

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Biologie



Projet de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de Master en: biochimie
Domaine : Sciences de la nature et de la vie
Filière : Sciences biologiques
Spécialité : biochimie

Thème

Évaluation de l'efficacité des biofertilisants naturels sur sols pauvres en matière organique

Soutenu le : 29./ 06/2026

Présenté Par :

- 1) M^{elle} Belmokhtar Hena Soheir
- 2) M^{elle} Benadjila Rania

Devant le jury composé de :

Dr BENHÂBIB OUASSILA	M C A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Présidente
Dr BRIXI-GORMAT NASSIMA	M C A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinatrice
Dr YAZIT SIDI-MOHAMMED	M C A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année Universitaire 2025/2026

Dédicace (1)

Je dédie ce modeste travail, fruit de plusieurs années d'efforts, à toutes les personnes qui m'ont soutenue(e), encouragé(e) et accompagné(e) tout au long de mon parcours.

A mes très chers parents, aucun mot ne saurait exprimer toute ma gratitude et mon amour envers vous, merci pour vos sacrifices, votre patience, votre soutien moral surtout, vos conseils précieux et vos prières qui m'ont toujours donné la force de poursuivre mon chemin. Vous avez toujours cru en moi et m'avez appris les valeurs du respect et de la persévérance. Que ce mémoire soit le témoignage de ma profonde reconnaissance et modeste récompense de tout ce que vous avez fait pour moi. Qu'allah vous accorde une longue vie, une bonne santé et vous protège.

A toute ma famille, qui, de près ou de loin, m'a encouragé(e) au long de ce parcours. Recevez ici l'expression de ma sincère reconnaissance et de mon profond respect.

A ma seule amie qui est partagée avec moi les joies, les difficultés et les défis de la vie universitaire. Merci pour votre amitié, votre solidarité et les merveilleux souvenirs que nous avons construits ensemble.

A mes enseignants, qui ont contribué à ma formation par leur savoir. Votre engagement et votre dévouement ont été une véritable source d'inspiration. J'adresse également mes sincères remerciements à mon encadrant, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

HÉNA SOHÉIR

Dédicace (2)

Je dédie ce modeste travail, fruit de plusieurs années d'efforts, à toutes les personnes qui m'ont soutenue, encouragée et accompagnée tout au long de mon parcours.

À mes très chers parents, Aucun mot ne peut exprimer toute ma gratitude et mon amour envers vous. Merci pour vos sacrifices, votre patience, votre soutien, vos conseils et surtout vos prières, qui m'ont toujours donné la force d'avancer. Vous avez toujours cru en moi. Que ce travail soit un témoignage de ma profonde reconnaissance. Qu'Allah vous accorde une longue vie, une bonne santé et vous protège.

À ma famille, Merci pour votre affection, vos encouragements et votre présence à mes côtés. Recevez l'expression de ma sincère reconnaissance.

À mon binôme, Merci pour toutes ces années universitaires partagées, pour notre entraide, notre collaboration et tous les beaux souvenirs que nous garderons.

À mon encadreur, Merci pour votre disponibilité, vos conseils, votre patience et votre accompagnement tout au long de ce travail. Que Dieu vous récompense pour tout ce que vous nous avez apporté.

À mes enseignants, Merci pour votre savoir, votre engagement et tout ce que vous nous avez transmis au cours de notre formation.

Enfin, à toutes les personnes qui m'ont soutenue de près ou de loin, je leur adresse mes sincères remerciements.

RANIA

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail

Avant de commencer la présentation de ce travail, nous profitons de l'occasion pour remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant d'examiner ce mémoire et de l'enrichir par leurs suggestions. Nos remerciements les plus respectueux vont Dr BENHÂBIB OUASSILA qui a bien voulu nous faire l'honneur de présider le jury. Veuillez trouver ici Madame le témoignage de notre reconnaissance et notre respect le plus profond.

Nous remercions également Dr BRIXI-GORMAT NASSIMA pour l'honneur qu'elle nous a fait en acceptant d'examiner ce travail et de siéger parmi cet honorable jury. Veuillez accepter ce travail, en preuve de notre grand respect et de toutes nos profondes reconnaissances.

Nous remercions tous particulièrement notre encadrant Dr YAZIT SIDI-MOHAMMED Vous avez bien voulu nous confier ce travail riche d'intérêt et nous guider à chaque étape de sa réalisation. Vous nous avez toujours réservé le meilleur accueil, malgré vos obligations professionnelles. Vos encouragements inlassables, votre confiance, votre gentillesse, votre patience méritent toute admiration. Aucune expression de gratitude ne sera suffisante pour vous exprimer notre respect et notre reconnaissance.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenus dans la poursuite de nos études.

N'oublions pas de remercier nos très chers parents, frères et sœurs, nos collègues et Amis pour leur contribution, leur soutien, leurs encouragements et leur patience

A toutes et tous, un grand merci !

RANIA & HÉNA SOHEIR

RÉSUMÉ

La fertilité du sol constitue un facteur essentiel pour assurer une production agricole durable. Dans ce contexte, la valorisation des déchets organiques représente une alternative écologique permettant d'améliorer les propriétés du sol tout en réduisant l'impact environnemental des déchets. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet du marc de café et des épluchures de pomme de terre, utilisés comme amendements organiques, sur les propriétés physico-chimiques du sol et sur la croissance de la laitue (*Lactuca sativa* L.).

Pour atteindre cet objectif, quatre traitements ont été mis en place : un témoin (T0), un sol amendé par le marc de café (T1), un sol amendé par les épluchures de pomme de terre (T2) et un sol amendé par le mélange marc de café + épluchures de pomme de terre (T3). Les paramètres de croissance (hauteur des plants, nombre et longueur des feuilles, biomasse fraîche et sèche) ainsi que certaines propriétés chimiques du sol (pH, matière organique et conductivité électrique) ont été évalués après compostage et après culture.

Les résultats obtenus montrent que les amendements organiques ont amélioré les propriétés du sol et favorisé le développement de la laitue. Le traitement T2 a présenté les meilleures performances avec une hauteur finale de 16 cm, une longueur des feuilles de 15 cm et les valeurs les plus élevées de biomasse fraîche (9,53 g) et sèche (0,55 g). Les analyses du sol ont révélé une augmentation de la matière organique dans les traitements amendés ainsi qu'une stabilité du pH proche de la neutralité. Une augmentation de la conductivité électrique a également été observée après culture, traduisant la libération progressive des éléments minéraux issus de la décomposition des amendements.

Ces résultats mettent en évidence l'intérêt agronomique de la valorisation des épluchures de pomme de terre et du marc de café comme amendements organiques capables d'améliorer la fertilité du sol et la croissance de la laitue dans une perspective d'agriculture durable.

Mots-clés : Fertilité du sol ; Amendements organiques ; Marc de café ; Épluchures de pomme de terre ; Laitue (*Lactuca sativa* L.) ; Matière organique.

ABSTRACT

Soil fertility is a key factor in ensuring sustainable agricultural production. In this context, the valorization of organic waste represents an environmentally friendly alternative for improving soil properties while reducing the environmental impact of waste. The objective of this study was to evaluate the effect of coffee grounds and potato peels, used as organic amendments, on the physicochemical properties of soil and on the growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.).

To achieve this objective, four treatments were established: a control soil (T0), soil amended with coffee grounds (T1), soil amended with potato peels (T2), and soil amended with a mixture of coffee grounds and potato peels (T3). Plant growth parameters (plant height, number of leaves, leaf length, fresh biomass, and dry biomass) as well as selected soil chemical properties (pH, organic matter, and electrical conductivity) were evaluated after composting and after cultivation.

The results showed that the organic amendments improved soil properties and promoted lettuce growth. Treatment T2 recorded the best performance, with a final plant height of 16 cm, a leaf length of 15 cm, and the highest fresh (9.53 g) and dry (0.55 g) biomass values. Soil analyses also revealed an increase in organic matter content in the amended treatments, while soil pH remained close to neutrality. An increase in electrical conductivity was observed after cultivation, reflecting the gradual release of mineral nutrients during the decomposition of the organic amendments.

These findings highlight the agronomic potential of coffee grounds and potato peels as organic amendments capable of improving soil fertility and enhancing lettuce growth, thereby contributing to more sustainable agricultural practices.

Keywords: Soil fertility; Organic amendments; Coffee grounds; Potato peels; Lettuce (*Lactuca sativa* L.); Organic matter.

ملخص

تُعد خصوبة التربة عاملاً أساسياً لضمان إنتاج زراعي مستدام. وفي هذا السياق، تمثل الاستفادة من النفايات العضوية بديلاً صديقاً للبيئة يساهم في تحسين خصائص التربة والحد من الآثار البيئية للنفايات. هدفت هذه الدراسة إلى تقييم تأثير تفل القهوة وقشور البطاطا، المستخدمة كمحسنات عضوية للتربة، على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة وعلى نمو نبات الخس (*Lactuca sativa* L.).

ولتحقيق هذا الهدف، تم تطبيق أربعة معاملات تجريبية: معاملة شاهدة ((T0)، وتربة مضاف إليها تفل القهوة ((T1)، وتربة مضاف إليها قشور البطاطا ((T2)، وتربة مضاف إليها خليط من تفل القهوة وقشور البطاطا ((T3). وتم تقييم مؤشرات نمو النبات، المتمثلة في ارتفاع النباتات، وعدد الأوراق، وطول الأوراق، والكتلة الحيوية الطازجة والجافة، بالإضافة إلى بعض الخصائص الكيميائية للتربة، وهي الرقم الهيدروجيني ((pH)، والمادة العضوية، والتوصيل الكهربائي، وذلك بعد مرحلة التسميد العضوي وبعد الزراعة.

أظهرت النتائج أن المحسنات العضوية ساهمت في تحسين خصائص التربة وتعزيز نمو نبات الخس، حيث سجلت المعاملة T2 أفضل النتائج، بارتفاع نهائي بلغ 16 سم، وطول أوراق 15 سم، وأعلى قيم للكتلة الحيوية الطازجة (9.53 غ) والجافة (0.55 غ). كما بينت تحاليل التربة زيادة في محتوى المادة العضوية في المعاملات المضاف إليها المحسنات العضوية، مع بقاء قيمة الرقم الهيدروجيني قريبة من التعادل، في حين لوحظ ارتفاع في التوصيل الكهربائي بعد الزراعة نتيجة التحرر التدريجي للعناصر المعدنية أثناء تحلل المواد العضوية.

وتبرز هذه النتائج الأهمية الزراعية لتفل القهوة وقشور البطاطا كمحسنات عضوية للتربة، لما لها من دور في تحسين خصوبة التربة وتعزيز نمو نبات الخس، مما يجعلها خياراً واعداً لدعم ممارسات الزراعة المستدامة

الكلمات المفتاحية: خصوبة التربة؛ المحسنات العضوية؛ تفل القهوة؛ قشور البطاطا؛ الخس)

(.؛ المادة العضوي *Lactuca sativa* L.)

LISTE DES ABREVIATIONS

MO : Matière Organique

pH : Potentiel Hydrogène

CE : Conductivité Électrique

CEC : Capacité d'Échange Cationique

N : Azote

P : Phosphore

K : Potassium

NPK : Azote – Phosphore – Potassium

VBS : Valeur au Bleu de Méthylène

USDA : United States Department of Agriculture

L. sativa : Lactuca sativa

CaCO₃ : Carbonate de Calcium

HCl : Acide Chlorhydrique

TDS : Total Dissolved Solids : Quantité totale des solides dissous dans une solution.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : fertilité du sol (schéma générer par AI).....	02
Figure 2 : facteurs influencent la fertilité du sol (schémas générer par AI).....	03
Figure 3 : cause de dégradation du sol (schémas générer par (AI)	06
Figure 4 : impact de dégradation du sol (schémas générer par AI).....	07
Figure 5 : rôle de la matière organique dans le sol (génère par AI)	08
Figure 6 : rôle des éléments majeurs (N, P et K) dans la fertilité des sols (génère par AI)....	09
Figure 7 : étapes de compostage (schémas générer par AI).....	18
Figure 8 : localisation géographiques du site a l'aide de Google earth	24
Figure 9 : triangle USDA des textures des sols	26
Figure 10 : processus d'analyse de la texture du sol par la méthode du bocal (schémas générer par AI).....	26
Figure11 : schémas d'essais de bleu de méthylène pour la détermination de la texture du sol (générer par AI)	28
Figure 12 : schémas d'essais de bleu de méthylène pour la détermination de la texture du sol (générer par AI).....	29
Figure13 : analyse granulométrique du sol par sédimentation au densimètre	30
Figure14 : Calcimètre utilise par la détermination du carbonate de calcium (CaCO ₃).....	31
Figure15 : marc de café.....	33
Figure 16 : épluchures de pomme de terre	33
Figure 17 : représentation des différents traitements.....	34
Figure 18 : représentation schématique de dispositif expérimental (générer par AI).....	34
Figure 19 : suivie de culture par semaine (des photos Reille)	36
Figure 20 : appareil multiparametre utilise pour mesure du PH et de la conductivité électrique du sol.....	38
Figure 21 : four a moufle et calcination des échantillons pour la détermination de la matière organique par perte au feu (LOI).....	39
Figure 22 : effet des amendements organiques sur la hauteur des plants de laitue	41

Figure 23 : effet des amendements organiques sur la longueur des feuilles (cm).....	42
Figure 24 : effet des amendements organiques sur la longueur des feuilles par différence semaine	42
Figure 25 : variation de la conductivité électrique (CE) du sol après compostage et après culture selon les différents traitements	43
Figure 26 : variation du PH du sol après compostage et après culture selon les différents traitements	44
Figure 27 : variation du la matière organique du sol après compostage et après culture selon les différents traitements	45
Figure 28 : biomasse fraîche et sèche après récolte	46

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison entre les amendements organiques et les engrais chimiques.....	23
Tableau 2 : Classification des sols selon la valeur au bleu de méthylène (VBS).....	27
Tableau 3 : Classification des sols selon la teneur en carbonate de calcium (CaCO_3).....	31
Tableau 4 : Résultats de la texture du sol.....	40
Tableau 5 : propriété physique du sol étudié	41

SOMMAIRE

DÉDICACE	i
REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	v
LISTE DES ABRÉVIATIONS	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	x
INTRODUCTION GÉNÉRALE	
PARTIE I: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	1
Chapitre I : Généralités sur la fertilité du sol	1
I.1. Définition et importance de la fertilité des sols	1
I.2. Origine de la fertilité des sols	2
I.2.1 Fertilité naturelle ou intrinsèque	2
I.2.2 Fertilité acquise anthropique.....	2
I.3. Facteurs influençant la fertilité des sols	3
I.4. Indicateurs simples de la fertilité des sols	4
I.4.1. Le pH du sol	4
I.4.2. La matière organique.....	4
I.4.3. L'azote	5
I.5. Dégradation des sols : causes, impacts et rôle protecteur de la matière organique	5
I.5.1. Causes de la dégradation des sols	5
I.5.2. Impact de la dégradation sur les caractéristiques du sol	6
I.5.3. Rôle de la matière organique dans la limitation de la dégradation	7
I.6. Importance agronomique des éléments majeurs (N,P,K) et lien avec la fertilité des sols...	8
Chapitre II : Amendements organiques et valorisation des déchets organiques.....	10
II.1. Les amendements organiques comme alternative aux fertilisants chimiques.....	10
II.2. Définition des amendements organiques	11
II.3. Différents types d'amendements organiques	11
II.3.1. Déchets organiques d'origine animale et urbaine	11
II.3.2. Résidus de culture et engrais verts	12
II.3.3. Compost.....	12
II.3.4. Amendements organiques issus des sous-produits agroalimentaires	12
II.4. Effets des amendements organiques sur la fertilité du sol	13

II.4.1. Effets sur les propriétés physiques du sol	13
II.4.2. Effets sur les propriétés chimiques du sol	13
II.4.3. Effets sur les propriétés biologiques du sol.....	14
II.5. Avantages et limites des amendements organiques	14
II.5.1. Avantages des amendements organiques	14
II.5.2. Limites des amendements organiques	15
II.6. Impact environnemental et agronomique de la valorisation des sous-produits agroalimentaires	15
II.7. Compostage des déchets organiques	16
II.7.1. Définition du compostage	16
II.7.2. Phases du compostage	16
II.7.3. Facteurs influençant le compostage	17
II.8. Valorisation agronomique des déchets organiques	18
II.8.1. Le marc de café comme amendement organique.....	19
II.8.2. Les épluchures de fruits et légumes comme amendement organique	20
II.8.3. Intérêt agronomique de la combinaison du marc de café et des épluchures de fruits et légumes	21
II.9. Différence entre les amendements organiques et les engrais chimiques	23
PARTIE II : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.....	24
Chapitre III : Matériel et méthodes	24
III.1. Caractérisation initiale du sol	24
III.1.1. Site et prélèvement du sol	24
III.1.2. Analyses physiques du sol	25
III.1.3. Analyses chimiques du sol.....	31
III.2. Mise en place de l'expérimentation	32
III.2.1. Choix de la plante test	32
III.2.2. Préparation des amendements organiques	32
III.2.3. Préparation des pots et dispositif expérimental	33
III.2.4. Incorporation des amendements	35
III.2.5. Semis	35
III.2.6. Suivi de la culture	35
III.2.7. Détermination de la biomasse	37
III.3. Évaluation de l'effet des amendements sur les propriétés du sol	37
III.3.1. Détermination du pH	37
III.3.2. Détermination de la conductivité électrique	38
III.3.2. Détermination de la matière organique	38
Chapitre IV : Résultats et discussion	40

IV.1. Texture du sol	40
IV.2. Étude physique du sol	40
IV.3. Effet des amendements sur la croissance de la laitue	41
IV.3 .1 Effet des amendements organiques sur la hauteur des plants (cm)	41
IV.3 .2 Effet des amendements organiques sur le nombre des feuilles	42
IV.3 .3 Effet des amendements organiques sur la longueur des feuilles (cm)	42
IV.4. Effet des amendements sur les propriétés chimiques du sol	43
IV.4.1. Conductivité électrique (CE)	43
IV.4.2. pH du sol	43
IV.4.3. Matière organique	44
IV.5. Biomasse fraîche et sèche	45
Chapitre V : discussion	46
V.1. effet des amendements organique sur la matiere organique	46
V.2. effet des amendements organique sur pH du sol	46
V.3. effet des amendements organique sur la conductivite electrique	47
V.4. effet des amendements organiques sur la croissance de la biomasse de la laitue.....	47
V.5. textural de sol	49
V.6. Caractérisation physique du sol	49
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	50
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	51
ANNEXES	52

*PARTIE I : SYNTHÈSE
BIBLIOGRAPHIQUE*

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le sol constitue une ressource essentielle pour la production agricole et la sécurité alimentaire, puisqu'il assure le développement des cultures et joue un rôle clé dans le cycle des nutriments. Un sol sain est indispensable pour garantir une bonne productivité, une qualité nutritionnelle des cultures et un fonctionnement optimal des écosystèmes (**European Commission, 2020**).

Cependant, la fertilité des sols est aujourd'hui menacée par plusieurs facteurs, notamment la diminution de la matière organique et l'utilisation excessive des engrais chimiques. En effet, l'usage prolongé de ces derniers entraîne des effets négatifs tels que l'acidification des sols, le déséquilibre des éléments nutritifs, la perturbation de la microflore du sol ainsi que la modification de l'activité des métaux lourds (Lin et al., 2019). À long terme, ces pratiques contribuent à la dégradation de la qualité des sols, à la pollution de l'eau et à une baisse de la productivité agricole (**Jain, 2019**).

Dans ce contexte, la recherche de solutions durables et respectueuses de l'environnement devient une nécessité. Parmi ces solutions, la valorisation des déchets organiques apparaît comme une alternative prometteuse. En effet, les déchets issus des activités domestiques, agricoles et industrielles peuvent être transformés en amendements organiques capables d'améliorer la fertilité des sols (**Pajura, 2024**).

Le compostage constitue l'une des principales méthodes de valorisation des déchets organiques. Il s'agit d'un processus biologique naturel permettant la transformation des résidus organiques en substances stables riches en humus, favorables à l'amélioration des propriétés du sol (**Sayara et al., 2020**). L'application du compost permet également de restituer au sol des éléments nutritifs essentiels tels que l'azote, le phosphore et le potassium, indispensables à la croissance des plantes (**Narayanasamy et al., 2020**). De plus, le compost présente généralement une faible charge en micro-organismes pathogènes et contribue à améliorer la structure du sol ainsi que son activité biologique (**Papafilippaki et al., 2015 ; Sanasam et Talukdar, 2017**).

