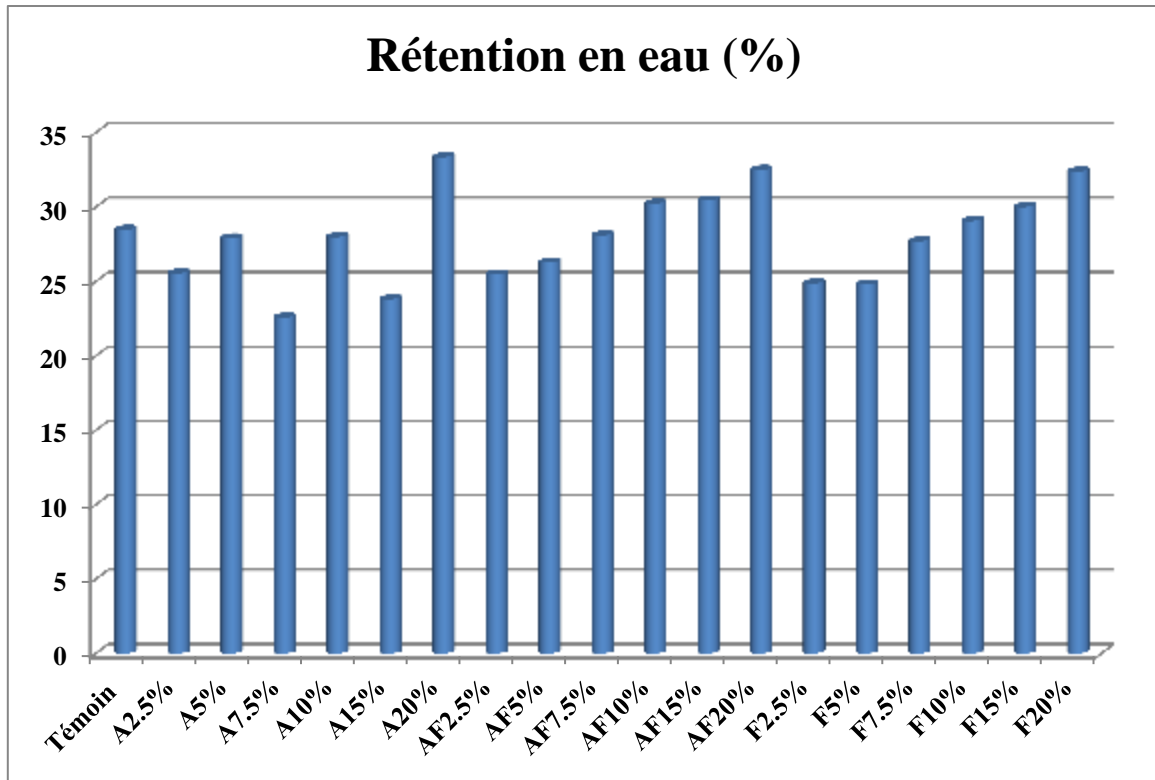


Figure 20 : Évolution de la rétention en eau en fonction des doses de la bentonite, du fumier et du mélange.

II.3.5. Stabilité structurale

La stabilité structurale du sol signifie la résistance opposée par les agrégats contre toute action des facteurs externes tendant à les dégrader ou à les détruire, et celle de l'eau en particulier (Mathieu *et al.*, 2003).

Les résultats envisagés dans la figure 21 révèlent que l'indice d'instabilité (I_s) du témoin est de (1,50) durant l'expérimentation. D'après les classes de stabilité structurale (Tableau 22, Annexe III), le sol initial a une stabilité médiocre (Mathieu *et al.*, 2003). En ce qui concerne les sols amendés, l'indice d'instabilité a diminué significativement ($P < 0.001$). Cette diminution s'accroît avec l'augmentation de la dose des amendements. Les plus faibles valeurs ont été enregistrées par le mélange (bentonite + fumier), de l'ordre de 0,99, 0,90, 0,80, 0,84, 0,81 et 0,76 obtenue sous le traitement AF2.5, AF5, AF7.5, AF10, AF15, et AF20 respectivement. Ces résultats mettent en évidence le rôle de la combinaison des amendements minéraux et organiques dans la stabilisation de la structure (Grosbellet, 2008). De plus, la matière organique du sol est protégée de la dégradation par les particules d'argile, les sols argileux («lourds») ont naturellement une teneur en matière organique plus élevée que les sols sableux. La stabilité structurale des sols légers et moyennement légers (jusqu'à 30% d'argile)

augmente avec l'augmentation de la teneur en matière organique du sol (Zihlmann *et al.*, 2019). Les matières organiques assurent la cohésion des autres constituants du sol entre eux tel que l'argile et l'humus et contribuent à la structuration du sol et à sa stabilité (Grosbellet, 2008). Ainsi, la matière organique apportée au sol joue un rôle central dans sa structuration et participe à sa stabilité vis-à-vis des agressions extérieures (pluie, tassement...) en limitant notamment l'érosion hydrique (Citeau, 2008).

La stabilité structurale joue un rôle important dans la fertilité physique du sol car elle influence l'aération, la circulation de l'eau et la perméabilité (Mathieu *et al.*, 2003).

Les matières organiques, à la surface du sol, atténuent le choc des gouttes des pluies et permettent à l'eau pure de s'infiltrer lentement dans le sol ; l'écoulement en surface et l'érosion sont ainsi réduits (Balesdent, 1996).

