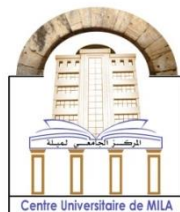


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



N° Ref :.....

Centre Universitaire Abdelhafid BOUSSOUF- Mila

Institut des Sciences de la Nature et de la Vie

Département de Biotechnologie végétale

**Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme de Master
(Start-up)**

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Biotechnologie

Spécialité : Biotechnologie végétale

Thème :

**Élaboration d'un engrais organique à partir de résidus d'huiles végétales
et d'autres déchets organiques :
approche expérimentale en agriculture durable.**

Présenté par :

- **BENSEMMA Zouhir**
- **ROUIHEM Abdelwahab**
- **BOUDJRADA Karima**

Devant le jury :

Nom et Prénom : Djeddi Hamsa	Grade : MCA	Examineur
Nom et Prénom : Boukeria Sabah	Grade : MCA	Promoteur
Nom et Prénom : Kherief Nacereddine Saliha	Grade : MCA	Co-encadrante
Nom et Prénom : Daoudi Hamza	Grade : MCA	Co-encadrant
Nom et Prénom : Bourihane Farouk	Grade : MCA	Expert de l'incubateur
Nom et prénom		Représentant de la direction du l'agriculture

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciement

Avant toute chose, nous rendons grâce à **Dieu Tout-Puissant**, source de force et de sagesse, pour nous avoir permis d'accomplir ce travail dans les meilleures conditions.

Nous exprimons notre **profonde gratitude à Mme Boukeria Sabah**, notre encadrante, pour sa disponibilité, ses conseils judicieux, son accompagnement attentif et sa rigueur scientifique tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Son encadrement bienveillant a grandement contribué à la réussite de notre projet.

Nos remerciements s'adressent également à **Mme Kherief Nacereddine Saliha** et à **Monsieur Daoudi Hamza** notre Co-encadrant pour leur implication, leurs orientations précieuses et leur soutien constant durant toutes les phases du projet

Nos remerciements les plus sincères vont également aux **enseignants de la filière Biotechnologie Végétale**, pour la qualité de leur enseignement, leur engagement pédagogique et leur soutien durant notre parcours universitaire.

Nous tenons aussi à saluer l'**ensemble de nos collègues et camarades de promotion**, pour l'entraide, l'échange et la convivialité qui ont enrichi cette expérience collective.

Enfin, nous adressons une **reconnaissance toute particulière à nos familles**, pour leur amour, leur patience et leur soutien moral indéfectible, qui ont été une véritable source de motivation tout au long de ce parcours.

Zouhir , Abdelwahhab et Karima

Dédicace

Nous dédions ce travail :

À nos chers parents,
qui ont été notre lumière dans les moments sombres, notre soutien
inconditionnel,
et notre source inépuisable de courage, d'amour et de prières.
Ce modeste fruit de nos efforts vous est dédié avec tout notre respect et
notre reconnaissance.

À nos familles aimantes,
pour leur patience, leurs encouragements et leur présence à chaque étape de
ce parcours.

À notre encadrante, Madame Boukria Sabah, nous exprimons toute notre
gratitude pour sa disponibilité et ses conseils précieux. Nous remercions
également Madame Kherief Nacereddine Saliha et Monsieur Daoudi Hamza,
nos co-encadrants, pour leur implication, leurs orientations pertinentes et
leur soutien constant tout au long des différentes phases du projet. Leur
bienveillance et la qualité de leur encadrement ont été d'un grand soutien
pour la réalisation de ce travail.

À tous les enseignants qui nous ont transmis le savoir avec passion,
et à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à notre formation.

À nos amis et camarades de promotion,
avec qui nous avons partagé les défis, les longues heures de travail, et les
moments de joie.

À tous ceux qui ont cru en nous,
qui nous ont soutenus d'un mot, d'un geste ou d'un simple sourire.

Ce travail est le fruit d'un effort collectif, d'une volonté commune,
et d'un engagement partagé.
Il représente bien plus qu'un diplôme : c'est un symbole de persévérance, de
solidarité et de réussite.

Par cette dédicace, nous rendons hommage à toutes les personnes qui ont
marqué notre parcours.
Merci du fond du cœur.

Résumé

Cette étude vise à proposer une solution innovante, durable et respectueuse de l'environnement pour la valorisation des déchets organiques en Algérie. À travers cette étude, nous avons élaboré et étudié un engrais organique naturel à partir de résidus d'huiles végétales (le tourteau de Pistacia lentiscus et le grignon d'olive) associés à des boues d'épuration traitées. Notre objectif était de transformer ces matières considérées comme des déchets polluants en une ressource agricole bénéfique, capable d'améliorer la structure des sols, d'enrichir leur teneur en matière organique et de fournir des éléments nutritifs essentiels aux plantes, et de remplacer les engrais minéraux. Nous avons procédé à une caractérisation physico-chimique des matières premières de produit, tout en respectant les normes nationales et internationales (notamment NF U44-095, ISO 19698 :2020, et la directive 86/278/CEE). Les résultats ont montré un bon équilibre en azote, phosphore, potassium et une biodégradabilité prometteuse, rendant ce compost adapté à une valorisation agronomique sûre. Au-delà de l'aspect scientifique, cette étude propose également un modèle économique de type start-up basé sur l'économie circulaire, offrant des perspectives concrètes pour le développement local, la création d'emplois et la réduction de l'impact environnemental des déchets organiques.

Abstract

This study aims to propose an innovative, sustainable, and environmentally friendly solution for the valorization of organic waste in Algeria. Through this research, we have developed and examined a natural organic fertilizer made from residues of vegetable oils (Pistacia lentiscus cake and olive pomace) combined with treated sewage sludge.