Par ailleurs, l'utilisation des amendements organiques et des biofertilisants permet de réduire la dépendance aux engrais chimiques tout en favorisant une agriculture durable. Ces pratiques contribuent à améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, à stimuler l'activité microbienne et à augmenter les rendements agricoles (**Gai et al., 2019 ; Mrunalini et al., 2022**).

Dans cette perspective, l'utilisation de déchets organiques ménagers, tels que le marc de café et les épluchures de légumes, représente une solution simple, économique et écologique pour enrichir les sols en matière organique.

Ainsi, ce travail vise à évaluer l'efficacité d'amendements organiques issus de déchets de cuisine, notamment le marc de café et les épluchures de pommes de terre, sur des sols pauvres en matière organique. L'objectif est d'étudier leur impact sur les propriétés du sol ainsi que sur la croissance des plantes.

La problématique posée est la suivante : Les amendements organiques issus des déchets de cuisine peuvent-ils constituer une alternative aux engrais chimiques ?

Nous émettons l'hypothèse que l'utilisation de ces amendements organiques améliore la fertilité du sol, stimule l'activité biologique et favorise la croissance ainsi que le rendement des cultures.

*PARTIE I : SYNTHÈSE
BIBLIOGRAPHIQUE*

Chapitre I: Fertilité des sols

I.1. Définition et importance de la fertilité des sols

La fertilité du sol constitue un élément fondamental pour assurer une production agricole durable et des rendements élevés. Elle désigne la capacité du sol à soutenir la croissance des plantes depuis la germination jusqu'à la maturité, en fournissant les conditions nécessaires à leur développement **(Yadav et Sarkar, 2019)**.

La fertilité du sol se traduit par sa capacité à fournir aux plantes un environnement propice à leur croissance. Un sol fertile offre un espace adéquat pour le développement des racines, une disponibilité suffisante en eau et en oxygène, ainsi qu'un apport équilibré en éléments nutritifs essentiels. Il contribue également à l'ancrage des végétaux, assurant leur stabilité et leur croissance optimale **(Alabouvette et Cordier, 2018)**.

Par ailleurs, la fertilité du sol résulte ainsi d'interactions complexes entre les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, qui conditionnent sa productivité et sa qualité globale **(Johnston, 2005)**. Le sol est alors considéré comme un milieu vivant et dynamique, composé de matière organique, de micro-organismes et de particules minérales de différentes tailles, possédant des propriétés physiques, chimiques et biologiques évolutives. Un sol riche en nutriments est qualifié de fertile. **(Johnston, 2005)**

La durabilité des systèmes agricoles repose sur le principe « nourrir le sol pour nourrir les plantes ». Ainsi, l'apport de matière organique (engrais verts, compost, résidus de culture) permet d'améliorer la fertilité du sol en enrichissant sa teneur en nutriments et en stimulant l'activité biologique. **(Doran et Safley, 1998)**

Enfin, le sol constitue la base de la production alimentaire : il nourrit les plantes, qui nourrissent à leur tour les animaux et les humains. Une gestion efficace des nutriments est donc essentielle pour répondre aux besoins alimentaires mondiaux **(Okigbo, 1999 ; Los Angeles, CA, 2002)**.

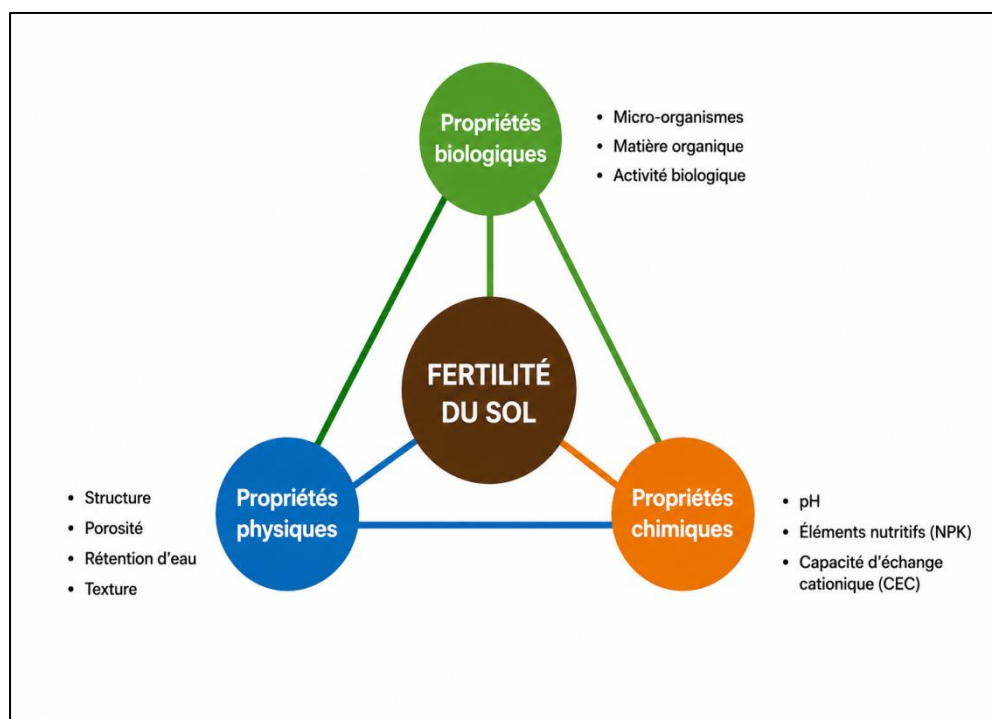


Figure 01 : Fertilité du sol (schémas générés par AI)

I.2. Origine de la fertilité des sols

La fertilité des sols peut être classée en deux types principaux :

I.2.1 Fertilité naturelle ou intrinsèque

La fertilité naturelle, également appelée fertilité intrinsèque, correspond à la capacité d'un sol à fournir naturellement les éléments nutritifs nécessaires à la croissance des plantes.

Elle dépend principalement de la nature de la roche mère, du climat, de la végétation et des processus pédogénétiques ayant conduit à la formation du sol. **(Javed et al., 2022).**

I.2.2 Fertilité acquise anthropique

La fertilité acquise résulte des interventions humaines visant à améliorer les propriétés du sol. Elle est obtenue grâce aux pratiques agricoles telles que l'apport d'engrais minéraux, de fumier, de compost ou d'autres amendements organiques, permettant d'augmenter la disponibilité des nutriments et d'améliorer la productivité des cultures. **(Ellis et al., 1997).**

Les biofertilisants contribuent également à améliorer la structure du sol, à stimuler la croissance végétale et à renforcer les populations de micro-organismes bénéfiques. Ils représentent ainsi une solution durable et respectueuse de l'environnement, limitant les risques de pollution. Les biofertilisants sont des intrants biologiques composés de micro-

organismes vivants qui améliorent la fertilité des sols et favorisent la croissance des plantes, constituant ainsi une alternative écologique aux engrais chimiques (Riaz et al, 2020).

I.3. Facteurs influençant la fertilité des sols

La fertilité des sols résulte de l'interaction de plusieurs facteurs physiques, chimiques et biologiques.

- **Les facteurs physiques** : influencent les propriétés structurales et hydriques du sol. Ils comprennent le climat, la texture et la structure du sol, la capacité de rétention en eau, la densité apparente ainsi que la conductivité électrique.
- **Les facteurs chimiques** : conditionnent la disponibilité des éléments nutritifs nécessaires aux plantes. Ils englobent le pH du sol, la capacité d'échange cationique ainsi que la disponibilité en éléments nutritifs, notamment les macroéléments et les oligoéléments.
- **Les facteurs biologiques** : sont liés à l'activité des organismes vivants du sol et jouent un rôle essentiel dans les transformations de la matière. Ils regroupent la matière organique, les microorganismes du sol, la minéralogie du sol ainsi que les cycles biogéochimiques (Retrieved et al ,2016 ; Brady NC, Weil RR al 2008)

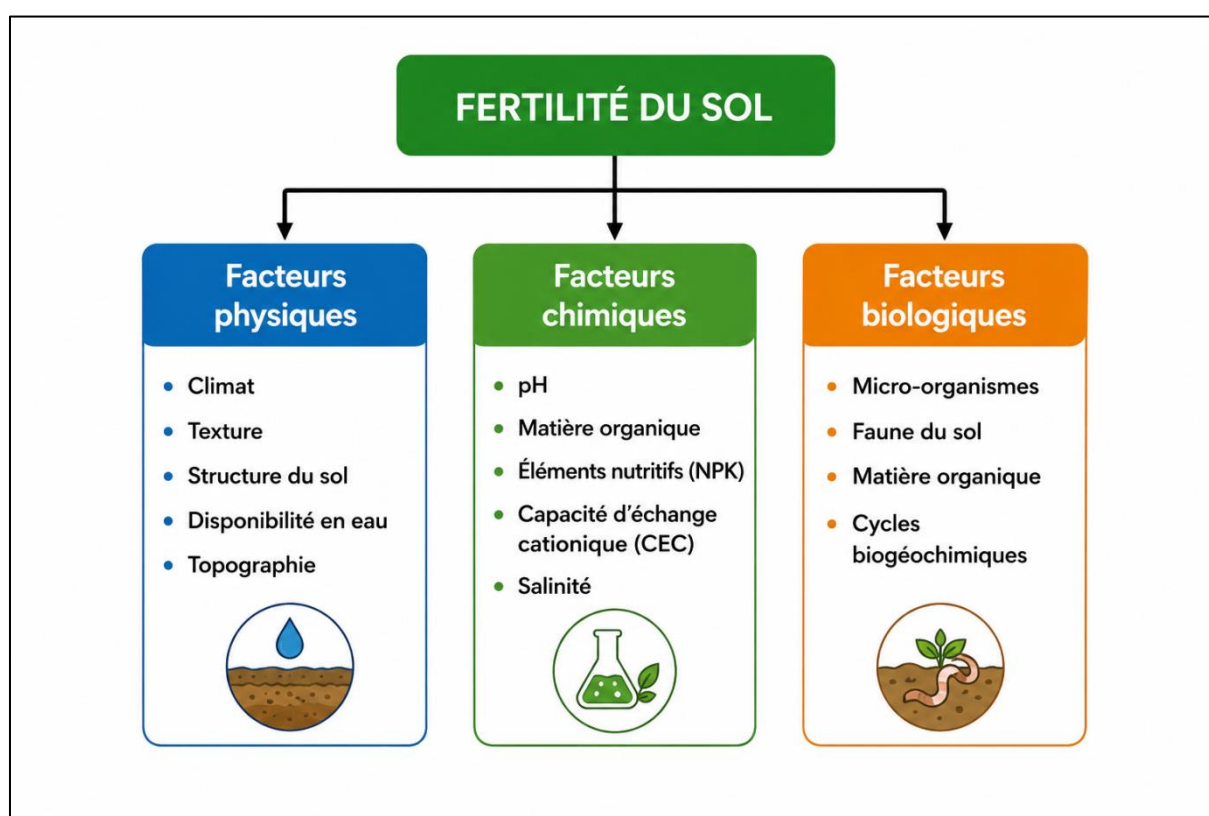


Figure 02 : facteurs influencent la fertilité du sol (schémas générés par IA)

I.4. Indicateurs simples de la fertilité des sols

Les indicateurs simples permettent d'évaluer rapidement l'état de fertilité d'un sol à partir de paramètres faciles à mesurer. Parmi les principaux indicateurs figurent le pH du sol, la matière organique et l'azote.

I.4.1. Le pH du sol

Le pH du sol est un indicateur essentiel de la fertilité, car il reflète le degré d'acidité ou d'alcalinité du sol. Il est mesuré sur une échelle de 0 à 14, où un pH égal à 7 correspond à un sol neutre, un pH inférieur à 7 indique un sol acide, tandis qu'un pH supérieur à 7 caractérise un sol basique.

La majorité des plantes se développent de manière optimale dans une gamme de pH comprise entre 5,5 et 6,5. Le pH influence directement la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol.

En effet, dans les sols fortement acides, la disponibilité de certains éléments majeurs tels que le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le potassium (K), le phosphore (P) et l'azote (N) diminue. En revanche, la disponibilité de certains oligo-éléments comme le fer (Fe), le manganèse (Mn), le zinc (Zn) et le cuivre (Cu) augmente.

Ainsi, le pH joue un rôle déterminant dans la nutrition des plantes et le maintien de la fertilité des sols. **(Javed et al., 2022)**

I.4.2. La matière organique

La matière organique du sol (MOS) provient de la décomposition des résidus végétaux et animaux, tels que les feuilles mortes, les débris végétaux, les microorganismes et les déjections animales. Elle comprend notamment l'humus, qui représente la fraction la plus stable.

Bien que sa proportion dans le sol soit relativement faible, la matière organique constitue un indicateur majeur de la fertilité des sols. Elle représente le principal réservoir d'éléments nutritifs, notamment l'azote, et joue un rôle essentiel dans le fonctionnement du sol.

Elle contribue à améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, notamment en favorisant la formation d'agrégats, en augmentant la stabilité structurale et en améliorant la rétention de l'eau.

Par ailleurs, la matière organique peut former des complexes organo-minéraux avec les particules du sol, ce qui augmente sa stabilité et la protège de la dégradation microbienne **(Oades, 1988 ; Baldock et Skjemstad, 2000).**

La teneur en matière organique dépend de plusieurs facteurs, notamment les conditions édaphiques (climat, végétation, type de sol) et les pratiques agricoles. Elle constitue ainsi un indicateur important de la qualité et de la durabilité des systèmes de production (Duponnois, 2012 ; Javed et al., 2022).

I.4.3. L'azote

La fertilité azotée d'un sol correspond à sa capacité à satisfaire les besoins en azote des cultures. L'azote est un élément essentiel pour la croissance des plantes, mais sa disponibilité dans le sol varie fortement dans le temps.

Les formes minérales de l'azote, telles que les nitrates (NO_3^-) et l'ammonium (NH_4^+), représentent une faible proportion de l'azote total du sol, mais elles sont directement assimilables par les plantes.

Ainsi, les mesures de l'azote minéral constituent des indicateurs utiles de la fertilité, bien qu'elles soient limitées dans le temps. Des méthodes d'incubation du sol permettent également d'estimer les quantités d'azote susceptibles d'être minéralisées (Ruiz et al., 1995).

I.5. Dégradation des sols : causes, impacts et rôle protecteur de la matière organique

La dégradation des sols constitue l'un des principaux facteurs limitant la productivité agricole à l'échelle mondiale. Elle correspond à l'ensemble des processus entraînant une diminution de la qualité du sol, affectant ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. Ce phénomène résulte de plusieurs causes naturelles et anthropiques.

I.5.1. Causes de la dégradation des sols

La dégradation des sols est principalement liée à :

- L'érosion hydrique et éolienne, qui entraîne la perte de la couche arable riche en éléments nutritifs.
- La diminution de la matière organique, due à des pratiques agricoles intensives et à la faible restitution des résidus organiques.
- La salinisation et la sodisation, souvent associées à une irrigation mal maîtrisée.
- L'utilisation excessive d'engrais chimiques et de pesticides, pouvant déséquilibrer les propriétés chimiques du sol.
- Le compactage du sol, lié à l'usage d'engins agricoles lourds, réduisant la porosité et l'aération.

- La déforestation et la surexploitation des terres, qui accélèrent la perte de couverture végétale protectrice.

(Russell et al., 1977)

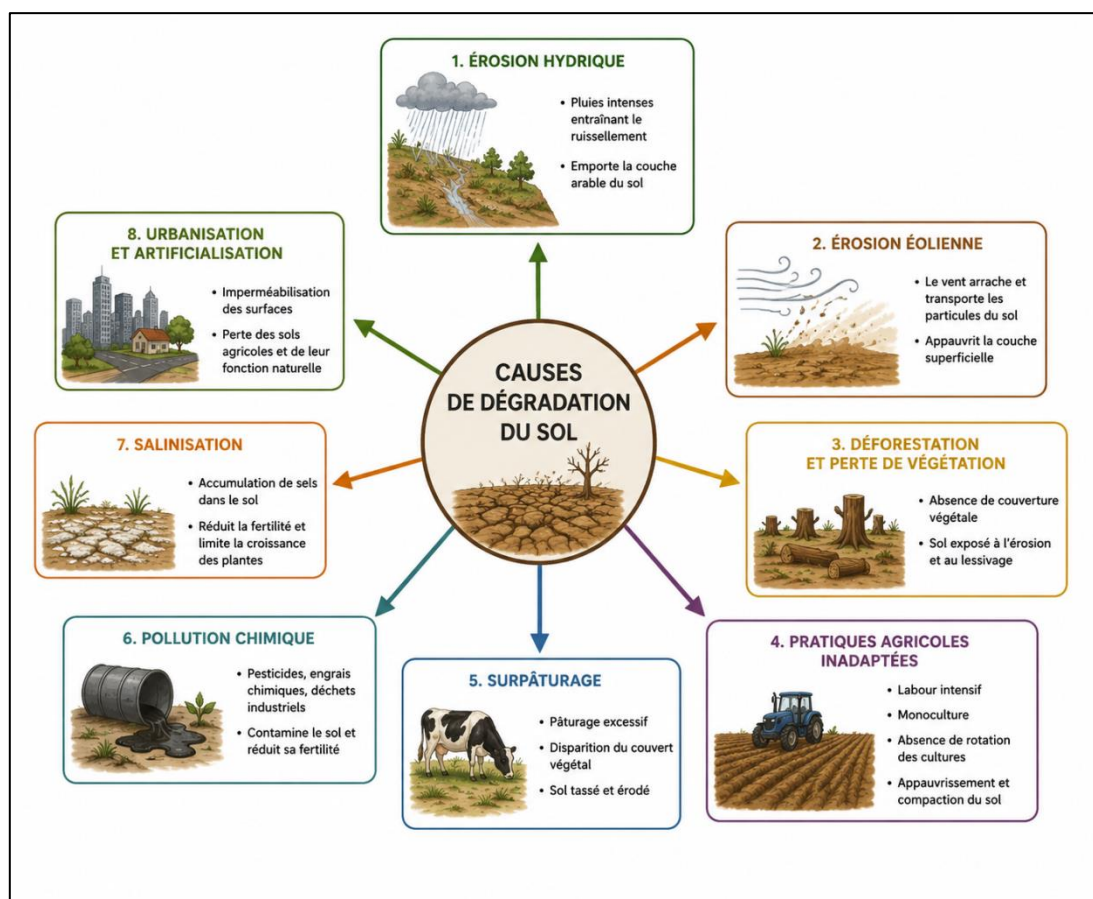


Figure 03 : Cause de dégradation du sol(schémas généré par AI)

1.5.2. Impact de la dégradation sur les caractéristiques du sol

La dégradation du sol affecte l'ensemble de ses propriétés :

- **Sur le plan physique** : elle entraîne une déstructuration du sol, une diminution de la porosité, une baisse de la capacité de rétention en eau et une augmentation de la densité apparente, limitant ainsi le développement racinaire.
- **Sur le plan chimique** : elle provoque une diminution des nutriments disponibles, un déséquilibre du pH et une réduction de la capacité d'échange cationique, ce qui limite la disponibilité des éléments essentiels aux plantes.
- **Sur le plan biologique** : elle entraîne une baisse de l'activité microbienne et une réduction de la diversité biologique du sol, affectant les cycles de transformation de la matière organique.