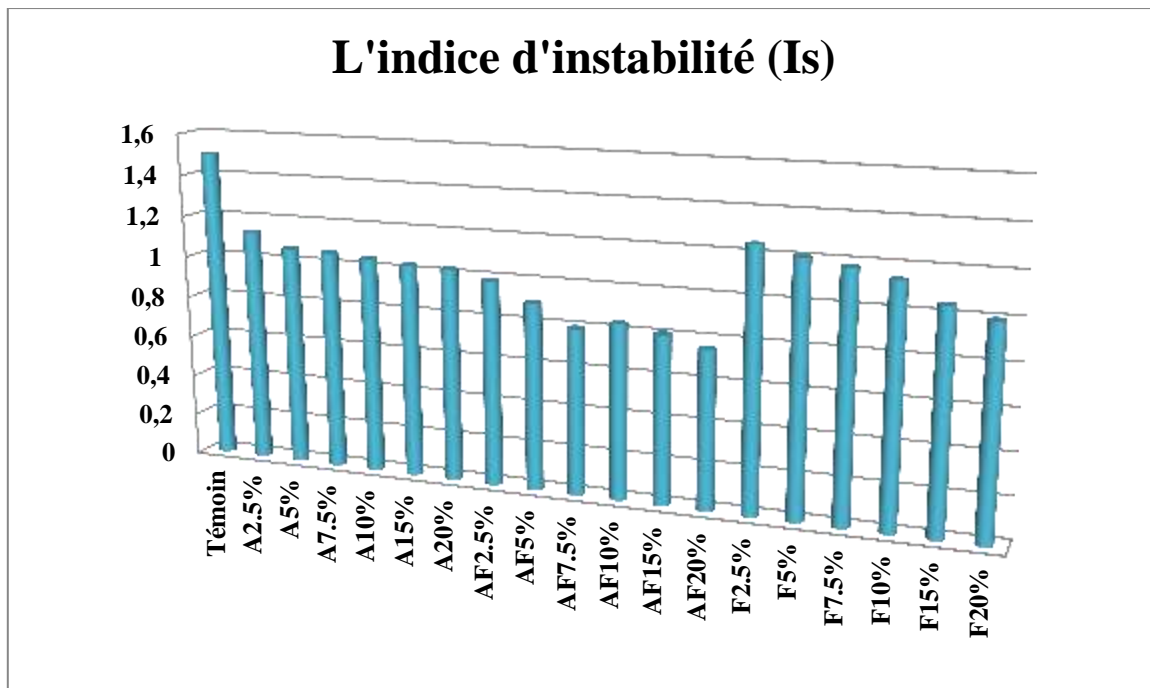


Figure 21 : Évolution de l'indice d'instabilité en fonction des doses de la bentonite, du fumier et du mélange.

II.4. Estimation du rendement de la culture du poivron

Les résultats préliminaires de la production de la culture du poivron sont représentés dans le Tableau 12 et qui indiquent que la dose de 10% de bentonite qui donne le meilleur rendement avec 59,6 g suivi par les traitements F10% (32,66 g) et AF20% (31 g) respectivement en comparaison le témoin (15 g), cela peut être due aux éléments fertilisants contenus dans la bentonite.

Tableau 12 : Rendement de la culture du poivron.

Traitement	Production (g/pot)	Traitement	Production (g/pot)	Traitement	Production (g/pot)
A2.5%	16,3	AF2.5%	13,3	F2.5%	10,6
A5%	18,7	AF5%	17	F5%	10,3
A7.5%	14,6	AF7.5%	15,3	F7.5%	10,3
A10%	59,6	AF10%	9	F10%	32,66
A15%	30,6	AF15%	11,6	F15%	22,3
A20%	28	AF20%	31	F20%	19
Témoin : 15 g/pot					

Conclusion générale

Conclusion générale

Les résultats de cette étude, nous permet de dire que l'application d'amendement a amélioré les propriétés physiques du sol avec une importance et une durabilité meilleure pour le mélange (bentonite + fumier) avec la dose 20%.

*Pour la densité apparente, une légère diminution a été observée pour les traitements suivants: AF10%, AF15%, AF20%, F10%, F15% et F20%.

*Avec l'augmentation des doses apportées, la porosité augmente avec l'apport du fumier et du mélange (bentonite + fumier) et diminue avec l'apport de la bentonite significativement en comparaison avec le témoin.

*Une nette réduction de la perméabilité est enregistrée pour l'ensemble des traitements à base de bentonite. Cette réduction s'accroît avec l'augmentation de la dose de bentonite. Par contre, pour les traitements à base de fumier et de mélange (bentonite + fumier), la perméabilité a évolué fortement partir de la dose 7,5% (F 7,5% et AF 7,5%).

*La capacité de rétention en eau a augmentée à partir de la dose de 10% de fumier et de mélange, mais l'effet le plus hautement significatif a été observé par le traitement A20%.

*Pour les sols amendés, l'indice d'instabilité a diminué significativement, cette diminution s'accroît avec l'augmentation de la dose des amendements. Les plus faibles valeurs ont été enregistrées pour les sols amendés à base du mélange (bentonite + fumier).

*La dose de 10% de bentonite a donné le meilleur rendement suivi par les traitements F10% et AF20% respectivement en comparaison le témoin.

Ces résultats mettent en évidence le rôle de la combinaison des amendements minéraux et organiques dans la stabilisation de la structure et l'amélioration de la fertilité du sol, 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 ce qui aboutit à l'augmentation du rendement.

Enfin, les propriétés physiques du sol peuvent être influencées par la dose et les propriétés de l'amendement apporté (fumier : frais ou décomposé, teneurs en fragments grossiers et en éléments fertilisants, bentonite : composition chimique et propriétés physiques, ...etc).