Our objective was to transform these materials—traditionally considered as polluting waste—into a beneficial agricultural resource capable of improving soil structure, enriching organic matter content, providing essential nutrients to plants, and replacing mineral fertilizers. We conducted a physico-chemical characterization of the raw materials used in the product, in compliance with national and international standards (notably NF U44-095, ISO 19698 :2020, and Directive 86/278/EEC). The results revealed a good balance of nitrogen, phosphorus, and potassium, along with promising biodegradability, making this compost suitable for safe agronomic use. Beyond the scientific aspect, this study also proposes a start-up economic model based on the circular economy, offering tangible prospects for local development, job creation, and the reduction of the environmental impact of organic waste.

المخلص

تهدف هذه الدراسة إلى تقديم مشروع تطبيقي وبيئي في آن واحد، يتمثل في إنتاج سماد عضوي طبيعي 100 % من بقايا استخلاص الزيوت النباتية (مثل كسبة الضرو وتفل الزيتون) مع الحمأة المعالجة. هذه المواد التي تُعتبر نفايات في العادة، حوّلناها إلى منتج زراعي نافع وآمن، يساهم في تحسين التربة وتغذيتها، ودعم الزراعة المستدامة.

قمنا بإجراء تحاليل علمية دقيقة، قارنا فيها النتائج مع المعايير الدولية، وأثبت المنتج فعاليتها وملاءمته للاستعمال الزراعي، من حيث غناه بالعناصر الأساسية كالأزوت والفوسفور، ومن حيث توازنه العضوي وقدرته على التسميد دون أضرار بيئية.

يتضمن المشروع أيضًا نموذجًا اقتصاديًا عصريًا يندرج ضمن فلسفة المؤسسات الناشئة (وفق القرار 1275)، مما يجعله قابلاً للتطبيق على أرض الواقع، بفرص حقيقية للإنتاج، التشغيل، وتقليل التلوث

Tables de matière

Introduction	1
Partie théorique	3
Chapitre 1	4
Cadre général de la valorisation des déchets dans l'agriculture durable.....	4
1. Qu'est-ce qu'un déchet ?.....	5
2. Valorisation des déchets agricoles et ses domaines d'application	6
3. Rôle de l'économie circulaire dans la gestion des déchets organiques	7
4. Agriculture durable et fertilisation organique : concepts et objectifs	7
5. L'importance de remplacer les engrais chimiques	8
Chapitre 02	10
Relation entre la fertilisation organique et la croissance végétale	10
1. Besoins nutritionnels fondamentaux des plantes (NPK et oligoéléments)	11
2. Effets de l'engrais organique sur les propriétés du sol (physiques et chimiques)	11
3. Lien entre la qualité de l'engrais et la croissance des plantes	12
4. Rôle des engrais organiques dans l'amélioration du rendement et de la qualité	13
Chapitre 3	14
Conditions biologiques et techniques pour produire un engrais organique efficace et sûr	14
1. Caractéristiques d'un bon engrais organique	15
2. Rôle des microorganismes dans la fermentation et la dégradation	16
3. Conditions optimales du compostage (aération, humidité, température)	18
Chapitre 4 :.....	19
Matières premières pour la production d'un engrais organique.....	19
1. Résidus d'extraction des huiles végétales	20
2. Valorisation des boues dans la production d'engrais organiques	24
3. Valorisation du lentisque (Pistacia lentiscus) dans la production d'engrais organiques	

Partie expérimentale.....	33
Chapitre 01	34
Matériel et Méthodes.....	34
Chapitre 02	51
Résultats et discussion.....	51
Conclusion	62
Perspectives	63
Annexe	64
Références bibliographiques	65

Liste des figures

Figure 1. Benefits of Using Compost US EPA (U.S. Environmental Protection Agency).....	12
Figure 2 L'évolution de température pendant le compostage d'un fumier de bovins (Godden, 1995).....	17
Figure 3 Tas de grignon d'olive extrait après la trituration (Naomi T,2012)	20
Figure 4 Répartition de la production d'olive 2018(MADR ,2019)	21
Figure 5 séchage solaire des boues– procédé Heliantis (SUEZ).....	25
Figure 6 Pistachier lentisques (Isabelle M,2024)	31
Figure 7 (Photo personel,2025).....	36
Figure 8 variété Saïda 83 (Photo personel,2025).	37
Figure 9 Sol de bonne qualité (Photo personel,2025).	38
Figure 10 Sol de mauvaise qualité (Photo personel,2025).....	38
Figure 11 Hauteur des plants (en cm) au cours du temps dans un bon sol	54
Figure 12 Hauteur des plants (en cm) dans un mauvais sol	55
Figure 13 Nombre des feuilles – bon sol (le 29/05/2025).....	56
Figure 14 Nombre de feuilles – Sol mauvais (le 29/05/2025)	57

Liste des tableaux

Tableau 1 Compositions physico-chimiques des grignons d'olive (Freitas, L et al,2022).....	23
Tableau 2 Paramètres physico-chimiques typiques des boues déshydratées	26
Tableau 3 Valeurs limites (mg/kg MS) des métaux lourds selon Directive UE 86/278.....	27
Tableau 4 Méthode d'analyse des métaux lourds des boues	39
Tableau 5 traitements effectués sur les deux types de sol	47
Tableau 6 Les répétitions (sol × traitement).....	48
Tableau 7 Tableaux des résultats fournis STEP Ferjioua(2020)	58
Tableau 8 Tableaux des résultats fournis STEP Ferjioua(2022)	58
Tableau 9 Tableaux des résultats fournis STEP Oued Naja(2020)	59
Tableau 10 Référentiel utilisé pour l'évaluation des métaux lourds.....	59
Tableau 11 Hauteur des plants (en cm) bon sol.....	64
Tableau 12 Hauteur des plants (en cm) – sol mauvais	64
Tableau 13 Nombres de feuilles – bon sol	64
Tableau 14 Nombres de feuilles – mauvais sol	64