Ainsi, la dégradation du sol conduit globalement à une perte de fertilité et à une baisse significative de la productivité agricole. (Doumbia, 2007)

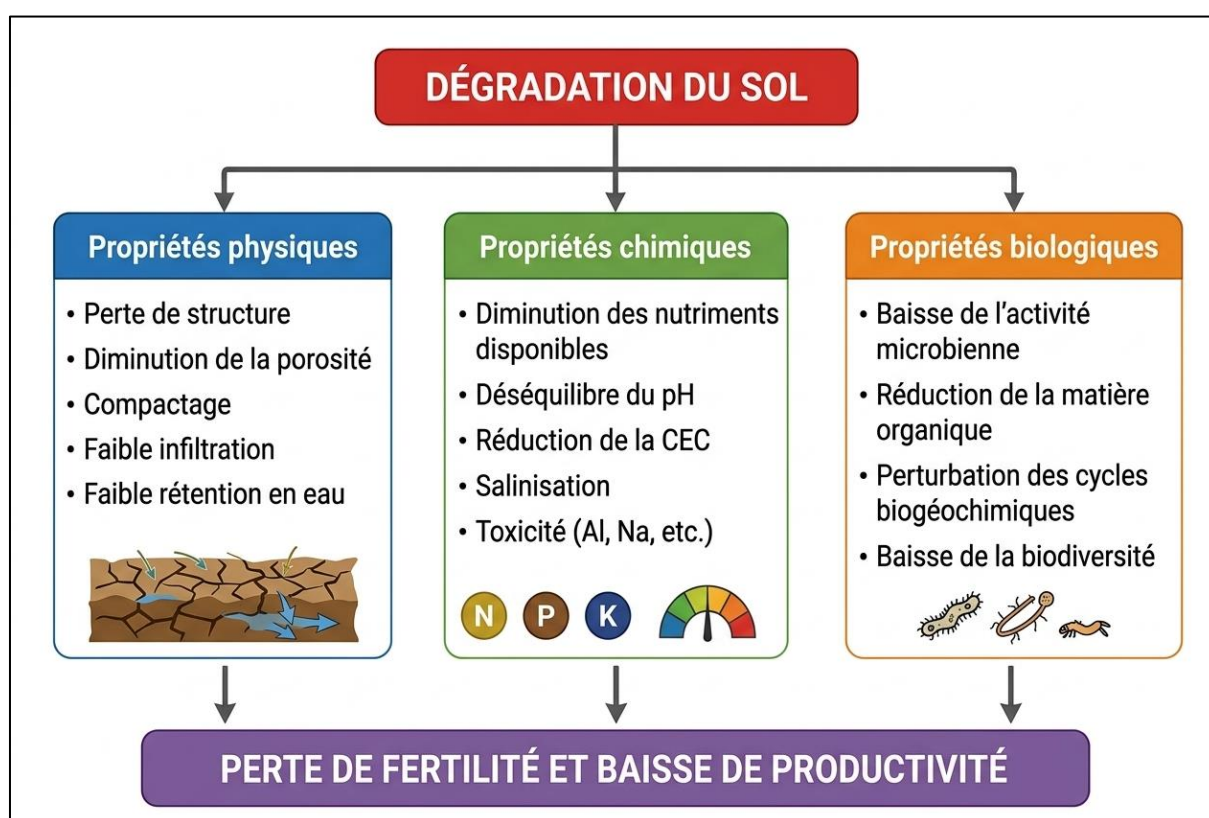


Figure 04 : Impact de dégradation du sol(schémas généré par AI)

1.5.3. Rôle de la matière organique dans la limitation de la dégradation

La matière organique joue un rôle central dans la prévention et la réduction de la dégradation des sols. Elle améliore la structure du sol en favorisant l'agrégation des particules, augmente la rétention en eau et stimule l'activité biologique.

Elle contribue également à la stabilité chimique du sol en augmentant la capacité d'échange cationique et en régulant la disponibilité des nutriments. Par ailleurs, elle permet la fixation de certains éléments toxiques, limitant ainsi leur impact négatif sur les cultures.

Ainsi, la matière organique constitue un indicateur clé de la qualité des sols et un élément essentiel de leur durabilité (Fairhurst, 2015).

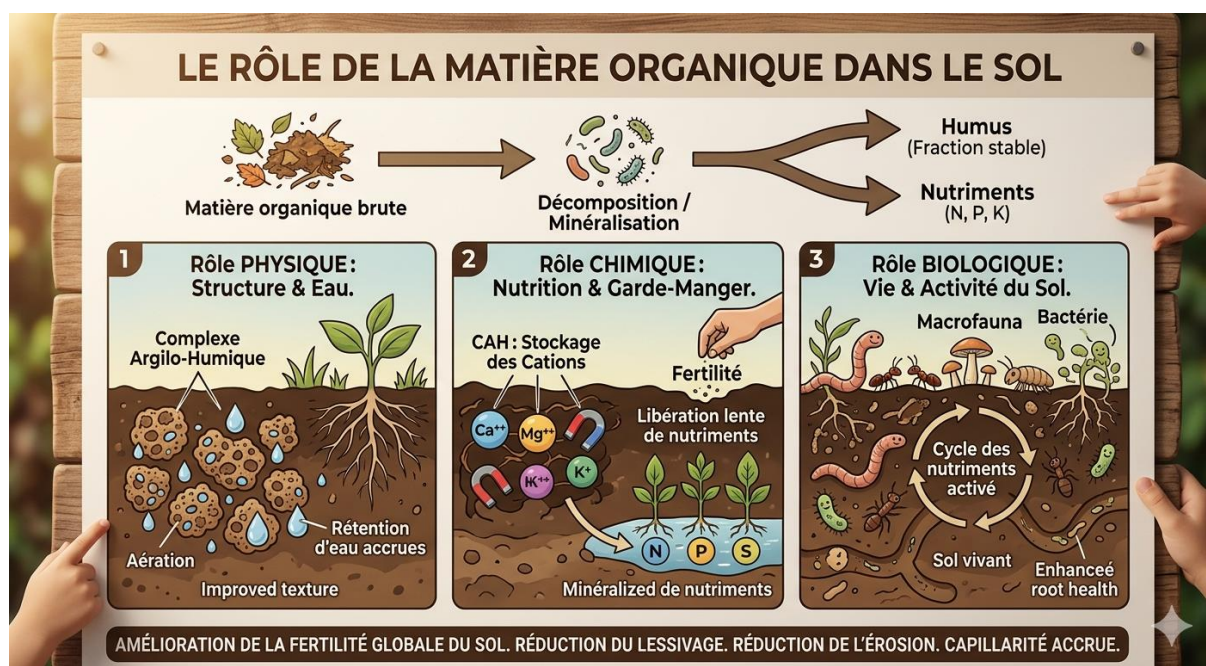


Figure 05 : Rôle de la matière organique dans le sol (généré par Ai)

I.6. Importance agronomique des éléments majeurs (N, P et K) et lien avec la fertilité des sols

Les éléments nutritifs majeurs, à savoir l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K), sont indispensables à la croissance des plantes et constituent des indicateurs essentiels de la fertilité des sols. Leur étude est particulièrement importante car ils représentent les principaux éléments limitants dans la production agricole.

L'azote (N) est un constituant fondamental des protéines et de la chlorophylle. Il joue un rôle clé dans la croissance végétative et la production de biomasse. Sa déficience entraîne un ralentissement de la croissance et une chlorose des feuilles.

Le phosphore (P) intervient dans les transferts d'énergie au sein de la plante, notamment à travers l'ATP, et est essentiel au développement du système racinaire, à la floraison et à la maturation des graines.

Le potassium (K) ne constitue pas un élément structural, mais il est essentiel à la régulation de nombreuses fonctions physiologiques. Il améliore la résistance des plantes aux stress hydriques, thermiques et pathogènes, et contribue à la qualité des récoltes.

L'importance de ces trois éléments réside dans leur rôle complémentaire dans le fonctionnement des plantes. Leur disponibilité dans le sol dépend fortement de la matière organique, du pH et de l'activité microbienne. Ainsi, le suivi du NPK constitue un indicateur fondamental pour évaluer la fertilité des sols et optimiser les pratiques de fertilisation (Donn et al., 2014).

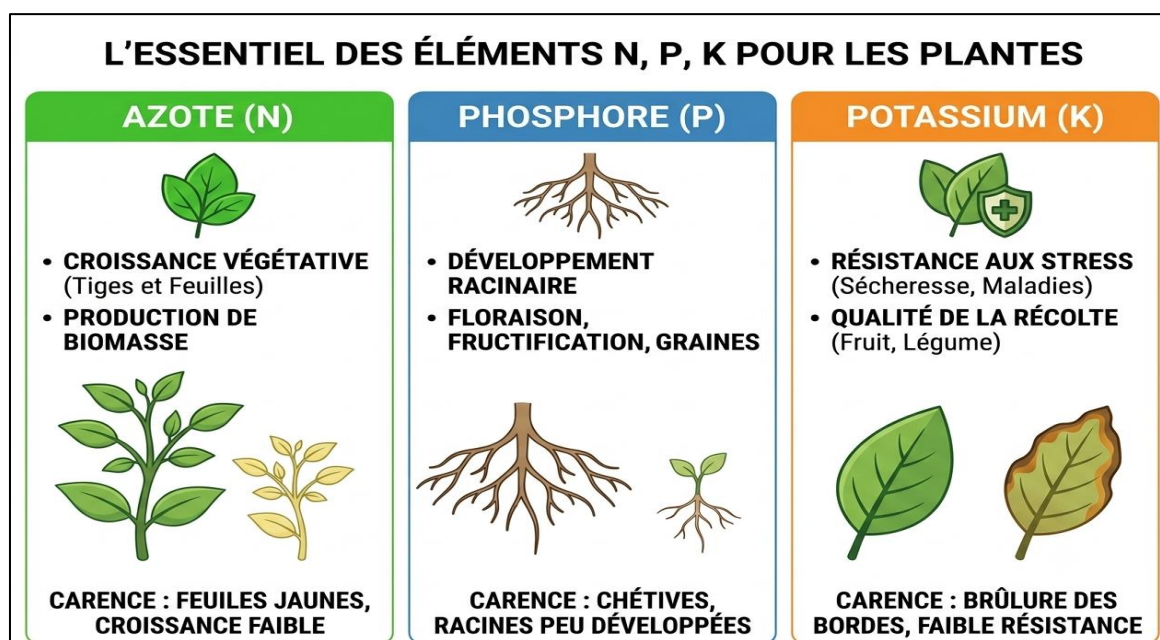


Figure 06 : rôle des éléments majeurs (N, P et K) dans la fertilité des sols (généré par AI)

Chapitre II : Amendements organiques a et valorisation des déchets organiques

L'amélioration de la fertilité des sols constitue un enjeu majeur pour assurer une production agricole durable. Pendant longtemps, les engrais chimiques ont été largement utilisés pour répondre aux besoins nutritionnels des cultures. Cependant, leur utilisation excessive peut entraîner des impacts négatifs sur les propriétés du sol et sur l'environnement. Dans ce contexte, les amendements organiques apparaissent comme une alternative durable permettant à la fois d'améliorer la qualité des sols et de valoriser les déchets organiques. Parmi ces derniers, les sous-produits agroalimentaires tels que le marc de café et les épluchures de fruits et légumes représentent des ressources potentiellement intéressantes pour enrichir les sols en matière organique et en éléments nutritifs. Ce chapitre présente les principaux amendements organiques, leurs effets sur la fertilité des sols ainsi que les possibilités de valorisation agronomique des sous-produits agroalimentaires.

II.1. Les amendements organiques comme alternative aux fertilisants chimiques

Au cours des dernières décennies, l'intensification agricole s'est largement appuyée sur l'utilisation des engrais minéraux afin d'augmenter les rendements des cultures. Bien que ces fertilisants apportent rapidement les éléments nutritifs nécessaires aux plantes, leur utilisation excessive peut entraîner plusieurs conséquences négatives, notamment la dégradation de la structure du sol, la diminution de la matière organique, l'acidification des sols et la pollution des eaux par lessivage des nitrates et des phosphates.

Parallèlement, l'augmentation des activités agricoles, agroalimentaires et domestiques génère d'importantes quantités de déchets organiques dont l'élimination constitue un défi environnemental majeur. Dans une perspective d'agriculture durable et d'économie circulaire, la valorisation de ces sous-produits organiques sous forme d'amendements apparaît comme une solution prometteuse permettant à la fois de réduire les déchets et d'améliorer la fertilité des sols.

Ainsi, l'utilisation d'amendements organiques Issus de sous-produits agroalimentaires constitue une alternative écologique aux fertilisants chimiques. Ces matériaux apportent de la

matière organique, stimulent l'activité biologique du sol, améliorent ses propriétés physiques et chimiques et contribuent au maintien de sa fertilité à long terme.

II.2. Définition des amendements organiques

Les amendements organiques sont des matières d'origine végétale ou animale, généralement issues de la décomposition ou du compostage des résidus organiques, telles que le fumier et le compost. Leur utilisation vise principalement à améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, notamment sa structure et sa fertilité (**Abdelhaq ; Diacono et al., 2011**).

Selon **Schvartz et al. (2005)**, les amendements organiques sont des matières minérales ou organiques utilisées pour entretenir ou améliorer les propriétés du sol ainsi que son activité biologique. Leur apport permet notamment d'améliorer l'état structural du sol et de favoriser la formation d'un produit stable riche en humus.

De plus, **Soltner (2003)** définit les amendements organiques comme des matières fertilisantes riches en composés carbonés d'origine végétale, destinées à maintenir ou à reconstituer le stock de matière organique du sol.

Ces amendements jouent un rôle essentiel dans une agriculture durable, car ils contribuent à améliorer la qualité du sol, sa fertilité et sa capacité à retenir l'eau et les nutriments (**Fageria, 2012 ; Wang et al., 2021 ; Wang et al., 2022**).

II.3. Différents types d'amendements organiques

Les amendements organiques regroupent un ensemble de matières d'origine végétale, animale ou mixte destinées à améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Leur composition varie selon leur origine, leur mode de production et leur degré de décomposition. Ces amendements constituent une source importante de matière organique et participent au maintien de la fertilité des sols (**Janvier, 2007**).

On distingue principalement :

II.3.1. Déchets organiques d'origine animale et urbaine

Cette catégorie comprend principalement les fumiers, les lisiers ainsi que les composts issus des déchets ménagers organiques. Le fumier résulte du mélange des déjections animales et

de la litière, tandis que le lisier est constitué essentiellement d'excréments liquides et d'urine. Ces amendements sont utilisés depuis longtemps en agriculture pour enrichir les sols en matière organique et en éléments nutritifs essentiels. Leur apport contribue à améliorer la stabilité structurale du sol, à favoriser l'activité biologique et à maintenir la fertilité à long terme(Villenave et al., 1998).

II.3.2. Résidus de culture et engrais verts

Les résidus de culture correspondent aux parties végétales laissées sur le champ après la récolte, telles que les pailles, les tiges ou les feuilles. Leur incorporation au sol permet d'apporter de la matière organique fraîche et de restituer une partie des éléments nutritifs prélevés par les cultures.

Les engrais verts sont des plantes cultivées spécifiquement pour être enfouies dans le sol avant leur maturité. Ils contribuent à améliorer la structure du sol, à augmenter sa teneur en matière organique et à limiter les risques d'érosion. Les légumineuses utilisées comme engrais verts présentent également la capacité de fixer l'azote atmosphérique grâce à leur association avec des bactéries symbiotiques, enrichissant ainsi le sol en azote disponible pour les cultures suivantes(Van Scoll, 1998 in Merdaci et Atia, 2006 ; Soltner, 2005).

II.3.3. Compost

Le compost est un amendement organique obtenu par la décomposition biologique aérobie de matières organiques d'origine végétale ou animale sous l'action des micro-organismes. Les matières compostées peuvent inclure des résidus végétaux, des déchets alimentaires, des fumiers ou d'autres déchets biodégradables.

Le compost est particulièrement apprécié pour sa stabilité et sa richesse en humus. Son utilisation permet d'améliorer la structure du sol, d'augmenter sa capacité de rétention en eau, de favoriser l'activité microbienne et d'assurer une libération progressive des éléments nutritifs. Il contribue ainsi à l'amélioration durable de la fertilité des sols (Mustin, 1987 ; Nada, 2011 ; Oustani et al., 2015). Selon Van Scoll (1998), le compost « nourrit à la fois le sol et la plante ».

II.3.4. Amendements organiques issus des sous-produits agroalimentaires

Les sous-produits agroalimentaires constituent une source croissante d'amendements organiques dans le cadre de l'agriculture durable et de l'économie circulaire. Ils proviennent des activités de transformation des produits agricoles et alimentaires et sont généralement riches en matière organique ainsi qu'en éléments minéraux.

Parmi les principaux sous-produits valorisables figurent le marc de café, les pulpes de fruits, les résidus de transformation des légumes, les grignons d'olive, les drêches de brasserie, la bagasse issue de la transformation de la canne à sucre ainsi que les résidus de transformation des céréales.(Prado-Acebo et al., 2024)

L'utilisation de ces sous-produits comme amendements organiques présente un double intérêt. D'une part, elle permet de réduire les quantités de déchets destinés à l'élimination et de limiter leur impact environnemental. D'autre part, elle contribue à améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol grâce à leur apport en matière organique et en nutriments. Dans cette optique, le marc de café et les épluchures de fruits et légumes représentent des ressources particulièrement intéressantes pour la valorisation agronomique des déchets organiques.(Nabais et al., 2008 ; Le Robert, 2024)

II.4. Effets des amendements organiques sur la fertilité du sol

II.4.1. Effets sur les propriétés physiques du sol

Les amendements organiques améliorent considérablement la structure du sol en favorisant la formation d'agrégats stables. Cette amélioration structurale augmente la porosité, facilite la circulation de l'air et de l'eau dans le profil du sol et réduit les phénomènes de compaction. De plus, l'augmentation de la matière organique améliore la capacité de rétention en eau, ce qui permet aux cultures de mieux résister aux périodes de sécheresse. Les amendements organiques contribuent également à réduire l'érosion hydrique et éolienne grâce à une meilleure cohésion des particules du sol.(Larney et Angers, 2012).

II.4.2. Effets sur les propriétés chimiques du sol

L'apport d'amendements organiques enrichit le sol en éléments nutritifs essentiels tels que l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca) et le magnésium (Mg). La matière organique augmente également la capacité d'échange cationique (CEC), améliorant ainsi la

rétenction et la disponibilité des nutriments pour les plantes. Elle participe également à la stabilisation du pH du sol et limite les pertes d'éléments nutritifs par lessivage. (Larney et Angers, 2012).

II.4.3. Effets sur les propriétés biologiques du sol

Les amendements organiques constituent une source importante d'énergie pour les microorganismes du sol. Ils stimulent ainsi l'activité microbienne, favorisent la biodiversité édaphique et accélèrent les processus de décomposition et de minéralisation de la matière organique. Cette activité biologique contribue à la libération progressive des nutriments et à l'amélioration de la fertilité globale du sol. (Larney et Angers, 2012).

II.5. Avantages et limites des amendements organiques:

II.4.1. Avantages des amendements organiques

Les amendements organiques présentent de nombreux avantages pour la fertilité des sols et la durabilité des systèmes agricoles. Ils assurent une libération progressive des éléments nutritifs essentiels, notamment l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K), permettant ainsi une alimentation plus régulière des plantes et une réduction des pertes par lessivage (Dhaliwal et al., 2024 ; Rashid et al., 2021).

L'apport de matière organique contribue également à l'amélioration des propriétés physiques du sol. Il favorise la formation d'agrégats stables, améliore la structure, augmente la porosité et facilite l'infiltration de l'eau et l'aération du sol (Franzluebbers, 2002 ; Bronick et Lal, 2005). De plus, les amendements organiques renforcent la capacité de rétention en eau, ce qui permet une meilleure résistance des cultures aux périodes de déficit hydrique (Bhadha et al., 2017).

Sur le plan biologique, ils constituent une source d'énergie et de carbone pour les microorganismes du sol, stimulant ainsi l'activité biologique, les processus de minéralisation et les cycles biogéochimiques des nutriments (Sharma et al., 2023 ; Tian et al., 2021). Enfin, l'incorporation régulière de matière organique favorise le stockage du carbone dans les sols et contribue à l'atténuation des changements climatiques par la séquestration du carbone (Dalal et Bridge, 2020).

II.4.2. Limites des amendements organiques

Malgré leurs nombreux avantages, les amendements organiques présentent certaines limites susceptibles de restreindre leur utilisation. Leur composition chimique est souvent variable selon l'origine des matières premières et les procédés de transformation utilisés, ce qui rend plus difficile la standardisation des apports nutritifs et la prévision de leur efficacité agronomique (Urta et al., 2019).

Par ailleurs, leur faible concentration en éléments nutritifs par rapport aux engrais minéraux implique généralement l'utilisation de quantités importantes, ce qui peut engendrer des contraintes de transport, de stockage et d'épandage (Senadheera et al., 2024). Certains amendements insuffisamment traités peuvent également contenir des agents pathogènes ou des graines d'adventices. Toutefois, ces risques peuvent être considérablement réduits grâce à des procédés appropriés tels que le compostage thermophile (Folorunsho, 2019).

Enfin, les éléments nutritifs contenus dans les amendements organiques sont libérés progressivement au cours de leur décomposition. Bien que cette caractéristique constitue un avantage pour la fertilité à long terme, elle peut ne pas répondre aux besoins immédiats des cultures à forte exigence nutritionnelle, notamment dans les systèmes agricoles intensifs (Osman et Osman, 2013).

II.6. Impact environnemental et agronomique de la valorisation des sous-produits agroalimentaires

Les amendements organiques jouent un rôle important dans la protection de l'environnement en contribuant à une gestion plus durable des ressources naturelles. Grâce à leur décomposition progressive, ils favorisent une libération graduelle des éléments nutritifs, ce qui réduit les pertes par lessivage et limite les risques de contamination des eaux souterraines et de surface. En améliorant la structure du sol et sa stabilité, ils contribuent également à réduire les phénomènes d'érosion et de dégradation des terres (Diacono et Montemurro, 2010).