Les amendements contribuent positivement à la protection et à la mise en valeur de nos ressources édaphiques, car ils apportent une première solution à une problématique actuelle qui est la perte de fertilité des sols (300 000 ha de terre agricole à l'échelle locale) et la diminution de leur capital organique en région semi-aride.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- ❖ **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.
- ❖ **Adden, A-K. (2004).** Évaluation quantitative ce composts de biomasses diverses et leur phytotoxicite. Maîtrise .Université de Lomé. 44p.
- ❖ **Aimrun, W., Amin, M., Eltaib, S-M. (2004).** Effective porosity of paddy soils as an estimation of its saturated hydraulic conductivity. *Geoderma*, 121(3 et 4) : 197-203.
- ❖ **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.
- ❖ **Alvaro-Fuentes, J., Cantero-Martinez, C., Lopez, M-V. (2007).** Soil carbon dioxide fluxes following tillage in semiarid Mediterranean agroecosystems. *Soil and Tillage Research*, 96 (1 et 2) : 331-341.
- ❖ **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.
- ❖ **Balesdent, J. (1996).** Unpoint sur l'évolution des réserves organiques des sols en France, INRA, Paris, 260p.
- ❖ **Baize, D. (2000).** Guide des analyses en pédologie. 2ème Ed. INRA. Paris. 257p.
- ❖ **Baize, D. et Jabiol, B. (1995).** Guide pour la description des sols. Ed. INRA. Paris. 375p.
- ❖ **Batouchek, H. (2010).** Intercalation de liquides ioniques dans les argiles. Thèse de Magistère. Université de Constantine. 118p.
- ❖ **Bedjadj, S. (2011).** Contribution à l'étude des caractéristiques microbiologiques des sols dans la région de Ouargla (Cas de l'exploitation de l'université de Ouargla). Mémoire de d'Ingéniorat. Université Kasdi Merbah Ouargla. 126p.
- ❖ **Belnap, J. (2002).** Impacts of off-road vehicles on nitrogen cycles in biological soil crusts: resistance in different U.S. deserts. *Journal of Arid Environments*, 52 (2), 1186-1191.
- ❖ **Benkhelifa, M. et Daoud, Y. (1998).** Influence de la bentonite sur les propriétés

Références bibliographiques

physiques d'un sol sableux. *Annales de l'Institut National Agronomique - El Harrach*, 79 (1 et 2) : 18-29.

❖ **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 (Ti-aret, Algeria). *J. Fundam. Appl. Sci*, 12(3), 1386-1403.

❖ **Bernoux, M. and Chevallier, T. (2013).** Carbon in dry areas. Multiple functions indispensable. Thematic files of the CSFD/Agropolis International, 10: 1-44.

❖ **Bigorre, F. (2000).** Influence de la pédogenèse et de l'usage des sols sur leurs propriétés physiques : mécanismes d'évolution et éléments de prévision. Thèse de doctorat, France, Université Nancy. 145p.

❖ **Bissonnais, Y., Daroussin, J., Jamagne, M., Lambert, J-J., Le Bas, C., King, D., Cerdan, O., Léonard, J., Bresson, L-M. and Jones, R-J-A. (2005).** Pan-European soil crusting and erodibility assessment from the European Soil Geographical Database using pedotransfer rules. *Advances in Environmental Monitoring and Modelling*, 2 (1): 1-15.

❖ **Blake, G.R. and Hartge, K. (1986).** Bulk density. *Methods Soil Analysis*, 5: 363–375.

❖ **Boifin, J. (1976).** La dégradation structurale des couches superficielle du sol sous l'action des pluies. Thèse de Doctorat, Paris-grignon, Institut National Agronomique, 100p.

❖ **Bottinelli, N. (2010).** Evolution de la structure et de la perméabilité d'un sol en contexte de non labour associé à l'apport d'effluent d'élevage : rôle de l'activité lombricienne. Thèse de Doctorat INRA. 222p.

❖ **Briat, J.F. et Job D. (2010).** Les sols et la vie souterraine. *in* Des enjeux majeurs en agroécologie. Ed. *QUAE*. 243p.

❖ **Bruand, A. and Dexter, A.R. (2011).** Slumping dynamics in tilled sandy soils under natural rainfall and experimental flooding. *Soil and Tillage Research*, 114 (1): 9-17.

❖ **Bouras, O. (2003).** Propriétés adsorbantes d'argiles pontées organophiles: Synthèse et caractérisation, Thèse de Doctorat, Université de Limoges. 189p.

❖ **Boukadah, N. (2007).** Étude de l'adsorption de micropolluants organiques sur la bentonite. Thèse de Magister. Université Skikda. 139p.

❖ **Caillère, S., Henin, S. et Rautureau, M. (1982).** Minéralogie des argiles: Structure et propriétés physico-chimiques, Masson, 2^{ème} Ed. 184p.

❖ **Callot, R. (1983).** Mieux comprendre les interactions sol-racines. INRA, Ed Lavoisier, France. 325p.

❖ **Calvet, R. (2003).** Le sol, Propriétés et fonctions : Constitution et structure,

Références bibliographiques

phénomènes aux interfaces. Tome1. Vol1. Ed. France agricole. Paris. 457p.