Introduction :

Dans un contexte mondial marqué par une accumulation croissante de déchets organiques issus des activités agricoles, une valorisation de ces déchets devient une nécessité soit sur le plan environnementale ou bien économique. En Algérie chaque année les moulins génèrent des quantités significatives de déchets tel que les grignons d'olive, les résidus de lentisque (*Pistacia lentiscus*), ainsi que les boues issues des systèmes de transformation. Ces déchets qui représentent une source organique à fort potentiel agronomique, sont généralement mal exploités ou éliminés de manière non durable.

D'un autre côté l'agriculture moderne doit réduire sa dépendance aux engrais chimiques, car leur usage intensif a montré des effets néfastes sur la qualité des sols, la biodiversité ainsi que sur la santé humaine. Le développement d'engrais organiques à partir de déchets organiques biodégradables s'inscrit dans une vision d'agriculture durable, en accord avec les principes d'économie circulaire. Notre travail s'appuie sur ce principe en envisageant la possibilité de produire un engrais organique à partir des résidus de l'extraction d'huiles végétales (olive et lentisque) combinés à d'autres matières organiques, telles que les boues riches en matières organiques est valorisée par compostage naturel sans ajout d'additifs chimiques, afin de respecter les conditions de transformation biologique spontanée de la matière organique.

➤ Notre étude s'articule autour de la problématique suivante :

L'objectif principal de cette étude est d'intégrer ces résidus dans une approche de recyclage agricole durable pour permettre non seulement de réduire leur impact environnemental, mais aussi de contribuer à la fertilité des sols et à la productivité des cultures.

« Est-il possible de valoriser les résidus d'extraction d'huiles végétales et les déchets organiques locaux par compostage pour produire un engrais efficace et stable du point de vue agronomique ? »

➤ Pour répondre à cette problématique, on formule ces hypothèses :

- Les résidus issus de l'extraction des huiles (olives, lentisque) ainsi que les boues constituent une source riche en carbone (C), et en matière organique, ce qui les rend favorable au processus de compostage.
- Le compostage de ces résidus par voie aérobie permettrait d'obtenir un compost bénéfique pour la fertilité des sols.
- Le produit final est estimé comme une alternative crédible aux engrais chimiques dans le cadre de l'agriculture durable.

➤ **Les objectifs de cette étude sont les suivants :**

- Observer le déroulement de processus de compostage naturel
- Evaluer la qualité agronomique du compost final
- Etudier les propriétés physico-chimiques des matières premières utilisées

Notre méthode de travail repose sur l'analyses de laboratoire (MO, N, P, K, C, rapport C/N...), et des essais expérimentaux de compostage.

L'étude a été réalisé de façon pour permettre l'évaluation de l'effet du compost élaboré à partir des résidus issus de l'extraction d'huiles végétales et de boues, enrichi par un activateur biologique (fumier bovin), sur la croissance d'orge *Hordeum vulgare* L., visant à comparer les performances de ce compost à celle d'un témoin (sol non traité) ainsi qu'à un sol traité avec des engrais minéraux de type NPK.

L'étude vise à évaluer les différents modes de fertilisation sure :

- La croissance végétative de l'orge (hauteur des plantes, nombre de feuilles)
- L'impact on fonction de type de sol (sol fertile vs sol pauvre)
- L'efficacité du compost formulé comparativement au traitement chimique (NPK)

L'expérience a été réalisé dans des pots, dans des conditions de plein air à Ferjioua (Wilaya de Mila, Algérie).

La structure de ce mémoire s'articule en deux grandes parties :

❖ Une partie théorique, divisée en quatre chapitres :

- **Chapitre 1** : Cadre général de la valorisation des déchets dans l'agriculture durable
- **Chapitre 2** : Relation entre la fertilisation organique et la croissance végétale
- **Chapitre 3** : Conditions biologiques et techniques pour produire un engrais organique efficace et sûr
- **Chapitre 4** : Matières premières pour la production d'un engrais organique

❖ Une partie pratique, composée de deux chapitres :

- **Chapitre 1** : Matériel et Méthodes
- **Chapitre 2** : Résultats et discussion

Partie théorique

Chapitre 1

Cadre général de la valorisation des déchets dans l'agriculture durable

1. Qu'est-ce qu'un déchet ?

Un déchet est défini comme "toute substance ou tout objet, dont le détenteur se défait ou a l'intention ou l'obligation de se défaire". Cette définition est largement reconnue au niveau international, notamment dans la Directive européenne 2008/98/CE et reprise dans la loi algérienne n°01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets. (Fao,2001). Les déchets peuvent être solides, liquides ou gazeux, et proviennent de diverses activités humaines : domestiques, industrielles, commerciales, agricoles, médicales ou de construction :

1-1 Classification des déchets:

Les déchets en Algérie se répartissent classiquement en plusieurs catégories : ménagers et assimilés (ordures ménagères résiduelles et déchets similaires issus des commerces et services), industriels (déchets des activités industrielles non dangereux), organiques et agricoles (déchets verts, restes de culture, fumier, etc.), dangereux (déchets spéciaux contenant des substances toxiques – solvants, huiles, etc.), hospitaliers et biomédicaux (déchets de soins à risques, matériels médicaux, produits pharmaceutiques périmés), inertes (gravats et déblais du BTP) et électroniques (DEEE, déchets d'équipements électriques et électroniques).