Par ailleurs, l'utilisation des amendements organiques s'inscrit dans une démarche de valorisation des déchets biodégradables issus des activités agricoles, agroalimentaires et domestiques. Cette pratique permet de réduire les quantités de déchets destinés à l'enfouissement ou à l'incinération, tout en transformant ces résidus en ressources utiles pour l'agriculture. Elle

constitue ainsi un élément clé de l'économie circulaire, fondée sur le recyclage et la réutilisation des matières organiques.

Les amendements organiques contribuent également à diminuer la dépendance aux engrais chimiques, dont la production et l'utilisation intensive peuvent engendrer des impacts environnementaux importants. En outre, leur apport régulier favorise l'accumulation de matière organique dans le sol et participe à la séquestration du carbone, contribuant ainsi à l'atténuation des changements climatiques. Enfin, ils assurent une amélioration durable des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, garantissant le maintien de sa fertilité à long terme.

II.7. Compostage des déchets organiques

II.7.1. Définition du compostage

Le compostage est un processus biologique de décomposition aérobie des matières organiques d'origine végétale ou animale sous l'action de micro-organismes tels que les bactéries, les champignons et les actinomycètes. Selon **Mustin (1987)**, il correspond à la dégradation des constituants organiques des sous-produits organiques. D'après **Godden (1986)**, le compostage est une transformation biologique des déchets organiques assurée par une succession de populations microbiennes, conduisant à la formation d'un produit stable appelé compost, utilisable comme amendement organique pour améliorer la fertilité des sols.

Le compost constitue aujourd'hui l'un des amendements organiques les plus utilisés. Sa production représente à la fois une pratique agricole durable et une solution efficace de valorisation des déchets organiques (**Pérez-Piqueres et al., 2006**).

II.7.2. Phases du compostage

Le processus de compostage se déroule généralement en quatre phases principales :

- **Phase mésophile** : elle correspond au début du compostage. Les micro-organismes mésophiles dégradent rapidement les matières organiques facilement biodégradables, entraînant une élévation progressive de la température.
- **Phase thermophile** : la température peut atteindre 45 à 70 °C. Cette phase est caractérisée par une activité microbienne intense permettant la dégradation des composés organiques complexes ainsi que l'élimination de nombreux agents pathogènes et graines d'adventices.

- **Phase de refroidissement** : lorsque les matières facilement dégradables deviennent moins abondantes, l'activité microbienne diminue progressivement et la température commence à baisser.
 - **Phase de maturation** : cette dernière étape correspond à la stabilisation de la matière organique et à la formation de composés humiques. Le compost obtenu devient alors plus stable et adapté à une utilisation agricole (**Doublet et al., 2011**).
- Partie à améliorer (durée ect et références)

II.7.3. Facteurs influençant le compostage

L'efficacité du compostage dépend de plusieurs facteurs qui conditionnent l'activité des micro-organismes responsables de la décomposition.

- **La température** constitue l'un des principaux indicateurs de l'activité biologique au cours du compostage. Son évolution permet de suivre les différentes phases du processus.
- **L'humidité** est indispensable au développement des micro-organismes. Une humidité insuffisante ralentit la décomposition, tandis qu'un excès d'eau réduit l'aération du milieu et favorise les fermentations anaérobies.
- **L'aération** assure l'apport en oxygène nécessaire à la respiration des micro-organismes aérobies. Un brassage régulier du compost permet de maintenir des conditions favorables à leur activité.
- **Le rapport carbone/azote (C/N)** influence directement la vitesse de dégradation de la matière organique. Un rapport initial compris entre 25 et 30 est généralement considéré comme optimal.
- **Le pH** affecte également l'activité microbienne. Les valeurs proches de la neutralité sont généralement les plus favorables au compostage.
- **La granulométrie des matériaux** intervient enfin dans la circulation de l'air et l'accessibilité des substrats aux micro-organismes.

Le compost obtenu améliore la fertilité du sol en augmentant la disponibilité des éléments nutritifs essentiels tels que l'azote, le phosphore, le potassium et le magnésium. Il favorise également le développement du système racinaire, améliore la structure du sol et stimule l'activité biologique (Donn et al., 2014).

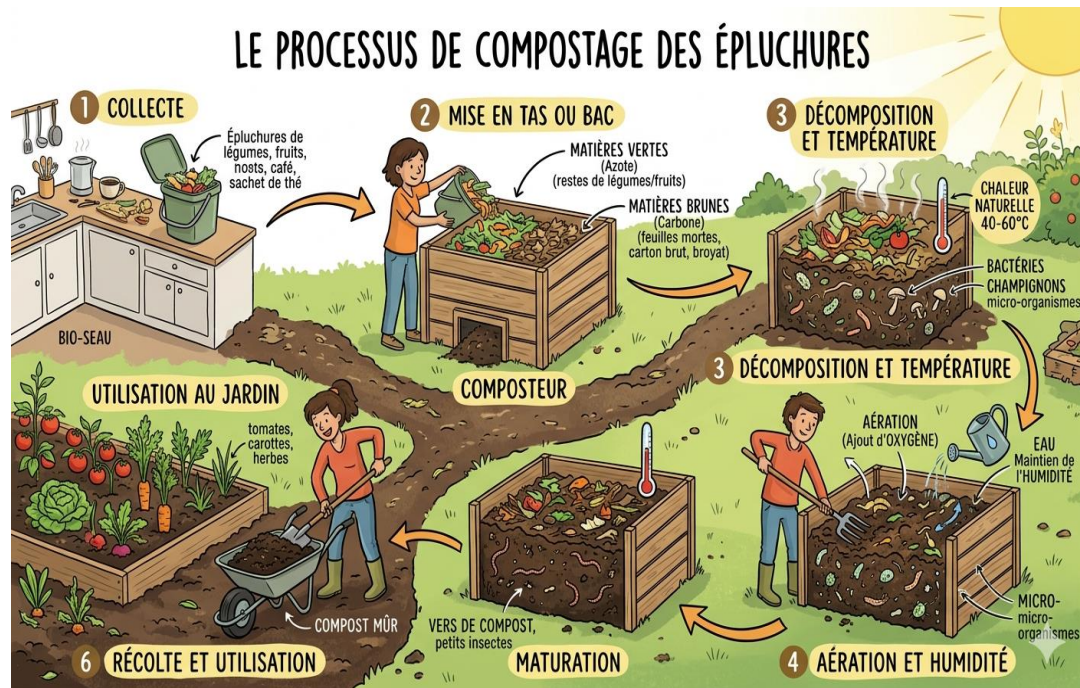


Figure 07 : étapes de compostage (schémas générer par AI)

II.8. Valorisation agricole des déchets organiques

Dans une perspective d'agriculture durable, la valorisation des déchets organiques représente une approche prometteuse pour améliorer la fertilité des sols tout en réduisant les impacts environnementaux liés à leur accumulation. Les déchets organiques regroupent divers résidus issus des activités agricoles, agroalimentaires et domestiques. Riches en matière organique et en éléments nutritifs, ils constituent une ressource potentielle pour la restauration des sols appauvris et le maintien de leur productivité (Chauvin, 2004).

La transformation de ces déchets en amendements organiques, notamment par compostage, permet leur recyclage et leur réutilisation en agriculture. Cette pratique contribue non seulement à réduire les quantités de déchets destinés à l'élimination, mais également à

enrichir les sols en matière organique, à améliorer leur structure et à stimuler leur activité biologique.

Parmi les déchets organiques valorisables, le marc de café et les épiluchures de fruits et légumes présentent un intérêt particulier. Ces sous-produits agroalimentaires sont produits en grandes quantités et contiennent des composés organiques susceptibles d'améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Leur valorisation comme amendements organiques s'inscrit pleinement dans les principes de l'économie circulaire, qui vise à transformer les déchets en ressources utiles.

Toutefois, la réussite de cette valorisation dépend de la maîtrise des procédés de traitement et de compostage. En effet, plusieurs projets de gestion des déchets organiques, notamment dans les pays en développement, ont rencontré des contraintes techniques, économiques ou organisationnelles limitant leur efficacité (Masse et al., 2017).

Dans le cadre de cette étude, **le marc de café et les épiluchures de fruits et légumes** ont été retenus comme amendements organiques potentiels afin d'évaluer leur capacité à améliorer la fertilité de sols pauvres en matière organique. Leur utilisation pourrait constituer une alternative durable et économiquement accessible aux fertilisants conventionnels.

II.8.1. Le marc de café comme amendement organique

Le marc de café constitue une source intéressante de matière organique valorisable en agriculture. Il est riche en composés carbonés et peut contribuer à l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Sa valorisation est d'autant plus pertinente que la production mondiale de café génère d'importantes quantités de résidus, le café étant l'une des boissons les plus consommées au monde et un produit largement commercialisé à l'échelle internationale (Nabais et al., 2008).

- **Teneur en matière organique et éléments nutritifs**

Le marc de café présente généralement une teneur élevée en matière organique, souvent supérieure à 80 % de la matière sèche, de composés lignocellulosiques (cellulose, hémicellulose et lignine), de protéines, de lipides ainsi que de nombreux composés bioactifs (Campos-Vega et al., 2015). Il constitue ainsi une source importante de carbone organique susceptible d'améliorer la structure du sol et de favoriser l'activité microbienne. Il renferme également des quantités appréciables d'azote, avec des teneurs généralement comprises entre 1 et 3 % de la matière sèche,

ainsi que du phosphore et du potassium le calcium, le magnésium en proportions variables selon les conditions de production et de transformation. Cette richesse nutritionnelle en fait un matériau potentiellement intéressant pour l'amendement des sols et la production de compost. (**Campos-Vega et al., 2015**)

- **Effets sur la fertilité du sol**

Plusieurs études ont mis en évidence l'intérêt agronomique du marc de café. **Nabais et al.** (2008) ont montré que ce résidu présente un potentiel élevé pour la production d'amendements organiques en raison de sa richesse en matière organique et en nutriments, dont il favorise l'augmentation de la matière organique, améliore la stabilité structurale des agrégats et contribue à accroître la capacité de rétention en eau. Il stimule également l'activité des micro-organismes du sol et participe au recyclage des éléments nutritifs. Lorsqu'il est utilisé après compostage, le marc de café présente généralement une meilleure stabilité biologique et un risque réduit de phytotoxicité(**Bomfim et al., 2022**). D'autres travaux ont rapporté que son incorporation dans le compost améliore la qualité du compost obtenu et favorise le développement des cultures. Cependant, certaines études recommandent une utilisation modérée ou un compostage préalable, car l'application directe de grandes quantités de marc de café peut entraîner une immobilisation temporaire de l'azote ou la présence de composés susceptibles d'affecter la croissance de certaines plantes.(**Cruz et al., 2012 ; Hardgrove & Livesley, 2016**).

II.8.2. Les épluchures de fruits et légumes comme amendement organique

Les épluchures de fruits et légumes représentent une fraction importante des déchets organiques ménagers et agroalimentaires. Elles correspondent aux parties externes retirées lors des opérations de préparation, de transformation ou de consommation des produits végétaux. En raison de leur caractère biodégradable et de leur richesse en composés organiques, elles constituent une ressource intéressante pour la production d'amendements organiques par compostage (**Le Robert, 2024**).

- **Teneur en matière organique et éléments nutritifs**

Les épluchures de fruits et légumes sont particulièrement riches en matière organique facilement dégradable. Elles contiennent principalement des glucides, de la cellulose, de l'hémicellulose, des pectines ainsi que diverses substances organiques favorisant l'activité des

microorganismes du sol.(Suthar et al., 2014 ; Adhikari et al., 2009). Cette richesse en matière organique contribue à l'amélioration de la structure du sol, à l'augmentation de sa capacité de rétention en eau et au maintien de sa fertilité.

Outre leur teneur élevée en matière organique, les épluchures renferment plusieurs éléments minéraux essentiels à la croissance des plantes, notamment l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca) et le magnésium (Mg). Leur composition varie selon l'espèce végétale, le stade de maturité des produits et les conditions de culture. Les épluchures de banane sont généralement riches en potassium, tandis que celles de certains légumes présentent des teneurs appréciables en calcium et en phosphore.(Pathak et al., 2018 ; Hailemariam et al., 2024).

- **Effets sur la fertilité du sol**

L'application des composts issus des épluchures de fruits et légumes contribue à l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Elle favorise l'augmentation de la matière organique, améliore la structure et la porosité du sol, accroît sa capacité de rétention en eau et stimule l'activité microbienne. (Bernal et al., 2009 ; Agegnehu et al., 2016) .De plus, la minéralisation progressive des nutriments contenus dans ces résidus assure un apport durable en éléments nutritifs aux plantes et participe au maintien de la fertilité des sols.

Plusieurs études ont montré que la valorisation des épluchures de fruits et légumes sous forme de compost constitue une solution efficace pour le recyclage des déchets organiques et l'amélioration de la qualité des sols agricoles, tout en réduisant les impacts environnementaux liés à leur élimination.(Lim et al., 2016 ; Shiralipour et al., 1992).

II.8.3. Intérêt agronomique de la combinaison du marc de café et des épluchures de fruits et légumes

L'association de différents déchets organiques constitue une stratégie intéressante pour améliorer la qualité des amendements organiques destinés à l'agriculture. Parmi ces déchets, le marc de café et les épluchures de fruits et légumes présentent des caractéristiques complémentaires susceptibles de favoriser la fertilité des sols et d'optimiser les processus de compostage. (Mirabella et al., 2014 ;)

Le marc de café est principalement caractérisé par sa richesse en matière organique stable, en carbone et en azote, tandis que les épluchures de fruits et légumes contiennent généralement

des matières organiques plus facilement biodégradables ainsi que des quantités appréciables de minéraux essentiels tels que le potassium, le calcium et le phosphore. L'association de ces deux sous-produits permet ainsi d'obtenir un substrat plus équilibré sur le plan nutritionnel.

Sur le plan du compostage, le mélange du marc de café avec les épluchures de fruits et légumes favorise un meilleur équilibre du rapport carbone/azote (C/N), facteur déterminant pour l'activité des micro-organismes responsables de la décomposition de la matière organique. Cette complémentarité peut accélérer le processus de compostage et améliorer la qualité du compost produit. **(Fan et al., 2018)**

D'un point de vue agronomique, l'application de ce mélange au sol peut contribuer à augmenter la teneur en matière organique, améliorer la structure et la stabilité des agrégats, renforcer la capacité de rétention en eau et stimuler l'activité biologique du sol. La minéralisation progressive des nutriments contenus dans ces résidus assure également un apport durable en éléments nutritifs nécessaires à la croissance des plantes. **(Diacono et Montemurro, 2010)**

Par ailleurs, la valorisation conjointe du marc de café et des épluchures de fruits et légumes s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire visant à réduire les quantités de déchets organiques destinés à l'élimination tout en produisant des amendements à valeur agronomique. Cette approche contribue ainsi à la préservation de l'environnement et à la promotion d'une agriculture plus durable. **(Bhatia & Sindhu, 2024)**

Dans le cadre de cette étude, l'association du marc de café et des épluchures de fruits et légumes a été retenue afin d'évaluer son potentiel d'amélioration de la fertilité de sols pauvres en matière organique et de déterminer son intérêt comme alternative durable aux amendements conventionnels.

II.9. Différence entre les amendements organiques et les engrais chimiques :

Critères	Amendements organiques	Engrais chimiques
Définition	Matières d'origine végétale ou animale améliorant la structure et la fertilité du sol (Diacono et al., 2011)	Substances minérales apportant directement des nutriments (Hera, 1996)
Mode d'action	Libération lente et progressive des nutriments grâce à la décomposition	Libération rapide et directe des éléments nutritifs
Effet sur le sol	Améliorent la structure, la porosité et l'activité biologique (Larney et Angers, 2012)	Risque de dégradation du sol et baisse de la matière organique
Effet sur la matière organique	Augmentent l'humus et la fertilité du sol	Diminution de la matière organique en cas d'usage excessif (Roelcke et al., 2004)
Impact environnemental	Réduisent la pollution, limitent le lessivage et protègent les eaux (Diacono et Montemurro, 2010)	Peuvent provoquer la pollution des eaux, l'eutrophisation et l'acidification des sols (Roelcke et al., 2004 ; Dinesh et al., 2010 ; Guo et al., 2010)
Efficacité	Effet lent mais durable	Effet rapide mais temporaire
Impact sur le pH	Stabilisent généralement le pH	Peuvent acidifier le sol (Cooke, 1982)
Durabilité	Solution durable et respectueuse de l'environnement (Diacono et al., 2011)	Moins durable en cas d'utilisation excessive
Rendement agricole	Amélioration progressive à long terme	Augmentation rapide des rendements (Hera, 1996)

Tableau 1 : Comparaison entre les amendements organiques et les engrais chimiques

Ainsi, bien que les engrais chimiques présentent une efficacité rapide, les amendements organiques offrent une solution plus durable et respectueuse de l'environnement pour maintenir la fertilité des sols à long terme.

*PARTIE II : ÉTUDES
EXPÉRIMENTALE*

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.1. Caractérisation initiale du sol

III.1.1. Site et prélèvement du sol

a) Localisation du site

Le sol utilisé dans cette étude a été prélevé au niveau du douar Sidi Houssein, commune d'Oulhaça, wilaya d'Aïn Témouchent (Algérie). Les coordonnées géographiques du site sont : 35°14'36.43" N et 1°29'32.94" W (ou E). Le site a été localisé à l'aide de Google Earth



Figure 8 : Localisation géographique du site d'étude à l'aide de Google Earth

b) Conditions de prélèvement

L'échantillonnage du sol a été effectué dans l'horizon superficiel (0–20 cm), correspondant à la couche la plus active sur le plan biologique et la plus exploitée par les racines des plantes. Plusieurs prélèvements élémentaires ont été réalisés puis mélangés afin d'obtenir un échantillon composite représentatif du site.

c) Préparation des échantillons

Après prélèvement, les échantillons de sol ont été transportés au laboratoire, puis séchés à l'air libre à température ambiante. Le sol a ensuite été débarrassé des débris végétaux et des cailloux, homogénéisé, broyé et tamisé à 2 mm avant la réalisation des analyses physicochimiques et la mise en place de l'expérimentation.

Les analyses du pH, de la conductivité électrique (CE), des solides dissous totaux (TDS) et de la salinité ont été réalisées au Laboratoire de Biologie de l'Université d'Aïn Témouchent. Les analyses de la matière organique, la détermination du carbonate de calcium (CaCO_3), l'essai au bleu de méthylène ainsi que l'analyse granulométrique par sédimentation ont également été effectuées dans le laboratoire de la mécanique du sol de département de génie civile Université d'Aïn Témouchent, selon les protocoles analytiques appropriés.

L'expérimentation végétale, consistant à évaluer l'effet des différents amendements organiques sur la croissance de la culture test, a été conduite dans des pots installés à domicile, dans un espace extérieur ouvert, afin de permettre aux plantes de se développer sous des conditions environnementales naturelles (éclairage, température et aération).

III.1.2. Analyses physiques du sol

III.1.2.1. Détermination de la texture du sol

La texture du sol a été évaluée à l'aide de deux méthodes complémentaires : la méthode du bocal, permettant d'estimer les proportions relatives de sable, de limon et d'argile, et l'essai au bleu de méthylène, utilisé pour apprécier la teneur en particules argileuses et l'activité de la fraction fine du sol

➤ Méthode du bocal (triangle textural)

La texture du sol a été déterminée à l'aide de la méthode du bocal **USDA (1930)**. Cette technique repose sur la sédimentation différentielle des particules minérales en suspension dans l'eau selon leur taille.

Pour ce faire, une quantité connue de sol préalablement séché et tamisé a été introduite dans un bocal transparent contenant de l'eau. Après agitation vigoureuse afin de disperser les particules, le mélange a été laissé au repos pendant plusieurs heures pour permettre la décantation. Les particules les plus grossières (sables) se sont déposées en premier, suivies des limons puis des argiles.

À la fin de la décantation, les hauteurs des différentes couches ont été mesurées. Les proportions relatives de sable, de limon et d'argile ont ensuite été calculées et reportées sur le triangle textural afin de déterminer la classe texturale du sol.

