

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'effet d'amendements organiques issus de  
sous-produits agroalimentaires sur la fertilité des sols et la  
croissance d'une culture test**

Soutenu le : 30/ 06/2026

**Présenté Par :**

- 1) Benzina nariman
- 2) Bentouir mama
- 3) Bourtal zerat Hanane

**Devant le jury composé de :**

|                        |                                |              |
|------------------------|--------------------------------|--------------|
| Dr BEANNABI FARID      | M C A UAT.B.B (Ain Temouchent) | Président    |
| Dr BOUCHOUICHA SARA    | M A B 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, À ma très chère mère Rachida, source inépuisable de tendresse, d'amour et de sacrifice. Merci pour ton soutien indéfectible, tes prières sincères et tous les efforts que tu as consentis pour mon bonheur et ma réussite. À mon cher père Baroudi, qui m'a transmis les valeurs du travail, de la persévérance et du courage. Merci pour tes encouragements, ta confiance et ton soutien tout au long de mon parcours. À mon cher époux, qui a été mon soutien le plus précieux durant cette aventure. Merci pour ta patience, tes encouragements, ta compréhension et ton accompagnement constant. Ta présence à mes côtés a été une source de force et de motivation. À mes chers frères Ryan et Ibrahim, pour leur affection, leur soutien et les moments de joie partagés. À mon encadrant, M<sup>r</sup>. Sidi Mohammed Yazit, pour ses précieux conseils, sa disponibilité et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce travail. À toute ma famille, qui m'a entourée d'amour et de soutien.. Enfin, à tous ceux qui ont contribué à mon parcours et à la réalisation de ce mémoire, je dédie ce travail avec une profonde gratitude et une sincère reconnaissance.

## **Dédicace (2)**

Je dédie ce travail à ma mère, Kheira, à qui j'adresse mes plus sincères remerciements. C'est elle qui m'a donné la vie, inspiré la force et a toujours été ma source de soutien. Grâce à son amour et à son dévouement, chaque étape de ma vie a été possible. Merci maman pour tout. À mon père, qui a semé en moi la persévérance et la détermination. J'adresse également mes remerciements à ma chère tante Fatiha ainsi qu'à mes cousines : Imane, Ikram, Siham et Malak, qui ont toujours été présentes à mes côtés grâce à leur grand amour. À mes frères et à ma chère famille, qui ont été un soutien précieux tout au long de ce parcours. Je remercie aussi mes amies : Fadoua, Amira et Sara, pour leurs encouragements constants et leur belle présence dans ma vie. À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, j'adresse mes sincères remerciements et ma profonde gratitude.

### **Dédicace (3)**

Je dédie ce modeste travail à : À mon cher père Boumédiene et à ma chère mère Zohra, pour leur amour, leurs sacrifices et leurs prières. À mes chères sœurs Fatiha et Nadia, à mon cher frère Fathi, ainsi qu'à ma précieuse fille Joumana, pour leur soutien et leur affection. À la mémoire de mon beau-frère Mourad et de ma tante Maghnia, qu'Allah leur accorde Sa miséricorde. À ma cousine Hanan, fille de ma regrettée tante Maghnia. À tous mes neveux et nièces, avec toute mon affection. À mon encadrant, M. Yazit, pour ses précieux conseils, sa disponibilité et son accompagnement. À mes chères amies Halima, Ikhlass, Doaa et Kounouz, pour leur soutien et leur sincère amitié. Enfin, à toutes les personnes qui m'ont soutenue de près ou de loin, je dédie ce travail avec une profonde gratitude.

## REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la patience, la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. Nous adressons nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire. Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur, Monsieur Mohamed Yazit, pour sa disponibilité, ses conseils avisés, son suivi rigoureux et ses précieuses orientations tout au long de ce travail. Nous remercions également l'ensemble de nos enseignants pour les connaissances scientifiques et méthodologiques qu'ils nous ont transmises durant notre parcours universitaire. Nos remerciements s'adressent aussi à l'équipe du laboratoire de Biologie de l'Université Belhadj Bouchaïb d'Ain Témouchent pour son accueil, son aide et son accompagnement durant la réalisation de ce travail. Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à nos parents pour leur soutien moral et matériel, leurs sacrifices et leurs encouragements constants tout au long de nos études. Enfin, nous remercions toutes les personnes qui nous ont apporté leur aide et leur soutien, de près ou de loin. À tous, nous adressons nos plus sincères remerciements.

*BOUCHRA& NARIMANR& HANANE*

## RÉSUMÉ

La valorisation des sous-produits agroalimentaires et leur utilisation comme amendements organiques du sol constituent une approche durable permettant d'améliorer la fertilité des sols et de réduire les déchets organiques. Dans ce contexte, cette étude vise à évaluer l'effet de deux types d'amendements organiques, à savoir la coquille d'œuf et le son de blé, sur certaines propriétés physico-chimiques du sol ainsi que sur la croissance d'une culture test de laitue (*Lactuca sativa* L.). L'expérimentation a été réalisée dans des conditions contrôlées en utilisant quatre traitements : sol témoin (T0), sol amendé par la coquille d'œuf (T1), son de blé (T2), et un mélange de coquille d'œuf et de son de blé (T3). Certaines propriétés du sol, notamment le pH, la conductivité électrique et la matière organique, ont été étudiées avant et après la culture en plus du suivi des paramètres de croissance de la laitue. Les résultats obtenus montrent que l'ajout des amendements organiques a influencé les propriétés du sol et le développement des plantes. La coquille d'œuf a contribué à l'augmentation du pH du sol et au maintien de valeurs proches de la neutralité grâce à sa richesse en carbonate de calcium, tandis que l'utilisation du son de blé a amélioré la teneur du sol en matière organique et favorisé la croissance de la laitue. Les différents traitements ont également montré des variations dans la réponse du sol et des plantes, confirmant le potentiel agronomique de ces sous-produits comme amendements organiques. En conclusion, l'utilisation de la coquille d'œuf et du son de blé comme amendements organiques représente une alternative écologique et économique prometteuse pour améliorer la fertilité du sol et soutenir la production végétale.

**Mots-clés** : Amendements organiques, coquille d'œuf, son de blé, fertilité du sol, laitue, croissance végétale.

## ABSTRACT

Abstract: The valorization of agro-food by-products and their use as organic soil amendments represent a sustainable approach that contributes to improving soil fertility and reducing organic waste. In this context, this study aims to evaluate the effect of two types of organic amendments, namely eggshell and wheat bran, on some physicochemical properties of the soil as well as on the growth of a test crop of lettuce (*Lactuca sativa* L.). The experiment was conducted under controlled conditions using four treatments: control soil (T0), soil amended with eggshell (T1), wheat bran (T2), and a mixture of eggshell and wheat bran (T3). Several soil properties, including pH, electrical conductivity, and organic matter content, were analyzed before and after cultivation in addition to monitoring lettuce growth parameters. The results showed that the addition of organic amendments influenced soil properties and plant development. Eggshell application contributed to increasing soil pH and maintaining values close to neutrality due to its high calcium carbonate content, whereas wheat bran improved soil organic matter content and enhanced lettuce growth. The different treatments showed variations in soil and plant responses, highlighting the agronomic potential of these agro-food by-products as organic amendments. In conclusion, the use of eggshell and wheat bran as organic soil amendments represents a promising ecological and economic alternative for improving soil fertility and supporting plant production.

**Keywords:** Organic amendments, eggshell, wheat bran, soil fertility, lettuce, plant growth.

## ملخص

يُعد تثمين المنتجات الثانوية للصناعات الغذائية واستعمالها كمحسنات عضوية للتربة نهجًا مستدامًا يساهم في تحسين خصوبة التربة والحد من النفايات العضوية. وفي هذا السياق، تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير نوعين من المحسنات العضوية، وهما قشور البيض ونخالة القمح، على بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة، وكذلك على نمو محصول اختباري من الخس (*Lactuca sativa* L.). أُجريت التجربة في ظروف مضبوطة باستعمال أربع معاملات: تربة شاهدة (T0)، تربة مضاف إليها قشور البيض (T1)، نخالة القمح (T2)، ومزيج من قشور البيض ونخالة القمح (T3). وتمت دراسة بعض خصائص التربة، لا سيما الرقم الهيدروجيني (pH)، والتوصيلية الكهربائية، والمادة العضوية قبل وبعد الزراعة إضافة إلى متابعة مؤشرات نمو نبات الخس. أظهرت النتائج أن إضافة المحسنات العضوية أثرت على خصائص التربة ونمو النباتات. حيث ساهمت قشور البيض في رفع قيمة الرقم الهيدروجيني (pH) للتربة والحفاظ على قيم قريبة من التعادل بفضل غناها بكاربونات الكالسيوم، في حين أدى استعمال نخالة القمح إلى تحسين محتوى التربة من المادة العضوية وتعزيز نمو نبات الخس. كما أظهرت المعاملات المختلفة فروقات في استجابة التربة والنبات، مما يؤكد الإمكانات الزراعية لهذه المنتجات الثانوية كمحسنات عضوية. وفي الختام، يمثل استخدام قشور البيض ونخالة القمح كمحسنات عضوية للتربة حلاً بيئيًا واقتصاديًا واعدًا لتحسين خصوبة التربة ودعم الإنتاج النباتي.

**الكلمات المفتاحية:** المحسنات العضوية، قشور البيض، نخالة القمح، خصوبة التربة، الرقم الهيدروجيني، .

الخس، النمو النباتي

## LISTE DES ABREVIATIONS

**USDA** : United States Department of Agriculture : Département de l'Agriculture des États-Unis.

**VBS** : Valeur au Bleu du Sol : Indicateur de la teneur en argiles et de leur activité.

**G** : Gramme : Unité de mesure de la masse.

**pH** : Potentiel Hydrogène : Mesure de l'acidité ou de l'alcalinité du sol.

**CE** : Conductivité Électrique : Mesure de la salinité du sol.

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

**MO** : Matière Organique : Ensemble des résidus organiques présents dans le sol.

**NaOH** : Hydroxyde de Sodium : Réactif chimique utilisé dans les analyses.

**H totale** : Humidité Totale : Quantité totale d'eau contenue dans le sol.

**H limon** : Teneur en Limon : Pourcentage de limon dans le sol.

**H argile** : Teneur en Argile : Pourcentage d'argile dans le sol.

**SST** : Surface Spécifique Totale : Surface totale des particules du sol par unité de masse.

**LOI** : Loss On Ignition (Perte au Feu) : Méthode de détermination de la matière organique par calcination.

**NPK** : Azote – Phosphore – Potassium : Principaux éléments nutritifs des plantes.

**M<sup>+</sup>** : Cations échangeables : Ions positifs retenus sur le complexe argilo-humique.

**Ca<sup>2+</sup>** : Calcium : Élément nutritif essentiel pour les plantes.

**Mg<sup>2+</sup>** : Magnésium : Élément entrant dans la composition de la chlorophylle.

**K<sup>+</sup>** : Potassium : Élément nécessaire à la croissance végétale.

**NH<sub>4</sub><sup>+</sup>** : Ammonium : Forme assimilable de l'azote.

**CEC** : Capacité d'Échange Cationique : Capacité du sol à retenir et échanger les cations.

**NO<sub>3</sub><sup>-</sup>** : Nitrate : Forme minérale de l'azote assimilable par les plantes.

**P** : Phosphore : Élément indispensable au développement racinaire et énergétique.

**EEA** : Activité Enzymatique Extracellulaire : Activité des enzymes libérées dans le sol.

**CaCO<sub>3</sub>** : Carbonate de Calcium : Constituant calcaire du sol.

**CA** : Calcium Actif : Fraction réactive du calcium dans le sol.

**S** : Soufre : Élément nutritif nécessaire à la synthèse des protéines.

**Fe** : Fer : Oligoélément essentiel à la croissance des plantes.

**Zn** : Zinc : Oligoélément impliqué dans plusieurs réactions enzymatiques.

**Cu** : Cuivre : Oligoélément participant au métabolisme végétal.

**Mn** : Manganèse : Oligoélément nécessaire à la photosynthèse.

**SOM** : Soil Organic Matter : Matière organique présente dans le sol.

**MF** : Matière Fine : Fraction fine du sol constituée de particules de petite taille

**VBS** : Valeur au Bleu du Sol

**V** : Taux de saturation en bases (ou degré de saturation)

**M** : Masse (selon le contexte d'analyse)

**P** : Phosphore

**CEC** : Capacité d'Échange Cationique

## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 01</b> : définition et composition du sol.....                                                                                                            | 02 |
| <b>Figure 02</b> : propriété du sol et leurs impacts.....                                                                                                           | 06 |
| <b>Figure 03</b> : effets des amendements organiques sur les propriétés du sol.....                                                                                 | 13 |
| <b>Figure 04</b> : structure et organisation des différentes couches de la coquille d'œuf (Sainz-Hernández et al., 2026).....                                       | 15 |
| <b>Figure 05</b> : Organisation anatomique du grain de blé mettant en évidence les couches du son de blé et leurs principaux constituants (Onipe et al., 2015)..... | 17 |
| <b>Figure 06</b> : localisation géographiques du site d'étude a el malah (Ain tèmouchent,algerie). Source : Google Earth pro (2025).....                            | 19 |
| <b>Figure 07</b> : photographie réelle présentant l'environnement général de la zone d'étude.....                                                                   | 20 |
| <b>Figure 08</b> : méthodes de caractérisation de la texture du sol .....                                                                                           | 20 |
| <b>Figure 09</b> : Méthode du bocal pour la détermination de la texture du sol après 48 heures de sédimentation.....                                                | 21 |
| <b>Figure 10</b> : schéma de détermination de la texture du sol par la méthode du bocal.....                                                                        | 22 |
| <b>Figure 11</b> : réalisation de l'essai au bleu de méthylène.....                                                                                                 | 24 |
| <b>Figure 12</b> : coquille d'œuf.....                                                                                                                              | 25 |
| <b>Figure 13</b> : son de blé.....                                                                                                                                  | 26 |
| <b>Figure 14</b> : schéma représentatif des traitements.....                                                                                                        | 27 |
| <b>Figure 15</b> : multi-paramètre mètre.....                                                                                                                       | 30 |
| <b>Figure 16</b> : Observation visuelle des plants de laitue à la récolte selon les différents traitements.....                                                     | 32 |
| <b>Figure 17</b> : évolution de la hauteur des plantes (cm).....                                                                                                    | 33 |
| <b>Figure 18</b> : évolution du nombre de feuilles.....                                                                                                             | 34 |
| <b>Figure 19</b> : évolution de la longueur de feuilles (cm).....                                                                                                   | 35 |
| <b>Figure 20</b> : variation de ph du sol.....                                                                                                                      | 36 |
| <b>Figure 21</b> : variation de la conductivité électrique du sol.....                                                                                              | 37 |
| <b>Figure 22</b> : variation de TDS du sol.....                                                                                                                     | 38 |
| <b>Figure 23</b> : variation de salinité du sol.....                                                                                                                | 39 |
| <b>Figure 24</b> : teneur en matière organique du sol.....                                                                                                          | 40 |

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 01 :</b> classification des sols selon la valeur au bleu de méthylène (VBS)..... | 23 |
| <b>Tableau 02 :</b> répartition et description des traitements.....                         | 26 |
| <b>Tableau 03 :</b> résultats de l'étude textural du sol.....                               | 31 |
| <b>Tableau 04 :</b> valeurs de biomasse fraîche et sèche.....                               | 36 |

# SOMMAIRE

|                                                                                    |      |
|------------------------------------------------------------------------------------|------|
| DÉDICACE .....                                                                     | i    |
| REMERCIEMENTS .....                                                                | iv   |
| RÉSUMÉ .....                                                                       | v    |
| ABSTRACT .....                                                                     | vi   |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS .....                                                       | viii |
| LISTE DES FIGURES .....                                                            | x    |
| LISTE DES TABLEAUX .....                                                           | xi   |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE                                                              |      |
| PARTIE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....                                           | 1    |
| Chapitre I : Le sol, ses propriétés et les bases de la fertilité.....              | 1    |
| 1.1 Définition et organisation du sol.....                                         | 1    |
| 1.2 Propriétés physiques du sol.....                                               | 1    |
| 1.2.1 Texture et structure .....                                                   | 2    |
| 1.2.2 Porosité, densité et rétention d'eau .....                                   | 2    |
| 1.3 Propriétés chimiques du sol.....                                               | 3    |
| 1.3.1 Matière organique et carbone.....                                            | 3    |
| 1.3.2 pH, calcaire et nutriments.....                                              | 3    |
| 1.4 Propriétés biologiques du sol.....                                             | 4    |
| 1.5 Notion de fertilité du sol .....                                               | 5    |
| 1.6 Facteurs influençant la fertilité du sol.....                                  | 6    |
| Facteurs physiques.....                                                            | 6    |
| Facteurs chimiques.....                                                            | 7    |
| Facteurs biologiques .....                                                         | 7    |
| Chapitre II : Amendements organiques et amélioration de la fertilité des sols..... | 8    |
| II.1 Définition des amendements organiques.....                                    | 8    |
| II.2 Types d'amendements organiques.....                                           | 8    |
| II.3 Effets des amendements organiques sur les propriétés du sol.....              | 9    |
| II.3.1 Effets sur les propriétés physiques.....                                    | 9    |
| II.3.2 Effets sur les propriétés chimiques.....                                    | 10   |
| II.3.3 Effets sur les propriétés biologiques.....                                  | 11   |
| II.4. Avantages des amendements organiques .....                                   | 12   |

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.5 Valorisation des déchets organiques .....                                                                | 13 |
| II.6 composition et valorisation de coquilles d'œuf et son de blé.....                                        | 14 |
| PARTIE II : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.....                                                                          | 18 |
| Chapitre III : matériel et méthode (Etude expérimental) .....                                                 | 18 |
| III.1 site d'étude et échantillonnage du sol .....                                                            | 18 |
| III.1.1 localisation de la zone d'étude.....                                                                  | 18 |
| III.2. caractérisation physique du sol .....                                                                  | 19 |
| III.2.1 détermination de la texture du sol .....                                                              | 19 |
| III .2.2.1 classification textural selon le triangle USDA .....                                               | 20 |
| III.2.2.2 détermination de l'activité argileuse par l'essai au bleu de méthylène .....                        | 22 |
| III.2.2.3 analyse granulométrique par sédimentation .....                                                     | 24 |
| III.3 préparation des amendements .....                                                                       | 24 |
| III .3.1 préparation des coquilles d'œufs .....                                                               | 24 |
| III.3.2 préparation de son de blé .....                                                                       | 24 |
| II.4.mise en place de l'expérimentation.....                                                                  | 26 |
| II.4.1 préparation des traitements .....                                                                      | 26 |
| II.4.2 incubation des amendements .....                                                                       | 27 |
| II .4.3 culture de la laitue .....                                                                            | 27 |
| II.4.4 conditions de culture .....                                                                            | 27 |
| II.4.5 suivi la croissance .....                                                                              | 28 |
| III.5 Evaluation de l'effet des amendements sur les propriétés du sol.....                                    | 28 |
| III.5.1 détermination de la matière organique (méthode LOI) .....                                             | 28 |
| III.5.2 mesure du ph ,de la conductivité électrique , de la salinité et des solides dissous totaux (TDS)..... | 29 |
| Chapitre IV : résultat et interprétation.....                                                                 | 31 |
| IV.1 résultats texture du sol obtenu par les différentes méthodes d'analyse .....                             | 31 |
| IV.2. Évolution visuelle de la croissance des laitues durant l'expérimentation.....                           | 31 |
| IV.3 observation visuelle des plantes de laitue a la récolté.....                                             | 33 |
| IV.4 effet des amendements sur la croissance de la laitue .....                                               | 34 |
| IV.4.1 effet des amendements organiques sur la hauteur des plantes (cm) .....                                 | 34 |
| IV .4.2 effet des amendements organiques sur le nombre de feuilles .....                                      | 35 |
| IV.4.3 effet des amendements organiques sur la longueur des feuilles .....                                    | 36 |
| IV.4.4 effet des amendements organiques sur le poids frais et sec .....                                       | 37 |
| IV.5. analyses chimiques du sol .....                                                                         | 38 |

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| IV.5.1 effet des amendements organiques sur le ph du sol .....                | 38 |
| IV .5.2 effet des amendements organiques sur conductivité électrique.....     | 39 |
| IV.5.3 effet des amendements organiques sur TDS (solides dissous totaux)..... | 39 |
| IV.5.4 effet des amendements organiques sur la salinité .....                 | 40 |
| IV.5.5 effet des amendements organiques sur la matière organique .....        | 41 |
| Chapitre V : Discussion.....                                                  | 42 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE .....                                                     | 48 |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....                                              | 48 |

# *INTRODUCTION*

## INTRODUCTION

Le sol constitue l'une des ressources naturelles les plus importantes sur lesquelles repose l'agriculture, car il représente la base de la production alimentaire et de la continuité de la vie humaine. Le développement des civilisations à travers l'histoire a été étroitement lié à l'exploitation du sol et à l'amélioration de ses propriétés (Akhila & Entoori, 2022).