Cette classification est reprise dans la législation algérienne (loi et décrets) et sert de base à la planification et au suivi (par exemple un plan national couvrant déchets ménagers/inertes séparément des déchets spéciaux/dangereux (Maamar 2016)

1-2 Politiques publiques de gestion des déchets:

1-2-1 Cadre légal et réglementaire:

Le cadre juridique est structuré autour de la loi n°01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, complétée par de multiples décrets d'application. Parmi ceux-ci, le décret n°02-175 du 20 mai 2002 a créé l'Agence nationale des déchets (AND) chargée de coordonner la politique nationale et d'assister les collectivités locales (Maamar 2016).

Récemment, la législation a été renforcée pour promouvoir l'économie circulaire. L'Assemblée nationale et le Conseil de la Nation ont adopté fin 2024 – début 2025 un projet de loi modifiant la loi 01-19, intégrant des principes d'éco-conception et de responsabilité élargie du producteur (REP) (Algeriainvest,2024).

Cette réforme redéfinit le déchet comme « ressource valorisable » et introduit des mesures clés : élaboration d'une stratégie nationale intégrée de gestion des déchets, mise en place d'un système numérique de suivi, plans de gestion nationaux et locaux des déchets ménagers/inertes et spéciaux/dangereux, et renforcement des sanctions incitatives (réduction des plastiques à usage unique, systèmes de consigne, etc.) (Bastien M,2025)

1-2-2 Stratégies nationales et programmes:

Dès 2001 la loi a prévu un programme national (PROGDEM) pour l'amélioration de la gestion des déchets ménagers. Un « schéma directeur » a été élaboré pour chaque wilaya afin de planifier les investissements (CET, collecte, tri). Plus récemment, le gouvernement a mis à l'étude des plans régionaux (Plans Communaux de Gestion des Déchets), encadrés par l'AND, pour coordonner les actions locales. Les textes nouveaux imposent désormais l'élaboration d'une véritable stratégie nationale de gestion intégrée des déchets et de plans spécifiques (PNGD) pour chaque typologie (ménagers, inertes, spéciaux) (Algeriainvest,2024). La transition vers l'économie circulaire est également soutenue par des feuilles de route sectorielles (par ex. traitement des biodéchets, filière d'éco-conception, lutte contre le plastique jetable).

1-2-3 Initiatives de modernisation et économie circulaire:

Depuis 2014 plusieurs projets de coopération internationale (notamment GIZ) soutiennent la modernisation du secteur. Le programme PRODEC – Gestion des déchets et économie circulaire (2014-2019) a apporté du conseil stratégique et technique (restructuration de l'AND, formation, appui aux CET, outils de gouvernance) pour rendre les services de collecte plus performants (GIZ ,2019). Des centres pilotes de formation et de tri ont été créés, et les autorités sont encouragées à utiliser le numérique (plateformes de suivi des bennes, bases de données des gisements). Au niveau législatif et économique, la transition vers l'économie circulaire est au cœur des initiatives récentes. La nouvelle loi de 2024-25 instaure la Responsabilité Elargie du Producteur (REP) pour divers produits (emballages, piles, appareils électriques, pneus, textiles, etc.), obligeant les fabricants à financer la collecte et le recyclage. Elle introduit aussi le principe d'éco-conception pour réduire à la source l'impact des produits. Des mesures soutiennent les start-ups et entreprises locales de recyclage (incitations financières, accès à la technologie) et encouragent la consommation responsable (interdiction progressive du plastique à usage unique, tarifs d'achat du compost, etc.). Parallèlement, des dispositifs de soutien voient le jour : depuis 2024 un décret exécutoire (n°24-61) octroie des allègements fiscaux aux collecteurs informels de déchets recyclables, ouvrant la voie à la formalisation des « chiffonniers » (qui récupèrent aujourd'hui la majeure partie des matériaux recyclables) (Ouamane ,2024).

2. Valorisation des déchets agricoles et ses domaines d'application :

La valorisation consiste à transformer les déchets agricole (cultures, élevage, coproduits) en nouveaux intrants réutilisables, notamment des engrais organiques. La loi algérienne définit la valorisation comme « toutes les opérations de réutilisation, de recyclage ou de compostage des déchets »(Loin° 01-19 décembre 2021), et oblige chaque producteur de déchets à les valoriser. Le compostage est l'une de ces opérations clés, c'est un processus de fermentation aérobie où

des micro-organismes décomposent les molécules organiques en présence d'oxygène et d'eau. Le résultat est le compost : une matière organique stable et riche qui se dégrade lentement pour former de l'humus. Par cette transformation, on réduit le volume des déchets (par évaporation d'eau et minéralisation) tout en libérant progressivement N, P, K et autres nutriments utiles aux sols. Le compost améliore la structure du sol et fournit des nutriments sur plusieurs mois, accroissant la fertilité durable des terres agricoles. (N'guessan 2021)

3. Rôle de l'économie circulaire dans la gestion des déchets organiques :

L'économie circulaire cherche à boucler les cycles de matière : les déchets ne sont plus considérés comme un produit à éliminer, mais comme une ressource à réinjecter dans le système. Pour les déchets organiques agricoles (litières animales, résidus de récoltes, sous-produits oléicoles, etc.), cela se traduit par le compostage, la méthanisation, ou d'autres procédés biologiques et biochimiques afin de recycler localement les nutriments. Concrètement, on vise à convertir les résidus de culture ou de transformation (feuilles, sarments, grignons d'olive, margines, engrais verts...) en amendements (composts, digestats) et/ou en bioénergie (biogaz, biomasse solidifiée). Cette approche permet de réduire les importations d'engrais minéraux (en Algérie ~100 000 t/an d'engrais N-P-K) et d'améliorer la qualité des sols et de l'eau. Les analyses montrent que, dans un modèle agricole circulaire, la valorisation des matières organiques améliore les sols et la qualité hydrique tout en réduisant les émissions polluantes (N'guessan ,2021).