- ❖ **Chamayou, J-A. (1984).** Notions fondamentales de sciences du sol. ENSA Montpellier, France. 271p.
- ❖ **Calvet, R. (2011).** Le sol, Propriétés et fonctions : Phénomènes physiques et chimiques, applications agronomiques et environnementales. Tome2. Vol2. Ed France Agricole. Paris. 513p.
- ❖ **CAM (Chambre d'Agriculture Martinique). (2014).** Fiche d'Itinéraire technique POIVRON. 2p.
- ❖ **Cedra, C. (1993).** Les matériels de travail du sol, semis et plantation. 1ère Ed. Tec & Doc. Lavoisier. Collection Formagri. Vol3. Paris. 384p.
- ❖ **Chamayou, H. et Legros J.P. (1989).** Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. Agence de Coopération culturelle et technique, Paris, Presse universitaires de France. 592p.
- ❖ **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.
- ❖ **Chikhi, K. (2013).** Adsorption du zinc sur la bentonite de Maghnia. Thèse de Magistère Université Ouargla. 129p.
- ❖ **CRAD (Chambre Régionale d'Agriculture de Dosso). (2015).** Fiche technique pour la culture du poivron. 15p.
- ❖ **Citeau, L., Bispo, A., Bardy, A. and King, D. (2008).** Gestion durable des sols. Edit. Quae. 336p.
- ❖ **CPVQ (Conseil des productions végétales au Québec). (2000).** Guide des pratiques de conservation en grandes cultures. Guide technique. Québec. 400p.
- ❖ **Dananaj, I., Frankovská, J. and Janotka, I. (2005).** The influence of smectite content on microstructure and geotechnical properties of calcium and sodium bentonites. *Applied Clay Sciences*, 28: 223–232.
- ❖ **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.
- ❖ **Degens, B-P., Spading, G-P., Abbott, L-K. (1996).** Increasing the length of hyphae in a sandy soil increases the amount of water-stable aggregates *Applied Soil Ecology*, 3(2):149-159.

Références bibliographiques

- ❖ **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.
- ❖ **Dicova, C. (1997).** Les matériels de fertilisation et traitement des cultures. Ed. Tec & Doc. Lavoisier. 276p.
- ❖ **Djaber, Y. (1999).** Évolution du bilan bactériologique dans un sol sableux bentonisé et cultivé (blé+pois chiche). Mémoire d'Ingénieur. Université de Mostaganem. 53 p.
- ❖ **Doucet, R. (2006).** Le climat et les sols agricoles. Ed Berget A.C. Canada. 173p.
- ❖ **Dridi, B. et Toumi, C. (1999).** Influence des amendements organiques et d'apports de boues sur les propriétés d'un sol cultivé. *Etude et Gestion des sols*, 6(1) : 7-14.
- ❖ **Drouineau, G. (1942).** Dosage rapide du calcaire actif du sol: nouvelles données sur la séparation et les 477 natures des fractions calcaires. *Ann. Agron*, 12 : 441-450.
- ❖ **DSA (Direction des Services Agricoles), 2024.**
- ❖ **Duchaufour, P. (1983).** Pédologie 1 : Pédogenèse et classification : Constituants et propriétés du sol. Éd Masson, Paris. 459p.
- ❖ **Durand, J.H. (1983).** Les sols irrigables, Etude pédologique. Presses Universitaire de France. Editions Agence de Coopération Culturelle et Technique. Paris. 339p.
- ❖ **ENOF (Entreprise Nationale des Produits Miniers non Ferreux et des Substances Utiles), 2024.**
- ❖ **ESE (Encyclopydia of Soils in Environment). (2005).** Water soil properties. 34p.
- ❖ **Escadafal, R. (1981).** Une méthode nouvelle de description de la surface des sols dans les régions arides. Actes du colloque : Informatique et traitement des données de sols), Paris, 27p.
- ❖ **Es-Skalli, A. (2015).** Analyse physico-chimique des sols agricoles. Mémoire de fin d'étude. Université de Maroc (Fès). 43p.
- ❖ **FAO. (2018).** Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems – Guidelines for assessment (Draft for public review). Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership. Rome, Italy. 64p.
- ❖ **Forges, M. (1972).** Irrigation et salinité. *Mediterraneennes*, 14 : 40-45.
- ❖ **Garcia-Orenes, F., Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Navarro-Pedreño, J., Gomez, I. and Mataix-Beneyto, J. (2005).** Factors controlling the aggregate stability and bulk density in two different degraded soils amended with biosolids. *Soil & Tillage Research*, 82: 65-76.
- ❖ **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.

Références bibliographiques

- ❖ **Girard, M-C. (2011).** Etude des sols, Ed Dunod. 254p.
- ❖ **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, A-W. (2003).** Le sol vivant. Bases de pédologie. Biologie des sols. Edit. Presses polytechniques et universitaires romandes. 571p.
- ❖ **Gobat, J-M., Aragno, M. et Matthey, W. (2010).** Le sol vivant. 3^{ème} Ed. Presse polytechnique et Universitaire romands Lausanne. Italie. 817p.
- ❖ **Grosbellet, C. (2008).** Evolution and effects on soil structure of organic matter brought in large quantities. INRA, Sagah Angers. Paris. 203p.
- ❖ **Khaleel, R., Reddy, K-R. and Overcash, M-R. (1981).** Changes in soil physical properties due to organic waste applications: a review. *Journal of Environmental Quality*, 10: 133-141.
- ❖ **Halilat, T. et Tessier, D. 2000.** Effet de la salinité et la sodicité sur le comportement hydrique de mélanges sable-argile. *Étude et Gestion des Sols*, 7(2) : 155-167.
- ❖ **Hamza, M-A. and Anderson, W-K. (2002).** Improving compacted clayey and sandy soils in Western Australia. Australian Soil Science Society, 6(1): 78–79.
- ❖ **Hartmann, C., Poss, R. and Singhatat, V. (1999).** Soil compaction and plant growth in Northeast Thailand: The case of the Nam Phong soil series. *IRRI, Khon Kaen, Thailand*, 5: 157-162.
- ❖ **Hillel, D. (1974).** L'eau et le sol: principes et processus physiques, Poly Académie, Press, Newyourk. 375P.
- ❖ **Hillel, D. (1998).** Environmental Soil Physics. New York, Academic Press. 771p.
- ❖ **ITA (Institut de technologie agricole). (1977).** Laboratoire du sol : Méthodes d'analyses physiques et chimiques du sol 3^{ème} et 4^{ème} année. Mostaganem. 78p.
- ❖ **ITCMI (Institut Technique des Cultures Maraichères et Industrielles). (2022).** Fiches techniques valorisées des cultures maraîchères et Industrielles : La culture du PIMENT / POIVRON. 5p.
- ❖ **Kanouri, R. et Labide, A. (2013).** Adsorption du phénol sur la bentonite de Maghnia. Thèse de magistère, université d'Ouargla. 150p.
- ❖ **Koull, N. et Halilat, M-T. (2016).** Effets de la matière organique sur les propriétés physiques et chimiques des sols sableux de la région d'Ouargla (Algerie). *Etude et Gestion des Sols*, 23 : 9-23.
- ❖ **Lal, R. and Shukla, M-K. (2004).** Principles of soil physics. New York, Marcel Dekker. 682p.