La santé des sols est étroitement liée au concept d'agriculture durable, dans la mesure où la diversité des micro-organismes du sol ainsi que leur niveau d'activité constituent des facteurs fondamentaux déterminant les fonctions biologiques du sol et sa qualité environnementale (Tahat et al., 2020).

Cependant, les terres agricoles font actuellement face à des défis croissants liés au phénomène de dégradation des sols, qui se manifeste principalement par la diminution de la matière organique et l'épuisement des éléments nutritifs, entraînant ainsi une baisse de la fertilité des sols (Lal, 2015). Ce processus de dégradation a été identifié comme l'un des principaux facteurs responsables de la diminution de la productivité agricole, en particulier dans les pays en développement (Hüttl & Frielinghaus, 1994).

Face aux défis croissants auxquels sont confrontés les systèmes agricoles, il devient nécessaire d'adopter des alternatives durables capables d'améliorer la fertilité des sols et d'en assurer la préservation à long terme. Les amendements organiques constituent l'une des principales options en ce sens, en raison de leur rôle efficace dans l'apport des éléments nutritifs essentiels au sol, ainsi que de leur contribution à l'amélioration des propriétés physiques du sol, à l'augmentation de sa capacité de rétention en eau et à la stimulation de l'activité des micro-organismes.

L'effet de ces amendements ne se limite pas à l'enrichissement du sol en éléments nutritifs, mais s'étend également à l'augmentation de la teneur en matière organique, considérée comme un élément clé pour le maintien de la santé des sols et la durabilité de leur fertilité (Singh et al., 2024).

Dans le cadre de l'orientation vers des pratiques de fertilisation durables et respectueuses de l'environnement, un intérêt croissant est accordé à l'exploration de sources alternatives d'amendements agricoles, parmi lesquelles figurent les coquilles d'œufs. Ces dernières constituent une matière riche en carbonate de calcium ainsi qu'en divers éléments minéraux, ce qui leur confère un potentiel prometteur pour l'amélioration des propriétés des sols agricoles. En effet, les coquilles d'œufs contribuent à l'amélioration de la structure

physique et chimique du sol, tout en apportant des éléments nutritifs essentiels au développement et à la croissance des plantes (Wong et al., 2023).

Le son de blé (WB) est considéré comme l'un des principaux sous-produits issus de l'industrie de la mouture, et il représente le plus abondant parmi les différents résidus de son de céréales (Rossi et al., 2024).

Ce sous-produit agroalimentaire est riche en fibres, minéraux, vitamines et composés phénoliques antioxydants, ce qui lui confère un intérêt potentiel dans les applications agricoles et comme amendement organique du sol (Shewry, 2009).

La laitue est considérée comme l'une des principales cultures maraîchères à l'échelle mondiale. Elle figure parmi les légumes-feuilles les plus consommés, notamment aux États-Unis, et est largement cultivée dans différentes régions du monde (Vannini et al., 2021). Elle se distingue par sa valeur nutritionnelle élevée, constituant une source importante de minéraux, de composés phénoliques et de vitamines, contribuant ainsi à l'amélioration de la santé humaine (Kim et al., 2016).

L'objectif de Ce travail vise à évaluer l'effet des amendements organiques issus des déchets alimentaires, notamment les coquilles d'œufs et le son de blé, sur la fertilité des sols, à travers l'étude de leurs impacts sur les propriétés physiques et chimiques du sol, ainsi qu'à comparer leur efficacité. Il vise également à analyser l'effet de ces amendements sur la croissance de la laitue

**Hypothèse** Cette étude suppose que l'apport d'amendements organiques au sol contribue à l'amélioration de sa fertilité en induisant des modifications positives de ses propriétés physiques, chimiques et biologiques, ce qui se traduit par un effet bénéfique sur la croissance de la laitue

L'intérêt de ce travail réside dans la valorisation des déchets alimentaires par leur transformation en amendements organiques à valeur ajoutée, au lieu de leur élimination par des méthodes pouvant entraîner une pollution environnementale, contribuant ainsi au soutien de l'agriculture durable et à la réduction de la dépendance aux engrais chimiques.

Enfin, ce travail est organisé en trois parties principales : la première est consacrée à la synthèse bibliographique, la deuxième présente les matériels et méthodes adoptés dans l'étude, tandis que la troisième expose les résultats obtenus ainsi que leur discussion.

*PARTIE I : SYNTHÈSE  
BIBLIOGRAPHIQUE*

## Chapitre I: Le sol, ses propriétés et les bases de la fertilité

### I.1. Définition et organisation du sol

Le sol est un milieu naturel vivant et poreux, composé d'une phase solide, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse qui interagissent continuellement. Issu de l'altération de la roche mère sous l'influence du climat et des organismes vivants, il constitue le support de la croissance des plantes et un élément clé du fonctionnement des écosystèmes (Morel, 1989 ; Baize & Jabiol, 1995). La connaissance de ses propriétés physiques est essentielle pour assurer une gestion durable des sols et optimiser la production végétale (Musy & Soutter, 1991).

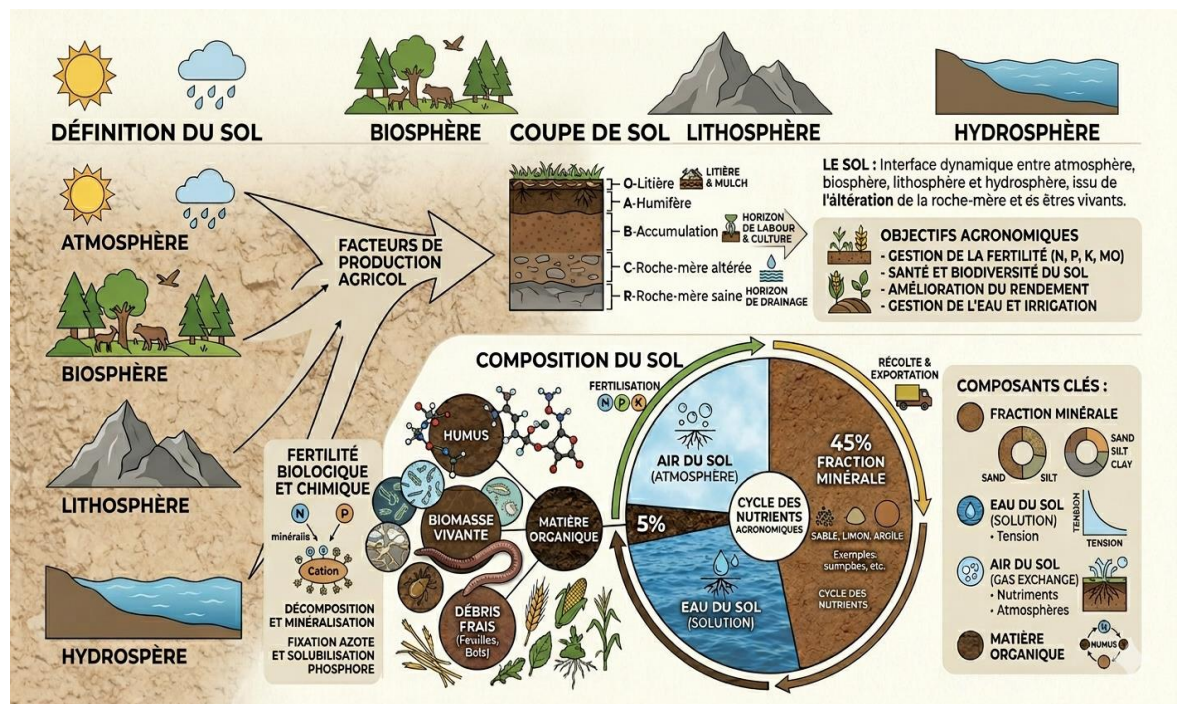


Figure 01: Définition et composition du sol ( image générer par AI)

### I.2. Propriétés physiques du sol

La physique du sol est une discipline qui étudie les processus physiques contrôlant les propriétés du sol, ce qui en fait un outil essentiel pour la gestion, la protection et la conservation des sols, ainsi que pour l'amélioration de la production végétale (Musy & Soutter, 1991).

### ***1.2.1. Texture et structure***

La texture du sol correspond à la répartition des particules élémentaires qui le composent, à savoir l'argile, le limon et le sable, selon leurs dimensions géométriques et leur granulométrie (Musy & Soutter, 1991). La classification des sols repose sur plusieurs systèmes, dont le système U.S.D.A. (1993), qui distingue :

- l'argile ( $< 0,002$  mm),
- le limon (0,002–0,05 mm),
- le sable (0,05–2 mm).

Le triangle textural permet de représenter les proportions de ces constituants et de classer les types de sols (Maignien, 1969).

La texture et la structure du sol influencent sa porosité, favorisant ainsi la circulation de l'eau et de l'air, ainsi que la rétention d'eau (Lanz, 2004). Elles contribuent également au développement et à l'exploration racinaire (Van Leeuwen et al., 2004 ; Seguin, 1986).

La structure du sol désigne le mode d'assemblage et d'organisation des particules élémentaires en agrégats (Maignien, 1969). Il s'agit d'une propriété variable influencée par des facteurs intrinsèques et extrinsèques du sol (Musy & Soutter, 1991 ; Duval et al., 1993). La matière organique joue un rôle important dans la stabilité structurale ; sa diminution est souvent associée à une dégradation de la structure du sol (Sanchez & Miller, 1986). Enfin, une structure grumeleuse constitue généralement un indicateur d'une bonne activité biologique et d'une meilleure stabilité du sol (Delaunois, 2006).

### ***1.2.2. Porosité, densité et rétention d'eau***

La porosité du sol correspond aux interstices (pores) non occupés par la matière minérale, pouvant être remplis par l'air, l'eau ou d'autres substances gazeuses ou liquides (Brown et al., 2021). La porosité contrôle les échanges air-eau et favorise la circulation des fluides.

La densité apparente reflète le niveau de compaction du sol et influence la pénétration des racines ainsi que le mouvement de l'eau et de l'air (Troeh & Thompson, 1993).

La rétention d'eau du sol dépend de la structure, de la texture et de la teneur en matière organique. Elle correspond à la capacité du sol à conserver l'eau nécessaire à la croissance des plantes (Brady & Weil, 2008).

### **I.3. Propriétés chimiques du sol**

La composition chimique du sol dépend en grande partie de l'altération de la roche mère sous l'action de l'eau (FAO, 2019).

#### ***I.3.1. Matière organique et carbone***

La matière organique du sol résulte de la décomposition des résidus végétaux, animaux et microbiens (Paradis, 2016). Les caractéristiques de la matière organique et de la structure du sol dépendent de facteurs naturels tels que le climat, la faune et la végétation (Kononova, 1966), ainsi que du mode de gestion et d'exploitation des terres (Feller, 1995).

La matière organique représente un indicateur important de la fertilité et de la qualité des sols, ce qui en fait un paramètre clé dans l'analyse des sols (Paré, 2011). Par ailleurs, elle contribue au stockage des éléments nutritifs, à l'augmentation de la capacité d'échange cationique (CEC), à l'activité microbienne et à l'amélioration de la stabilité structurale du sol (Kouakoua, 1998).

Les sols constituent le principal réservoir terrestre de carbone organique et leur capacité de stockage varie selon leur nature et surtout selon leur mode d'utilisation. Dans la nature, le carbone existe sous deux formes principales : le carbone organique et le carbone inorganique (UNIFA, 2019). Le carbone organique du sol représente une composante essentielle de la qualité des sols et de la durabilité des écosystèmes. Il joue un rôle central dans les processus chimiques, physiques et biologiques qui soutiennent la capacité du sol à assurer ses multiples fonctions (Krull et al., 2004).

#### ***I.3.2. pH, calcaire et nutriments***

Le pH du sol constitue un indicateur important des conditions physico-chimiques de la solution du sol, influençant l'activité microbienne et la disponibilité des nutriments

(ITAB, 2002). Une diminution du pH favorise également la solubilisation de certains éléments minéraux et leur assimilation (UNIFA, 2019).

Le calcaire total participe à la détermination des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, tout en limitant son acidification (UNIFA, 2019). Le calcaire actif correspond à la fraction facilement soluble dans la solution du sol et constitue un indicateur utile pour évaluer l'aptitude des sols à certaines cultures (Baize, 1988).

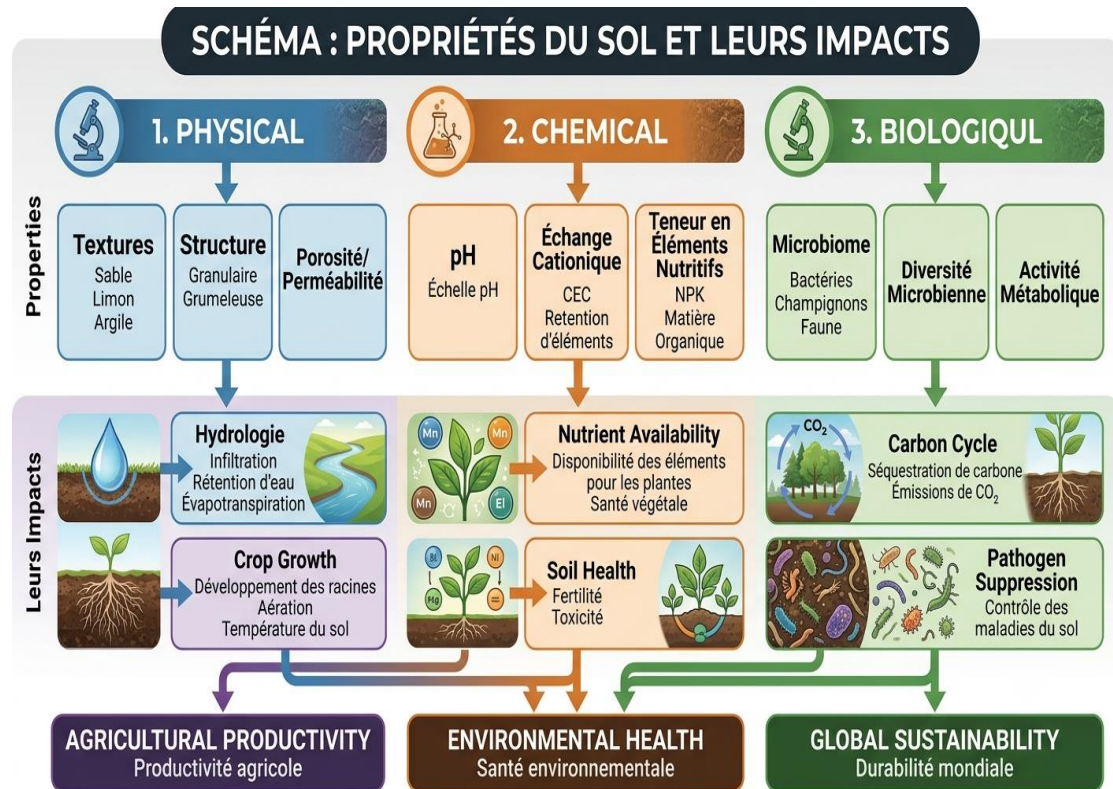
Les éléments nutritifs nécessaires aux plantes sont répartis en deux groupes : les macroéléments (N, P, K, Ca, Mg, S) et les microéléments (Fe, Zn, B, Cu, Mn, etc.), impliqués dans les processus biologiques indispensables à la croissance végétale (Lebrun, 2016 ; Brady & Weil, 2008). Les déséquilibres nutritionnels peuvent entraîner une diminution de la croissance et de la productivité des cultures (Brady & Weil, 2008).

#### **I.4. Propriétés biologiques du sol**

L'aspect biologique du sol désigne l'étude de l'abondance, de la diversité et de l'activité des organismes vivants présents dans le sol, ainsi que leur rôle dans le bon fonctionnement de celui-ci (Chaussod, 1995).

Les activités biologiques, notamment les communautés microbiennes, sont étroitement liées aux propriétés physiques et chimiques du sol, en particulier la texture, la structure, le pH et la teneur en matière organique. Les fractions fines contribuent également à la protection directe des micro-organismes (Robert & Chenu, 1992), ainsi qu'à leur protection indirecte à travers le complexe argilo-humique (Chassin, 1993).

Les organismes du sol sont responsables des cycles biogéochimiques (azote, phosphore, soufre) et de la décomposition de la matière organique, contribuant ainsi au renouvellement des nutriments et au maintien de la fertilité (Brady & Weil, 2008 ; Russell, 1977).



**Figure 02:** propriétés du sol et leurs impacts (image générer par AI)

### I.5. Notion de fertilité du sol

La fertilité du sol est la capacité du sol à fournir aux plantes les substances nécessaires en quantités appropriées, sans atteindre des concentrations toxiques. Ainsi, les sols fertiles se caractérisent par un équilibre des éléments nutritifs suffisant pour répondre aux besoins des plantes. Ils contiennent des éléments majeurs tels que l'azote, le phosphore et le potassium en grandes quantités, ainsi que des éléments mineurs comme le magnésium, le molybdène, le fer et le zinc en quantités plus faibles (Javed et al., 2022).

La fertilité du sol dépend de nombreuses propriétés du sol qui sont généralement regroupées en trois catégories ou piliers : le pilier biologique, le pilier physique et le pilier chimique (Stenberg, 1998 ; Stockdale et al., 2002).

- Le **“pilier biologique”** comprend la dynamique de la matière organique du sol (SOM) ainsi que l'activité des organismes macro-, méso- et microscopiques, qui jouent tous un rôle essentiel dans la disponibilité des nutriments et de l'eau du sol, ainsi que dans

la formation et le maintien de la qualité de la structure du sol (Huhta, 2007 ; Hartmann & Six, 2023).

- Le “**pilier physique**” concerne la texture du sol, sa structure et sa densité apparente, qui influencent les échanges d'eau et d'air, le développement de la faune du sol, la croissance des racines, l'accès aux nutriments et l'ancrage des plantes (Weil & Brady, 2017).

- Le “**pilier chimique**” se réfère principalement à l'abondance des nutriments pour les plantes et des polluants, ainsi qu'aux propriétés du sol telles que le pH, qui influencent leur disponibilité (Kabata-Pendias, 2010).

### **I.6. Facteurs influençant la fertilité du sol**

Les facteurs influençant la fertilité du sol sont divisés en trois grandes catégories : les facteurs physiques, chimiques et biologiques (Brady & Weil, 2008 ; Troeh & Thompson, 1993).

#### ➤ **Facteurs physiques**

- **Climat:** La température et les précipitations influencent directement la fertilité du sol et la croissance des plantes (Brady & Weil, 2008).
- **Texture du sol:** Elle dépend des proportions de sable, limon et argile, qui déterminent la porosité, la rétention d'eau et la disponibilité des nutriments (Brady & Weil, 2008 ; UK Essays, 2018).
- **Structure du sol:** Une bonne organisation des particules du sol améliore l'aération, l'infiltration de l'eau et la stabilité du sol (Brady & Weil, 2008 ; Troeh & Thompson, 1993).
- **Capacité de rétention d'eau:** Elle correspond à la capacité du sol à conserver l'eau nécessaire à la croissance des plantes (Brady & Weil, 2008).
- **Conductivité électrique:** Elle indique la concentration des sels solubles dans le sol. Une salinité élevée peut réduire la fertilité (Brady & Weil, 2008 ; Troeh & Thompson, 1993).