4. Agriculture durable et fertilisation organique : concepts et objectifs :

L'agriculture durable courante est un modèle agricole basé sur la conservation à long terme des ressources naturelles et sur la performance de pratiques respectueuses de l'environnement. La finalité consiste à satisfaire les besoins alimentaires courants sans compromettre leur capacité de satisfaire les générations subséquentes de subvenir aux leurs. Cette approche recourt aux cultures tournantes, l'agriculture, ou l'association judicieuse des ressources en eau et en énergie, entre autres approches novatrices. De plus, l'agriculture facilite la survenue de la biodiversité, qui assure la sûreté alimentaire. (Fonds de dotation Roullier, s.d.)

L'un des fondements de cette stratégie c'est la fertilisation organique, ou l'enrichissement du sol à partir de matières organiques naturelles plutôt que des engrais chimiques de synthèse.

La fertilisation organique a plusieurs objectifs : augmenter la fertilité des sols en augmentant leur teneur en matière organique, stimuler leur activité biologique, améliorer leur structure et leur capacité de rétention d'eau, et réduire la pollution des eaux souterraines due au lessivage des nitrates. De plus, cette pratique favorise la valorisation locale des déchets organiques produits par l'agriculture, l'élevage et l'agro-industrie, dans le cadre d'une économie circulaire. Par conséquent, la fertilisation organique joue un rôle fondamental non seulement dans la

durabilité des systèmes de production agricole, mais aussi dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la garantie de la sécurité alimentaire à long terme.

5. L'importance de remplacer les engrais chimiques :

Les engrais minéraux (notamment azotés) sont responsables de graves pollutions : un excès d'azote fertilisant entraîne le lessivage massif de nitrates (NO_3^-) dans les eaux (eutrophisation, zones hypoxiques) (Naila Sumreen H, 2024)

La fabrication et l'application des engrais azotés émettent aussi beaucoup de gaz à effet de serre (principalement N_2O et CO_2) – estimé à 1,13 Gt CO_2 -eq (2018), soit 10,6 % des émissions agricoles mondiales (Menegat, S et al, 2022)

Ces apports chimiques acidifient le sol, dégradent sa structure (compactage, perte de matière organique) et perturbent les cycles biogéochimiques. Au total, l'usage intensif d'engrais de synthèse compromet la qualité des sols et des eaux, tout en dopant les émissions climatiques.

5-1 Alternatives biologiques ou durables et leurs avantages :

- **Engrais verts et légumineuses** : en pratiquant des couverts végétaux ou des légumineuses à fixation d'azote, on réduit les intrants chimiques. Ces cultures enrichissent naturellement le sol en N, protègent le sol de l'érosion et améliorent sa porosité. (Menegat, S et al, 2022)
Par exemple, l'utilisation de légumineuses associées à la culture principale diminue le besoin en fertilisation tout en structurant le sol.
- **Compost et fumier** : ces amendements organiques augmentent la matière organique des sols, ce qui améliore la rétention d'eau et des éléments nutritifs, renforce l'activité microbienne et limite le ruissellement. Des études montrent que le substitut total des engrais chimiques par du fumier accroît la qualité globale du sol en facteurs biotiques et abiotiques. (Menegat, S et al, 2022)

De fait, l'application de compost réduit les pertes de nutriments dans l'environnement et stabilise l'alimentation des plantes sur la durée. (Menegat, S et al, 2022)

5-2 Effets sur la santé du sol :

Le remplacement des engrais chimiques par des amendements organiques rétablit la fertilité du sol. Des recherches récentes montrent que les pratiques organiques maintiennent ou renforcent la diversité bactérienne du sol, contrairement aux engrais minéraux seuls qui tendent à réduire la richesse microbienne. L'application prolongée de compost ou de fumier augmente la biomasse microbienne (carbone microbien, azote microbien, activités enzymatiques) et le stock de carbone organique du sol (Shu et al, 2023). À l'échelle biologique,

Au total, les amendements organiques renforcent l'agrégation du sol, la capacité de stockage en eau, tout en diminuant l'acidité et la disponibilité des métaux lourds (Khan, 2024).

Ces changements structuraux et biologiques favorisent la résilience et la fertilité durable des sols.

Chapitre 02 :

Relation entre la fertilisation organique et la croissance végétale

1. Besoins nutritionnels fondamentaux des plantes (NPK et oligoéléments) :

Selon l'article « Nutrition des plantes pour le développement durable et la santé mondiale » les plantes ont besoin de 14 éléments minéraux pour assurer sa croissance, parmi ceux-ci figurent les macronutriments azote (N), phosphore (P), potassium (K), calcium (Ca), magnésium (Mg) et soufre (S) et les micronutriments chlore (Cl), bore (B), fer (Fe), manganèse (Mn), cuivre (Cu), zinc (Zn), nickel (Ni) et molybdène (Mo), la carence de l'un ou plusieurs de ces éléments peut limiter le rendement agricole, certains sont absorbés via la solution de sol, et certains sont ajoutés sous forme d'engrais. L'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium et le soufre, sont nécessaires en grandes quantités, le chlore, le bore, le fer, le manganèse, le cuivre, le zinc, le nickel et le molybdène sont nécessaires en plus petites quantités. (P. J. White, 2010)