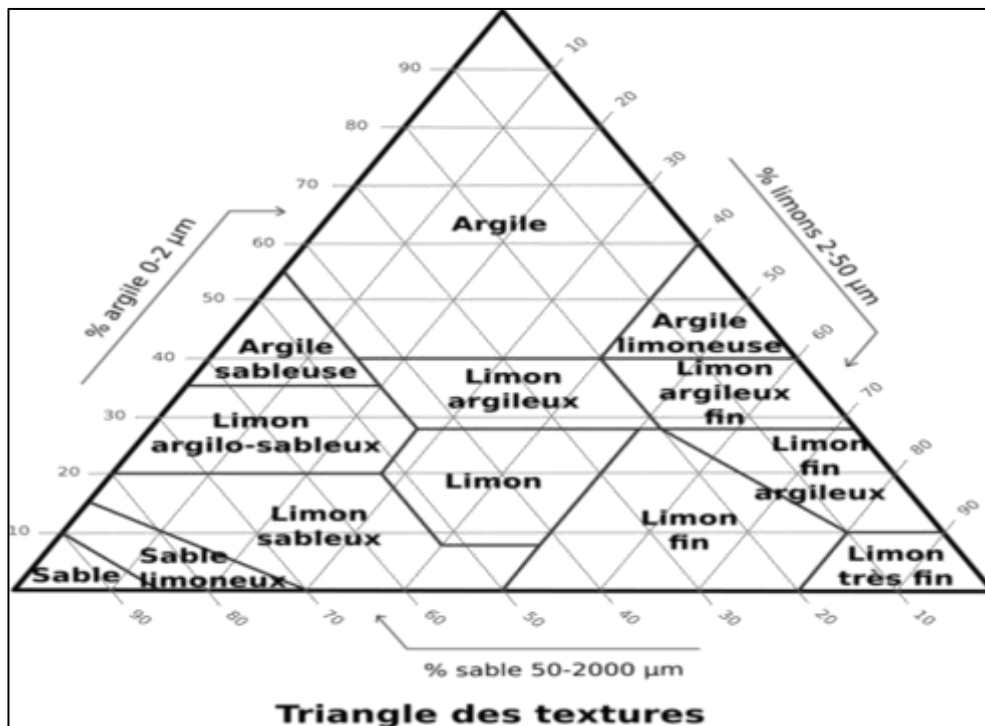


Figure 9 : Triangle USDA des textures des sols

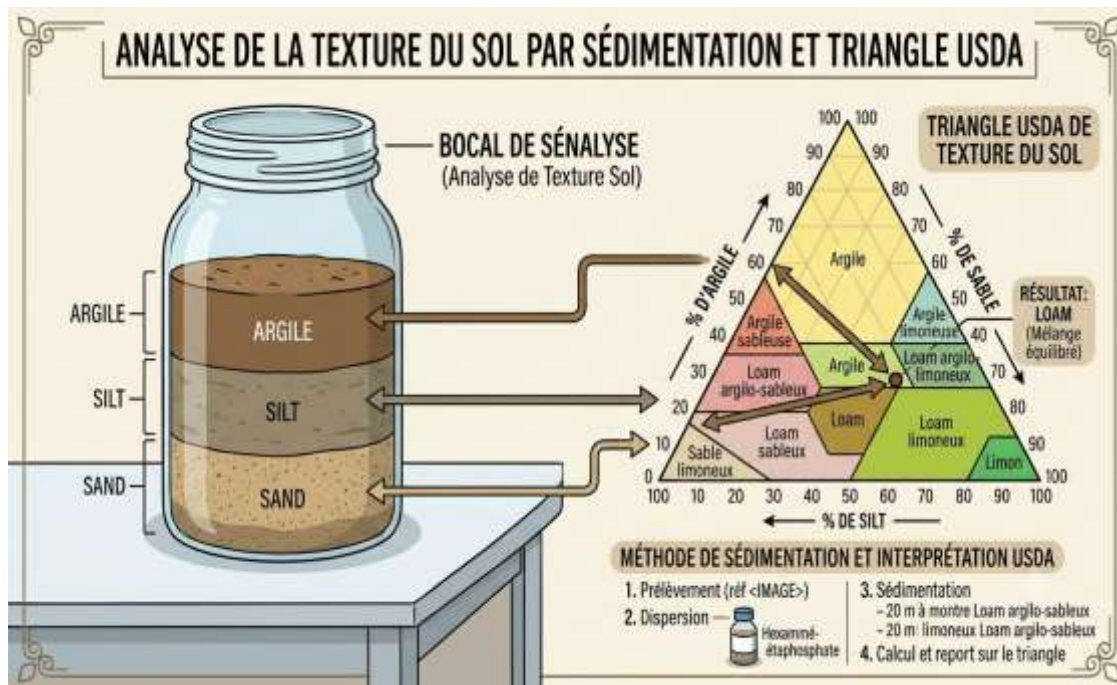


Figure 10 : Processus d'analyse de la texture du sol par la méthode du bocal (schéma générer par AI)

- Essai au bleu de méthylène (Hang & Brindley (1970), puis norme AFNOR 1992

- **Principe**

L'essai au bleu de méthylène permet d'estimer la teneur en particules argileuses et l'activité de la fraction fine du sol. Cette méthode repose sur l'adsorption progressive du bleu de méthylène par les surfaces des particules fines jusqu'à leur saturation.

- **Méthode**

Une prise d'essai de 30 g de sol sec tamisé à 5 mm a été introduite dans un bécher contenant 500 cm³ d'eau distillée. La suspension a été homogénéisée par agitation pendant 5 minutes. Une solution de bleu de méthylène a ensuite été ajoutée progressivement jusqu'à atteindre le point de saturation, déterminé par le test de la tache sur papier filtre.

Le volume total de bleu de méthylène consommé a permis de déterminer la valeur au bleu (VBS) ainsi que la surface spécifique totale (SST) du sol.

- **Calculs**

$$VBS = V/M$$

Où :

V : volume total de bleu ajouté (cm³)

M : masse de la prise d'essai (g)

La surface spécifique totale est calculée selon la relation :

Où :

$$SST = 20.93 \times VBS$$

SST : surface spécifique totale (m²/g)

VBS : valeur au bleu de méthylène.

Tableau 2: Classification des sols selon la valeur au bleu de méthylène (VBS).

VBS	Texture du sol
<0.2	Sols Sableux
0.2 _ 2.5	Sols Limoneux
2.5 _ 6	Sols Limoneux _ argileux
6 _ 8	Sols argileux
>8	Sols très argileux

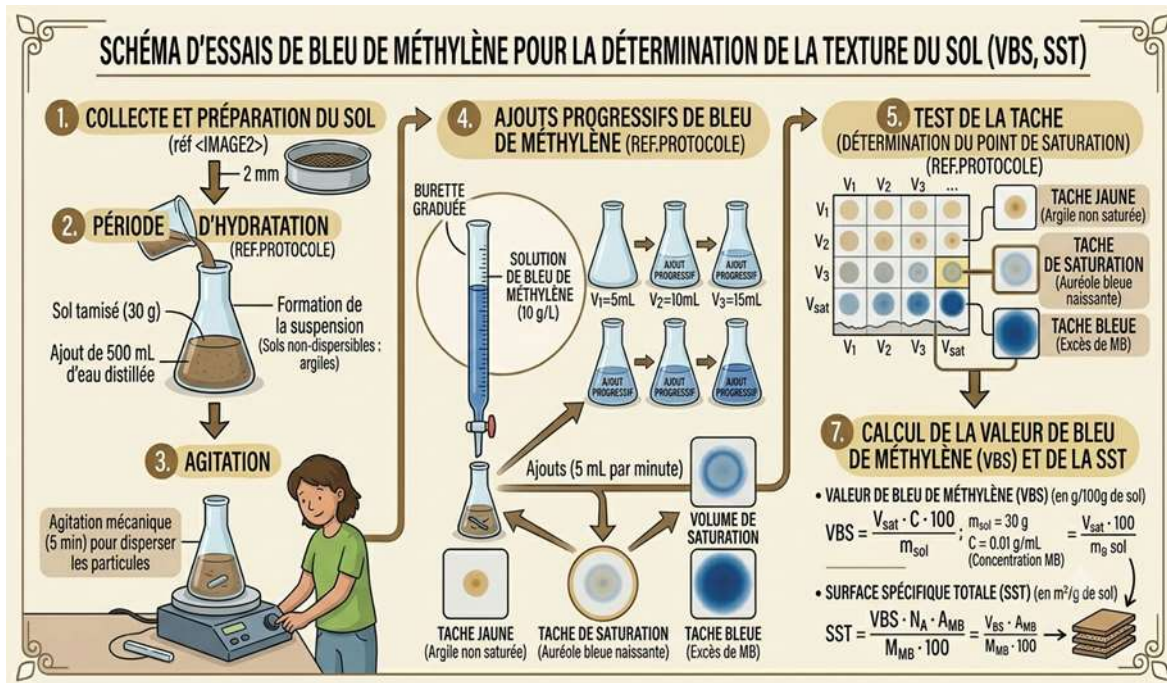
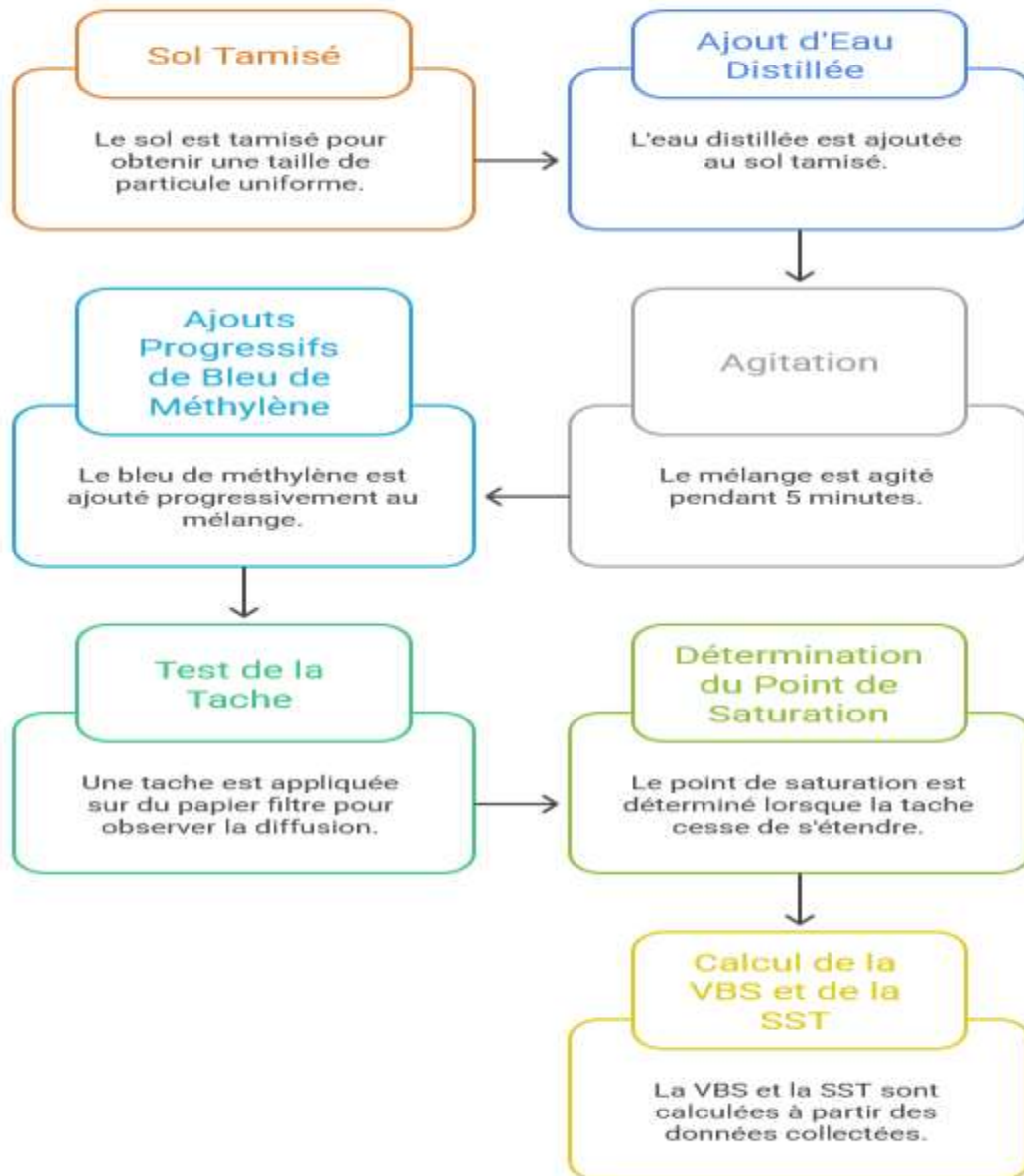


Figure 11 : Schéma d'essais de bleu de méthylène pour la détermination de la texture du sol (générer par AI)

Processus de Détermination de la VBS et de la SST



Made with Napkin

Figure 12 : Schémas d'essai de bleu de méthylène pour la détermination de la texture du sol (AI)

III.1.2.2. Analyse granulométrique par sédimentation

- **Principe**

L'analyse granulométrique par sédimentation permet de déterminer la répartition des particules minérales du sol en fonction de leur diamètre. Cette méthode repose sur la loi de Stokes, selon laquelle la vitesse de sédimentation des particules dans un liquide est proportionnelle à leur taille : les particules grossières se déposent plus rapidement que les particules fines.

- **Méthode**

L'analyse a été réalisée à l'aide d'un densimètre dans des éprouvettes graduées de 2 L. Une prise d'essai de 80 g de sol tamisé à 80 μm a été dispersée dans une solution défloculante puis agitée mécaniquement afin d'obtenir une suspension homogène.

La suspension a ensuite été transférée dans une éprouvette graduée et complétée avec de l'eau distillée jusqu'à un volume de 2 L. Après homogénéisation, des lectures densimétriques ont été effectuées à différents temps de sédimentation afin de suivre la décantation progressive des particules du sol.

Un éprouvette témoin contenant uniquement de l'eau distillée a été utilisé pour corriger les lectures du densimètre. La température de la suspension a également été mesurée afin d'appliquer les corrections nécessaires.

Les résultats obtenus ont permis de déterminer les proportions des différentes fractions granulométriques du sol (sable, limon et argile).



Figure 13: Analyse granulométrique du sol par sédimentation au densimètre.

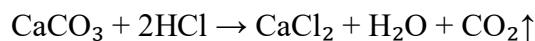
III.1.3. Analyses chimiques du sol

III.1.3.1. Détermination du carbonate de calcium (CaCO_3)

- **Principe**

La teneur en carbonate de calcium est déterminée par réaction du sol avec un acide, provoquant un dégagement de CO_2 proportionnel à la quantité de CaCO_3 présente.

Le dégagement de CO_2 observé lors de l'ajout de HCl est dû à la réaction suivante :



- **Méthode**

Une masse de 1 g de sol séché et finement broyé (sol tamisé/moulu) a été placée dans un tube à essai propre. Quelques gouttes d'acide chlorhydrique dilué (HCl) ont été ajoutées progressivement sur l'échantillon.

La réaction a été observée immédiatement. Le dégagement de CO_2 mesuré (effervescence) indique la présence de carbonates dans le sol. L'intensité de cette effervescence permet une estimation qualitative de la teneur en CaCO_3 .

- **Calculs**

La teneur en carbonate de calcium est calculée selon la relation :

$$\% = V_g \times 100 / 22400$$

Tableau 3 : Classification des sols selon la teneur en carbonate de calcium (CaCO_3)

Teneurs de CaCO_3	Type du sol
5% >	Sols peu calcaire
5 _ 15 %	Moyennement calcaire
>15 %	Calcaire à très calcaire



Figure 14 : Calcimètre utilisé pour la détermination du carbonate de calcium (CaCO_3).

III.2. Mise en place de l'expérimentation

III.2.1. Choix de la plante test

La laitue (*Lactuca sativa L.*) a été retenue comme plante test en raison de son cycle de croissance relativement court (35 à 45 jours), permettant d'obtenir rapidement des résultats expérimentaux. Cette espèce est également reconnue pour sa sensibilité aux variations de la fertilité du sol et à la disponibilité des éléments nutritifs. De plus, son développement rapide et son système racinaire peu profond en font un bon indicateur de l'effet des amendements organiques sur les propriétés du sol et la croissance végétale.

III.2.2. Préparation des amendements organiques

Les amendements organiques utilisés dans cette étude sont le marc de café et les épluchures de pomme de terre. Avant leur incorporation au sol, ces résidus ont subi différentes étapes de préparation afin d'améliorer leur conservation, de faciliter leur manipulation et de limiter les risques de phytotoxicité susceptibles d'affecter la germination et la croissance des plantes.

a) Marc de café

Le marc de café utilisé dans cette expérimentation provient des résidus de préparation du café produits au sein du foyer. Après collecte, il a été étalé en couche mince et séché à l'air libre pendant plusieurs jours afin de réduire sa teneur en humidité. Une fois sec, il a été homogénéisé puis conservé dans des récipients hermétiques à l'abri de l'humidité jusqu'à son utilisation.

b) Épluchures de pomme de terre

Les épluchures de pomme de terre utilisées proviennent des déchets de préparation alimentaire produits au sein du foyer. Après collecte, elles ont été lavées à l'eau afin d'éliminer les résidus de terre et autres impuretés, puis découpées en petits morceaux pour faciliter leur décomposition. Les épluchures ont ensuite été soumises à un pré-compostage afin d'amorcer leur dégradation biologique et de réduire les risques de phytotoxicité. Le matériau obtenu a ensuite été séché à l'air libre et conservé jusqu'à son incorporation au sol.

**Figure 15 : marc de café****Figure 16 : épluchures de pomme de terre.**

III.2.3. Préparation des pots et dispositif expérimental

Afin d'évaluer l'effet du marc de café et des épluchures végétales sur les propriétés du sol et la croissance des plantes, un essai en pots a été mis en place sous conditions contrôlées. Les amendements organiques ont été appliqués séparément à différentes doses afin d'étudier leur influence sur les paramètres physicochimiques du sol et le développement végétal.

- **Préparation des pots et conditions de culture**

Le sol préalablement séché à l'air libre, homogénéisé et tamisé à 2 mm a été réparti dans des pots en plastique à raison de 2 kg par pot. Les amendements organiques utilisés étaient le marc de café séché et les épluchures végétales pré-compostées. Ceux-ci ont été incorporés manuellement dans la couche superficielle du sol (1 à 2 cm) avant le semis afin d'assurer une répartition homogène.

L'expérimentation a été conduite en pots sous conditions contrôlées. L'irrigation a été assurée de manière à maintenir l'humidité du sol entre 60 et 70 % de la capacité au champ. Tous les traitements ont été soumis aux mêmes conditions environnementales afin de garantir la comparabilité des résultats. Les amendements ont été appliqués une seule fois au début de l'expérimentation.

- **Répartition des traitements, doses appliquées et répétitions**

Les traitements ont été répartis selon un dispositif complètement randomisé. Les doses d'amendements organiques ont été calculées en fonction de la masse de sol contenue dans chaque pot (2 kg) et appliquées en une seule fois au début de l'essai. Chaque traitement a été réalisé en trois répétitions afin de réduire l'effet de la variabilité expérimentale et de permettre l'analyse statistique des résultats.

Les figures (1 et 2) suivant présentent les différents traitements ainsi que les doses appliquées.

Comparaison des traitements				
Traitement	Description	Dose (%)	Répétitions	Nombre de pots
T0	Sol seul (témoin)	0	3	3
T1	Sol + marc de café	1.5	3	3
T2	Sol + épluchures (pomme de terre)	3	3	3
T3	Sol + marc de café + épluchures (pomme de terre)	3.5	3	3

Made with Napkin

Figure 17 : Représentation des différents traitements

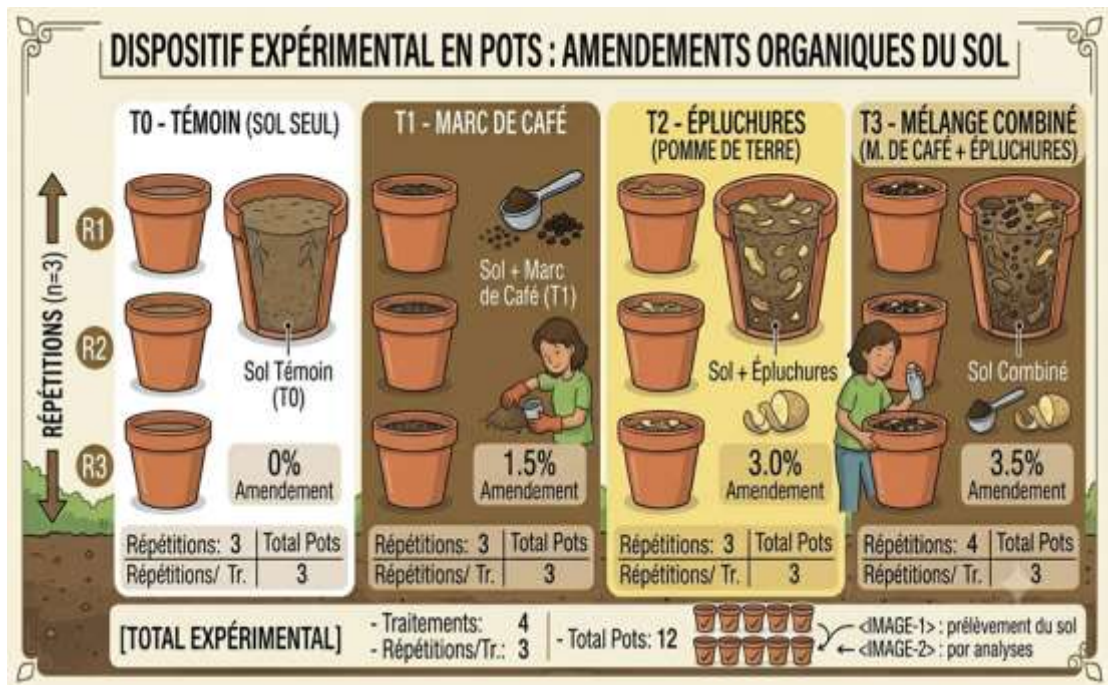


Figure 18 : Représentation schématique de dispositif expérimental (schéma générer par AI)

III.2.4. Incorporation des amendements

Le marc de café et les épluchures de pommes de terre ont été préalablement séchés à l'air libre pendant plusieurs jours afin de réduire leur teneur en humidité. Les épluchures ont ensuite été découpées en petits fragments pour faciliter leur décomposition.