- **Densité apparente:** Elle reflète le niveau de compaction du sol et influence la pénétration des racines ainsi que le mouvement de l'eau et de l'air (Troeh & Thompson, 1993).

➤ **Facteurs chimiques**

- **pH du sol:** Le pH contrôle l'acidité ou l'alcalinité du sol et affecte l'absorption des nutriments par les plantes (Brady & Weil, 2008).
- **Capacité d'échange cationique (CEC):** Elle représente la capacité du sol à retenir et échanger les éléments nutritifs essentiels (Brady & Weil, 2008).
- **Nutriments des plantes:** Macronutriments (N, P, K, Ca, Mg, S) et micronutriments (Fe, Zn, B, Cu, Mn, etc.) (Brady & Weil, 2008).

➤ **Facteurs biologiques**

- **Matière organique:** Issue de la décomposition des résidus végétaux et animaux, elle améliore la structure du sol et enrichit le sol en nutriments (Russell, 1977).
- **Microorganismes du sol:** Les bactéries, champignons et autres microorganismes assurent la décomposition de la matière organique et le recyclage des éléments nutritifs (Bollen, s.d 2003).
- **Cycles biogéochimiques et minéralogie du sol:** Ils contribuent au renouvellement des nutriments et au maintien de la fertilité du sol (Brady & Weil, 2008 ; Russell, 1977 ; Bollen, s.d 2003).

## **Chapitre II: Amendements organiques et amélioration de la fertilité des sols**

### **II.1. Définition des amendements organiques**

Les amendements organiques sont des matériaux d'origine végétale ou animale incorporés au sol afin d'améliorer ses propriétés physiques, chimiques et biologiques et d'augmenter la fertilité du sol à long terme (Goss et al., 2013 ; Bhattacharya et al., 2016 ; Luo et al., 2018).

### **II.2. Types d'amendements organiques**

Les amendements organiques, d'origine biologique, sont utilisés pour améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, augmenter la productivité agricole et favoriser la séquestration du carbone (Hao et al., 2025 ; Nwe Htwe et al., 2025).

Ils se classent en deux grandes catégories :

- **Amendements d'origine végétale**

Incluant la biomasse fraîche, les résidus de cultures et des produits transformés (compost, biochar, engrais verts, algues, macroalgues, bagasse), caractérisés par leur richesse en carbone et leur contribution à la structure du sol et à l'activité microbienne.

- **Amendements d'origine animale**

Comprenant les biosolides et certains biopolymères tels que le chitosane, riches en nutriments et susceptibles de stimuler l'activité biologique, avec parfois un effet suppressif sur les pathogènes (Magdoff & Van Es, 2021).

Sur le plan agronomique :

- Les amendements animaux induisent généralement une augmentation rapide du carbone organique et des nutriments disponibles.
- Les amendements végétaux assurent une amélioration plus progressive et durable de la fertilité et du stockage du carbone (Xie et al., 2025 ; Rahman et al., 2022).

De manière générale :

- Les amendements végétaux, riches en composés lignocellulosiques, favorisent la structuration du sol et le stockage du carbone à long terme.
- Les amendements animaux apportent davantage d'azote et de phosphore rapidement disponibles (Li & Tasnady, 2023 ; Sapkota et al., 2025 ; Bhunia et al., 2021).

Des matériaux émergents, tels que le chitosane, les extraits d'algues et les structures métal-organiques (MOFs), représentent des alternatives prometteuses bien qu'encore au stade expérimental (Shibana & Nair, 2024 ; Lopez-Nuñez et al., 2024 ; El Hadrami et al., 2010).

- **Sous-produits agroalimentaires**

Le biochar, le compost et le vermicompost, issus de la valorisation des déchets agroalimentaires, constituent des amendements efficaces pour améliorer la qualité des sols dégradés. Ils contribuent à l'amélioration de la structure du sol, de l'activité microbienne et de la productivité végétale, tout en favorisant la stabilisation des polluants (Islam et al., 2026).

### **II.3. Effets des amendements organiques sur les propriétés du sol**

#### ***II.3.1. Effets sur les propriétés physiques***

- **Structure du sol:** La matière organique joue un rôle essentiel dans le maintien de la stabilité structurale du sol. La stabilité structurale correspond à la capacité des agrégats du sol à résister à la désagrégation sous l'action de l'eau, notamment lors des précipitations. Elle constitue un indicateur important de la sensibilité du sol à la battance, à la formation de croûtes superficielles et à l'érosion hydrique (Amezketta et al., 1996 ; Le Bissonnais et al., 2002 ; Leguédois & Le Bissonnais, 2004).

Le carbone organique du sol joue un rôle essentiel dans les différentes propriétés du sol, en contribuant à l'amélioration des propriétés biologiques par l'apport de substrat et de nutriments nécessaires aux micro-organismes. Il influence également les propriétés chimiques en régulant les réactions du sol et en participant à la stabilisation du pH, ainsi que les propriétés physiques à travers la stabilisation de la structure du sol (Krull et al., 2004).

- **Porosité:** La diminution de la teneur en matière organique est étroitement liée à la dégradation de la structure des agrégats du sol, ce qui se traduit par une augmentation du compactage, la formation de croûtes superficielles et de semelles de labour, ainsi qu'une diminution de la porosité et de la capacité de rétention en eau du sol (Tejada & Gonzalez, 2007).
- **Rétention d'eau:** Les amendements organiques contribuent à améliorer la capacité de rétention d'eau du sol grâce à leur teneur élevée en matière organique par rapport à la plupart des sols minéraux (Camberato et al., 2006). Ils permettent ainsi d'augmenter la capacité des sols dégradés à retenir l'eau et d'accroître la quantité d'eau disponible pour les plantes (Fierro et al., 1999 ; Zibilske et al., 2000).

Cet effet est lié au rôle du carbone organique du sol (SOC), qui favorise la rétention d'eau à travers plusieurs mécanismes, notamment la formation de l'humus (Beck-Broichsitter et al., 2020 ; Celik et al., 2010), l'amélioration de la stabilité des agrégats et la modification de la structure des pores (He et al., 2023 ; Hussain et al., 2020 ; Zhou et al., 2020).

### ***II.3.2. Effets sur les propriétés chimiques***

- **pH:** Les amendements organiques contribuent généralement à l'augmentation du pH du sol, en particulier dans les sols acides, en raison de la décomposition de la matière organique et de leur richesse en éléments basiques tels que le calcium. Cette décomposition entraîne également la consommation des ions hydrogène ( $H^+$ ) et la neutralisation de l'acidité (Naramabuye et al., 2006).
- **Matière organique:** La matière organique constitue un des principaux facteurs influençant les propriétés chimiques du sol. Lors de sa décomposition, elle libère des éléments nutritifs essentiels à la croissance des plantes, notamment l'azote, le phosphore et le potassium (N-P-K). La matière organique améliore également la rétention des éléments nutritifs et limite leur lessivage grâce à sa capacité à retenir les cations ( $Ca$ ,  $Mg$ ,  $K$ ,  $NH_4^+$ ), augmentant ainsi la capacité d'échange cationique (CEC) (Cooperband, 2002).
- **Azote:** Dans le sol, la disponibilité de l'azote correspond à la quantité d'azote que les plantes peuvent absorber et utiliser. L'azote se trouve principalement sous forme d'ammonium ( $NH_4^+$ ) et de nitrate ( $NO_3^-$ ), issus de la décomposition de la matière organique par les micro-organismes du sol (Schimel & Bennett, 2004). Les apports de fertilisants et de matières organiques, en particulier les déjections animales, contribuent à augmenter la disponibilité de l'azote dans le sol (Yu et al., 2019 ; Wang et al., 2022).
- **Phosphore:** Le phosphore (P) est un élément nutritif essentiel à la croissance des plantes. L'apport d'amendements organiques aide à améliorer la disponibilité du phosphore et à augmenter la productivité des plantes. La matière organique contribue à réduire la fixation du phosphore en se liant à certains éléments comme le calcium et le fer, rendant le phosphore plus assimilable par les plantes (Islam et al., 2026).
- **Potassium:** Le potassium (K) est un élément nutritif important pour la croissance des plantes et la fertilité du sol. Les micro-organismes du sol, notamment les bactéries solubilisatrices du potassium, jouent un rôle important en produisant des acides et des

substances permettant de libérer le potassium à partir des minéraux (Zhang et al., 2025).

### ***II.3.3. Effets sur les propriétés biologiques***

- **Activité microbienne:** L'activité des micro-organismes du sol est directement influencée par les conditions environnementales et les propriétés édaphiques. Les communautés microbiennes contrôlent les cycles des principaux éléments nutritifs tels que l'azote, le soufre et le phosphore, influençant ainsi la structure physique du sol, la disponibilité des nutriments et le renouvellement de la matière organique (Nannipieri et al., 1979 ; Gregorich et al., 1996).

L'apport d'amendements organiques tels que le fumier et le compost permet de stimuler l'activité microbienne et d'améliorer la fertilité ainsi que les propriétés physiques et chimiques du sol (Chen et al., 2003).

- **Activités enzymatiques:** L'activité enzymatique extracellulaire (EEA) du sol joue un rôle essentiel dans la décomposition de la matière organique et sa transformation en nutriments assimilables par les plantes et les micro-organismes (Sinsabaugh et al., 2008). Elle constitue un indicateur sensible des changements environnementaux et des perturbations affectant le sol (Zuccarini et al., 2023).
- **Biomasse microbienne:** La biomasse microbienne du sol constitue un indicateur biologique essentiel permettant d'évaluer l'état de l'activité biologique du sol ainsi que sa fertilité. Several studies ont montré que l'apport d'amendements organiques tels que les composts issus des déchets solides municipaux et les boues d'épuration entraîne une augmentation significative du carbone de la biomasse microbienne (Perucci, 1992 ; García-Gil et al., 2000, 2004 ; Crecchio et al., 2001, 2004 ; Ros et al., 2006 ; Bastida et al., 2008).

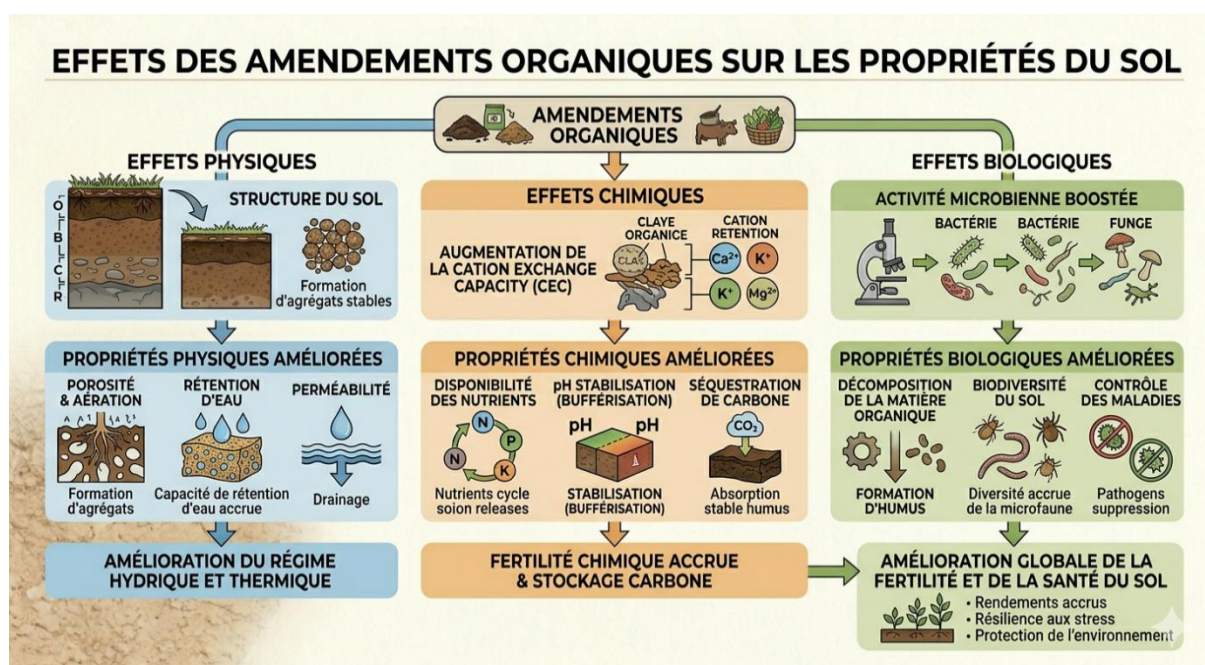


Figure 03: Effets des amendements organique sur les propriétés du sol

#### II.4. Avantages des amendements organiques

Les pratiques agricoles intensives, telles que l'utilisation excessive des intrants chimiques, le labour profond et l'irrigation excessive, ont contribué à la dégradation des sols, à la pollution des ressources hydriques ainsi qu'à la contamination de l'atmosphère. La diminution de la teneur en matière organique constitue aujourd'hui un facteur majeur de dégradation des sols, en particulier dans les régions méditerranéennes semi-arides d'Europe.

Dans ce contexte, plusieurs études à long terme (3 à 60 ans) ont évalué les effets des amendements organiques, utilisés à la fois pour restaurer la matière organique des sols et pour réduire la dépendance aux engrais chimiques

- **Effets biologiques:** L'application répétée de matière organique exogène améliore significativement les fonctions biologiques du sol, avec une augmentation de la biomasse microbienne du carbone pouvant atteindre 100 % avec des apports élevés de compost, et une hausse de l'activité enzymatique de l'ordre de 30 % suite à l'ajout de boues.
- **Effets sur le carbone organique:** Les amendements organiques favorisent une augmentation notable du carbone organique du sol, pouvant atteindre 90 % par rapport à un sol non fertilisé et jusqu'à 100 % comparativement aux fertilisations chimiques.

- **Effets physiques:** Ils contribuent à l'amélioration des propriétés physiques du sol, notamment par l'augmentation de la stabilité structurale et la diminution de la densité apparente.
- **Effets agronomiques:** Les performances les plus élevées sont généralement observées avec des apports fréquents et à fortes doses de compost, permettant une libération progressive de l'azote. Ces pratiques entraînent une augmentation significative des rendements agricoles, pouvant atteindre 250 % dans le cas d'applications prolongées de compost issu de déchets solides municipaux.
- **Atténuation du changement climatique:** Les amendements organiques jouent un rôle important dans l'atténuation du changement climatique grâce à la séquestration du carbone dans le sol.
- **Sécurité environnementale:** Les études disponibles n'ont pas mis en évidence d'effets négatifs significatifs liés aux métaux lourds, notamment lors de l'utilisation prolongée de composts de haute qualité. L'apport répété de matières organiques stabilisées contribue à l'enrichissement du sol en azote organique (jusqu'à 90 %), favorisant sa minéralisation progressive sans entraîner de lessivage important des nitrates.

## II.5. Valorisation des déchets organiques

La valorisation des déchets organiques constitue aujourd'hui un pilier central de l'agriculture durable, traduisant une transition progressive d'un modèle linéaire d'exploitation des ressources vers des systèmes de production circulaires et renouvelables.

Les activités agricoles génèrent d'importantes quantités de résidus organiques (fumier, résidus de cultures, sous-produits agroalimentaires), longtemps considérés comme de simples déchets. Toutefois, ces matières sont désormais reconnues comme des ressources valorisables, capables de contribuer à la production d'énergie, au recyclage des nutriments et à l'amélioration de la qualité des sols (Chojnacka et al., 2022).

Cette évolution conceptuelle s'inscrit pleinement dans les principes de l'économie circulaire, qui visent la fermeture des cycles de matière, la réduction de la dépendance aux intrants non renouvelables et la limitation des impacts environnementaux négatifs (Chojnacka et al., 2022).

Les procédés de valorisation favorisent le développement de produits biologiques tels que les engrais organiques, les amendements des sols et divers composés à haute valeur ajoutée issus des sous-produits agricoles. Les avancées technologiques dans les techniques de

traitement, ainsi que l'émergence du concept de bio-raffinerie, ont considérablement élargi les possibilités d'exploitation de ces résidus (Cabanoglu et al., 2022).

Les approches modernes de valorisation, notamment les procédés biochimiques et thermochimiques, ont démontré un fort potentiel pour améliorer l'efficacité globale des systèmes tout en réduisant leur impact environnemental.

## II-6 composition et valorisation coquille d'œuf et son de blé :

### II-6-1 Composition de la coquille d'œuf :

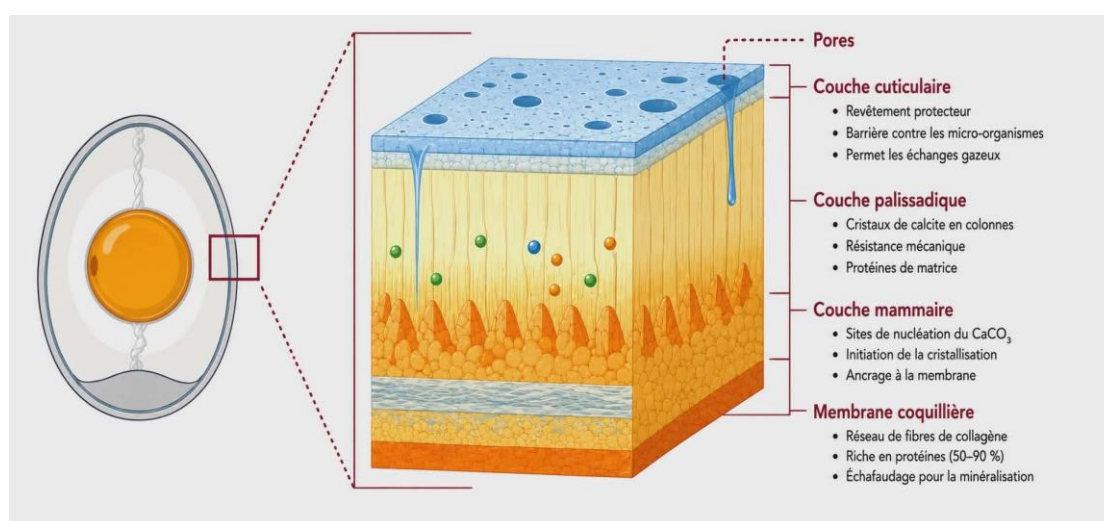
La coquille d'œuf est constituée d'une fraction organique représentée par des membranes riches en protéines et d'une fraction minérale qui constitue la majeure partie de sa structure.

Elle est composée principalement de :

carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) sous forme de calcite, dont la teneur varie généralement entre 93 et 97 % de la masse totale de la coquille.

La coquille renferme également de faibles proportions de phosphate de calcium, de magnésium ainsi que d'autres composés organiques.

La composition minérale de la coquille peut varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment l'âge de la poule, les conditions d'élevage et la qualité de l'alimentation minérale (Kristl et al., 2019).



**Figure 04 :** structure et organisation des différentes couches de la coquille d'œuf (Sainz-Hernández et al., 2026).

### **II-6-2.Valorisation de coquille d'œuf :**

Les coquilles d'œufs constituent un déchet abondant issu des couvoirs des ménages et de l'industrie agroalimentaire, ce qui facilite leur collecte et leur valorisation à grande échelle (Bain, 1997 ; Nys et al., 2004).

La valorisation des coquilles d'œufs représente une solution durable permettant de réduire les impacts environnementaux et les contraintes liées à leur élimination (Amu et al., 2005).

Malgré leur faible valeur économique les coquilles d'œufs constituent une ressource potentielle grâce à leur richesse en composés minéraux et biologiquement actifs (Nakano et al., 2003).

Elles se caractérisent par une teneur élevée en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), accompagnée de faibles quantités de magnésium et de phosphore ce qui leur confère un intérêt particulier dans les domaines agricole et environnemental (Swiatha et al., 2018).