2. Effets de l'engrais organique sur les propriétés du sol (physiques et chimiques) :

Les engrais organiques sont le résultat du compostage des déchets organiques après la décomposition de la matière organique. Selon (EPA U.S. Environmental Protection Agency) nos sols souffrent de la dégradation et de l'érosion de leur couche arable « environ 33 % des sols dans le monde sont modérément ou fortement dégradés », Il est donc essentiel d'utiliser l'engrais organique riche en matière organique indispensables au sol, Ceux-ci améliorent la croissance des plantes et conservent l'eau (U.S. Environmental Protection Agency)

L'utilisation de compost – produit de la décomposition contrôlée de matières organiques – améliore nettement les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, le compost fournit au sol de l'humus issu de la décomposition de la matière organique et peut agir comme une « colle » naturelle du sol, retenant les particules ensemble ce qui améliore la structure de, leur résistance à l'érosion ainsi que la capacité du sol à retenir l'humidité. Le compost s'il est appliqué à des quantités appropriées il peut régler le pH du sol (corriger l'acidité ou l'alcalinité) ce qui lui permet de mieux résister aux variations de pH (**Figure N° 01**). Le compost améliore également la capacité d'échange cationique des sols (HARRA, 2020)

Dès son intégration dans le sol, le compost l'enrichit rapidement en nutriments disponibles (NH_4^+ , NO_3^- , K^+ , etc.) et stimule l'activité biologique. Une partie significative de l'azote (quelques dizaines de %) et la quasi-totalité de certains micronutriments du compost sont disponibles la première année, favorisant la croissance initiale des plantes. L'augmentation de la porosité et de la conductivité hydraulique améliore l'infiltration et l'aération du sol, ce qui aide l'établissement racinaire et la reprise végétative.

Le compost agit aussi comme un tampon nutritif temporaire : les racines trouvent des nutriments libérés lentement, ce qui peut réduire les besoins en engrais chimiques à court terme et limiter le lessivage. En synthèse, le compost agit comme une « source vivante » d'amélioration du sol

: il augmente son activité biologique, fournit progressivement des nutriments et stabilise ses propriétés physico-chimiques.

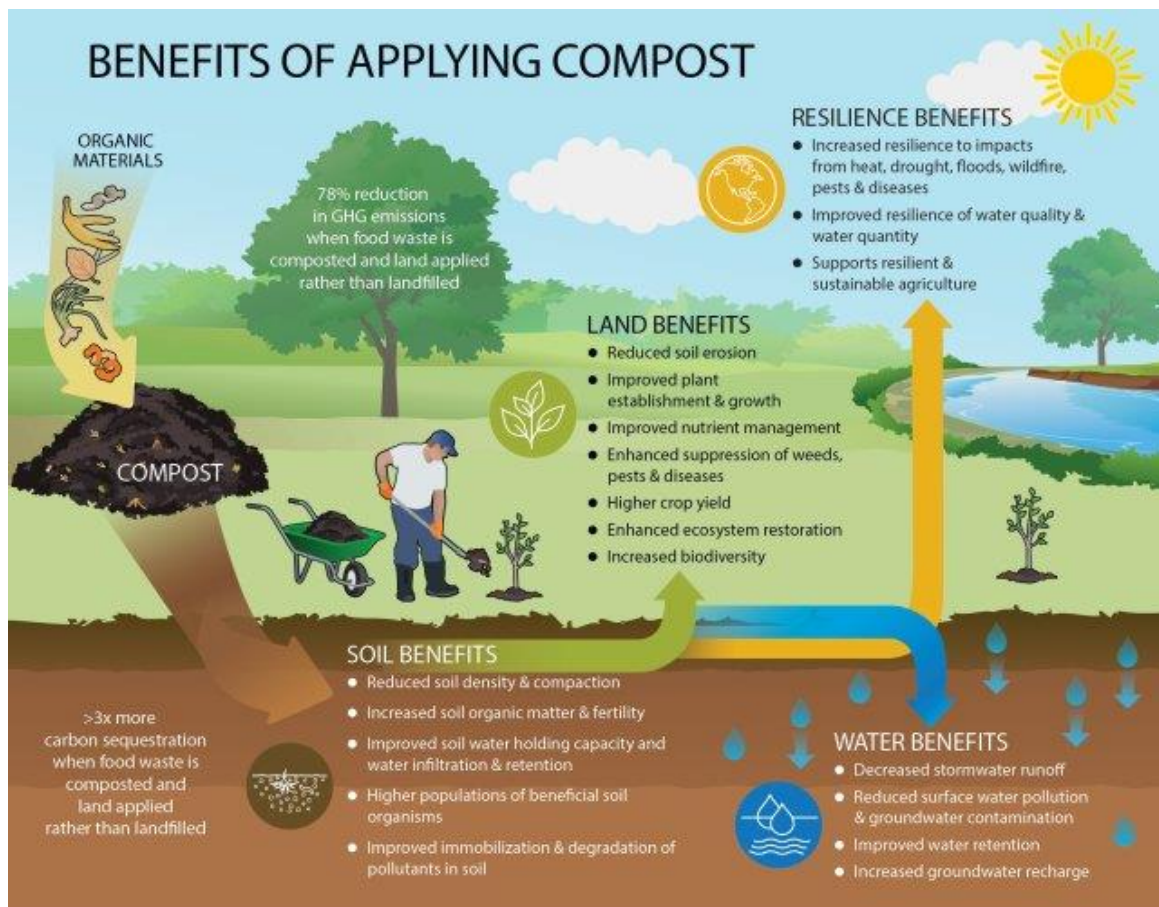


Figure 1. Benefits of Using Compost | US EPA (U.S. Environmental Protection Agency)