Les amendements ont été incorporés manuellement dans la couche superficielle du sol de chaque pot selon les doses définies dans le dispositif expérimental. Après homogénéisation du mélange sol-amendement, le sol a été légèrement humidifié.

Les pots ont ensuite été maintenus pendant une période d'incubation de 15 jours avant le semis afin de permettre l'amorce de la décomposition des amendements organiques et leur intégration au sol. Chaque traitement a été réalisé en trois répétitions.

III.2.5. Semis

Après la période d'incubation de 15 jours, les graines de laitue (*Lactuca sativa*) ont été semées manuellement dans les pots préparés. Les graines ont été réparties uniformément à la surface du sol puis recouvertes d'une fine couche de terre.

Après le semis, les pots ont été arrosés afin de maintenir une humidité favorable à la germination. L'arrosage a été effectué régulièrement en fonction de l'état d'humidité du sol.

Les pots ont ensuite été placés dans des conditions favorables de lumière et de température afin d'assurer une germination homogène et une croissance optimale des plantes.

III.2.6. Suivi de la culture

Le suivi de la culture a été réalisé pendant une période de 45 jours après le semis afin d'évaluer l'effet des différents traitements sur la croissance de la laitue (*Lactuca sativa*). Les observations ont été effectuées régulièrement, à intervalles de 7 jours, sur l'ensemble des traitements expérimentaux.

À chaque date d'observation, plusieurs paramètres de croissance ont été mesurés, notamment :

- la hauteur des plants (cm), mesurée à l'aide d'une règle graduée ;
- le nombre de feuilles par plant.

Des observations visuelles ont également été réalisées afin d'apprécier l'état général des plantes (vigueur, coloration des feuilles, homogénéité de la croissance et éventuels symptômes de stress ou de carence).

Ces mesures ont permis de suivre l'évolution de la croissance des plants de laitue et de comparer l'effet des différents amendements organiques sur le développement de la culture.

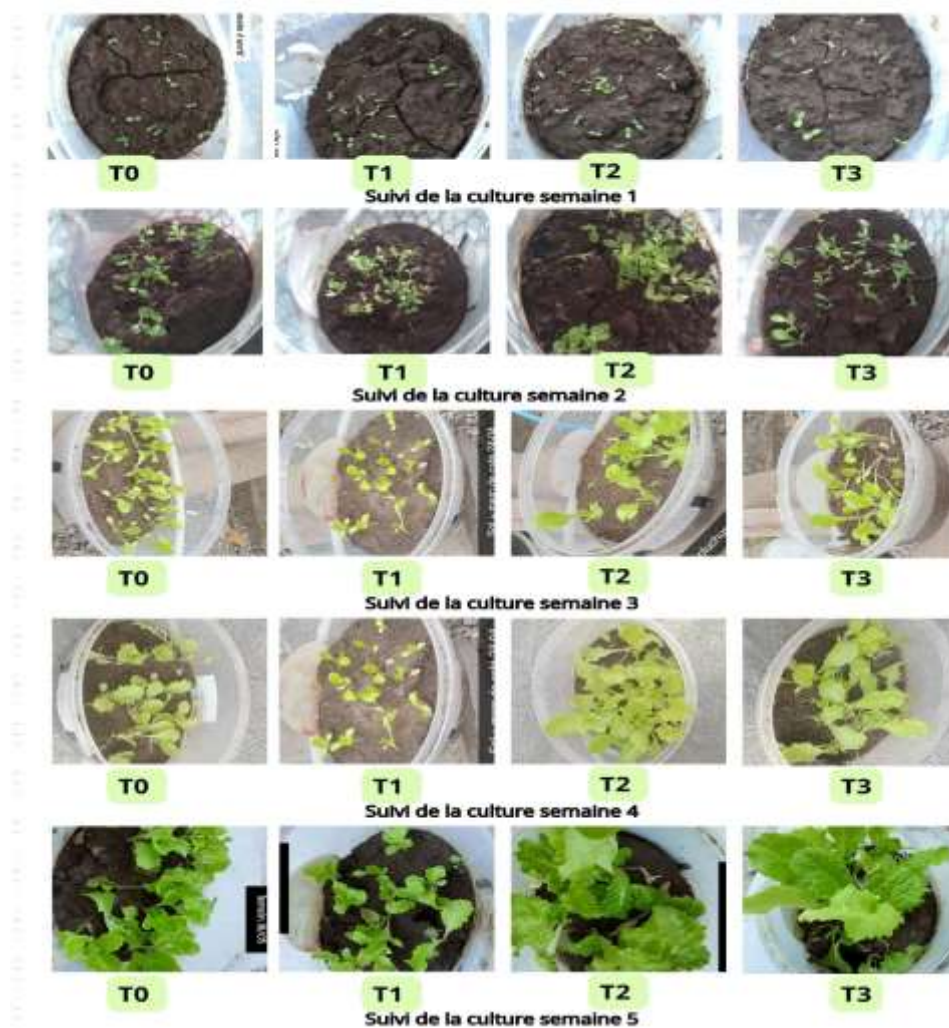


Figure 19 : Suivie de culture par semaine (des photos reels)

III.2.7. Détermination de la biomasse

La biomasse fraîche et la biomasse sèche ont été déterminées à la fin de l'expérimentation afin d'évaluer l'effet des amendements organiques sur la production végétale de la laitue (*Lactuca sativa*).

Quarante-cinq jours après le semis, deux plants représentatifs ont été prélevés au hasard dans chaque traitement.

La biomasse fraîche a été déterminée en pesant chaque plant immédiatement après la récolte à l'aide d'une balance de précision, afin de limiter les pertes d'eau par évaporation.

Pour la détermination de la biomasse sèche, les plants récoltés ont été placés dans une étuve à 65 °C pendant 24 heures jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Après séchage, les échantillons ont été refroidis dans un dessiccateur puis pesés.

En raison de la faible masse obtenue après séchage, les deux plants provenant d'un même traitement ont été pesés ensemble afin d'améliorer la précision des mesures.

III.3. Évaluation de l'effet des amendements sur les propriétés du sol

Afin d'évaluer l'effet des amendements organiques sur les propriétés du sol, des analyses physicochimiques ont été réalisées à trois étapes de l'expérimentation : avant l'application des amendements (état initial du sol), après leur incorporation et à la fin de la culture, après la récolte. Les paramètres suivis sont le pH, la conductivité électrique (CE) et la teneur en matière organique, choisis en raison de leur importance dans l'évaluation de la fertilité et de la qualité des sols.

III.3.1. Détermination du pH

- **Principe**

Le pH du sol permet d'évaluer son degré d'acidité ou d'alcalinité et de caractériser son milieu chimique.

- **Méthode**

Le pH a été mesuré dans une suspension sol-eau selon un rapport de 1:2,5. Pour cela, 10 g de sol sec ont été mélangés à 25 mL d'eau distillée. La suspension a été agitée pendant 30 minutes puis laissée au repos afin de permettre la stabilisation du milieu. La mesure du pH a ensuite été réalisée à l'aide d'un Appareil multiparamètre.

III.3.2. Détermination de la conductivité électrique

- **Principe**

La conductivité électrique (CE) permet d'évaluer la salinité du sol en mesurant la concentration des sels solubles présents dans la solution du sol.

- **Méthode**

La conductivité électrique (CE) a été mesurée dans une suspension sol-eau selon un rapport de 1:2,5. Pour cela, 10 g de sol sec ont été mélangés à 25 mL d'eau distillée. La suspension a été agitée pendant 30 minutes puis laissée au repos afin de permettre la stabilisation du milieu. La mesure du pH a ensuite été réalisée à l'aide d'un Appareil multiparamètre



Figure 20 : Appareil multiparamètre utilisé pour la mesure du pH et de la conductivité électrique du sol

III.3.3. Détermination de la matière organique

Cette analyse a été réalisée sur les échantillons prélevés avant l'application des amendements, après leur incorporation et après la récolte afin de suivre l'évolution de la teneur en matière organique du sol.

- **Principe**

La teneur en matière organique du sol a été déterminée par la méthode de perte au feu (Loss on Ignition, LOI), basée sur l'oxydation de la matière organique par combustion à haute température (450–550 °C). La perte de masse correspond à la fraction organique du sol.

- **Méthode**

L'échantillon de sol a été séché à l'air libre puis tamisé à 2 mm. Une masse de sol (environ 5 à 10 g) a été introduite dans un creuset préalablement pesé (P_0).

L'ensemble a été séché à 105 °C jusqu'à masse constante puis pesé (P_1). Ensuite, le creuset contenant l'échantillon a été placé dans un four à moufle à 450–550 °C pendant 4 heures afin de brûler la matière organique.

Après refroidissement dans un dessiccateur, le creuset a été pesé de nouveau (P_2).

- **Calcul**

La teneur en matière organique (MO %) est calculée selon la formule suivante :

$$MO (\%) = \frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_0} \times 100$$

Où :

P_0 : masse du creuset vide

P_1 : masse du creuset + sol sec (105 °C)

P_2 : masse du creuset + résidu après calcination

Dispositif expérimental



Four à moufle à 450–550°C.



Les échantillons dans le four pendant 4 h

Figure 21 : Four à moufle et calcination des échantillons pour la détermination de la matière organique par perte au feu (LOI).

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV-1- Texture du sol

Le tableau (04) présente les résultats de la détermination de la texture du sol par le triangle textural et par l'essai au bleu de méthylène. La méthode du bocal, associée au triangle textural, a permis de classer le sol comme un sol limoneux, sur la base de sa composition granulométrique : 52% de limon, 42% de sable et 6% d'argile. En revanche, l'essai au bleu de méthylène a mis en évidence une activité importante des particules fines, conduisant à une caractérisation de type limono-argileux. Cette différence s'explique par le fait que les deux méthodes n'évaluent pas les mêmes propriétés du sol. La méthode texturale décrit la répartition des fractions granulométriques, tandis que l'essai au bleu de méthylène renseigne sur la surface spécifique et l'activité des particules argileuses. Ainsi, les deux approches sont complémentaires et indiquent que le sol présente une dominance limoneuse avec la présence d'argiles actives influençant ses propriétés physico-chimiques.

Tableau 04 : Résultats de la texture du sol

Méthode	Valeur	Classe texturale
Triangle textural	Sable 42 % Limon 52 % Argile 6 %	Limoneux
Bleu de méthylène	VBS =5.5	Limoneux-argileux

IV-2 - Étude physique du sol

Les analyses physiques montrent que le sol étudié présente une teneur en eau de 14,45%, une densité apparente de 1,098 g/cm³, une densité réelle de 2,45 g/cm³ et une porosité de 55%. La teneur en carbonate de calcium est de 1,25%, indiquant un sol peu calcaire. Le tamisage humide a révélé un taux de 85,4%, traduisant une proportion importante de particules fines. L'ensemble de ces résultats indique que le sol possède une structure favorable à l'aération, à la circulation de l'eau et au développement racinaire.

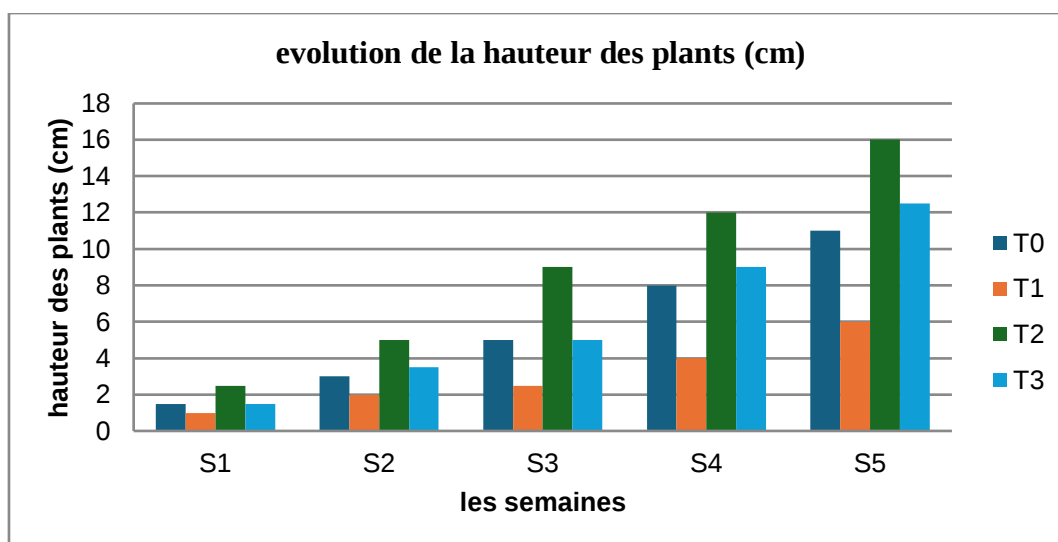
Tableau 05: Propriétés physiques du sol étudié.

paramètre physique du sol	Les valeurs	Propriétés du sol
Teneur en carbonate de calcium (CaCO_3)	1.25 %	Sols peu calcaire
Méthode de Tamisage humide	85.4%	Très riche en particules fines
Teneur en eau	14.45%	
Densité apparente	1.098 g /cm ³	Sols très légers (riche en matière organique)
Densité réelle	2.45 g /cm ³	
Porosité du sol	55 %	Sol très poreuse

IV.3.Effet des amendements sur la croissance de la laitue

IV.3 .1 Effet des amendements organiques sur la hauteur des plants (cm)

La hauteur des plants a augmenté progressivement dans tous les traitements au cours des cinq semaines d'observation. Le traitement T2 a présenté la meilleure croissance avec une hauteur finale de 16 cm. Le traitement T3 a montré une croissance intermédiaire, tandis que le traitement T1 a enregistré les valeurs les plus faibles, avec 6 cm à la cinquième semaine (22).

**Figure 22 :** Effet des amendements organiques sur la hauteur des plants de laitue.

T0 : Témoin, T1 : Sol + marc de café, T2 : Sol + Épluchures (Pomme de terre)

T3: Sol + marc de café +épluchures (pomme de terre)

II.2 Effet des amendements organiques sur le nombre des feuilles

La figure (23) montre l'effet des amendements organique sur Le nombre de feuilles. Le nombre de feuilles a augmenté progressivement dans tous les traitements. Le traitement T2 a donné le meilleur résultat avec 6 feuilles à la cinquième semaine. Le traitement T3 a présenté une croissance intermédiaire, tandis que T0 et T1 ont montré des résultats similaires.

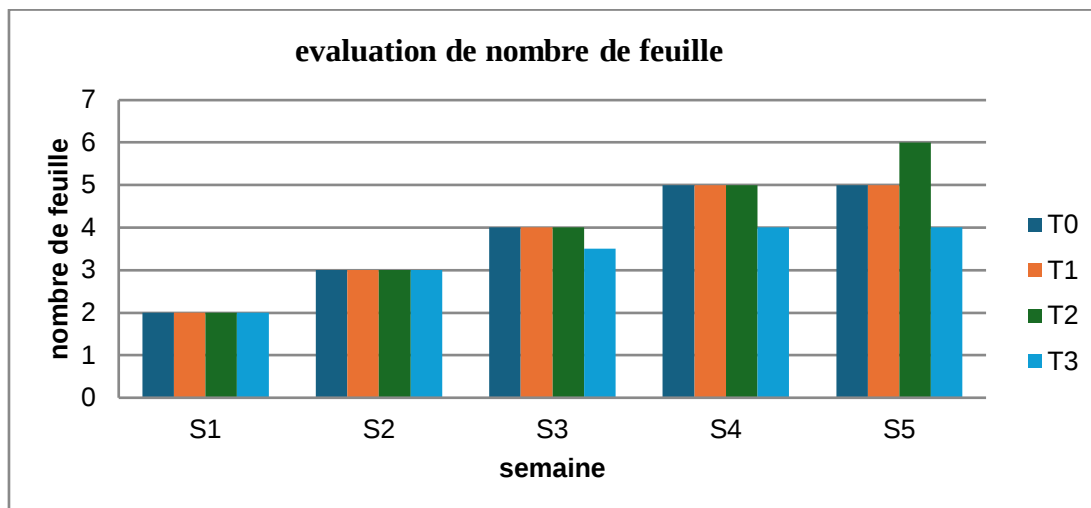


Figure 23 : Effet des amendements organiques sur le nombre de feuilles des plants de laitue.

II.3 . Effet des amendements organiques sur la longueur des feuilles (cm)

La longueur des feuilles a suivi la même tendance que la hauteur des plants. Le traitement T2 a enregistré la valeur maximale, avec 15 cm, tandis que le traitement T1 a montré les plus faibles valeurs, avec 5 cm(24)

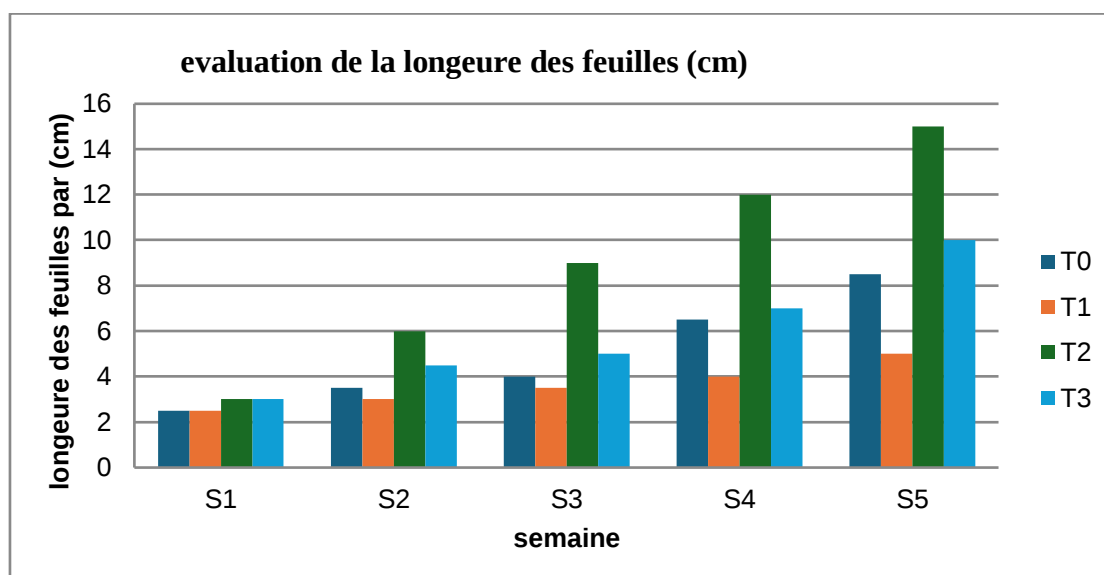


Figure 24 : Effet des amendements organiques sur la longueur des feuilles par différence semaine

IV.4. Effet des amendements sur les propriétés chimiques du sol

IV.4.1. Conductivité électrique (CE)

La figure (25) montre une variation de la conductivité électrique du sol selon les traitements appliqués. Après phase d'incubation, les valeurs de CE varient entre 316 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour le traitement T1 et 467 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour le traitement T3. Le traitement T3 présente la valeur la plus élevée, suivi de T2 (462 $\mu\text{S}/\text{cm}$), alors que T1 enregistre la valeur la plus faible.