Références bibliographiques

- ❖ **Lefèvre, R. (2015).** Matière organique stable du sol, dynamique et mécanismes de (dé)stabilisation. Thèse de Doctorat. France : Université Pierre et Marie Curie. 140p.
- ❖ **Legba, C-E., Aglinglo, A-L., Houdegbe, C-A., Francisco, R., Fassinou Hotègni, V-N. et Achigan-Dako, G-E. (2018).** Fiche technique synthétique pour la production du Poivron (*Capsicum annum* L.). Laboratory of Genetics, Horticulture and Seed Science (GBioS), Université d'Abomey-Calavi (UAC), Abomey- Calavi, ISBN 978-99919-76-73-0, Dépôt légal N°10471 du 06/07/18, Bibliothèque Nationale du Bénin, 3^{ième} trimestre.
- ❖ **Legros, J-P. (2007).** Les Grands Sols Du Monde. Ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Lausanne. 574 p.
- ❖ **Le Houerou, H-N. (1993).** Changements climatiques et désertification. *Sécheresse*, 2 : 95-111.
- ❖ **Le Quéré, C., Moriarty, R., Andrew, R-M., Peters, G-P., Ciais, P., Friedlingstein, P., Jones, S-D., Sitch, S., Tans, P., Arneeth, A., Boden, T-A., Bopp, L., Bozec, Y., Canadell, G.P., Chini, L.P., Chevallier, T., Cosc, C.E., Harris, I., Hoppema, M., Houghton, R-A., House, J-I., Jain, A-K., Johannessen, T., Kato, E., Keeling, R-F., Kitidis, V., Goldewijk, K-K., Kove, C., Landa, C-S., Landschutzer, P., Lenton, A., Lima, I-D., Marland, G., Mathis, J-T., Metzl, N., Nojiri, Y., Olsen, A., Ono, T., Peng, S., Peters, W., Pfeil, B., Poulter, P., Raupach, M-R., Regnier, P., Rodenbeck, C., Saito, S., Salisbury, J-E., Schuster, U., Schwinger, J., Seferian, R., Segsneider, J., Steinhoff, T., Stocker, J-E., Sutton, A-J., Takahashi, T., Tilbrook, B., van der Werf, G-R., Viovy, G-R., Wang, Y-P., Wanninkhof, R., Wiltshire, A. et Zeng, N. (2015).** Global carbon budget 2014. *Earth System Science Data*, 7, 47-85.
- ❖ **Lesturgez G. (2005).** Densification des sols sableux sous culture mécanisée. Thèse de Doctorat, Nancy, Université d'Henri Poincaré. 164p.
- ❖ **Moussaoui, Z. (2012).** Intercalation de dendromètres à travers la et bentonites sodiques. Thèse de Magister. Université de Tlemcen. 124p.
- ❖ **Mathieu, C., Pieltain, F. et Jeanroy, E. (2003).** Analyse chimique du sol: Méthodes choisies, Ed. Tec & Doc. Paris. 233p.
- ❖ **Mathieu, C., Pieltain, F. and Jeanroy, E. (2003).** Analyse physique du sol : Méthodes choisies, Ed. Tec & Doc. Paris. 256p.
- ❖ **Materechera, S-A. (2009).** Aggregation in the surface layer of a hardsetting and crusting soil as influenced by the application of amendments and grass mulch in a South African semi-arid environment. *Soil and Tillage Research*, 105 (2), 251-259.
- ❖ **Mermound, A. (2010).** Cours de physique du sol. Ecole polytechnique fédérale de

Références bibliographiques

Lausanne, Ouagadougou & Lausanne. 234p.

❖ **Mohammad, W., Shah, Z., Shah, S-M. and Iqbal, M-M. (2003).** Wheat yield, fertilizer N utilization and water use efficiency as influenced by tillage and P levels under rainfed conditions. *Pak. J. Soil Sci*, 22(1), 11-18.

❖ **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, R. (1989).** Les sols cultivés, Edition Technique et documentation–Lavoisier, Paris, France.

❖ **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.

❖ **Mouazen, A.M., Dumont, K., Maertens, K. and Ramonb, H. (2003).** Two-dimensional prediction of spatial variation in top soil compaction of a sandy loam field-based on measured horizontal force of compaction sensor, cutting depth and moisture content. *Soil and Tillage Research*, 74 (1): 91-102.

❖ **Morel, R. (1996).** Les sols cultivés. 2^{ème} Ed. Tec &Doc. Lavoisier. Paris. 389p.

❖ **Mullins, C-E., MacLeod, D-A., Northcote, K-H., Tisdall, J-M. and Young, I-M. (1990).** Hardsetting soils : Behavior, occurrence, and management. *Soil degradation. Advances in Soil Science*, 11 : 37-108.