3. Lien entre la qualité de l'engrais et la croissance des plantes :

Un sol friable et riche en matière organique permet aux racines d'explorer de plus grands volumes et d'accéder plus efficacement à l'eau et aux nutriments, ce qui se traduit par une biomasse végétative plus élevée. Inversement, un engrais pauvre ou mal adapté (par ex. très acide, très salé, ou mal composté) peut dégrader la structure (dispersion argileuse) ou accroître la densité apparente, limitant la pénétration racinaire. Par exemple, un apport excessif de Na^+ dissout provoque la défloculation des agrégats argileux, dégradant la qualité structurale du sol. En outre, les substances issues du compost (acides humiques, fuviques) ont un rôle édaphique actif : elles complexent les métaux toxiques, stimulent la microflore bénéfique et agissent comme un « ciment » de l'agrégation. À long terme, les engrais organiques de qualité améliorent donc la fertilité globale du sol (chimiquement et physiquement), ce qui stimule la croissance racinaire et foliaire au cours des saisons suivantes (Liu et al, 2024)

De nombreux études montrent que la qualité de l'engrais organique se traduit par des différences significatives de croissance. Un produit bien composté et équilibré en éléments nutritifs favorise la croissance des plantes (hauteur, biomasse, rendement), tandis qu'un produit de moindre qualité peut retarder l'émergence, réduire la biomasse ou même causer un effet « brûlure » (concentration élevée en NH_4^+). Par exemple, dans une culture de laitue sous serre, Segatelli et al ont comparé trois composts organiques de compositions différentes : tous les engrais organiques ont donné des plants de laitue de taille et de poids frais comparables au fertilisant NPK, alors que le témoin non fertilisé avait une biomasse nettement inférieure. Ceci illustre que des composts de qualité correcte peuvent remplacer ou égaler un engrais minéral standard. (Segatelli et al ,2020).

4. Rôle des engrais organiques dans l'amélioration du rendement et de la qualité :

A. Impact à long terme sur la qualité des sols :

L'apport régulier d'engrais organique améliore durablement la fertilité des sols. En augmentant leur teneur en matière organique sous l'effet d'une fertilisation organique continue, Par exemple, après plus d'une décennie d'apports annuels de compost, le carbone organique du sol peut augmenter de 30 à plus de 70 % par rapport à un sol sous fertilisation minérale. Cette augmentation stabilise la structure de sol ainsi la régulation de Ph. Aussi l'application régulière d'engrais organique améliore la capacité de rétention en eau et d'échange cationique, ce qui favorise une bonne nutrition. Les engrais organiques soutiennent une microflore riche et diversifiée dans le sol (bactéries, champignons...) qui participent à la dégradation des résidus (Zhou et al, 2022)

Chapitre 3 :

***Conditions biologiques et techniques pour
produire un engrais organique efficace et
sûr***

1. Caractéristiques d'un bon engrais organique :

La matière organique et riche en carbone (C) et l'azote (N) deux éléments essentielles utilisées comme nutriments par les micro-organismes du sol. Ces microorganismes consomment ces nutriments et décomposent la matière organique et libèrent d'autres nutriments qu'elle contient rendant ainsi ces éléments disponibles pour les plantes. (Petit & Jobin, 2005).

Un engrais organique de qualité se caractérise par des critères essentiels, qui influencent directement l'efficacité de fertilisation de sol :

1.1. Éléments fertilisants majeurs (N, P, K, Ca, Mg...) :

Un bon engrais organique apporte les trois macronutriments essentiels nécessaires aux plantes (N, P, K)

1.2. Teneur en matière organique (%) et rapport C/N :

Le rapport C/N c'est un critère fondamental du compostage, car il permet d'équilibrer la source d'énergie le carbone (C) et l'azote (N) indispensable aux développements des micro-organismes (bactéries). Pour un compostage efficace la plupart des études recommandent un rapport initial de C/N autour de 25 :1 ou 30 :1 (Shen, 2024).

- ❖ Un mélange équilibré (matières riches en carbone + riches en azote) autour de 30 :1 favorise une croissance microbienne rapide et efficace.
- ❖ C'est le rapport initial et >40 il y'a un manque d'azote disponible pour les microbes, ce qui ralentit le processus de compostage.
- ❖ À l'inverse un rapport trop faible (<20) entraîne une minéralisation rapide et émission d'ammoniac NH_3 . Des études de compostage rapportent qu'un C/N initial trop bas libère de l'ammoniac (NH_3) ou N_2O , causant des nuisances et pertes azotées (Azis, F. A et al, 2023).

1.3. Autres propriétés chimiques (pH, capacité de rétention, minéralisation progressive) :

Un bon engrais organique a généralement un pH proche de la neutralité (6–8) afin de ne pas acidifier ou alcaliniser excessivement le sol. Il doit contenir de la matière organique stable (humus) qui améliore la capacité d'échange cationique et la rétention en eau du sol. L'humus ainsi formé stabilise la structure en formant des agrégats stables, facilitant la circulation air/eau et stockant les nutriments en surface et dans les micropores. Enfin, la minéralisation des nutriments doit être progressive : un engrais bien humifié libère peu d'azote la première année (5–10 % seulement pour un compost mature) mais nourrit la plante à long terme, évitant un lessivage rapide.