Après culture, une augmentation de la conductivité électrique est observée dans tous les traitements. Les valeurs obtenues sont de 933 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour T0, 478 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour T1, 565 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour T2 et 1058 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour T3. Le traitement T3 conserve la valeur la plus élevée après culture, tandis que T1 présente la valeur la plus faible

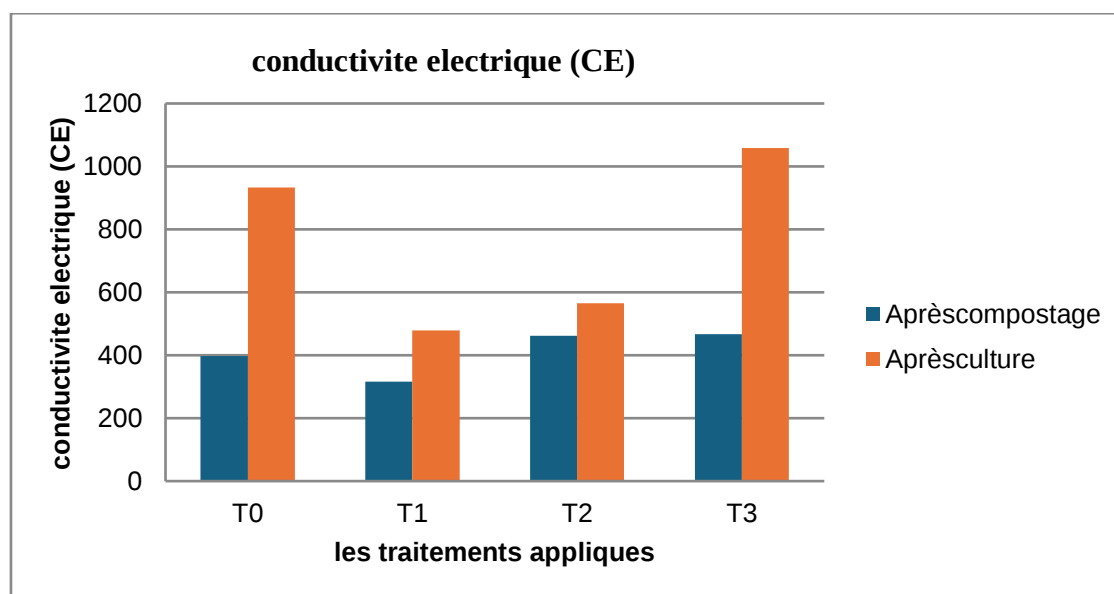


Figure 25 : Variation de la conductivité électrique (CE) du sol après compostage et après culture selon les différents traitements.

IV.4.2. pH du sol:

La figure (26) montre que les valeurs du pH sont restées proches de la neutralité dans tous les traitements. Après compostage, le pH varie de 7,00 à 7,08, tandis qu'après culture il varie de 7,02 à 7,06. Les variations observées entre les traitements sont faibles, indiquant une stabilité du pH du sol tout au long de l'expérimentation. Les amendements organiques

appliqués n'ont donc pas entraîné de modification importante de l'acidité ou de l'alcalinité du sol

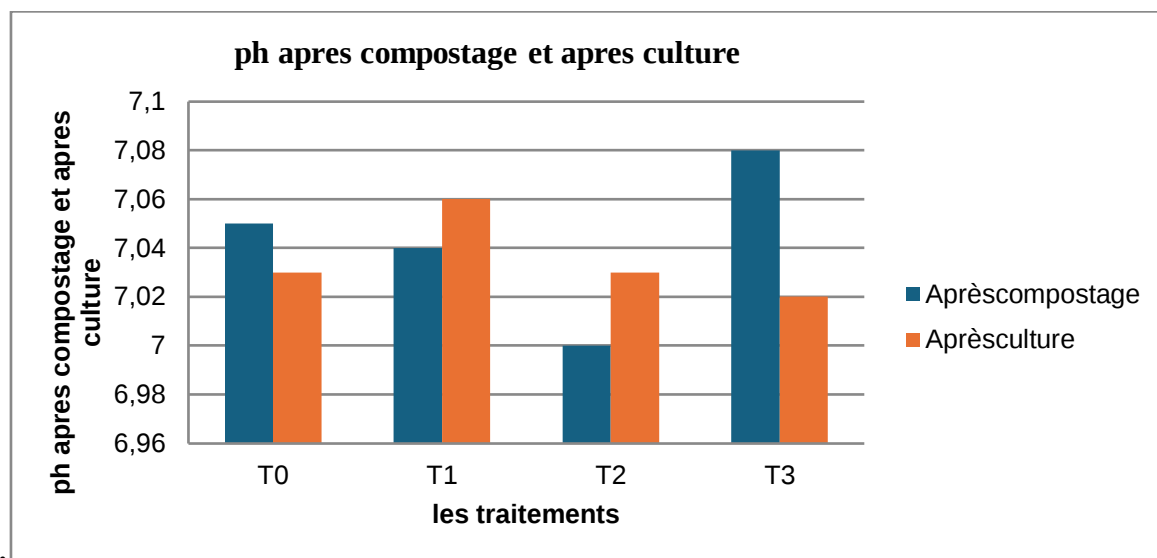


Figure 26 : Variation du pH du sol après compostage et après culture selon les différents traitements.

IV.4.3. Matière organique

La figure (27) montre une augmentation de la teneur en matière organique dans les traitements amendés après compostage par rapport au témoin T0. La valeur la plus élevée est observée pour le traitement T1 (4,05%), suivi de T2 (3,85%) et T3 (3,45%), alors que le témoin conserve une teneur de 1,75%.

Après culture, une diminution de la teneur en matière organique est enregistrée dans les traitements amendés. Les valeurs passent à 3,35% pour T1, 2,55% pour T2 et 3,15% pour T3, tandis que le témoin reste stable à 1,75%

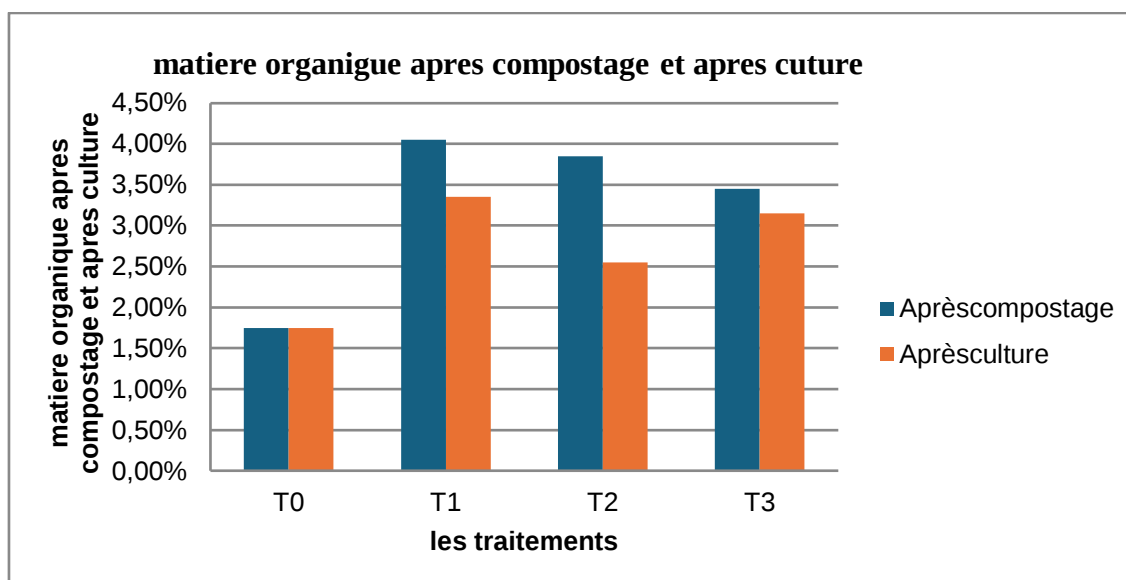


Figure 27 : Variation de la matière organique du sol après compostage et après culture selon les différents traitements.

IV.5. Biomasse fraîche et sèche

Le traitement T2 a enregistré les valeurs les plus élevées avec une biomasse fraîche de 9,53 g et une biomasse sèche de 0,55 g. Le traitement T3 occupe la deuxième position avec 6,41 g de biomasse fraîche et 0,46 g de biomasse sèche. Le témoin T0 présente des valeurs intermédiaires, avec 2,37 g et 0,13 g, tandis que le traitement T1 affiche les valeurs les plus faibles, avec 0,63 g de biomasse fraîche et 0,04 g de biomasse sèche. L'ordre des traitements pour la biomasse fraîche comme pour la biomasse sèche est le suivant : $T2 > T3 > T0 > T1$.

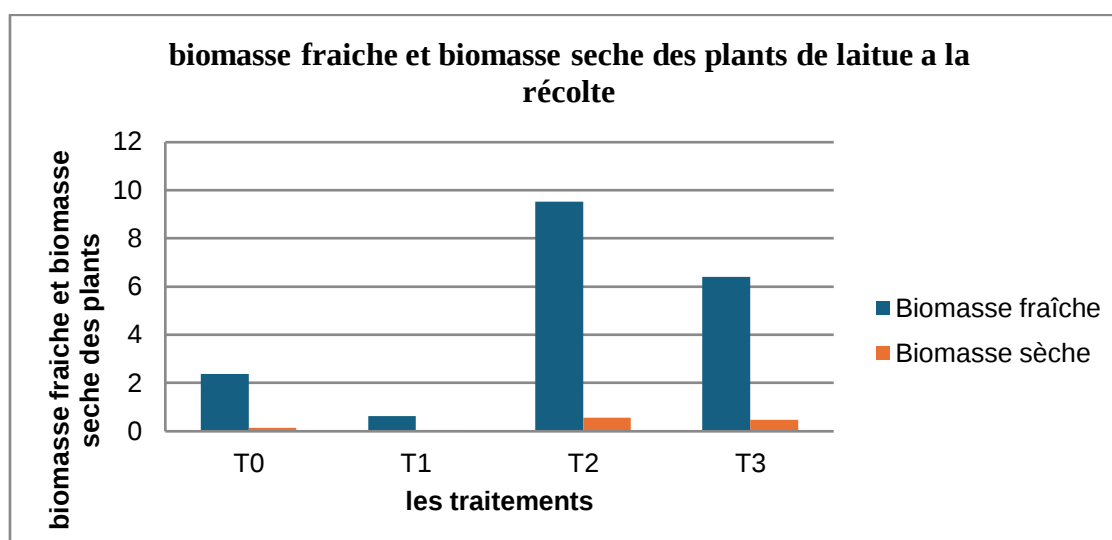


Figure 28: Biomasse fraîche et sèche après récolte

Chapitre V : Discussion

V.1. Effet des amendements organiques sur la Matière organique

Les résultats obtenus montrent que l'incorporation des amendements organiques a modifié la teneur en matière organique du sol. Après la culture, une diminution de la matière organique a été observée dans certains traitements, notamment dans le traitement T2 (épluchures de pomme de terre), où la teneur est passée de 3,85 % à 2,55 %. Cette diminution peut être expliquée par la minéralisation de la matière organique sous l'action des microorganismes du sol et par l'absorption des nutriments libérés par les plants de laitue au cours de leur croissance.

Cette observation est en accord avec les travaux de **Domínguez et al. (2019)**, qui ont montré que les amendements organiques stimulent l'activité biologique du sol et favorisent la transformation de la matière organique en éléments nutritifs assimilables par les plantes. Ainsi, la diminution observée ne traduit pas nécessairement une perte de fertilité mais plutôt une utilisation efficace de la matière organique par le système sol-plante.

Ces résultats rejoignent également ceux de **Havlin et Heiniger (2020)** qui indiquent que l'incorporation d'amendements organiques améliore la fertilité du sol en stimulant l'activité microbienne, en favorisant la minéralisation de la matière organique et en améliorant la disponibilité des nutriments pour les cultures.

Par ailleurs, les épluchures de pomme de terre constituent une source importante de composés organiques facilement biodégradables. Selon **Hailemariam et al. (2024)**, ces résidus peuvent être valorisés comme biofertilisants grâce à leur richesse en matière organique et en éléments minéraux, notamment le potassium, ce qui favorise la fertilité du sol et la croissance des cultures.

V.2. Effet des amendements organiques sur le pH du sol

Les résultats obtenus montrent que le pH du sol est resté relativement stable dans l'ensemble des traitements, avec des valeurs comprises entre 7 et 7,08 après l'application des amendements organiques. Cette stabilité indique que les amendements utilisés n'ont pas perturbé l'équilibre chimique du sol.

Selon **Matisic et al. (2024)**, les amendements organiques contribuent au maintien du pH grâce à leur pouvoir tampon et à la libération progressive des éléments minéraux lors de

leur décomposition. Les résultats obtenus confirment donc la capacité des amendements organiques à maintenir des conditions favorables au développement des cultures.

Les résultats obtenus montrent que le pH du sol est resté relativement stable dans l'ensemble des traitements, avec des valeurs comprises entre 7 et 7,08 après l'application des amendements organiques. Cette stabilité indique que les amendements utilisés n'ont pas perturbé l'équilibre chimique du sol.

Selon Soil Science **Ahuchaogu (2017)**, le pH constitue l'une des caractéristiques les plus importantes du sol, car il contrôle la solubilité des ions, influence l'activité microbienne et détermine la disponibilité des nutriments pour les plantes. Les sols ayant un pH proche de la neutralité offrent généralement des conditions favorables à la croissance végétale grâce à une meilleure disponibilité des éléments nutritifs essentiels.

Par ailleurs, l'utilisation des amendements organiques peut contribuer au maintien d'un pH stable grâce à la libération progressive des composés minéraux au cours de leur décomposition. Ainsi, les valeurs obtenues dans cette étude suggèrent que les amendements appliqués ont permis de conserver des conditions chimiques favorables au développement de la laitue.

V.3. Effet des amendements organiques sur la Conductivité électrique

Les valeurs relativement élevées de la conductivité électrique observées dans les traitements amendés peuvent être attribuées à la courte durée de compostage appliquée avant le semis (15 jours), durée inférieure à celle généralement recommandée pour obtenir un compost totalement stabilisé.

Selon **Michele Diacono et Francesco Montemurro (2010)**, la décomposition des amendements organiques entraîne une libération progressive d'ions minéraux solubles tels que K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} et NO_3^- , ce qui peut provoquer une augmentation temporaire de la conductivité électrique du sol.

Au cours de la période de culture (environ 50 jours), la poursuite de la minéralisation des résidus organiques a probablement favorisé l'accumulation de ces sels dans la solution du sol, expliquant ainsi l'augmentation de la conductivité électrique observée à la fin de l'expérimentation.

V.4. Effet des amendements organiques sur la croissance et la biomasse de la laitue

Eghball et al. (2004) ont montré que les amendements organiques améliorent durablement la disponibilité des nutriments et stimulent significativement la croissance végétative des cultures.

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que le traitement T2, amendé avec des épluchures de pomme de terre, a présenté les meilleures performances aussi bien en termes de croissance (hauteur des plants et développement foliaire) qu'en production de biomasse fraîche et sèche. Ces résultats traduisent une meilleure production de matière végétale, probablement liée à une disponibilité plus importante des nutriments libérés lors de la décomposition des résidus organiques ainsi qu'à une amélioration des propriétés physiques et biologiques du sol. **Lazcano & Domínguez (2011)**

De manière similaire, **Havlin et Heiniger (2020)** ont rapporté que la gestion de la fertilité des sols par l'apport de matières organiques améliore les propriétés physico-chimiques du sol et favorise directement la croissance végétative ainsi que l'accumulation de biomasse chez les cultures.

Ces observations sont en accord avec les travaux de **Cavalheiro et al. (2020)**, qui ont montré que les fertilisants organiques issus de résidus végétaux améliorent significativement la croissance et le développement de la laitue. De même, **Rather et al. (2018)** ont rapporté que les amendements organiques augmentent la disponibilité des nutriments et favorisent ainsi le développement végétatif ainsi que l'accumulation de biomasse chez les cultures maraîchères. L'effet positif observé dans le traitement T2 peut donc être attribué à la richesse des épluchures de pomme de terre en matière organique et en éléments minéraux facilement assimilables.

Concernant le traitement T1, les performances plus faibles observées aussi bien pour la croissance que pour la biomasse peuvent être liées à la présence de composés phytotoxiques dans le marc de café. **Basílio et al. (2026)** ont montré que l'application directe du marc de café peut parfois limiter la croissance de la laitue en raison de la présence de caféine et d'autres composés bioactifs susceptibles d'inhiber partiellement le développement végétal. **Cruz et al. (2012)**

Le traitement T3 a présenté des résultats intermédiaires entre T1 et T2. Cette amélioration par rapport au traitement T1 peut s'expliquer par l'association du marc de café avec les épluchures de pomme de terre. En effet, bien que le marc de café contienne des composés potentiellement phytotoxiques tels que la caféine et certains polyphénols, plusieurs

études indiquent que ces effets peuvent être atténués lorsqu'il est mélangé à d'autres amendements organiques et soumis à un processus de compostage. Selon **Bomfim et al. (2022)**, l'association du marc de café avec d'autres résidus organiques favorise sa stabilisation et réduit progressivement l'impact des composés inhibiteurs, tout en conservant son apport en éléments nutritifs. Ainsi, dans notre étude, le mélange avec les épluchures de pomme de terre a probablement permis de limiter partiellement l'effet négatif de la caféine et d'améliorer les performances du traitement T3 par rapport au traitement T1, sans toutefois atteindre les résultats obtenus avec le traitement T2.

V.5 .Textural de sol:

Les résultats obtenus par la méthode du triangle textural et par l'essai au bleu de méthylène ont montré une légère différence dans la classification du sol. Cette divergence peut être expliquée par le fait que les différentes méthodes d'analyse des sols reposent sur des principes physico-chimiques distincts et peuvent fournir des informations complémentaires sur les propriétés du sol (**Brady et Weil, 2016**).

La méthode du triangle textural repose sur la détermination des proportions relatives de sable, de limon et d'argile, permettant ainsi une classification texturale globale du sol selon les standards établis par le United States Department of Agriculture (**USDA, 1951**). En revanche, l'essai au bleu de méthylène évalue principalement la capacité d'adsorption des particules fines actives, notamment les minéraux argileux, et renseigne davantage sur leur surface spécifique et leur activité physico-chimique (**Tran Ngoc Lan, 1977**).

Dans notre étude, la valeur au bleu de méthylène ($VBS = 5,5 \text{ cm}^3/\text{g}$) indique un sol limono-argileux présentant une proportion appréciable de particules fines actives. Ce résultat est cohérent avec les travaux de **Valencia (2008)**, qui ont montré que l'essai au bleu de méthylène permet de caractériser l'activité des particules fines indépendamment de leur simple proportion granulométrique. Ainsi, les différences observées entre les deux méthodes ne sont pas contradictoires mais complémentaires, car elles apportent des informations différentes sur les caractéristiques physiques et physico-chimiques du sol.

V.6. Caractérisation physique du sol

La teneur en eau (14,45 %), la porosité élevée (55 %) et la forte proportion de particules fines obtenue par tamisage humide (85,4 %) indiquent des conditions favorables à la rétention de l'eau, à l'aération du sol et à l'activité biologique. Ces caractéristiques

expliquent en partie les bonnes performances de croissance observées au cours de l'expérimentation.

Selon **Havlin et Heiniger (2020)**, les sols présentant une bonne porosité et une teneur adéquate en matière organique offrent de meilleures conditions de rétention d'eau, d'aération et de disponibilité des nutriments, ce qui favorise l'activité biologique et la croissance des plantes.

CONCLUSION

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Face à la dégradation croissante des sols agricoles et aux conséquences environnementales engendrées par l'usage intensif des engrais chimiques, l'adoption de solutions durables s'impose comme une nécessité pour promouvoir une agriculture plus respectueuse de l'environnement. C'est dans cette optique que s'inscrit la présente étude, qui porte sur l'évaluation du potentiel agronomique de deux déchets organiques de cuisine, le marc de café et les épluchures de pomme de terre, valorisés comme amendements organiques.

Les résultats obtenus ont montré que l'incorporation de ces amendements a permis de modifier favorablement certaines propriétés physico-chimiques du sol. Une amélioration de la teneur en matière organique ainsi qu'une évolution de la conductivité électrique ont été observées, tandis que le pH du sol est demeuré globalement stable, traduisant le maintien d'un équilibre chimique favorable au développement végétal.

L'évaluation des paramètres de croissance de la laitue (*Lactuca sativa*) a révélé une réponse positive aux différents traitements, avec une performance particulièrement remarquable du traitement à base d'épluchures de pomme de terre (T2), qui a enregistré les meilleurs résultats en matière de croissance végétative et de production de biomasse. À l'inverse, l'utilisation du marc de café seul (T1) a montré un effet plus limité, probablement lié à la présence de certains composés bioactifs susceptibles d'influencer la croissance des plantes. Le traitement combiné T3 a présenté des résultats intermédiaires, mettant en évidence l'intérêt potentiel d'une association équilibrée entre différents résidus organiques.