❖ **Musadji, N-Y. (2013).** Structure et dynamique du carbone mobile dans le sol. Thèse de Doctorat, Université de POITIERS UFR des sciences fondamentales et appliquées. Institut de chimie des milieux et matériaux de Poitiers. France. 263p.

❖ **Oulbachir, K. (1997).** Thèse de Dagister, Contribution à l'étude microbiologique des sols rouges sous différents systèmes de culture en conditions semi-arides en Algérie. Université de Tiaret. 154p.

❖ **Oulbachir, K. (2010).** Thèse de Doctorat, Écologie microbienne des sols sous différents compartiments granulométriques et différents stades bioclimatiques. Université d'Oran. 220p.

❖ **Pansu, M. And Gautheyrou, J. (2001).** L'analyse Du sol minéralogique, organique et minérale. Ed Springer. 134p.

❖ **Pedro, G. (1974).** Structures et réactivité des argiles. *Bulletin du Groupe français des Argiles*, 26, 9-55.

❖ **Petard, J. (1993).** Les Méthodes d'analyse, Tome 1, Analyses De Sols.

Références bibliographiques

- ❖ **Rawls, W-J, Pachepsky, Y-A, Ritchie, J-C, Sobecki, T-M. and Bloodworth, H. (2003).** Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, 116: 61-71.
- ❖ **Rahaoui, F. (2009).** Etude de la mobilité de certains ETM dans un sol en domaine routier, approche expérimentale et théorique. Mémoire d'Ingénieur. Université de Tlemcen. 120p.
- ❖ **Rongon P. (1994).** Les conséquences de la sécheresse sur la pédogenèse. *Sécheresse*, 3(5):173-184
- ❖ **Roose, E. et Sarrailh, J-M. (1990).** Erodibilité de quelques sols tropicaux vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *OROSTOM, sér. pédol*, 28:7-30.
- ❖ **Rouahna, H. (2007).** Relation entre les nappes et la salinité dans les sols gypseux de la région de Ain Ben Noui-Biskra. Mémoire Magister, Université de Batna. 83p.
- ❖ **Ruellan, A. (2010).** Des sols et des hommes. *in* un lien menacé. Préface Bruno Latour. *Ed, ERD*. 203p.
- ❖ **Samreen, S., Zahir, S. and Wisal, M. (2017).** Impact of organic amendments on soil carbon sequestration, water use efficiency and yield of irrigated wheat. *BASE*, 21(1):36-46.
- ❖ **Salim, S. et Tessier, D. (1998).** Évolution des propriétés physiques et physico-chimiques de la basse vallée de l'Euphrate (Syrie). *Étude et Gestion des Sols*, 5(4), 277-287.
- ❖ **SDR (Service du Développement Rural). (2016).** Fiche technique : Le poivron – *Capsicum annuum L.* 12p.
- ❖ **Silva, L-L. (2006).** The effect of spray head sprinklers with different deflector plates on irrigation uniformity, runoff and sediment yield in a Mediterranean soil. *Agricultural water management*, 85 (3): 243-252.
- ❖ **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.
- ❖ **Siboukeur, A. (2013).** Assessment of the fertilizing value of different types of manure. Agricultural Sciences University of Ouargla.
- ❖ **Sophie, D. et Christian, I. (2010).** Effet d'apport de différents amendements organiques sur les propriétés du sol-Bilan de 15 années d'essai en culture légumière à la SERAIL. *Echo-MO*, 81 : 1-5.
- ❖ **Soltner, D. (1992).** Les bases de la production végétale. Tom 1 : Le Sol. Collection Sciences et Techniques Agricoles, 19ème Edition, Sainte Gemmes Sur Loire. 105p.
- ❖ **Soltner, D. (2003).** Les bases de la production végétale. Tome I. Le sol et son amélioration. Collection Sciences et Techniques Agricoles. 23^{ème} Ed. Paris. 472p.

Références bibliographiques

- ❖ **Tucker, M. E. (2001).** Sedimentary Petrology: An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks 3^{ème} Ed, Edition La Livrothèque, Marseille, France.
- ❖ **Velde, B. (2013).** Origin and mineralogy of clays: clays and the environment. Springer Science & Business Media.
- ❖ **Verrechia, E., Yair, A., Kidron, G-J. and Verrechia, K. (1995).** Physical properties of the psammophile cryptogamic crust and their consequences to the water regime of sandy soils, north-western Negev Desert, Israel. *Journal of Arid Environments*, 29 (4), 427-437.
- ❖ **Wei, X-R, Hao, M-D., Shao, M-G. and Gale, W-J. (2006).** Changes in soil properties and the availability of soil micronutrients after 18 years of cropping and fertilization. *Soil and Tillage Research*, 91, (1 et 2): 120–130.
- ❖ **USDA. (2008).** Soil quality indicators.
- ❖ **Yair, A., Almong, R. and Veste, M. (2011).** Differential hydrological response of biological topsoil crusts along a rainfall gradient in a sandy arid area: Northern Negev desert, Israel. *Catena*, 87(3): 326-333.
- ❖ **Zeytin, S. and Baran, A. (2003).** Influences of composted hazelnut husk on some physical properties of soils. *Bioresource Technology*, 88: 241-244.
- ❖ **Zhao, Y., Xu, M. and Belnap, J. (2010).** Potential nitrogen fixation activity of different aged biological soil crusts from rehabilitated grasslands of the hilly Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 74(10): 1186-1191.
- ❖ **Zihlmann, U., Weisskopf, P., Agroscope, A., Bern, B. et Seitz, A. (2019).** Matière organique des sols cultivés – enrichir plutôt que consumer. *Agroscope*, 3498 :1-4.
- ❖ **Znaidi, I.A. (2002).** Etude et évaluation du compostage de différents types de matières organiques et des effets des jus de composts biologiques sur les maladies des plantes. Mémoire de Master. Tunisie. 58p.