Des études récentes ont montré que la poudre de coquille d'œuf finement broyée constitue un amendement efficace pour les sols acides, en contribuant à la correction de l'acidité et à l'amélioration des propriétés chimiques du sol.

L'utilisation de la poudre de coquille d'œuf favorise de meilleures conditions de croissance des plantes et contribue à l'amélioration des performances agronomiques des cultures.

Les matériaux dérivés des coquilles d'œufs peuvent être incorporés dans les procédés de compostage et dans la production de biochar enrichi afin d'améliorer la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol.

L'incorporation de produits issus des coquilles d'œufs contribue également à l'immobilisation de certains contaminants et à la stimulation de l'activité microbienne du sol, favorisant ainsi sa fertilité et sa qualité (Sainz-Hernández et al., 2026).

### **II-6-3.Composition du sol de blé :**

Le son de blé est constitué des couches externes du grain de blé, notamment le péricarpe externe et interne la testa et la couche d'aleurone (Apprich et al., 2013).

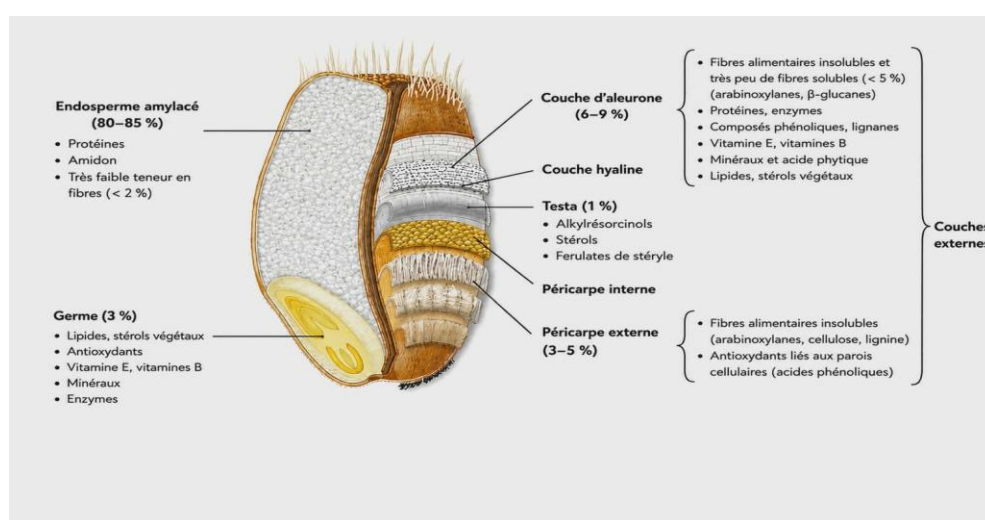
Il se caractérise par une teneur élevée en fibres alimentaires représentant environ 53 % de sa composition, principalement sous forme de xylanes, de lignine, de cellulose, de galactanes et de fructanes (Apprich et al., 2013 ).

Il contient également des vitamines, des minéraux ainsi que de nombreux composés bioactifs tels que les alkylrésorcinols, l'acide férulique, les flavonoïdes, les caroténoïdes, les lignanes et les stérols végétaux (Apprich et al., 2013 ; Andersson et al., 2012 ; De Brier et al., 2014 ).

Les couches du péricarpe contiennent principalement des fibres alimentaires insolubles ainsi que des acides phénoliques sous forme liée (Apprich et al., 2013 cité par Onipe et al., 2015).

Les alkylrésorcinols sont principalement localisés dans la couche de la testa (Rebolleda et al., 2013).

Quant à la couche d'aleurone, elle constitue la couche la plus interne du son de blé et renferme des quantités importantes de lignanes, de protéines présentant un profil équilibré en acides aminés, de composés bioactifs, d'acide phytique, d'antioxydants, ainsi que de vitamines et de minéraux (Javed et al., 2012).



**Figure 05 :** Organisation anatomique du grain de blé mettant en évidence les couches du son de blé et leurs principaux constituants (Onipe et al., 2015) .

#### II-6-4. Valorisation du son de blé :

Le son de blé est un sous-produit issu de la mouture du blé, mais il possède une valeur nutritionnelle et fonctionnelle élevée grâce à sa richesse en fibres alimentaires et en divers composés organiques bénéfiques. De nombreuses études ont donc cherché à valoriser le son de blé en l'intégrant dans l'industrie agroalimentaire afin de produire des aliments plus sains et riches en fibres (Onipe et al., 2015) .

En outre, le son de blé peut également être utilisé comme amendement organique du sol en raison de sa richesse en matière organique et en éléments nutritifs ce qui contribue à améliorer les propriétés physiques et chimiques du sol ainsi qu'à stimuler l'activité des micro-organismes (Onipe et al., 2015) .

C'est dans ce cadre que le son de blé a été choisi dans cette étude comme amendement organique afin d'évaluer son effet sur certaines propriétés du sol et sur la croissance des plantes

*PARTIE II : ÉTUDES  
EXPÉRIMENTALE*

## Chapitre III : Matériels et méthodes

### III.1. Site d'étude et échantillonnage du sol

#### *III.1.1. Localisation de la zone d'étude*

Les échantillons de sol utilisés dans cette étude ont été prélevés dans un jardin domestique situé dans la daïra d'El Malah, wilaya d'Aïn Témouchent, au nord-ouest de l'Algérie. Le site d'étude est localisé aux coordonnées géographiques 35°23'22.81" N et 1°05'18.61" W, avec une altitude de 80,42 m. La région est caractérisée par un climat semi-aride et une activité agricole importante. Les prélèvements ont été réalisés dans l'horizon superficiel du sol (0–20 cm), représentatif de la couche cultivée.



**Figure 06:** localisation géographiques du site d'étude a el malah (Ain tèmouchent,algérie).

Source : Google Earth pro (2025)

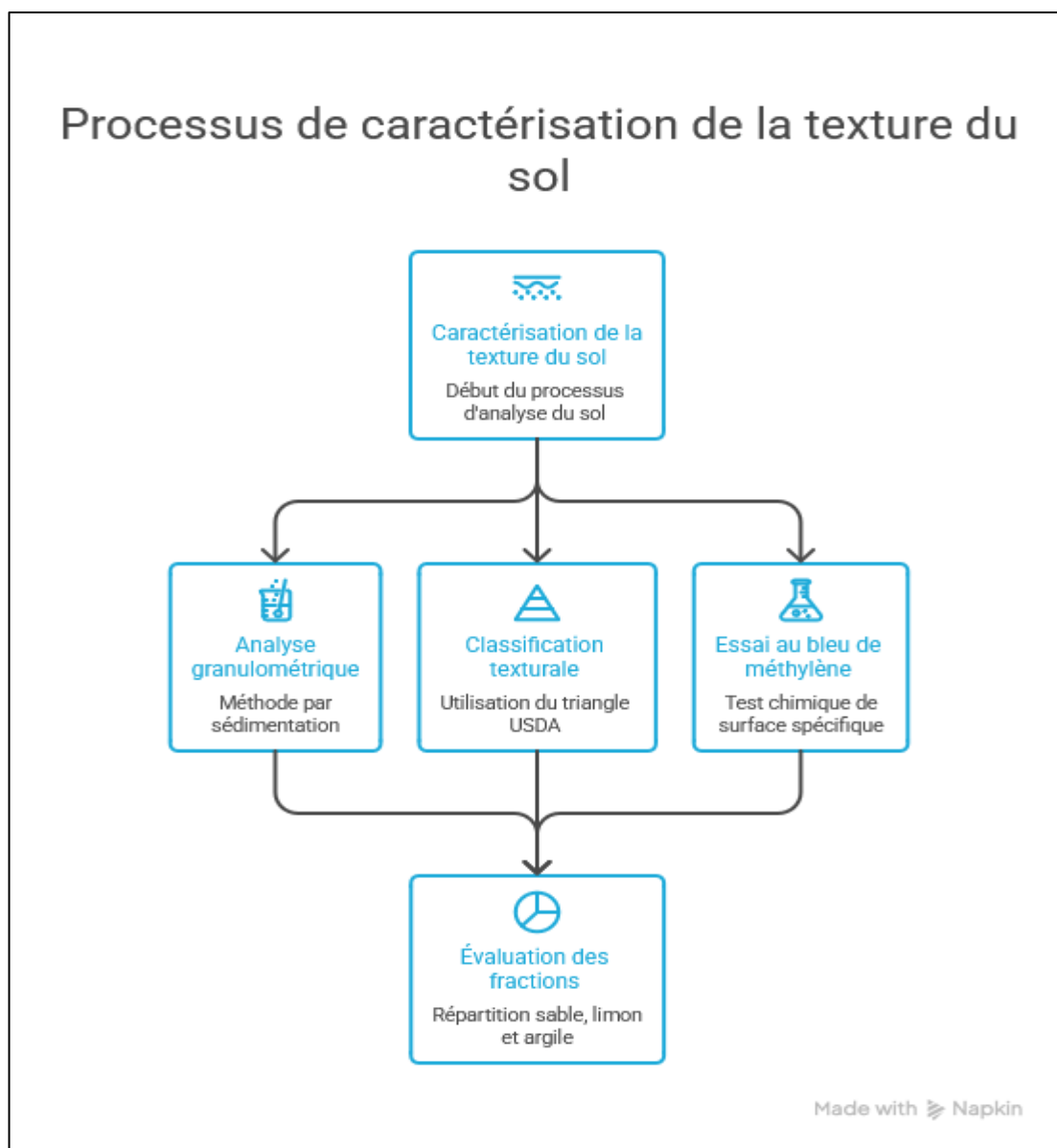


**Figure 07** : photographie réelle présentant l'environnement général de la zone d'étude

## **III.2. Caractérisation physique du sol**

### ***III.2.1. Détermination de la texture du sol***

La texture du sol a été caractérisée à l'aide de trois méthodes complémentaires : l'analyse granulométrique par sédimentation, la classification texturale selon le triangle USDA et l'essai au bleu de méthylène. Ces méthodes permettent d'évaluer la répartition des fractions granulométriques du sol (sable, limon et argile), de déterminer sa classe texturale et d'apprécier la teneur ainsi que l'activité des particules argileuses. La combinaison de ces approches fournit une caractérisation plus complète des propriétés texturales du sol étudié.



**Figure 08** : Méthodes de caractérisation de la texture du sol

### *III.2.2.1. Classification texturale selon le triangle USDA*

- **Principe**

La méthode du triangle textural de l'USDA repose sur la détermination des proportions relatives des fractions sableuses, limoneuses et argileuses du sol. Ces proportions sont ensuite reportées sur le triangle textural USDA afin d'identifier la classe texturale du sol.

- **Mode opératoire**

Deux cent cinquante grammes de sol ont été introduits dans un récipient en verre. Afin de disperser les agrégats et de libérer les particules élémentaires, une solution dispersante composée de 0,4 g d'hydroxyde de sodium (NaOH) dissous dans 110 mL d'eau distillée a été ajoutée au sol. Après absorption complète de cette solution, 150 mL d'eau ont été ajoutés.

Le mélange a ensuite été agité mécaniquement pendant 30 minutes afin d'assurer une dispersion homogène des particules, puis laissé au repos pendant 48 à 72 heures pour permettre leur décantation selon leur taille.

Après séparation des différentes fractions granulométriques, les proportions de sable, de limon et d'argile ont été déterminées et reportées sur le triangle textural de l'USDA, ce qui a permis d'établir la classe texturale du sol étudié.

- **Calcul des Pourcentages**

Mesurez la hauteur totale des sédiments ( $H_{\text{total}}$ ) avec une règle.

Mesurez la hauteur de chaque couche :  $H_{\text{sable}}$ ,  $H_{\text{limon}}$ , et  $H_{\text{argile}}$ .

Appliquez la formule suivante pour chaque composant :

$$\% \text{ Particule} = \frac{H_{\text{totale}}}{H_{\text{particule}}} \times 100$$

- **Triangle Textural de l'USDA**

Une fois les pourcentages obtenus, le triangle de l'USDA (United States Department of Agriculture) permet de définir la classe texturale exacte du sol :

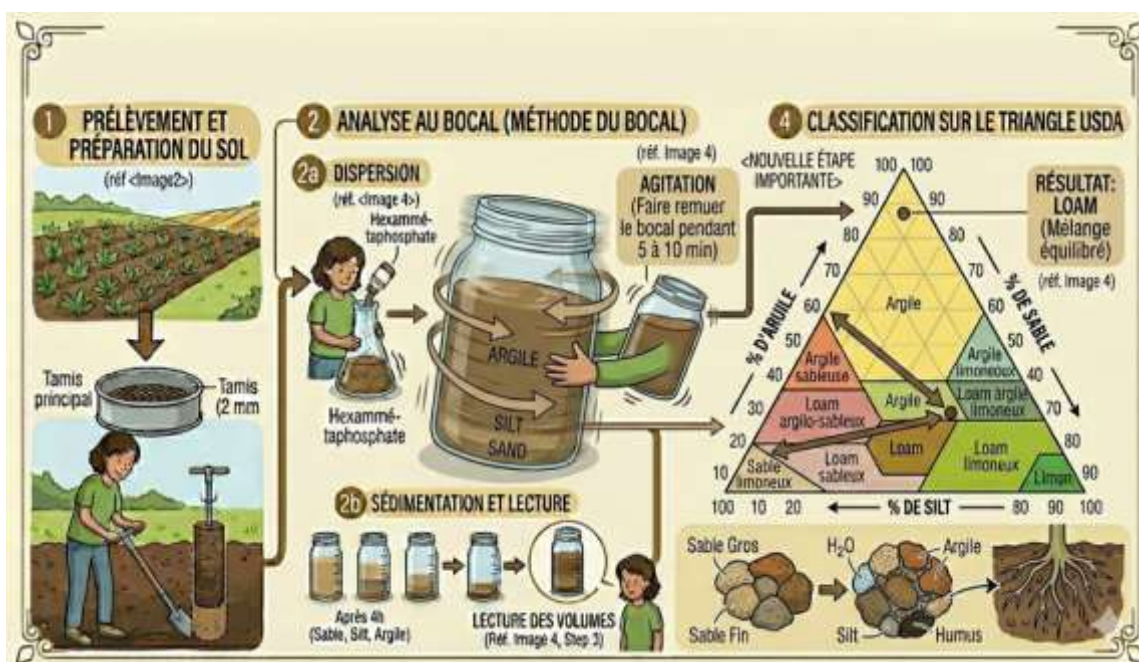
**Les Argiles (%) :** Se lisent sur l'axe horizontal gauche, en suivant les lignes horizontales (vers la droite).

**Les Limons (%) :** Se lisent sur l'axe oblique droit, en suivant les lignes diagonales descendantes (vers le bas et la gauche).

**Les Sables (%) :** Se lisent sur l'axe horizontal inférieur, en suivant les lignes diagonales ascendantes (vers le haut et la gauche).



**Figure 09:** Méthode du bocal pour la détermination de la texture du sol après 48 heures de sédimentation.



**Figure 10 :** Schéma de détermination de la texture du sol par la méthode du bocal (générer par AI)

### III.2.2.2. Détermination de l'activité argileuse par l'essai au bleu de méthylène

- Principe**

L'essai au bleu de méthylène permet d'évaluer indirectement la teneur et l'activité des particules argileuses présentes dans le sol. Le bleu de méthylène, colorant cationique, est adsorbé par les surfaces des minéraux argileux. Lorsque tous les sites d'adsorption sont saturés, un halo bleu persistant apparaît autour d'une goutte déposée sur papier filtre.

- Objectif**

Cet essai permet d'estimer la quantité et l'activité des particules argileuses du sol et de compléter les informations obtenues par l'analyse granulométrique.

- Mode opératoire**

Trente grammes de sol tamisé à 2 mm ont été introduits dans un bécher contenant 500 mL d'eau distillée. La suspension a été agitée pendant 5 minutes puis maintenue sous agitation lente.

Une solution de bleu de méthylène a ensuite été ajoutée progressivement par fractions de 4 mL. Après chaque ajout, la suspension a été agitée pendant une minute puis une goutte a été prélevée à l'aide d'une baguette en verre et déposée sur un papier filtre.

L'opération a été répétée jusqu'à l'apparition d'une auréole bleue persistante autour de la tache centrale, indiquant le point de saturation.

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 (cm<sup>3</sup>)

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

La surface spécifique totale est calculée selon la relation :

Où :

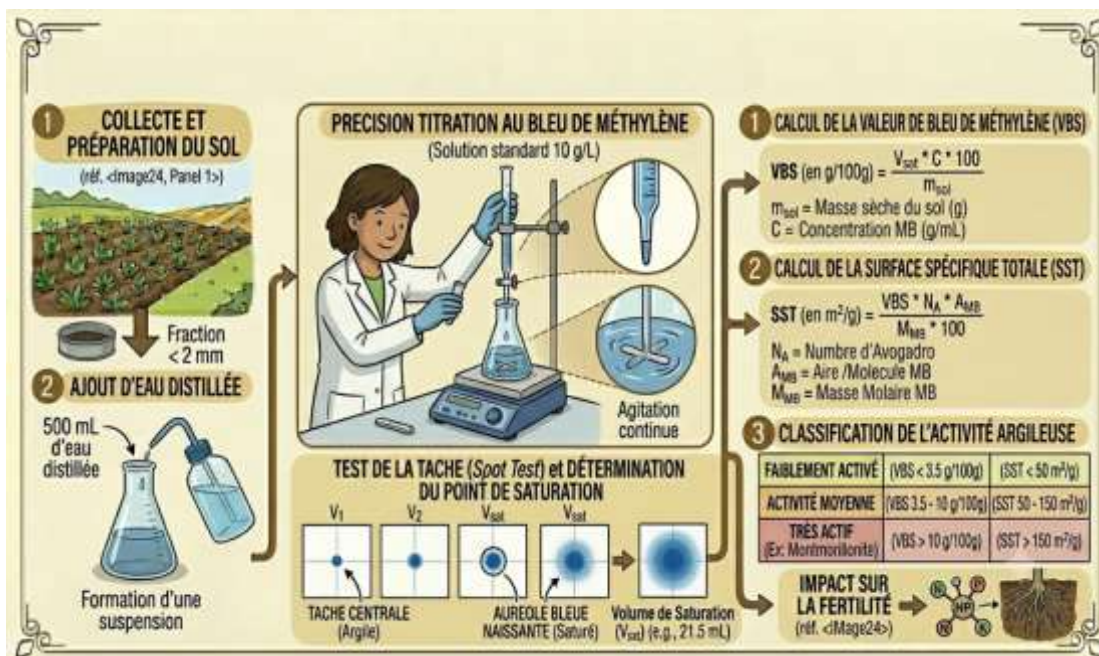
$$SST = 20.93 \times VBS$$

SST : surface spécifique totale (m<sup>2</sup>/g)

VBS : valeur au bleu de méthylène.

**Tableau 01:** 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:** Réalisation de l'essai au bleu de méthylène.

### III.2.2.3. Analyse granulométrique par sédimentation

L'analyse granulométrique par sédimentation a été réalisée afin de déterminer les proportions des fractions sableuses, limoneuses et argileuses du sol. Cette méthode repose sur la loi de Stokes, selon laquelle la vitesse de décantation des particules en suspension dans un liquide dépend de leur diamètre.

L'échantillon de sol, préalablement préparé et dispersé, a été mis en suspension dans l'eau distillée puis homogénéisé. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un densimètre à différents temps de sédimentation. Une éprouvette témoin contenant uniquement de l'eau distillée a été utilisée afin de corriger les éventuelles erreurs de lecture et les variations de densité du liquide. Les lectures corrigées ont permis de calculer les proportions des différentes fractions granulométriques et de déterminer la texture du sol à l'aide du triangle textural.