Ainsi, cette étude confirme que la valorisation des déchets organiques représente une stratégie prometteuse permettant à la fois d'améliorer la fertilité des sols, de réduire la dépendance aux engrais chimiques et de participer à une gestion plus durable des déchets biodégradables.

À long terme, le développement de ce type de biofertilisants pourrait constituer une alternative accessible, écologique et économiquement intéressante pour promouvoir une agriculture durable fondée sur les principes de l'économie circulaire et de la préservation des ressources naturelles.

*RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES*

Référence bibliographique

- Aggani, S. L. (2013). Development of bio-fertilizers and its future perspective. *Scholars Academic Journal of Pharmacy*, 2(4), 327–332.
- Anderson, J. P. E. (1987). Handling and storage of soils for pesticide experiments. In L. Sommerville & M. P. Greaves (Eds.), *Pesticide effects on soil microflora* (pp. 45–60). Taylor & Francis.
- Bellahammou, M. S. (2001). Effet des amendements organiques sur la structure des communautés de nématodes sur la culture de tomate dans la région de Touggourt (Mémoire de DEA). Université de Blida.
- Bhadha, J. H., Capasso, J. M., Khatiwada, R., Swanson, S., & LaBorde, C. (2017). Raising soil organic matter content to improve water holding capacity (SL447/SS661). EDIS, University of Florida.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The nature and properties of soils* (14th ed.). Prentice Hall.
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124(1–2), 3–22.
- Dalal, R. C., & Bridge, B. J. (2020). Aggregation and organic matter storage in sub-humid and semi-arid soils. In *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils* (pp. 263–307). CRC Press.
- Dhaliwal, S. S., Dubey, S. K., Kumar, D., Toor, A. S., Walia, S. S., Randhawa, M. K., (2024). Enhanced organic carbon triggers transformations of macronutrients, micronutrients, and secondary plant nutrients and their dynamics in the soil under different cropping systems: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1–21.
- Diacono, M., & Montemurro, F. (2011). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. In E. Lichtfouse (Ed.), *Sustainable agriculture* (Vol. 2, pp. 761–786). Springer.
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. In J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, & B. A. Stewart (Eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment* (pp. 3–21). Soil Science Society of America.

- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1999). Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set. In *Methods for assessing soil quality* (pp. 25–38). Soil Science Society of America.
- Doran, J. W., & Safley, M. (1998). Defining and assessing soil health and sustainable productivity. In C. E. Pankhurst, B. M. Doube, & V. V. S. R. Gupta (Eds.), *Biological indicators of soil health* (pp. 1–28). CAB International.
- Ellis, B. G., & Foth, H. D. (1997). *Soil fertility* (2nd ed.). CRC Press.
- Fageria, N. K. (2012). Role of soil organic matter in maintaining sustainability of cropping systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43(16), 2063–2113.
- Fardeau, J.-C. (2015). *Des indicateurs de la fertilité des sols. Étude et Gestion des Sols*. Association Française pour l'Étude du Sol (AFES).
- Folorunsho, L. S. (2019). *Microbiological profiling of food waste compost* (Master's thesis). University of Malaya, Malaysia.
- Franzluebbers, A. J. (2002). Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil and Tillage Research*, 66(2), 197–205.
- Janvier, C. (2007). *Recherche d'indicateurs de la santé des sols* (Thèse de doctorat). Institut National Agronomique Paris-Grignon, École Doctorale ABIES.
- Johnston, J. (2005). *Assessing soil fertility: The importance of soil analysis and its interpretation*. PDA.n.
- Koul, B., Taak, P., & Kumar, A. (2015). Rôle du fumier organique dans l'amélioration de la fertilité des sols et de la productivité des cultures : Une étude de cas dans le nord de l'Inde. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 6(8), 211–219.
- Merdaci, A., & Atia, S. (2006). *L'étude de la fertilisation organique et ses impacts sur la production de la tomate sous serre en milieu salin* (Mémoire d'ingénieur d'État en agronomie). Université de Biskra.
- Morel, R. (1989a). Analyse des facteurs de la croissance de la plante pour la définition du concept de fertilité des sols. In *Fertilità del suolo e nutrizione delle piante* (pp. 57–73).
- Morel, R. (1989b). La fertilité des sols. In *Les sols cultivés* (p. 341). Lavoisier, Tec & Doc.
- Mustin, M. (1987). *Le compost : Gestion de la matière organique*. Éditions François Dubusc.
- Okigbo, B. N. (1999). Development of sustainable agricultural production systems in Africa (pp. 1–66). International Institute of Tropical Agriculture.
- Osman, K. T. (2013). Plant nutrients and soil fertility management. In *Soils: Principles, properties and management* (pp. 129–159).

- Oustani, M., Halilat, M. T., & Chenchouni, H. (2015). Effect of poultry manure on the yield and nutrient uptake of potato under saline conditions of arid regions. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 27(1), 106–120.
- Rashid, M., Hussain, Q., Khan, K. S., Alwabel, M. I., Hayat, R., Akmal, M., (2021). Carbon-based slow-release fertilizers for efficient nutrient management: Synthesis, applications, and future research needs. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 1144–1169.
- Riaz, U., Mehdi, S. M., Iqbal, S., Khalid, H. I., Qadir, A. A., Anum, W., (2020). Bio-fertilizers: Eco-friendly approach for plant and soil environment. In *Bioremediation and biotechnology: Sustainable approaches to pollution degradation* (pp. 189–213).
- Russell, E. W. (1977). The role of organic matter in soil fertility. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 281.
- Schvartz, S., Muller, J.-C., & Decroux, J. (2005). *Guide de la fertilisation raisonnée : Grandes cultures et prairies*. Presses S.A.
- Senadheera, U. E., Jayasanka, J., Udayanga, D., Hewawasam, C., Amila, B., Takimoto, Y., et al. (2024). Beyond composting basics: A sustainable development goals-oriented strategic guidance to IoT integration for composting in modern urban ecosystems. *Sustainability*, 16(23), 10332.
- Singh, N. K., Sachan, K., M., B. P., Panotra, N., & Katiyar, D. (2024). Building soil health and fertility through organic amendments and practices: A review. *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(1), 175–197.
- Soil Fertility. (2016). Soil fertility. Retrieved from [source à préciser].
- Soltner, D. (2005). *Les bases de la production végétale. Tome I : Le sol et son amélioration* (24e éd.). Sciences et Techniques Agricoles.
- Soltner, D. (2005). *Les grands équilibres de la nature et l’agriculture*. Sciences et Techniques Agricoles.
- Suhag, M. (2016). Potential of biofertilizers to replace chemical fertilizers. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 3(5), 163–167.
- Tian, J., Ge, F., Zhang, D., Deng, S., & Liu, X. (2021). Roles of phosphate-solubilizing microorganisms from managing soil phosphorus deficiency to mediating biogeochemical phosphorus cycle. *Biology*, 10(2), 158.
- University of California, Division of Agriculture and Natural Resources. (2002). *Soil fertility management for organic crops*. University of California.

- Urta, J., Alkorta, I., & Garbisu, C. (2019). Potential benefits and risks for soil health derived from the use of organic amendments in agriculture. *Agronomy*, 9(9), 542.
- Villenave, C., Fernandez, P., Badiane, A., Sène, M., Ganry, F., & Oliver, R. (1998). Influence du travail du sol et de l'apport de compost sur les peuplements de nématodes phytophages. Poster présenté au XVIe Congrès Mondial de l'Association Internationale de Science du Sol.
- Wang, X., Bian, Q., Jiang, Y., Zhu, L., Chen, Y., Liang, Y., & Sun, B. (2021). Organic amendments drive shifts in microbial community structure and keystone taxa which increase C mineralization across aggregate size classes. *Soil Biology and Biochemistry*, 153, 108062.
- Wang, Y., Liu, C., Zhang, X., & Zhang, Y. (2022). Effects of organic and physical soil amendments on root development and soil properties in saline soils. *Agricultural Water Management*, 264, 107501.
- Basílio, A. A. G., Gratão, M. S., Macedo, G. C., Xavier, S. J. L., Silva, M. E. B. R., Soares, L. A. F., Macedo, P. H. L., dos Santos, T. E. B., & Matos, F. S. (2026). Effect of Coffee Grounds as a Bio-Input in Lettuce Cultivation. *Sustainability*, 18(2), 649.
- Bomfim, A. S. C., de Oliveira, D. M., Walling, E., Babin, A., Hersant, G., Vaneeckhaute, C., Dumont, M. J., & Rodrigue, D. (2022). Spent Coffee Grounds Characterization and Reuse in Composting and Soil Amendment. *Waste*, 1(1), 2–20.
- Nabais, J. M. V., Carrott, P. J. M., Carrott, M. M. L. R., et al. (2008). Production of activated carbons from coffee endocarp by CO₂ and steam activation. *Fuel Processing Technology*, 89, 262–268.
- Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G., Vergara-Castañeda, H., & Oomah, B. D. (2015). Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. *Trends in Food Science & Technology*, 45(1), 24–36.
- Cervera-Mata, A., Pastoriza, S., et al. (2018). Spent coffee grounds improve compost quality during composting process. *Journal of Cleaner Production*.
- Cruz, R., Cardoso, M. M., Fernandes, L., et al. (2012). Potential use of spent coffee grounds in agriculture and impact on soil properties. *Waste Management*.
- Hardgrove, S. J., & Livesley, S. J. (2016). Applying spent coffee grounds directly to urban agriculture soils greatly reduces plant growth. *Urban Forestry & Urban Greening*, 18, 1–8.
- Hailemariam, A. M., et al. (2024). Valorization of potato peel waste for biofertilizer production and sustainable agriculture applications.

- Pathak, P. D., Mandavgane, S. A., & Kulkarni, B. D. (2018). Fruit peel waste: Characterization and applications. *Current Science*, 113(3), 444–454.
- Suthar, S., Singh, S., & Dhawan, S. (2014). Composting of food industry waste and its impact on soil properties. *Bioresource Technology*.
- Adhikari, B. K., Barrington, S., Martinez, J., & King, S. (2009). Effectiveness of three bulking agents for food waste composting. *Waste Management*, 29(1), 197–203.
- Javed, A., Ali, E., Afzal, K. B., Osman, A., & Riaz, S. (2022). Soil fertility: Factors affecting soil fertility, and biodiversity responsible for soil fertility. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*, 12(1), 21–33.
- Prado-Acebo, I., Cubero-Cardoso, J., Lu-Chau, T. A., et al. (2024). Integral multi-valorization of agro-industrial wastes: A review. *Waste Management*, 179, 1–20.
- Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453.
- Agegnehu, G., Bass, A. M., Nelson, P. N., & Bird, M. I. (2016). Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment*, 543, 295–306.
- Lim, S. L., Lee, L. H., & Wu, T. Y. (2016). Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: Recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 111, 262–278.
- Shiralipour, A., McConnell, D. B., & Smith, W. H. (1992). Uses and benefits of MSW compost: A review and an assessment. *Biomass and Bioenergy*, 3(3–4), 267–279.
- Leclerc, B. (2001). *Guide des matières organiques*, Tome 1, 2ème édition. ITAB, 238 p.
- Celerier, J. (2008). *Caractérisation moléculaire et dynamique de la matière organique de compost dans un sol*. Université de Poitiers.
- Znaidi, I.E.A. (2002). *Étude et évaluation du compostage de différents types de matières organiques*. U.M.M.T.
- Bhatia, T., & Sindhu, S. S. (2024). Sustainable management of organic agricultural wastes: contributions in nutrients availability, pollution mitigation and crop production. *Discover Agriculture*, 2, 130.
- Mirabella, N., Castellani, V., & Sala, S. (2014). Current options for the valorization of food manufacturing waste: a review. *Journal of Cleaner Production*, 65, 28–41.

- Diacono, M., & Montemurro, F. (2010). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 401–422.
- Fan, Y. V., Lee, C. T., Klemeš, J. J., Chua, L. S., Sarmidi, M. R., & Leow, C. W. (2018). Evaluation of effective microorganisms on home scale organic waste composting. *Journal of Environmental Management*, 216, 41–48.
- AFNOR (1992). Norme NF P 94-068 — Sols : Mesure de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux.
- Hang, P.T. & Brindley, G.W. (1970). Methylene blue absorption by clay minerals. Determination of surface areas and cation exchange capacities.
- Bhatia, T., & Sindhu, S. S. (2024). Sustainable management of organic agricultural wastes: contributions in nutrients availability, pollution mitigation and crop production. *Discover Agriculture*, 2, 130.
- Mirabella, N., Castellani, V., & Sala, S. (2014). Current options for the valorization of food manufacturing waste: a review. *Journal of Cleaner Production*, 65, 28–41.
- Diacono, M., & Montemurro, F. (2010). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 401–422.
- Fan, Y. V., Lee, C. T., Klemeš, J. J., Chua, L. S., Sarmidi, M. R., & Leow, C. W. (2018). Evaluation of effective microorganisms on home scale organic waste composting. *Journal of Environmental Management*, 216, 41–48.

ANNEXE

ANNEXE

Annexe A : Protocole détaillé de l'essai au bleu de méthylène

Matériel et réactifs

- Balance de précision
- Béchers de 500 mL
- Agitateur mécanique ou magnétique
- Burette ou éprouvette graduée
- Papier filtre
- Baguette de verre
- Solution de bleu de méthylène
- Eau distillée

Préparation de l'échantillon

- Séchage
- Tamisage à 5 mm
- Pesée de 30 g

Réalisation de l'essai

- Ajout de 500 mL d'eau
- Durée d'agitation (5 min)
- Ajouts successifs de 5 mL de bleu de méthylène
- Temps d'agitation entre les ajouts

Test de la tache

- Description du test négatif
- Description du test positif
- Apparition de l'auréole bleue

Critère de validation

- Cinq taches positives consécutives
- Reprise des ajouts si le test redevient négatif

Exemple de calcul

Par exemple :

Masse du sol = 30 g

Volume total consommé = 12 mL

VBS = $30/12=0,40$

SST = $20,93 \times 0,40 = 8,37 \text{ m}^2/\text{g}$

Annexe B : Protocole détaillé de la détermination de la teneur en eau

- **Principe**

La teneur en eau du sol est déterminée par la méthode gravimétrique. Elle repose sur la mesure de la perte de masse d'un échantillon de sol après séchage à 105°C. Cette perte correspond à l'eau initialement contenue dans le sol.

- **Méthode**

Une capsule (tare) vide a été pesée afin de déterminer sa masse. Un échantillon de sol frais a ensuite été introduit dans la capsule, puis l'ensemble (capsule + sol humide) a été pesé pour obtenir la masse humide.

L'échantillon a été ensuite séché à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures. Après séchage, la capsule contenant le sol sec a été refroidie dans un dessiccateur afin d'éviter l'absorption d'humidité, puis pesée à nouveau pour obtenir la masse sèche.

- **Calculs :**

$$\% = (M_h - M_s) / M_s$$

M_h : masse du tass + sol humide

M_s : masse du tass + sol sec

Tass + Sol après 24 h L'étuve 105°C

Annexe C : Protocole détaillé de la Détermination de la densité apparente.

- **Principe**

La densité apparente correspond au rapport entre la masse sèche du sol et le volume total qu'il occupe, incluant l'espace poral. Elle permet d'évaluer le degré de compaction du sol.

Elle est déterminée en mesurant la masse d'un volume connu de sol.

- **Méthode expérimentale**

Le poids du récipient vide a été déterminé à l'aide d'une balance de précision. Le récipient, de volume connu (900 mL), a ensuite été rempli de sol sec et tamisé à l'aide d'un entonnoir afin d'assurer un remplissage homogène.

L'ensemble (récipient + sol) a été pesé afin de déterminer la masse totale. La masse nette du sol a été obtenue par différence entre la masse totale et la masse du récipient vide :

$$M = M_{\text{complet}} - M_{\text{récipient}}$$

La manipulation a été répétée trois fois afin d'assurer la précision des résultats, puis la moyenne des valeurs obtenues a été utilisée pour calculer la densité apparente

- **Calculs :**

La densité apparente est calculée selon la formule suivante :

$$P_{\text{app}} = M / V$$

Tableau 4: Classification des sols selon la densité apparente.

Densité apparente	Nature du sol
<1.2	Sols très légers (riche en matière organique)
1.2 - 1.5	Sols normal
>1.6	Sols compact (mauvais aération)

Annexe D : Protocole détaillé de la Détermination de la densité réelle

Principe

La densité réelle correspond au rapport entre la masse des particules solides du sol et leur volume réel, sans tenir compte des pores.

Elle est déterminée à l'aide d'un pycnomètre utilisant le toluène comme liquide de référence.

Méthode

Le pycnomètre vide a d'abord été pesé à l'aide d'une balance de précision. Ensuite, 20 g de sol sec ont été introduits dans le pycnomètre.

Le toluène a été ajouté progressivement afin de remplir le pycnomètre et d'éliminer l'air présent entre les particules du sol. Après stabilisation, le pycnomètre rempli a été pesé.

Les différentes masses obtenues ont permis de calculer le volume réel des particules solides puis la densité réelle du sol.

Calculs :

$$D_s = P_w (m_2 - m_1) / (m_4 + m_2 - m_1 - m_3)$$

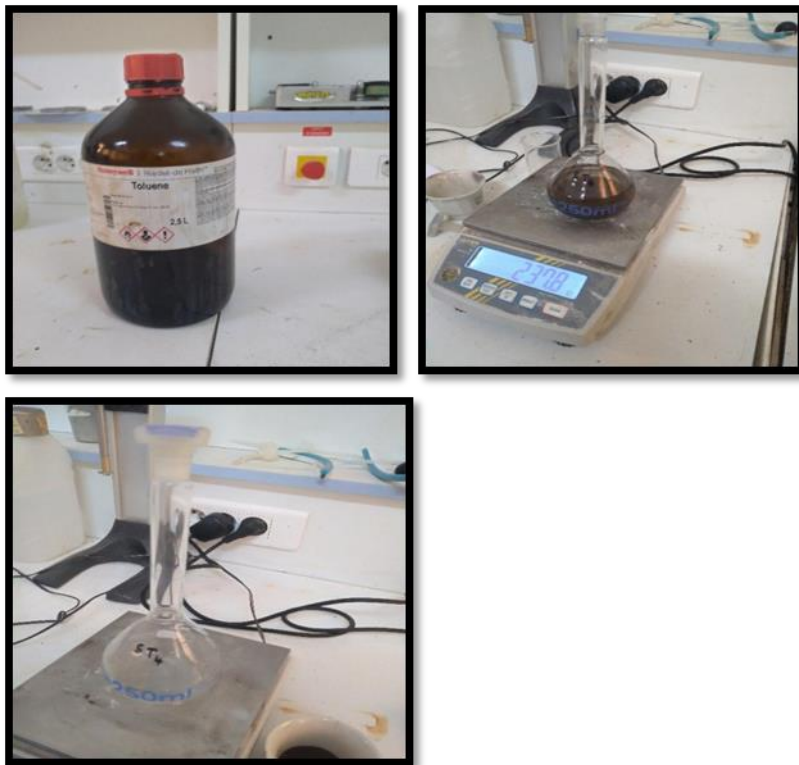


Figure 9 : Pycnomètre utilisé pour la détermination de la densité réelle du sol.

Annexe E : Protocole détaillé de Calcul de la porosité totale

Principe

La porosité représente le pourcentage des espaces vides (pores) présents dans le sol par rapport au volume total.

Elle est déterminée à partir de la densité apparente et de la densité réelle du sol.

Calculs :

$$P(\%) = (1 - p_{app} / p_r) \times 100$$

50 %	<i>Sol très poreuse</i>
50 % _ 35%	<i>Sol normal</i>
35 % >	<i>Sol compact</i>

Tableau 5: Classification des sols selon la porosité.

Annexe E : Protocole détaillé d'évaluation de la stabilité structurale par tamisage humide

Principe

Le tamisage humide permet de séparer les fractions du sol et d'évaluer la stabilité des agrégats sous l'action de l'eau.

Méthode

Une masse de 500 g de sol séché a été utilisée.

L'échantillon a été placé sur un tamis, puis lavé à l'eau afin de séparer les particules fines des agrégats stables.

Après lavage, le refus du tamis a été récupéré et séché à l'étuve à 105°C pendant 24 heures. Après refroidissement, le poids du sol retenu sur le tamis a été mesuré

Calculs :

$\% = M \text{ passent} / M \text{ tamisé}$

Lavage à l'eau échantillon de sol (500g) sol après séchage