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 3).
- **Calcul**
- (**P1**) : Argiles + Limons fins + Limons grossiers
- (**P2**) : Argiles + Limons fins
- (**P3**) : Argiles
- % Argiles = $(P3) \times 750/10 \times 100/15$
- % Limons fins = $[P2] - [P3] \times 750/10 \times 100/15$
- % Limons grossiers = $[(P1) - (P2)] \times 750/10 \times 100/15$
- % Sables = $100 - (\%Argiles + \%Limons\ fins + \%Limons\ grossiers)$

Annexes

Tableau 13: Hauteur de prélèvement en fonction du temps de sédimentation (Gee et Or, 2002)

Température (°C)	Particules de 0,002 mm de diamètre				Particules de 0,02 mm de diamètre
	Temps de chute pour 10 cm en heures-minutes	Profondeur de décantation ou de prélèvement en cm après			Temps de pour 10 cm en minutes et secondes
		8H	7H	6H	
10	10.23	7.7	6.7	5.8	6.14
11	10.06	7.9	6.9	5.9	6.03
12	9.49	8.1	7.1	6.1	5.54
13	9.34	8.4	7.3	6.3	5.44
14	9.19	8.6	7.5	6.4	5.35
15	9.05	8.8	7.7	6.6	5.27
16	8.51	9.0	7.9	6.8	5.19
17	8.37	9.3	8.1	7.0	5.10
18	8.24	9.5	8.3	7.2	5.03
19	8.12	9.8	8.6	7.3	4.55
20	8.00	10.0	8.8	7.5	4.48
21	7.48	10.3	9.0	7.7	4.41
22	7.37	10.5	9.2	7.9	4.34
23	7.26	10.8	9.4	8.1	4.25
24	7.16	11.0	9.7	8.3	4.22
25	7.06	11.3	9.9	8.5	4.15
26	6.56	11.5	10.1	8.7	4.10
27	6.47	11.8	10.3	8.9	4.04
28	6.38	12.1	10.6	9.1	3.59
29	6.29	12.3	10.8	9.3	3.24
30	6.21	12.6	11.0	9.5	3.15

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

- 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'erlen 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'erlen au calcimètre, en prenant soin de bien fermer l'ouverture.
- Lire le volume de 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'erlen avec le calcimètre, et le V1 après le contact du HCl avec le CaCO₃.

Annexes

- **Calcul**

$$\text{CaCO}_3 \% = \frac{\text{Vs} \times \text{mCaCO}_3}{\text{Vt} \times \text{msol}} \times 100$$

- **msol** = 1 g
- **mCaCO₃** = 0.3g
- **Vs** = V1 sol – V0 sol
- **Vt** = V1 témoin – V0 témoin
- **V0** = Volume initial
- **V1** = Volume lu

I.2.5. Dosage du calcaire actif

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

- Peser 10 g de terre fine.
- Introduire dans un flacon de 300 ou 500 ml.
- Ajouter 250 ml d'oxalate d'ammonium N/5 (à 0,2 N).
- Agiter durant 2 heures à l'agitateur mécanique (rotatif).
- Filtrer à l'aide d'un entonnoir en verre et du papier filtre la solution dans un bûcher 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 bûcher de 250 ml.
- Ajouter 10 ml d'H₂SO₄ 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 bûcher 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 KMnO₄ versé ou obtenus (**n** volume en cm³).

Essai témoin

- Titrer de la même façon, 10 ml de la solution d'oxalate d'ammonium utilisée.
- Soit **N** le nombre de ml de KMnO₄ versé pour le témoin (**N** volume en cm³).

Calcul

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

Annexes

I.2.6. Le dosage du carbone organique et l'estimation de l'azote total

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 $K_2Cr_2O_7$ 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 l'eau distillée de rinçage jusqu'au trait de jauge.
- 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 V_1 : le volume de solution de sel de Mohr versé dans le bécher.
- Soit V_T : le volume de solution de sel de Mohr versée dans le témoin.

$$C \text{ (Carbone organique) \%} = (V_t - V_1) \times 0,615$$

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

L'azote total (N total) est obtenu en appliquant la formule empirique suivant:

$$N \text{ total (\%)} = MO * 0.05$$

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 98.1g 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..... $H_2 SO_4$.

Annexe II : Fiche technique de la culture du poivron

Figure 22 : Fiche technique de la culture du poivron (Pépinière el-Merdja, 2024).

PROTECTOR F1- ROOTSTOCK FOR PEPPER	PORTE-GREFFE PROTECTOR F1 POUR POIVRON	حامل للتلقيح بروتكتور للفلفل
<p>Hybrid pepper with very high disease resistances package. Very high adaptability, open field and protected cultivation. Very good compatibility, already tested with UG and most important hybrids in the market. Very high percentage of successful grafting. No over vigor plant, no oversize fruits, uniform fruits and very high quality. HR*/IR*: PVY, Tm, Pc, Ma, Mi, Mj.</p>	<p>Poivron hybride avec une résistance aux maladies très élevée. Très grande adaptabilité, culture en plein champ et sous serres. Très bonne compatibilité, déjà testé avec United Genetics et les hybrides les plus importants du marché. Pourcentage de réussite très élevé de greffage. N'impacte pas la vigueur des plants ni le calibre des fruits, il permet de contre d'obtenir des fruits uniformes et de très haute qualité. Tolérance et résistance à : HR*/IR* : PVY, TM, PC, MA, MI, MJ. Virus : PVY : virus Y de la pomme de terre, TM : mosaïque du tabac Champignons : PC : phytophthora Nématodes à galles : M A, MI, MJ</p>	<p>فلفل هجين مع مقاومة جد عالية للأمراض الفطرية، الفيروسيات و كذا الديدان. قابل للتكيف للغاية في الحقول المفتوحة و داخل البيوت البلاستيكية تم اختبار توافقه العالي من طرف يوناييتد جينتيكس مع مختلف أصناف الفلفل عالميا. و بالفعل يتصف بنسبة نجاح عالية جدا في التطعيم. لا يآثر على حجم النبتة ولا حجم ثمارها لكنه ينتج فلفل موجد و ذو جودة عالية.</p>