**Le protocole détaillé de l'analyse granulométrique par sédimentation, incluant les modalités de préparation de la suspension, les corrections des lectures densimétriques et les calculs des fractions granulométriques, est présenté en Annexe 1.**

### III.3. Préparation des amendements

Dans le cadre de cette étude, deux amendements d'origine organique ont été utilisés : les coquilles d'œufs et le son de blé. Ces matériaux ont été choisis en raison de leur

disponibilité locale et de leur potentiel d'amélioration des propriétés physico-chimiques du sol.

### ***III.3.1. Préparation des coquilles d'œufs***

Les coquilles d'œufs usagées ont été collectées à partir de déchets ménagers. Elles ont d'abord été soigneusement lavées à l'eau afin d'éliminer les résidus organiques susceptibles d'interférer avec l'expérimentation. Les coquilles ont ensuite été séchées à l'air libre puis placées dans un four préalablement chauffé et éteint afin d'assurer leur dessiccation complète.

Après séchage, elles ont été broyées à l'aide d'un mixeur électrique jusqu'à l'obtention d'une poudre fine et homogène. Cette poudre a ensuite été conservée dans un récipient sec et hermétique jusqu'à son incorporation au sol. Les coquilles d'œufs constituent une source importante de calcium et peuvent contribuer à l'amélioration de la structure du sol ainsi qu'à la correction de son acidité.



**Figure 12:** coquille d'œuf

### ***III.3.2. Son de blé***

Le son de blé a été obtenu auprès d'un moulin local. Après collecte, il a été débarrassé des éventuelles impuretés grossières puis conservé dans un endroit sec et à l'abri de l'humidité jusqu'à son utilisation.

Riche en matière organique et en éléments nutritifs, notamment en azote, phosphore et potassium, le son de blé est susceptible de stimuler l'activité biologique du sol et de favoriser la croissance des plantes après sa décomposition.



**Figure 13** : son de blé

#### II.4. Mise en place de l'expérimentation

L'expérimentation a été conduite en pots afin d'évaluer l'effet de différents amendements sur les propriétés du sol et la croissance de la laitue (*Lactuca sativa*). Chaque pot a été rempli avec 2 kg de sol préalablement homogénéisé. Quatre traitements ont été mis en place selon les modalités décrites ci-dessous.

##### II.4.1. Préparation des traitements

Les traitements appliqués sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau 02:** répartition et description des traitements

| Traitements | Composition                                                    | Dose (%)         | Nombre de pots<br>(répétition) |
|-------------|----------------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------|
| <b>T0</b>   | 2 kg de sol (témoin)                                           | 0                | 3                              |
| <b>T1</b>   | 2 kg de sol + 100 g de coquilles d'œufs                        | 5                | 3                              |
| <b>T2</b>   | 2 kg de sol + 100 g de son de blé                              | 5                | 3                              |
| <b>T3</b>   | 2 kg de sol + 50 g de coquilles d'œufs +<br>50 g de son de blé | 5(2.5%<br>+2.5%) | 3                              |

Les amendements ont été soigneusement mélangés au sol afin d'assurer une répartition homogène dans chaque pot.



**Figure 14 :** Schéma représentatif des traitements (générer par Ai)

#### III.4.2. Incubation des amendements

Après incorporation des amendements, les différents traitements ont été maintenus pendant une période de huit jours avant le semis. Cette phase d'incubation avait pour objectif de favoriser l'intégration des amendements au sol et d'initier les processus de décomposition et de minéralisation de la matière organique.

#### III.4.3. Culture de la laitue

La laitue (*Lactuca sativa*) a été choisie comme plante test pour évaluer l'effet des différents traitements. À l'issue de la période d'incubation, les graines ont été semées dans les différents pots.

Durant toute la période expérimentale, les pots ont été maintenus dans des conditions similaires d'arrosage et d'exposition afin de limiter l'influence des facteurs environnementaux sur la croissance des plantes.

#### III.4.4. Conditions de culture

L'expérimentation a été réalisée en pots dans des conditions environnementales homogènes. Afin de limiter l'influence des facteurs extérieurs sur la croissance des plantes, tous les traitements ont été soumis aux mêmes conditions de culture.

Les pots ont été placés dans un endroit bénéficiant d'un éclairage naturel et ont été régulièrement arrosés afin de maintenir une humidité favorable à la germination et au développement des plants. L'arrosage a été effectué de manière uniforme pour l'ensemble des traitements pendant toute la durée de l'expérimentation.

La durée de l'essai a été de 45 jours à compter de la date du semis. Les observations et les mesures de croissance ont été réalisées à intervalles réguliers afin de suivre l'évolution des plants de laitue en fonction des différents amendements appliqués.

#### ***III.4.5. Suivi de la croissance***

Le développement des plants de laitue a été suivi de manière hebdomadaire tout au long de l'expérimentation. Les observations et mesures ont porté sur plusieurs paramètres de croissance, notamment :

- le nombre de feuilles
- la longueur des feuilles
- la hauteur totale des plants.

Ces paramètres ont permis d'évaluer l'influence des différents amendements sur la croissance et le développement de la culture.

### **III.5. Évaluation de l'effet des amendements sur les propriétés du sol**

Les analyses ont été réalisées avant et après amendement.

#### ***III.5.1. Détermination de la matière organique (méthode LOI)***

La teneur en matière organique du sol a été déterminée par la méthode de perte au feu (Loss On Ignition, LOI), qui repose sur l'oxydation de la matière organique à haute température. La perte de masse observée après calcination est attribuée principalement à la combustion de la matière organique.

Dans un premier temps, l'échantillon de sol a été séché à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures afin d'éliminer l'humidité résiduelle. Le sol séché a ensuite été tamisé à 2 mm afin d'obtenir la fraction fine destinée à l'analyse.

Un creuset vide a été pesé ( $P_0$ ), puis environ 20 g de sol sec ont été introduits dans ce dernier. Le creuset contenant le sol a été pesé avant calcination ( $P_1$ ). L'ensemble a ensuite été placé dans un four à moufle à 550 °C pendant 4 heures afin d'assurer la combustion de la matière organique.

Après calcination, le creuset a été retiré du four puis placé dans un dessiccateur jusqu'à refroidissement complet afin d'éviter toute réabsorption d'humidité. Le creuset contenant le sol calciné a ensuite été pesé ( $P_2$ ).

La teneur en matière organique a été calculée à partir de la perte de masse observée selon la formule suivante :

$$MO (\%) = \frac{p1 - p2}{p1 - p0} \times 100$$

où :

MO (%) : teneur en matière organique du sol ;

P<sub>0</sub> : masse du creuset vide (g) ;

P<sub>1</sub> : masse du creuset + sol sec avant calcination (g) ;

P<sub>2</sub> : masse du creuset + sol après calcination (g).

### ***III.5.2. Mesure du pH, de la conductivité électrique, de la salinité et des solides dissous totaux (TDS)***

- **Principe**

Le pH permet d'évaluer l'acidité ou l'alcalinité du sol, tandis que la conductivité électrique (CE) renseigne sur la concentration des sels dissous dans la solution du sol. La salinité correspond à la quantité totale de sels solubles présents, alors que le TDS (Total Dissolved Solids) représente la concentration totale des substances dissoutes. Ces paramètres constituent des indicateurs importants de la qualité chimique du sol.

- **Mode opératoire**

Une suspension sol-eau a été préparée en mélangeant 50 g de sol avec 125 mL d'eau distillée, soit un rapport de 1:2,5. Le mélange a été soumis à une agitation mécanique pendant 30 minutes afin d'obtenir une suspension homogène.

Après stabilisation de la suspension, le pH et conductivité électrique, salinité, TDs a été mesuré à l'aide d'un multimètre multi paramètre préalablement étalonné.

Les analyses ont été effectuées avant et après l'application des différents amendements afin d'évaluer leur effet sur les propriétés chimiques du sol.



**Figure 15 :** multi – paramètre mètre

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

### IV-1- Résultats texture du sol obtenu par les différentes méthodes d'analyse

Le tableau (03) présente les résultats de la détermination de la texture du sol par le triangle textural et par l'essai au bleu de méthylène. La détermination de la texture du sol par la méthode du bocal, suivie de l'interprétation à l'aide du triangle textural USDA, a révélé une composition granulométrique de 61.1 % de sable, 16.7 % de limon et 22.2 % d'argile. Selon la classification USDA, ce sol est donc de texture limono-argilo-sableuse (Sandy Clay loam ) En revanche, l'essai au bleu de méthylène a conduit à une classification du sol comme limoneux. Cette différence peut s'expliquer par le fait que la méthode du bocal évalue la répartition granulométrique des particules, tandis que l'essai au bleu de méthylène renseigne davantage sur la nature et l'activité des fractions fines, notamment les argiles.

**Tableau 03** : Résultats de l'étude textural du sol

| Méthode d'analyse   | Valeurs obtenus                                     | Texture du sol              |
|---------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------|
| La méthode du bocal | Argile : 22,2 %<br>Limon : 16,7 %<br>Sable : 61,1 % | Sol : argilo-limono-sableux |
| Bleu de méthylène   | VBS = 0,93                                          | Sol : limoneux              |

### IV.2. Évolution visuelle de la croissance des laitues durant l'expérimentation



**Semaine 2**

T0



T1



T2



T3

**Semaine 3**

T0



T1



T2



T3

**Semaine 4**

T0



T1



T2



T3

L'observation visuelle réalisée au cours des quatre semaines de culture a mis en évidence des différences progressives de croissance entre les traitements. Dès les premières semaines, les plants soumis aux différents amendements ont présenté des niveaux de développement variables, se traduisant par des différences de hauteur, de nombre de feuilles, de surface foliaire et de vigueur générale.

Au fil de l'expérimentation, ces écarts sont devenus plus marqués, suggérant une influence des amendements organiques sur la disponibilité des éléments nutritifs et sur les conditions de croissance des plantes. Les traitements ayant favorisé le meilleur développement se caractérisaient par des plants plus vigoureux, une biomasse foliaire plus importante et une coloration verte plus intense, tandis que les traitements moins performants présentaient une croissance plus limitée.

Ces observations qualitatives confirment les tendances observées à travers les paramètres agronomiques mesurés et témoignent de l'effet différencié des amendements utilisés sur le développement de la laitue.

#### **IV.3.Observation visuelle des plants de laitue à la récolte**

En complément des mesures de croissance et de biomasse, une observation visuelle des plants de laitue a été réalisée à la fin de l'essai. Les photographies présentées dans la figure (16) montrent les différences de développement observées entre les traitements. Ces variations concernent notamment la taille des plants, leur vigueur générale ainsi que l'abondance du feuillage, suggérant une influence des amendements organiques sur la croissance et le développement de la culture.



**Figure (16) :** Observation visuelle des plants de laitue à la récolte selon des différents traitements

#### **IV.4. Effet des amendements sur la croissance de la laitue :**

##### ***IV.4.1. effet des amendements organiques sur la hauteur des plants (cm) :***

La (figure 17) présente l'évolution de la hauteur des plantes au cours des cinq semaines de culture en fonction des différents traitements appliqués.

Au cours de la première semaine, les hauteurs des plantes sont relativement similaires pour l'ensemble des traitements, avec des valeurs variant de 2 cm pour le témoin (T0) à 2,5 cm pour le traitement T2.

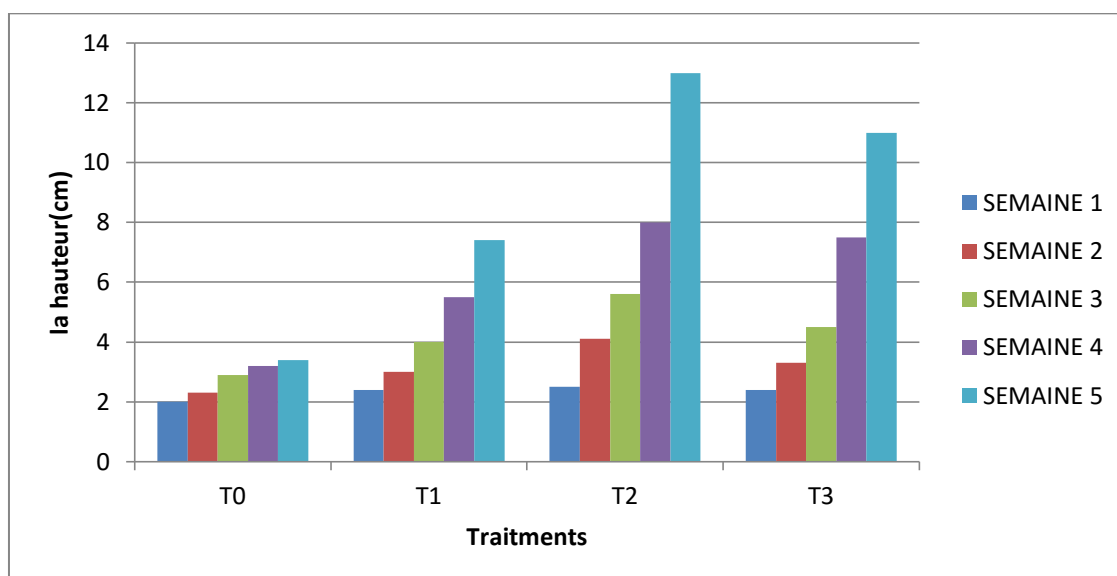
À partir de la deuxième semaine, une augmentation progressive de la croissance est observée dans tous les traitements. Le traitement T2 (sol + son de blé) présente la hauteur la plus élevée (4,1 cm), suivi de T3 (3,3 cm), T1 (3,0 cm) et du témoin T0 (2,3 cm).

Cette tendance se poursuit durant la troisième semaine, où les plantes atteignent respectivement 5,6 cm pour T2, 4,5 cm pour T3, 4,0 cm pour T1 et 2,9 cm pour T0.

À la quatrième semaine, les hauteurs enregistrées sont de 8,0 cm pour T2, 7,5 cm pour T3, 5,5 cm pour T1 et 3,2 cm pour le témoin.

Les valeurs maximales sont observées à la cinquième semaine. Le traitement T2 présente la croissance la plus importante avec une hauteur moyenne de 13 cm, suivi de T3 avec 11 cm, puis de T1 avec 7,4 cm. Le témoin T0 affiche la plus faible valeur, avec seulement 3,4 cm.

Dans l'ensemble, les traitements amendés ont favorisé la croissance des plantes par rapport au témoin, l'effet le plus marqué étant observé pour le traitement T2.

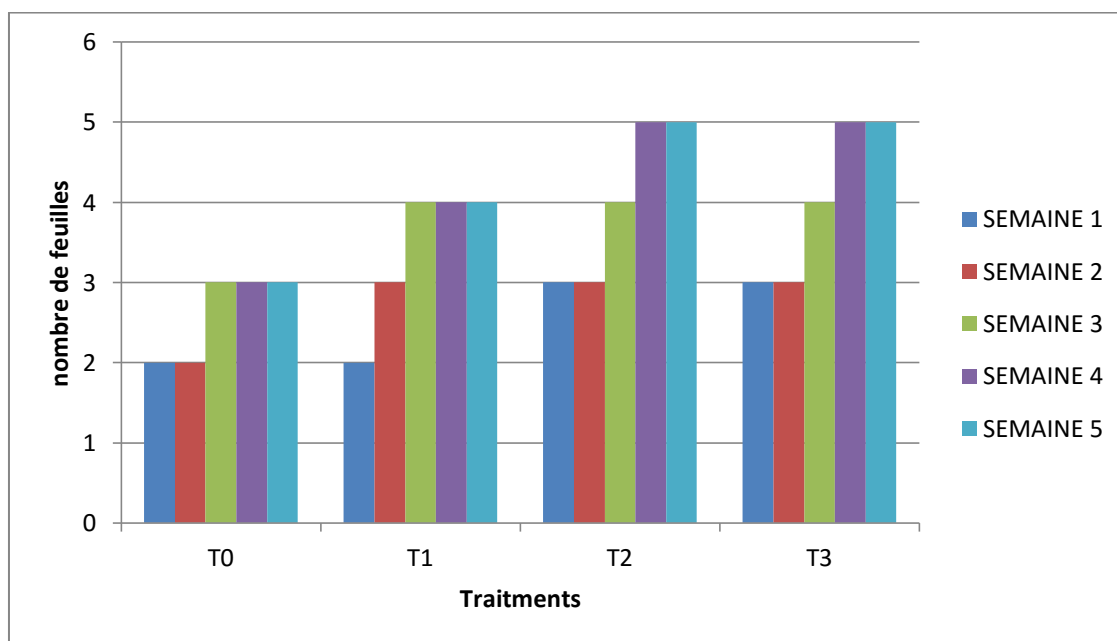


**Figure 17:** évolution de la hauteur des plantes (cm)

T0 : Témoin (sans amendement), T1 : sol + coquille d'œuf, T2 : sol + son de blé, T3 : sol + coquille d'œuf + son de blé

#### ***IV-4.2. Effet des amendements organiques sur le nombre des feuilles :***

Le nombre de feuilles de laitue a augmenté progressivement dans l'ensemble des traitements au cours des cinq semaines de culture (**Figure 18**). Toutefois, l'intensité de cette augmentation a varié selon le type d'amendement organique appliqué. Le traitement témoin T0 (sol sans amendement) a présenté la croissance foliaire la plus faible. Le nombre de feuilles est passé de 2 feuilles au début de l'expérimentation à seulement 3 feuilles à la cinquième semaine, indiquant un développement végétatif limité en absence d'apport organique. Le traitement T1 (sol + coquilles d'œufs) a montré une amélioration modérée du nombre de feuilles. À la fin de l'essai, les plants ont atteint 4 feuilles, ce qui traduit un effet positif mais relativement faible de cet amendement sur la croissance foliaire. Le traitement T3 (sol + son de blé + coquilles d'œufs) a également favorisé le développement des feuilles. Le nombre de feuilles est passé de 3 feuilles à la première semaine à 5 feuilles à partir de la quatrième semaine, valeur qui s'est maintenue jusqu'à la fin de l'expérimentation. Le traitement T2 (sol + son de blé) a enregistré les meilleures performances. Le nombre de feuilles a augmenté de 3 à 5 feuilles entre la première et la cinquième semaine. Ce traitement a ainsi présenté, avec le traitement T3, le nombre final de feuilles le plus élevé. À la cinquième semaine, le nombre moyen de feuilles était respectivement de 3, 4, 5 et 5 feuilles pour les traitements T0, T1, T2 et T3.



**Figure 18** : évolution du nombre de feuilles

#### ***IV.4.3. Effet des amendements organiques sur la longueur des feuilles :***

Les résultats dans la (**figure19**) montrent une augmentation progressive de la longueur des feuilles de laitue dans tous les traitements au cours des cinq semaines de suivi.

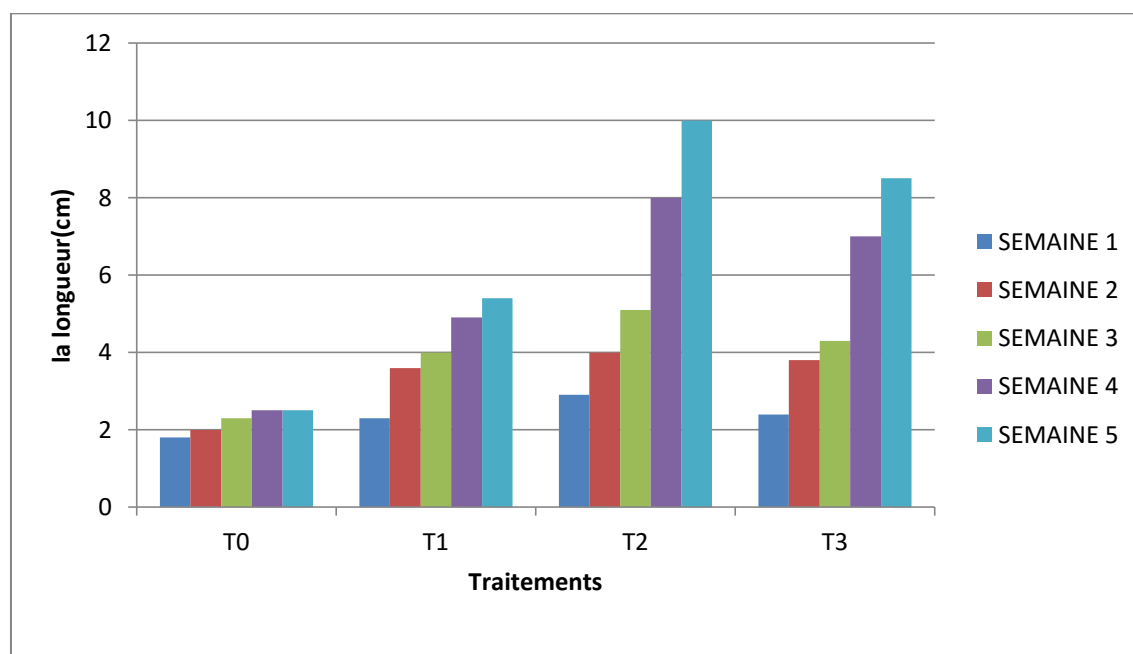
Le traitement T0 (sol seul) a présenté les valeurs les plus faibles passant de 1,8 cm en première semaine à 2,5 cm en cinquième semaine.

Le traitement T1 (sol + coquilles d'œufs) a montré une croissance plus importante que le témoin avec une longueur des feuilles augmentant de 2,3 cm à 5,4 cm entre la première et la cinquième semaine.

Le traitement T2 (sol + son de blé) a enregistré les valeurs les plus élevées durant toute la période expérimentale.

La longueur des feuilles est passée de 2,9 cm en semaine 1 à 10 cm en semaine 5.

Le traitement T3 (sol + son de blé + coquilles d'œufs) a également favorisé la croissance des feuilles avec une augmentation de 2,4 cm à 8,5 cm entre la première et la cinquième semaine.



**Figure 19:** évolution de la longueur des feuilles (cm)

#### ***IV-4.4.Effet des amendements organiques sur le poids frais et sec***

Les résultats présentés dans le tableau (04) montrent que les différentes modalités d'amendement ont influencé la production de biomasse fraîche et de biomasse sèche des plantes. La biomasse la plus élevée a été obtenue avec le traitement au son de blé, qui a enregistré 1,60 g de biomasse fraîche et 0,33 g de biomasse sèche. Le traitement Mix a présenté des valeurs intermédiaires de 0,91 g et 0,17 g respectivement, tandis que le traitement à base de coquilles d'œuf a produit 0,67 g de biomasse fraîche et 0,11 g de biomasse sèche. Les plus faibles valeurs ont été observées pour le témoin sans amendement, avec 0,62 g de biomasse fraîche et 0,04 g de biomasse sèche.

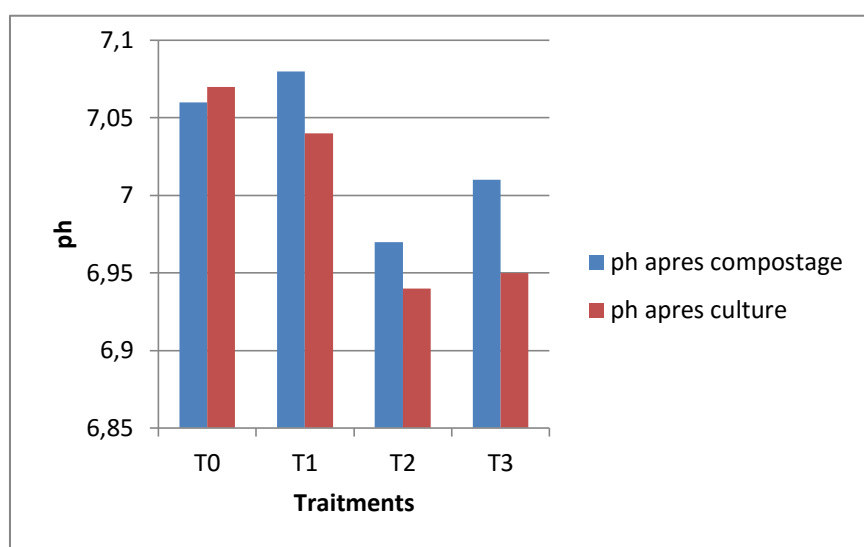
Pour l'ensemble des traitements, la biomasse fraîche est supérieure à la biomasse sèche, ce qui traduit la perte d'eau contenue dans les tissus végétaux lors du séchage. L'écart entre ces deux paramètres est particulièrement marqué pour le traitement au son de blé, qui présente également les valeurs de biomasse les plus élevées.

**Tableau 04:** Valeurs de biomasse fraîche et sèche

| Traitement       | Biomasse fraîche (g) | Biomasse sèche après 4 jour |
|------------------|----------------------|-----------------------------|
| Mix              | 0,91 g               | 0,17 g                      |
| Son de blé       | 1,60 g               | 0,33 g                      |
| Coquille d'œuf   | 0,67 g               | 0,11 g                      |
| Sans amendements | 0,62 g               | 0,04 g                      |

#### IV.5. analyses chimiques du sol :

##### IV.5.1. Effet des amendements organiques sur le ph du sol :

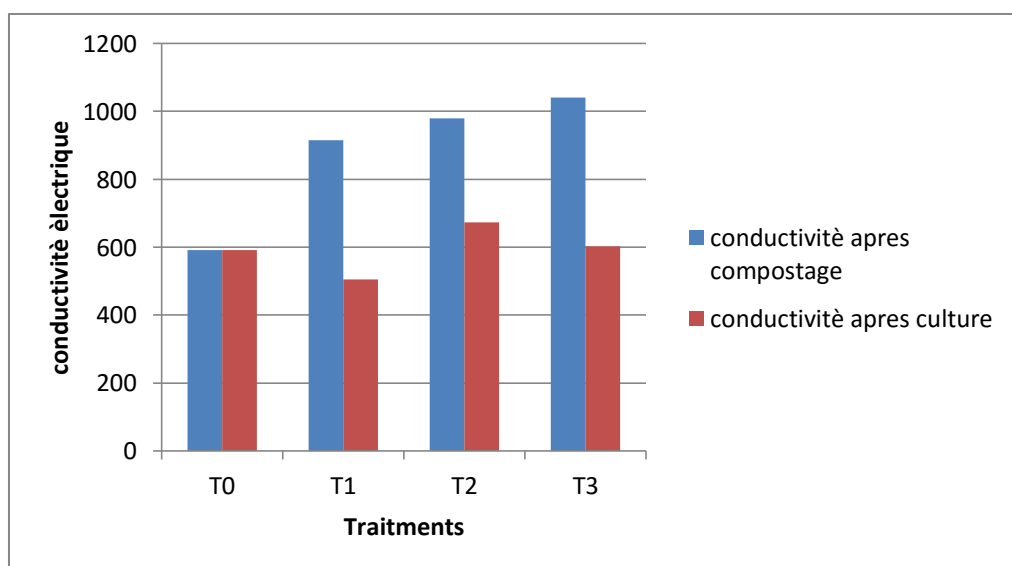
**Figure 20:** variation de ph du sol

Les valeurs du pH mesurées après le compostage et après la culture montrent de faibles variations entre les différents traitements, tout en restant proches de la neutralité. Après compostage, le pH varie de 6,97 à 7,08, indiquant des sols globalement légèrement acides à légèrement basiques, mais proches de l'équilibre. Le traitement témoin (T0) présente des valeurs de 7,06 après compostage et 7,07 après culture, correspondant à un sol neutre à légèrement basique. Le traitement avec les coquilles d'œufs (T1) enregistre 7,08 après compostage et 7,04 après culture, indiquant un sol légèrement basique et proche de la neutralité. Le traitement contenant uniquement le son de blé (T2) montre les valeurs les plus faibles (6,97 après compostage et 6,94 après culture), traduisant un sol légèrement acide. Le traitement mixte (T3) présente 7,01 après compostage puis 6,95 après culture, correspondant à

un sol passant d'un état légèrement basique à légèrement acide, tout en restant proche de la neutralité.

#### ***IV.5.2. effet des amendements organiques sur conductivité électrique :***

Après compostage, les valeurs de la conductivité électrique (CE) varient selon les traitements. Le témoin (T0) enregistre une valeur de 592. Le traitement T3 (sol + son de blé + coquilles d'œufs) présente la valeur la plus élevée avec 1040, suivi du traitement T2 avec 980, puis du traitement T1 avec 915. Après culture, les valeurs de CE évoluent également entre les traitements. Le traitement T2 présente la valeur la plus élevée avec 673, tandis que le traitement T1 enregistre la valeur la plus faible avec 505. Le traitement T3 présente une valeur intermédiaire de 602. Globalement, les valeurs de la conductivité électrique varient selon les traitements et les deux périodes (après compostage et après culture).

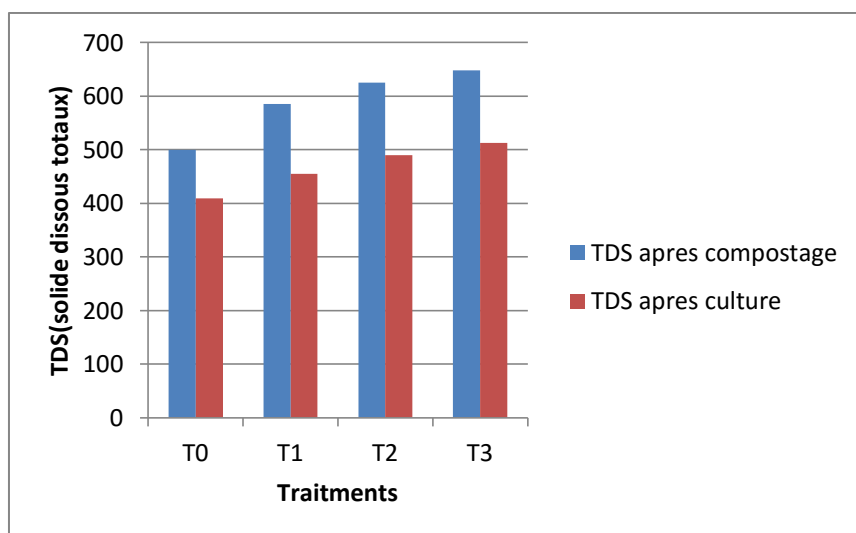


**Figure 21 :** variation de la conductivité électrique du sol

#### ***IV.5.3. effet des amendements organique sur TDs (solides dissous totaux) :***

Les résultats présentés dans le tableau montrent une variation des TDS selon les traitements appliqués. Après compostage, la valeur la plus élevée a été observée pour le traitement T3 (648) suivi de T2 (625) puis de T1 (585) tandis que le témoin T0 a enregistré la valeur la plus faible avec 500. Après culture les valeurs des TDS ont diminué pour l'ensemble des traitements. Le traitement T3 a conservé la valeur la plus élevée avec 513 suivi de T2 (490) puis de T1 (455), alors que le témoin T0 a présenté la valeur la plus faible avec 409. Globalement, les traitements enrichis en amendements organiques ont montré des valeurs de

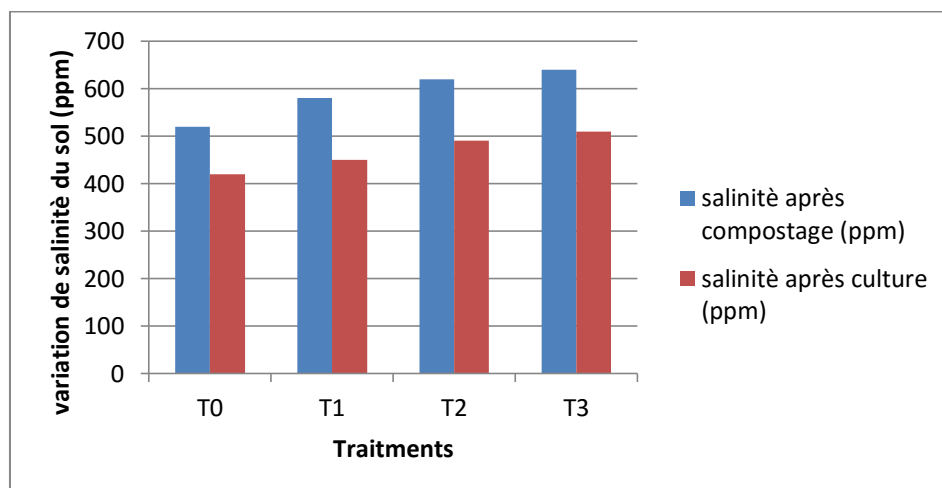
TDS plus élevées que le témoin, aussi bien après compostage qu'après culture, avec une diminution générale des TDS après la période de culture.



**Figure 22:** variation de TDS du sol

#### ***IV.5.4. effet des amendements organiques sur la salinité :***

Les résultats obtenus montrent une variation de la salinité du sol selon les traitements appliqués. Après compostage, les valeurs enregistrées étaient de 520 ppm pour T0 (témoin), 580 ppm pour T1 (coquille d'œuf), 620 ppm pour T2 (son de blé) et 640 ppm pour T3 (coquille d'œuf + son de blé). Après culture, la salinité a enregistré des valeurs de 420 ppm pour T0, 450 ppm pour T1, 490 ppm pour T2 et 510 ppm pour T3.

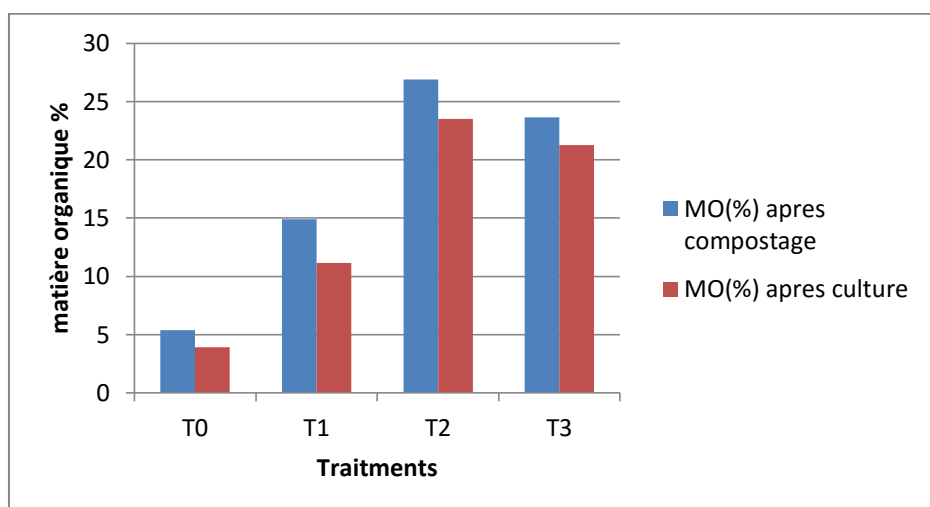


**Figure 23 :** variation de salinité du sol

**IV.5.5. effet des amendements organiques sur la matière organique :**

Les résultats montrent des variations de la teneur en matière organique (MO) selon les traitements aussi bien après le compostage qu'après la culture de la laitue.

Après le compostage, le traitement T0 (témoin) a enregistré la plus faible teneur en matière organique avec 5,39 %. Le traitement T1 (sol + coquilles d'œufs) a présenté une valeur de 14,89 %. Les teneurs les plus élevées ont été observées pour les traitements T2 (sol + son de blé) et T3 (sol + son de blé + coquilles d'œufs) avec respectivement 26,91 % et 23,65 %. Après la culture, une diminution de la teneur en matière organique a été observée dans l'ensemble des traitements. Les valeurs obtenues sont de 3,92 % pour T0, 11,17 % pour T1, 23,50 % pour T2 et 21,28 % pour T3.



**Figure 24 :** teneur matière organique du sol

## Chapitre V : Discussion

### I-Discussion des propriétés physico-chimiques du sol :

L'analyse granulométrique a montré que le sol présente une texture limono-argilo-sableuse, caractérisée par une prédominance de la fraction sableuse (61,1 %), associée à des proportions de limon (16,7 %) et d'argile (22,2 %). Cette répartition granulométrique confère au sol une bonne aération et un drainage satisfaisant grâce à la forte proportion de sable, tout en assurant une certaine capacité de rétention de l'eau et des éléments nutritifs grâce aux fractions limoneuse et argileuse. Les résultats du test au bleu de méthylène ont révélé une valeur de VBS de 0,93 et une surface spécifique totale de 19,46 m<sup>2</sup>/g. Ces valeurs traduisent une activité de surface modérée, caractéristique des sols contenant une proportion faible à moyenne de particules fines. Selon au bleu de méthylène, le sol est classé comme limoneux. Cette observation est cohérente avec les résultats de l'analyse granulométrique, qui ont mis en évidence la texture limono-argilo-sableuse du sol étudié. Ainsi, ce sol présente un équilibre entre l'aération, le drainage et la rétention hydrique, des propriétés généralement favorables au développement des cultures.

Cette texture limono-argilo-sableuse est considérée comme favorable au développement des cultures, car elle assure un équilibre entre l'aération, le drainage et la rétention d'eau. La fraction sableuse facilite la circulation de l'air et de l'eau dans le sol, tandis que les fractions limoneuse et argileuse contribuent à la rétention de l'eau et des éléments nutritifs. (Bruand 1990) et (Bruand et al 1994) ont montré que les propriétés hydriques du sol dépendent fortement de la texture et de la densité apparente. Les résultats du test au bleu de méthylène ont révélé une valeur de VBS de 0,93 et une surface spécifique totale de 19,46 m<sup>2</sup>/g, traduisant une activité de surface modérée. Cette observation est cohérente avec la texture limono-argilo-sableuse mise en évidence par l'analyse granulométrique. Ainsi, le sol étudié présente des caractéristiques favorables à la rétention de l'eau et des éléments nutritifs nécessaires à la croissance et au développement des plantes.

### II-Discussion des propriétés du sol après compostage :

- **Effet des amendements sur PH :**

Les valeurs du pH ont présenté de faibles variations entre les différents traitements et sont restées proches de la neutralité (6,94–7,08), traduisant une bonne stabilité du milieu. La légère diminution observée dans les traitements contenant du son de blé (T2 et T3) peut être liée à la production d'acides organiques lors de la décomposition de la matière organique. Ce

résultat est cohérent avec les observations de (Wang et al 2024), qui ont montré que la dégradation des composés lignocellulosiques du son de blé favorise la formation d'acides organiques susceptibles d'entraîner une baisse temporaire du pH du sol. À l'inverse, le traitement à base de coquilles d'œufs (T1) a maintenu des valeurs de pH relativement élevées grâce à la présence de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), connu pour son effet tampon sur l'acidité du sol. Ces observations concordent avec les travaux de (Buntaro et Avicenna 2023), qui ont souligné le rôle des coquilles d'œufs dans la neutralisation de l'acidité et l'amélioration de la fertilité des sols. Le traitement mixte (T3) a présenté des valeurs intermédiaires, reflétant l'équilibre entre l'effet acidifiant du son de blé et l'effet alcalinisant des coquilles d'œufs. Globalement, les valeurs obtenues demeurent favorables à la disponibilité des éléments nutritifs et à l'activité des microorganismes du sol, contribuant ainsi au maintien de la fertilité du sol.

- **Effet des amendements sur Matière organique :**

**Matière organique** Les résultats obtenus ont montré une augmentation importante de la teneur en matière organique dans les traitements amendés par rapport au témoin, passant de 5,39 % dans le traitement T0 à 14,89 % dans T1, 26,91 % dans T2 et 23,65 % dans T3. Cette augmentation peut être attribuée à l'apport de matières organiques biodégradables ayant enrichi le sol en carbone organique et amélioré ses propriétés. Ces résultats sont en accord avec ceux de (Angelova et al 2013), qui ont montré que l'application de compost et de vermicompost augmente significativement la teneur en matière organique et en carbone organique du sol. De plus, (Fortuna et al 2003) ont indiqué que l'utilisation d'amendements organiques contribue à l'augmentation du carbone organique et à l'amélioration de la structure du sol, ce qui favorise sa fertilité ainsi que sa capacité de rétention en eau et en éléments nutritifs.