Annexes

Annexe III: Echelles d'interprétation des résultats

Tableau 14: 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 15: 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 salé	Négligeable
Classe II	500 à 1000	Légèrement salé	Diminution du rendement des cultures très sensibles au sel
Classe III	1000 à 2000	salé	Diminution du rendement de la plupart des cultures
Classe IV	2000 à 4000	très salé	Seules les cultures résistantes donnent un rendement satisfaisant
Classe V	Plus de 4000	extrêmement salé	Seules quelques cultures donnent des rendements satisfaisants

(Durand, 1983)

Tableau 16: 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 17: 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 18 : 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 19: 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)

Annexes

Tableau 20: Porosité du sol.

Porosité totale du sol (%)	Porosité du sol
<2%	Nom poreux
2-5%	Peu poreux
5-15%	Moyennement poreux
15-40%	Poreux
40%	Très poreux

(ESE, 2005)

Tableau 21 : Classe de perméabilité du sol en fonction de la valeur de K_s .

Coefficient de perméabilité K_s (m/s)	Perméabilité du sol
$<10^{-7}$	Sols imperméables
10^{-7}	Sols peu perméables
10^{-6}	Sols moyennement perméables
10^{-5}	Sols perméables
10^{-4}	Sols très perméables

(Mathieu *et al.*, 2003)

Tableau 22 : Classe de stabilité structurale en fonction de la valeur de I_s .

Stabilité	I_s
Très stables	<1
Stables	1,0 à 1,3
Stabilité médiocres	1,3 à 1,7
Instables	1,7 à 2,0
Très instables	>2

(Mathieu *et al.*, 2003)

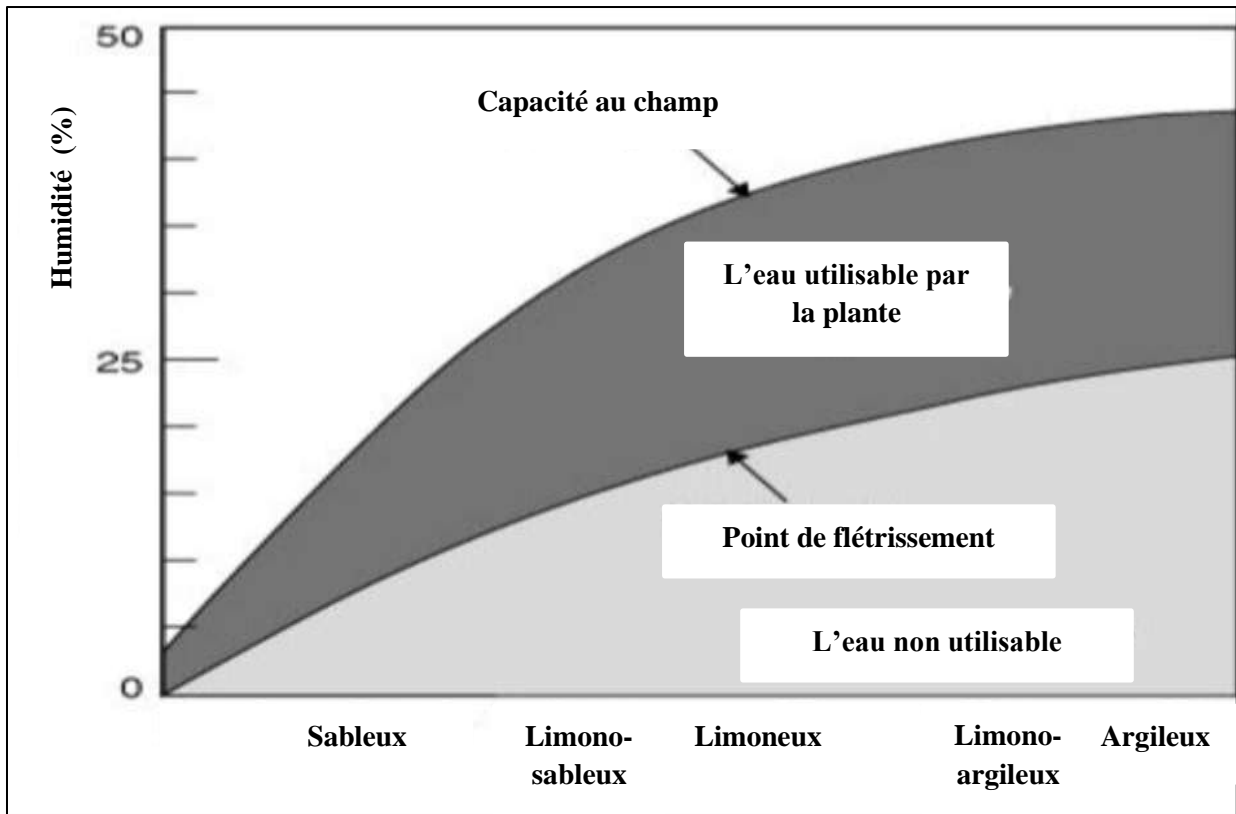


Figure 23 : Rétention en eau (ESE, 2005).