- **Effet des amendements sur Conductivité électrique :**

Les résultats ont révélé une augmentation de la conductivité électrique après le compostage, passant de 592  $\mu\text{S}/\text{cm}$  dans le témoin (T0) à 915  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 980  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 1040  $\mu\text{S}/\text{cm}$  dans les traitements T1, T2 et T3 respectivement, la valeur la plus élevée ayant été enregistrée dans le traitement T3. Cette augmentation peut être expliquée par une concentration plus importante d'ions et d'éléments nutritifs solubles libérés lors de la décomposition des amendements organiques. Ces résultats concordent avec ceux de (Gallardo-Lara et Nogales 1987), qui ont montré que l'incorporation du compost dans le sol augmente la teneur en sels solubles et, par conséquent, la conductivité électrique. De même, (Atiyeh et al 2001 ; 2002) ont rapporté qu'une augmentation des doses de vermicompost

entraîne une hausse de la conductivité électrique en raison de l'accroissement de la concentration ionique dans le sol. Toutefois, cette augmentation reste bénéfique tant qu'elle demeure en dessous des seuils critiques de salinité susceptibles d'affecter la croissance des plantes.

- **Effet des amendements sur TDS (Solides Totaux Dissous) :**

Les résultats ont montré une augmentation des valeurs de TDS dans les sols amendés par rapport au témoin, avec la valeur la plus élevée observée pour le traitement T3 (son de blé + coquille d'œuf). Cette augmentation peut être liée à la minéralisation des amendements organiques et à la libération d'ions solubles dans la solution du sol. Après la culture, une diminution des TDS a été observée dans tous les traitements, probablement en raison de l'absorption des éléments nutritifs par les plantes

Cette interprétation est en accord avec les travaux de (Atiyeh et al 2001, 2002), qui ont indiqué que l'application de vermicompost augmente la concentration des ions dissous dans le sol, ce qui se traduit par une augmentation de la conductivité électrique et des solides dissous. Ainsi, les variations du TDS observées reflètent les modifications de la composition ionique du sol après l'apport des amendements organiques.

- **Effet des amendements sur Salinité :**

Effet des amendements organiques sur la salinité du sol Les résultats obtenus montrent une diminution de la salinité du sol après la culture dans tous les traitements. Cette diminution peut être liée à l'absorption des éléments minéraux par les plantes et au lessivage des sels solubles au cours de l'expérimentation. Après compostage, les sols amendés ont présenté des valeurs de salinité plus élevées que le témoin, avec 640 ppm pour T3 (coquille d'œuf + son de blé), 620 ppm pour T2 (son de blé) et 580 ppm pour T1 (coquille d'œuf) contre 520 ppm pour T0. Cette augmentation pourrait être due à la libération progressive des éléments minéraux lors de la décomposition des amendements organiques. Après culture, une réduction de la salinité a été observée pour tous les traitements, avec la valeur la plus faible pour T0 (420 ppm) et la plus élevée pour T3 (510 ppm). Ces résultats montrent que les amendements organiques ont influencé la dynamique des sels solubles et les propriétés chimiques du sol au cours de la culture. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par (Melero et al., 2007) qui ont montré que l'apport d'amendements organiques constitue une stratégie efficace pour la restauration des sols affectés par la salinité et l'amélioration de leur fertilité. Leurs travaux ont démontré que la fertilisation organique permet d'améliorer les propriétés chimiques et biologiques du sol, notamment par l'augmentation de la teneur en carbone organique, en éléments nutritifs et de l'activité microbienne. Ils ont également indiqué que ces amendements

favorisent l'amélioration de la structure et de la perméabilité du sol, ce qui facilite le lessivage des sels solubles et limite leur accumulation dans les couches superficielles. Ces observations concordent avec la diminution de la salinité enregistrée après la culture dans les différents traitements de notre expérimentation.

### **Discussion effet les amendements sur (poids frais et sec) :**

Les résultats montrent que le poids frais était plus élevé dans les traitements amendés que dans le témoin sans amendement. Le traitement au son de blé a enregistré la valeur la plus élevée (1,60 g), suivi du traitement mixte (0,91 g), puis des coquilles d'œuf (0,67 g), tandis que le témoin a présenté le poids le plus faible (0,62 g). Après séchage, les mêmes tendances ont été observées. Le traitement au son de blé a conservé la plus grande quantité de matière sèche (0,33 g), suivi du traitement mixte (0,17 g) et des coquilles d'œuf (0,11 g), alors que le témoin a enregistré la valeur la plus faible (0,04 g). Cette augmentation de la biomasse dans les sols amendés peut être attribuée à l'amélioration des propriétés physiques et chimiques du sol. Le son de blé apporte de la matière organique facilement dégradable qui stimule l'activité microbienne et améliore la disponibilité des nutriments. Les coquilles d'œuf riches en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) contribuent à corriger l'acidité du sol et favorisent l'absorption des éléments nutritifs. La combinaison des deux amendements dans le traitement mixte semble avoir produit un effet synergique conduisant à une meilleure croissance des plantes et à une accumulation plus importante de matière sèche. La faible biomasse observée dans le témoin indique que l'absence d'amendement limite la disponibilité des ressources nécessaires au développement végétal, ce qui se traduit par une croissance réduite.

El Hanafi et al ; 2006 ont également rapporté que l'application d'un compost à base de déchets de thé a entraîné une augmentation significative de la biomasse végétale et du poids des racines chez la tomate, comparativement au traitement témoin. Cette amélioration de la biomasse est généralement attribuée à une meilleure nutrition minérale, à une stimulation de l'activité microbienne du sol et à une amélioration des conditions physiques du milieu de culture, favorisant ainsi le développement du système racinaire et de la partie aérienne des plantes.

### **III. Effet des amendements sur croissance et développement des plantes :**

L'expérimentation montre que les amendements organiques améliorent la croissance de la laitue. Le traitement T2 (sol + son de blé) donne les meilleurs résultats en hauteur, nombre et longueur des feuilles, confirmant l'intérêt du son de blé. Le T3 (son + coquilles) est aussi efficace, mais dans une moindre mesure. Le T1 (coquilles seules) n'apporte qu'une

légère amélioration, et le témoin T0 reste le moins performant. En conclusion, l'utilisation de déchets organiques comme le son de blé peut favoriser la production de la laitue.

Nos résultats sont en accord avec plusieurs études ayant mis en évidence l'effet bénéfique des amendements organiques sur la croissance des plantes. En effet, l'efficacité des apports organiques sur le développement végétal a été démontrée par différents auteurs. (El Hanafi et al ;2006) ont rapporté que l'application d'un compost issu de déchets de thé a amélioré significativement la croissance et la production de la tomate par rapport au témoin. De même, (Lee et al ;2004) ainsi que Sérémé et al. ont observé une augmentation importante de la croissance de la laitue (*Lactuca sativa*) cultivée sur des substrats enrichis en compost, atteignant des valeurs deux à trois fois supérieures à celles du témoin après six semaines d'expérimentation. Ces effets sont généralement attribués à l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, à une meilleure disponibilité des éléments nutritifs ainsi qu'à une augmentation de la capacité de rétention d'eau. Les amendements organiques apportent également des éléments minéraux et des oligoéléments essentiels au développement des plantes, ce qui explique les meilleures performances observées dans les traitements amendés de la présente étude (Mrabet et al., 2011).

#### **IV. Effet global des amendements organique :**

Les résultats obtenus après compostage et après culture montrent que les amendements organiques à base de coquilles d'œufs et de son de blé ont contribué à l'amélioration des propriétés physico-chimiques du sol ainsi qu'à l'augmentation de la biomasse de la laitue. Ces effets sont attribuables, d'une part, à l'apport de calcium par les coquilles d'œufs et, d'autre part, à l'enrichissement en matière organique assuré par le son de blé, favorisant ainsi la fertilité du sol et la croissance des plantes.

Les résultats obtenus dans cette étude sont en accord avec ceux rapportés par (Radha et Karthikeyan 2019), qui ont montré que l'application de poudre de coquilles d'œufs améliore plusieurs paramètres de croissance des plantes, notamment la longueur des racines, le développement de la partie aérienne, le nombre de feuilles ainsi que la biomasse. Les auteurs ont attribué cet effet bénéfique à la richesse des coquilles d'œufs en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), constituant une source naturelle de calcium essentielle à la croissance végétale. De la même manière, l'amélioration de la croissance de la laitue observée dans notre étude pourrait s'expliquer par l'apport en calcium fourni par les coquilles d'œufs et par leur capacité à améliorer les propriétés chimiques du sol. En effet, le calcium participe à la formation des parois cellulaires et favorise le développement des tissus végétaux, tandis que

l'augmentation du pH du sol contribue à une meilleure disponibilité des éléments nutritifs. Ces conditions favorables permettent une meilleure absorption des nutriments et stimulent ainsi la croissance végétative de la laitue.

## *CONCLUSION*

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude a eu pour objectif d'évaluer l'effet de deux amendements organiques issus de sous-produits agroalimentaires à savoir le son de blé et les coquilles d'œufs sur la fertilité du sol et la croissance de la laitue utilisée comme culture test.

Les résultats obtenus ont montré que l'apport des amendements organiques a exercé un effet positif sur les paramètres étudiés par rapport au traitement témoin. Le traitement à base de son de blé a présenté le meilleur effet sur l'amélioration de la croissance de la laitue et des propriétés du sol suivi par l'association son de blé + coquilles d'œufs puis par l'application des coquilles d'œufs seules. Le sol témoin a enregistré les valeurs les plus faibles pour les paramètres étudiés.

Ces résultats mettent en évidence l'intérêt de la valorisation des sous-produits agroalimentaires comme amendements organiques afin d'améliorer la fertilité des sols et de favoriser une agriculture plus durable. Le son de blé s'est révélé être l'amendement le plus efficace dans les conditions expérimentales étudiées démontrant ainsi son potentiel pour améliorer la qualité du sol et stimuler la croissance végétale. Cependant, des études complémentaires portant sur différentes doses d'application et des périodes d'expérimentation plus longues restent nécessaires afin d'optimiser l'utilisation de ces amendements et de mieux comprendre leurs effets sur les propriétés du sol et le développement des plantes.

*RÉFÉRENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES*

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- \_Bruand, A., Baize, D., & Hardy, M. (1994). Prediction of water retention properties of clayey soils : validity of relationships using a single soil characteristic. *Soil Use and Management*, 10(3), 99-103.
- Atiyeh, R. M., Lee, S., Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Metzger, J. D. (2002). The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. *Bioresource technology*, 84(1), 7-14.
- A. Vannini, E. Bianchi, D. Avi, N. Damaggio, L.A. Di Lella, F. Nannoni, G. Protano, S. Loppi Abdous, S. A., & Belkhelfa, K. (2019). Caractéristiques physiques et chimiques des sols sous vignes traitées (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- Akhila, A., & Entoori, K. (2022). Role of earthworms in soil fertility and its impact on agriculture: A review. *International Journal of Fauna and Biological Studies*, 9(3), 55–63.
- Amezket, E., Singer, M. J., & Le Bissonnais, Y. (1996). Testing a new procedure for measuring water-stable aggregation. *Soil Science Society of America Journal*, 60(3), 888-894.
- Amu, O. O., Fajobi, A. B., & Oke, B. O. (2005). Effect of eggshell powder on the stabilizing potential of lime on an expansive clay soil. *Research journal of Agriculture and biological sciences*, 1(1), 80-84.
- Andersson, A. A. M., Dimberg, L., Åman, P., & Landberg, R. (2014). Recent findings on certain bioactive components in whole grain wheat and rye. *Journal of Cereal Science*, 59, 294–311.
- Angelova, V. R., Akova, V. I., Artinova, N. S., & Ivanov, K. I. (2013). The effect of organic amendments on soil chemical characteristics. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 19(5), 958-971.
- Apprich, S., Tirpanalan, Ö., Hell, J., Reisinger, M., Böhmendorfer, S., Siebenhandl-Ehn, S., Novalin, S., & Kneifel, W. (2014). Wheat bran-based biorefinery 2 : Valorisation of products. *LWT – Food Science and Technology*, 56(2), 222–231.
- Atiyeh, R. M., Edwards, C. A., Subler, S., & Metzger, J. D. (2001). Pig manure vermicompost as a component of a horticultural bedding plant medium : effects on physicochemical properties and plant growth. *Bioresource technology*, 78(1), 11-20.

- Badar, R., Khan, M., Batool, B., & Shabbir, S. (2015). Effects of organic amendments in comparison with chemical fertilizer on cowpea growth. *Ijar*, 1(45), 66-71.
- Bain, M. M. (1997). Eggshell strength : a mechanical/ultrastructural evaluation. Doctoral thesis, University of Glasgow.
- Baize, D. (1988). Guide des analyses courantes en pédologie. INRA.
- Bastida, F., Kandeler, E., Moreno, J. L., Ros, M., García, C., & Hernández, T. (2008). Application of fresh and composted organic wastes modifies structure, size and activity of soil microbial community under semiarid climate. *Applied Soil Ecology*, 40(2), 318-329.
- Beck-Broichsitter, S., Fleige, H., & Horn, R. (2020). Compost quality and its function as a soil conditioner of recultivation layers – A critical review. *International Agrophysics*, 34(1), 11-18.
- Bhattacharya, S.S. ; Kim, K.-H. ; Das, S. ; Uchimiya, M. ; Jeon, B.H. ; Kwon, E. ; Szulejko, J.E. A Review on the Role of Organic Inputs in Maintaining the Soil Carbon Pool of the Terrestrial Ecosystem. *J. Environ. Manag.* 2016, 167, 214–227.
- Bhunias, S. ; Bhowmik, A. ; Mallick, R. ; Mukherjee, J. Agronomic Efficiency of Animal-Derived Organic Fertilizers and Their Effects on Biology and Fertility of Soil : A Review. *Agronomy* 2021, 11, 823.
- Biochar amendment reduces the availability of pb in the soil and its uptake in lettuce
- Bolan, N. S., Adriano, D. C., & Curtin, D. (2003). Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. *Advances in Agronomy*, 78, 215–272.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). The nature and properties of soils (13th ed.). Prentice Hall.
- Brown, S., Biswas, A., Caron, J., Dyck, M., & Si, B. (2021). La physique du sol : Introduction à la science du sol, de la théorie à la pratique en sols canadiens. Presses de l'Université de la Saskatchewan.
- Bruand, A. (1990). Improved prediction of water-retention properties of clayey soils by pedological stratification. *Journal of soil science*, 41(3), 491-497.
- Bruand, A., Duval, O., Gaillard, H., Darthout, R., & Jamagne, M. (1996). Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des sols*, 31(1), 1-27.
- Buntaro, G. A., & Avicenna, R. A. (2023, October). Potential of processed barnacles shell as soil conditioner using mung bean plants (*Vigna radiata* L.) growth. In IOP Conference

- Series : Earth and Environmental Science (Vol. 1251, No. 1, p. 012060). IOP Publishing.
- Camberato, J. J., Gagnon, B., Angers, D. A., Chantigny, M. H., & Pan, W. L. (2006). Pulp and paper mill by-products as soil amendments and plant nutrient sources. *Canadian journal of soil science*, 86(4), 641-653.
- Capanoglu, E., Nemli, E., & Tomas-Barberan, F. (2022). Novel approaches in the valorization of agricultural wastes and their applications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(23), 6787-6804.
- Celik, I., Ortas, I., & Kilic, S. (2004). Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxerert soil. *Soil and Tillage Research*, 78(1), 59-67.
- Chaussod, R. (1995). Impact of agricultural practices on the size and activity of the microbial biomass in a long-term field experiment. *Biology and Fertility of Soils*.
- Chen, G., Zhu, H., & Zhang, Y. (2003). Soil microbial activities and carbon and nitrogen fixation. *Research in microbiology*, 154(6), 393-398.
- Chenu, C., Abiven, S., Annabi, M., Barray, S., Bertrand, M., Bureau, F., ... & Verbègue, B. (2011). Mise au point d'outils de prévision de l'évolution de la stabilité de la structure de sols sous l'effet de la gestion organique des sols. *Étude et Gestion des sols*, 18(3), 161-174.
- Chojnacka, K., Moustakas, K., & Mikulewicz, M. (2022). Valorisation of agri-food waste to fertilisers is a challenge in implementing the circular economy concept in practice. *Environmental Pollution*, 312, 119906.
- Cooperband, L. (2002). Building soil organic matter with organic amendments. Center for Integrated Agricultural Systems (CIAS), College of Agricultural and Life Sciences, University of Wisconsin-Madison.
- Crecchio, C., Curci, M., Mininni, R., Ricciuti, P., & Ruggiero, P. (2001). Short-term effects of municipal solid waste compost amendments on soil carbon and nitrogen content, some enzyme activities and genetic diversity. *Biology and fertility of soils*, 34(5), 311-318.
- Crecchio, C., Curci, M., Pizzigallo, M. D., Ricciuti, P., & Ruggiero, P. (2004). Effects of municipal solid waste compost amendments on soil enzyme activities and bacterial genetic diversity. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(10), 1595-1605.
- De Brier, N., Gomand, S. V., Donner, E., Paterson, D., Smolders, E., Delcour, J. A., & Lombi, E. (2014). Element distribution and iron speciation in mature wheat grain (*Triticum aestivum* L.) using synchrotron X-ray fluorescence microscopy mapping and X-ray

- absorption near-edge structure (XANES) imaging. *Plant, Cell & Environment*, 38(9), 1944–1955.
- Dekaki, A. (2008). Impact de l'utilisation d'un compost vert sur l'activité et la diversité de la microflore tellurique (Doctoral dissertation, Paris Est).
- Delaunoy, A. (2006). Guide simplifié pour la description des sols. Chambre d'Agriculture du Tarn.
- Diacono, M., & Montemurro, F. (2011). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. In *Sustainable agriculture volume 2* (pp. 761-786). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Dupla, X., Claustre, R., Bonvin, E., Graf, I., Le Bayon, R. C., & Grand, S. (2024). Let the dust settle : Impact of enhanced rock weathering on soil biological, physical, and geochemical fertility. *Science of the Total Environment*, 954, 176297.
- Duval, M., Angers, D.-A., & Laverdière, M.-R. (1993). Revue de quelques facteurs régissant l'état et la stabilité de la structure du sol. *Agrosol*, 6(2), 44–51.
- El Hadrami, A. ; Adam, L.R. ; El Hadrami, I. ; Daayf, F. Chitosan in Plant Protection. *Mar. Drugs* 2010, 8, 968.
- Feller, C. (1995). La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1 :1 : Recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique.
- Fierro, A., Angers, D. A., & Beauchamp, C. J. (1999). Restoration of ecosystem function in an abandoned sandpit : plant and soil responses to paper de-inking sludge. *Journal of applied ecology*, 36(2), 244-253.
- Fortuna, A., Harwood, R., Kizilkaya, K., & Paul, E. A. (2003). Optimizing nutrient availability and potential carbon sequestration in an agroecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(8), 1005-1013.
- Franco-Otero, V. G., Soler-Rovira, P., Hernández, D., López-de-Sá, E. G., & Plaza, C. (2012). Short-term effects of organic municipal wastes on wheat yield, microbial biomass, microbial activity, and chemical properties of soil. *Biology and Fertility of Soils*, 48(2), 205-216.
- Gallardo-Lara, F., & Nogales, R. (1987). Effect of the application of town refuse compost on the soil-plant system : A review. *Biological wastes*, 19(1), 35-62.
- García-Gil, J. C., Plaza, C., Senesi, N., Brunetti, G., & Polo, A. (2004). Effects of sewage sludge amendment on humic acids and microbiological properties of a semiarid Mediterranean soil. *Biology and Fertility of Soils*, 39(5), 320-328.

- García-Gil, J. C., Plaza, C., Soler-Rovira, P., & Polo, A. (2000). Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass. *Soil Biology and biochemistry*, 32(13), 1907-1913.
- Goss, M.J. ; Tubeileh, A. ; Goorahoo, D. A Review of the Use of Organic Amendments and the Risk to Human Health ; Elsevier : Amsterdam, The Netherlands, 2013 ; Volume 120, pp. 275–379. ISBN 978-0-12-407686-0.
- Gregorich, E. G., Liang, B. C., Ellert, B. H., & Drury, C. F. (1996). Fertilization effects on soil organic matter turnover and corn residue C storage. *Soil Science Society of America Journal*, 60(2), 472-476.
- Hao, Y. ; Mao, J. ; Bachmann, C.M. ; Hoffman, F.M. ; Koren, G. ; Chen, H. ; Tian, H. ; Liu, J. ; Tao, J. ; Tang, J. ; et al. Soil Moisture Controls over Carbon Sequestration and Greenhouse Gas Emissions : A Review. *Npj Clim. Atmos. Sci.* 2025, 8, 16.
- Hartmann, M., & Six, J. (2023). Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(1), 4–18.
- He, Y., Xu, M., & Zhang, W. (2023). Soil organic carbon fractions and their relationship with soil aggregate stability. *Geoderma*, 429, 116276.  
<https://doi.org/10.3109/09637486.2012.687366>
- Huhta, V. (2007). The role of soil fauna in ecosystems : A historical review. *Pedobiologia*, 50(6), 489–495.
- Hussain, R., Guo, Z., & Li, F. (2020). Effects of soil organic matter on pore structure and hydraulic properties. *Soil and Tillage Research*, 199, 104592.
- Hüttl, R. F., & Frielinghaus, M. (1994). Soil fertility problems—an agriculture and forestry perspective. *Science of the Total Environment*, 143(1), 63–74.
- IAMB Mediterranean Agronomic Institute of Bari. Published in collection Master of Science IAMBCIHEAM (International Centre for advanced Mediterranean Agronomic studies) no.405 (2006).
- Islam, M. U., Jiang, F., Islam, M. M., Ibrahim, M. M., Halder, M., Liu, Y., & Hou, E. (2026). Organic amendment quality as a driver of soil phosphorus enrichment and crop yield : A global synthesis. *Soil and Tillage Research*, 256, 106836.
- ITAB. (2002). Activités biologiques et fertilité des sols : Intérêts et limites des méthodes analytiques disponibles. ITAB.
- J. J. LEE, R. D. PARK, Effect of food waste compost on microbial population, soil enzyme activity and

- 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.
- Javed, M. M., Zahoor, S., Shafaat, S., Mehmooda, I., Gul, A., Rasheed, H., ... & Haq, I. (2012). Wheat bran as a brown gold : Nutritious value and its biotechnological applications. *African Journal of Microbiology Research*, 6(4), 724-733.
- Jemai, I., Guirat, S. B., Aissa, N. B., Jedidi, N., & Gallali, T. (2011). Effet de l'amendement par fumier de ferme et par compost d'ordures ménagères sur la restauration d'un sol argileux de plaine sous climat semi-aride tunisien. *Étude et Gestion des sols*, 18(4), 271–285.
- K. El HANAFI SEBTI, Compost tea effects on soil fertility and plant growth of organic tomato (*Solanum lycopersicum* Mill) in comparison with different organic fertilizers. Master thesis, Organic farming.
- Kabata-Pendias, A. (2010). Trace elements in soils and plants (4th ed.). CRC Press.
- Kim, M. J., Moon, Y., Tou, J. C., Mou, B., & Waterland, N. L. (2016). Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Food Composition and Analysis*, 49, 19-34.
- Kononova, M. M. (1966). Soil organic matter. Pergamon Press.
- Kouakoua, E. (1998). La matière organique et la stabilité structurale d'horizons de surface de sols ferralitiques argileux : Effet du mode de gestion des terres (Document ORSTOM Montpellier, No. 5). ORSTOM.
- Kristl, M., Jurak, S., Brus, M., Sem, V., & Kristl, J. (2019). Evaluation of calcium carbonate in eggshells using thermal analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138(4), 2751-2758.
- Krull, E. S., Baldock, J. A., & Skjemstad, J. O. (2004). Importance of mechanisms and processes of the stabilisation of soil organic matter for modelling carbon turnover. *Functional Plant Biology*, 31(3), 207–222.
- Krull, E. S., Skjemstad, J. O., & Baldock, J. A. (2004). Functions of soil organic matter and the effect on soil properties (p. 129). Canberra : Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting.
- Lakhdar, A., Rabhi, M., Ghnaya, T., Montemurro, F., Jedidi, N., & Abdelly, C. (2009). Effectiveness of compost use in salt-affected soil. *Journal of hazardous materials*, 171(1-3), 29-37.

- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895.
- Lalande, R., Gagnon, B., Simard, R. R., & Cote, D. (2000). Soil microbial biomass and enzyme activity following liquid hog manure application in a long-term field trial. *Canadian Journal of Soil Science*, 80(2), 263-269.
- Lanz, J. (2004). Soils and wine quality: The key is relevant information. *Wynland*, décembre, 53–54.
- Larney, F. J., & Angers, D. A. (2012). The role of organic amendments in soil reclamation : A review. *Canadian Journal of Soil Science*, 92(1), 19-38.
- Le Bissonnais, Y., Cros-Cayot, S., & Gascuel-Oudou, C. (2002). Topographic dependence of aggregate stability, overland flow and sediment transport. *Agronomie*, 22(5), 489-501.
- Lebrun, R. (2016). Typicité du vin et réponses de la vigne aux contraintes du terroir. *AgroParisTech*.
- Lee, J. J., Park, R. D., Kim, Y. W., Shim, J. H., Chae, D. H., Rim, Y. S., ... & Kim, K. Y. (2004). Effect of food waste compost on microbial population, soil enzyme activity and lettuce growth. *Bioresource technology*, 93(1), 21-28.
- Leguédais, S., & Bissonnais, Y. L. (2004). Size fractions resulting from an aggregate stability test, interrill detachment and transport. *Earth Surface Processes and Landforms : The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 29(9), 1117-1129.
- lettuce growth, *Bioresource Technology* 93(1), (2004) 21-28.
- Li, S. ; Tasnady, D. Biochar for Soil Carbon Sequestration : Current Knowledge, Mechanisms, and Future Perspectives. *C* 2023, 9, 67.
- Liu, M., Xu, X., Wanek, W., Sun, J., Bardgett, R. D., Tian, Y., ... & Wang, Y. (2025). Nitrogen availability in soil controls uptake of different nitrogen forms by plants. *New Phytologist*, 245(4), 1450-1467.
- Lopez-Nuñez, R. ; Prieto-Rubio, J. ; Bautista, I. ; Lidón-Cerezuela, A.L. ; Valverde-Urrea, M. ; Lopez-Moya, F. ; Lopez-Llorca, L.V. Chitosan Reduces Naturally Occurring Plant Pathogenic Fungi and Increases Nematophagous Fungus *Purpureocillium* in Soil under Field Conditions. *Front. Agron.* 2024, 6, 1502402.
- Luo, G. ; Li, L. ; Friman, V.-P. ; Guo, J. ; Guo, S. ; Shen, Q. ; Ling, N. Organic Amendments Increase Crop Yields by Improving Microbe-Mediated Soil Functioning of Agroecosystems : A Meta-Analysis. *Soil Biol. Biochem.* 2018, 124, 105–115.
- Magdoff, F. ; Van Es, H. Building Soils for Better Crops : Ecological Management for Healthy Soils ; Handbook Series Book ; Sustainable Agriculture Research and

- Education (SARE) Program ; SARE Outreach Publications : College Park, MD, USA, 2021 ; Volume 10, p. 394.
- Maignien, R. (1969). Manuel de prospection pédologique (Document technique n° 11). ORSTOM
- Melero, S., Madejón, E., Ruiz, J. C., & Herencia, J. F. (2007). Chemical and biochemical properties of a clay soil under dryland agriculture system as affected by organic fertilization. *European Journal of Agronomy*, 26(3), 327-334.
- Morel, R. (1989). Les sols cultivés. Éditions Technique & Documentation.
- Mrabet, L., Belghyti, D., Loukili, A., & Attarassi, B. (2011). Étude de l'effet du compost des déchets ménagers sur l'amélioration du rendement de Maïs et de la Laitue. *Afrique science*, 7(2), 74-84.
- Musy, A., & Soutter, M. (1991). Physique du sol (1<sup>re</sup> éd.). Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Nakano, T., Ikawa, N. I., & Ozimek, L. (2003). Chemical composition of chicken eggshell and shell membranes. *Poultry Science*, 82(3), 510-514.
- Nannipieri, P., Pedrazzini, F., Arcara, P. G., & Piovaneli, C. (1979). Changes in amino acids, enzyme activities, and biomasses during soil microbial growth. *Soil Science*, 127(1), 26-34.
- Naramabuye, F. X., & Haynes, R. J. (2006). Effect of organic amendments on soil pH and Al solubility and use of laboratory indices to predict their liming effect. *Soil science*, 171(10), 754-763.
- Nwe Htwe, T. ; Sharma, S. ; Angmo, P. ; Dhaliwal, S.S. ; Saini, K.S. Potential Organic Amendments for Improving Productivity and Associated Biological Properties of Low Carbon Soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2025, 56, 654–670.
- Nys, Y., Gautron, J., Garcia-Ruiz, J. M., & Hincke, M. T. (2004). Avian eggshell mineralization : biochemical and functional characterization of matrix proteins. *Comptes Rendus Palevol*, 3(6-7), 549-562
- Onipe, O. O., Jideani, A. I., & Beswa, D. (2015). Composition and functionality of wheat bran and its application in some cereal food products. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(12), 2509-2518.
- Oyebiyi, O. O., Laezza, A., Hoque, M. M., Thammavongsa, S., Li, M., Tsipas, S., ... & Drosos, M. (2026). Organic Amendments for Sustainable Agriculture: Effects on Soil Function, Crop Productivity and Carbon Sequestration Under Variable Contexts. *C*, 12(1), 7.

- Pan, F., Wei, H., Huang, Y., Guo, W., Zhang, Z., Teng, R., ... & Gao, M. (2026). Synthesis of eggshell-buckwheat hull biochar: Adsorption mechanisms for phosphorus, fertilizer potential, and impact on soil bacterial community. *Journal of Cleaner Production*, 557, 148257.
- Pan, Y., Wang, D., Tan, T., An, J., Jin, X., Zou, H., ... & Siddique, K. H. M. (2025). Effect of organic amendments on soil organic carbon fractions, water retention, and mechanical properties in a Chinese Alfisol. *Soil and Tillage Research*, 254, 106723.
- Paolini, V., Tratzl, P., Terenzi, V., Fois, F., & Montiroli, C. (2026). Methane and ammonia emissions from organic waste valorization in agriculture.
- Paradis, R. (2016). Distribution spatiale du carbone organique et de l'azote dans les sols en fonction des zones de récurrence d'inondation (Thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières).
- Paré, M. C. (2011). Organic matter quality in cryosols: Effect on soil nitrogen dynamics and greenhouse gas emissions.
- Perucci, P. (1992). Enzyme activity and microbial biomass in a field soil amended with municipal refuse. *Biology and Fertility of soils*, 14(1), 54-60.
- Radha, T., & Karthikeyan, G. (2019). Hen eggshell waste as fertilizer for the growth of *phaseolus vulgaris* (Cowpea seeds). *Research Journal of Life Sciences, Bioinformatics, Pharmaceutical and Chemical Sciences*, 51(1), 398-406.
- Rahman, M.M. ; Kamal, M.Z.U. ; Ranamukhaarachchi, S. ; Alam, M.S. ; Alam, M.K. ; Khan, M.A.R. ; Islam, M.M. ; Alam, M.A. ; Jiban, S.I. ; Al Mamun, M.A. ; et al. Effects of Organic Amendments on Soil Aggregate Stability, Carbon Sequestration, and Energy Use Efficiency in Wetland Paddy Cultivation. *Sustainability* 2022, 14, 4475.
- Rebolleda, S., Beltrán, S., Sanz, M. T., González-Sanjósé, M. L., & Solaesa, Á. G. (2013). Extraction of alkylresorcinols from wheat bran with supercritical CO<sub>2</sub>. *Journal of Food Engineering*, 119(4), 814-821.
- Robert, M., & Chenu, C. (1992). Interactions between microorganisms and soil minerals. In G. Stotzky & J.-M. Bollag (Eds.), *Soil biochemistry* (Vol. 7, pp. 307–404). Marcel Dekker.
- Ros, M., Pascual, J. A., Garcia, C., Hernandez, M. T., & Insam, H. (2006). Hydrolase activities, microbial biomass and bacterial community in a soil after long-term amendment with different composts. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(12), 3443-3452.

- Rossi, D., Rossi, S., Cinelli, P., & Seggiani, M. (2024). Emerging opportunities in the valorisation of wheat bran byproduct as additive in polymer composite materials. *Materials Today Sustainability*, 27, 100832.
- Russell, E. W. (1977). The role of organic matter in soil fertility. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 281(980), 209–219.
- Sainz-Hernández, J. C., Renganathan, P., & Puente, E. O. R. (2026). Eggshell Waste Valorization for Sustainable Agriculture : Applications, Nanotechnology Advances, and Circular Bioeconomy Perspectives. *Clean Technologies*, 8(3), 69.
- Sanchez, P. A., & Miller, R. H. (1986). Organic matter and soil fertility management in acid soils of the tropics. In *Transactions of the 13th International Congress of Soil Science*
- Sapkota, S. ; Ghimire, R. ; Brewer, C.E. ; Fernando, S. Contrasting Effects of Plant and Animal Residue Biochars on Soil Health, Carbon Stability, and Crop Yield. *J. Soils Sediments* 2025, 25, 703–717.
- Schimel, J. P., & Bennett, J. (2004). Nitrogen mineralization : challenges of a changing paradigm. *Ecology*, 85(3), 591-602.
- Seguin, G. (1986). ‘Terroirs’ and pedology of wine growing. *Experientia*, 42(8), 861–873.
- Shewry P. 2009. The Healthgrain programme opens new opportunities for improving wheat for nutrition and health.
- Shibana, S.N. ; Nair, D.S. Effect of Chitosan on Increasing Beneficial Soil Microflora and Disease Suppression in Turmeric Plants in Humid Tropics of Kerala, India. *Int. J. Plant Soil Sci.* 2024, 36, 170–176.
- Shwetha, A., Dhananjaya, K. S., & Ananda, S. M. (2018). Comparative study on calcium content in egg shells of different birds. *International Journal of Zoology Studies*, 3(4), 31-33.
- Singh, S., Devi, N. B., Divya, D., Kumar, A., Singh, S., Tyagi, G., & Kumar, A. (2024). Soil fertility management: Role of organic amendments and bio-fertilizers: A review. *International Journal of Research in Agronomy*, 7(12), 766–772.
- Sinsabaugh, R. L., Lauber, C. L., Weintraub, M. N., Ahmed, B., Allison, S. D., Crenshaw, C., Contosta, A. R., Cusack, D., Frey, S., Gallo, M. E., Gartner, T. B., Hobbie, S. E., Holland, K., Keeler, B. L., Powers, J. S., Stursova, M., Takacs-Vesbach, C., Waldrop, M. P., Wallenstein, M. D., Zak, D. R., & Zeglin, L. H. (2008). Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. *Ecology Letters*, 11(11), 1252-1264.
- Stenberg, B. (1998). Soil attributes as predictors of crop production under standardized conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 27(1), 104–112.

- Stevenson, L. E. O., Phillips, F., O'sullivan, K., & Walton, J. (2012). Wheat bran: its composition and benefits to health, a European perspective. *International journal of food sciences and nutrition*, 63(8), 1001-1013.
- Stockdale, E. A., Shepherd, M. A., Fortune, S., & Cuttle, S. P. (2002). Soil fertility in organic farming systems—Fundamentally different ? *Soil Use and Management*, 18, 301–308.
- Tahat, M., Alananbeh, K. M., Othman, Y. A., & Leskovar, D. (2020). Soil health and sustainable agriculture. *Sustainability*, 12(12), 4859.
- Tejada, M., & Gonzalez, J. L. (2007). Influence of organic amendments on soil structure and soil loss under simulated rain. *Soil and Tillage Research*, 93(1), 197-205.
- Toxics, 9 (10) (2021), p. 268.
- Troeh, F. R., & Thompson, L. M. (1993). *Soils and soil fertility* (5th ed.). Oxford University Press.
- UK Essays. (2018). Factors affecting soil fertility : Environmental sciences essay. UK Essays.
- Van Leeuwen, C., Friant, P., Choné, X., Trégoat, O., Koundouras, S., & Dubourdieu, D. (2004). Influence of climate, soil, and cultivar on terroir. *American Journal of Enology and Viticulture*, 55(3), 207–217.
- Wang, L., Xiong, W., Chen, H., Meng, F., & Tan, Y. (2024). Exploring the spatial distribution and influencing factors of soil pH value of cultivated land in Sichuan Province. *Environmental Earth Sciences*, 83(1), 10.
- Wang, Y., Chen, Y., Gao, X., Wang, Q., Cui, M., Zhang, D., & Guo, P. (2024). Unveiling the driving role of pH on community stability and function during lignocellulose degradation in paddy soil. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1338842.
- Wang, Y., Lv, W., Xue, K., Wang, S., Zhang, L., Hu, R., ... & Niu, H. (2022). Grassland changes and adaptive management on the Qinghai–Tibetan Plateau. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(10), 668-683.
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.
- Wong, C. W., Bahari, N. Z. A. S., Tumiran, N. A. A., Ong, S. I., Faisal, R. A., & Joli, N. S. (2023). The effects of eggshell and egg membrane amendments on soil and plant growth. *International STEM Journal*, 4(2), 38–49.
- Wong, C. W., Bahari, N. Z. A. S., Tumiran, N. A. A., ONG, S. I., Faisal, R. A., & Joli, N. S. (2023). The Effects of Eggshell and Egg Membrane Amendments on Soil and Plant Growth. *International STEM Journal*, 4(2), 38-49.

- Xie, S. ; Yang, S. ; Xu, H. ; Liu, S. ; Zhou, H. ; Yang, F. ; Wei, C. Effects of Integrated Application of Plant- or Animal-Derived Organic Fertilizers in Tea Garden Ecosystem. *Soil Syst.* 2025, 9, 94.
- Xu, J., Li, Y., & Li, L. (2025). A comprehensive review of the effects of organic amendments on soil health and fertility: Mechanisms, greenhouse gas emissions, and implications for sustainable agriculture. *Agronomy*, 15(12), 2705.
- Yao, Y., Tao, Q., Cui, Q., Pang, G., Zhang, Q., Long, Y., Wang, L., Xu, B., & Song, J. (2025). Shifts in microbial metabolic strategy drive reduced biomass-specific enzyme activity in mountain hazard-affected soils. *Catena*, 261, 109567.
- Yu, G., Jia, Y., He, N., Zhu, J., Chen, Z., Wang, Q., ... & Goulding, K. (2019). Stabilization of atmospheric nitrogen deposition in China over the past decade. *Nature Geoscience*, 12(6), 424-429.
- Zhang, T., Wei, W., Xie, J., Zhou, Z., Pu, Y., Jia, Y., ... & Li, T. (2025). Synergistic effects of biochar-immobilized *Stenotrophomonas acidaminiphila* on potassium availability and ryegrass productivity in purplish soil. *Journal of Environmental Management*, 396, 128119.
- Zhou, M., Liu, C., Wang, J., Meng, Q., Yuan, Y., Ma, X., Liu, X., Zhu, Y., Ding, G., Zhang, J., Feng, G., & Chen, X.(2020). Soil aggregates stability and storage of soil organic carbon respond to cropping systems on Black Soils of Northeast China. *Scientific Reports*,10, 265.
- Zibilske, L. M., Clapham, W. M., & Rourke, R. V. (2000). Multiple applications of paper mill sludge in an agricultural system : soil effects (Vol. 29, No. 6, pp. 1975-1981). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Zuccarini, P., Sardans, J., Asensio, L., & Peñuelas, J. (2023). Altered activities of extracellular soil enzymes by the interacting global environmental changes. *Global Change Biology*, 29(8), 2067-2091.