1.4. Stabilité et dégradabilité :

La stabilité biologique d'un engrais organique mesure la fraction de matière organique résistante à la dégradation rapide. Compaoré et al (2010) ont montré qu'un produit bien composté se décompose lentement, libérant progressivement ses nutriments et contribuant à la formation d'humus. En revanche, un engrais frais ou immature se dégrade rapidement (avec risques de libérer des phytotoxines ou d'aspirer l'azote du sol).

La maturité du compost (résultat d'un compostage complet) est cruciale : un compost immature peut nuire à la germination et à la croissance des cultures, tandis qu'un compost mature est exempt de mauvaises herbes et pathogènes.

Ainsi, les degrés de stabilité et de maturité du compost sont les plus importants pour sa qualité agronomique (Compaoré et al. 2010).

1.5. Absence de contaminants (pathogènes, métaux lourds) :

Un bon engrais organique doit être innocent pour la santé et l'environnement. Il ne doit pas contenir de doses élevées de métaux lourds (Cd, Pb, Hg, As, Ni, Zn, Cu, etc.), ni de polluants organiques (dioxines, HAP), ni de micro-organismes pathogènes (*Salmonella*, *E. coli*, parasites). Ces contaminants peuvent s'accumuler dans le sol ou la chaîne alimentaire, représentant un risque sanitaire. La réglementation fixe des limites strictes : par exemple, les normes européennes (directive 86/278/CEE et normes NF U) imposent des seuils maximaux pour les éléments traces métalliques et la flore pathogène dans les composts et engrais organiques.

2. Rôle des microorganismes dans la fermentation et la dégradation :

Le compostage est un processus biologique en présence d'oxygène, au cours duquel la matière organique (déchets verts, fumiers, résidus agricoles, etc.) est dégradée par des micro-organismes. (Trautmann, 1996). Au début, des bactéries mésophiles (optimum ~20–40 °C) dégradent les sucres, acides aminés et composés simples, provoquant une montée en température. Rapidement (>40–45 °C), ce sont surtout les bactéries thermophiles (genres *Bacillus*, *Thermus*, etc.) qui prennent le relais. (Trautmann, 1996). Les champignons (levures et moisissures) et les actinomycètes (bactéries filamenteuses) décomposent les matériaux plus résistants.

• Phases de décomposition dans le compostage :

On peut décomposer le compostage en 04 phases. L'évolution de la température, qui exprime l'activité des microbes liées aux modifications du milieu, est la manifestation la plus perceptible de la dynamique du compostage. Elle permet de distinguer 04 phases (Figure N° 02).

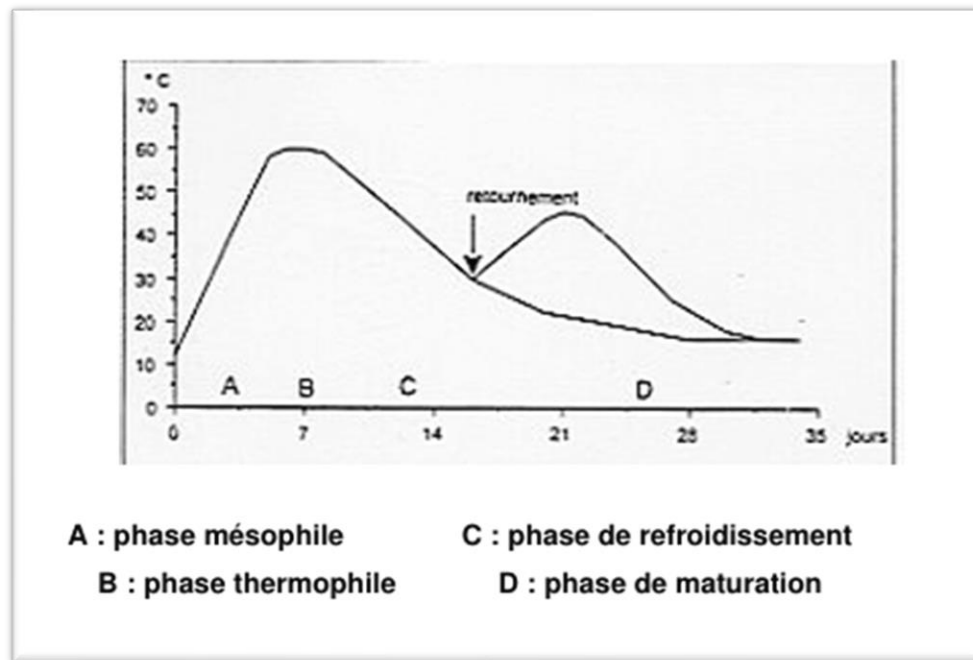


Figure 2 L'évolution de température pendant le compostage d'un fumier de bovins (Godden, 1995)

❖ La phase mésophile : (A)

C'est la phase initiale de compostage la matière organique est envahie par les micro-organismes mésophiles (bactéries et champignons). Ce qui provoque une augmentation de la température grâce à leur activité métabolique, passant généralement de 10–15 °C à 30–40 °C, accompagnée d'un dégagement important de CO₂. Entraîne une acidification de milieu ainsi une diminution de rapport N/C. Durant cette phase la dégradation de cellulose est responsable de plus de 75% de la perte de poids sec.

❖ La phase thermophile : (B)

Cette phase se caractérise par une élévation de la température (de l'ordre de 60 à 70°C). Seul Les micro-organismes thermophiles résistent à ces conditions tandis que l'activité des champignons diminue, durant cette phase les pertes en azote sont importantes, une fois minéralisé sous forme ammoniacale (NH₄⁺) peut se volatiliser sous forme d'ammoniac (NH₃). A la fin de cette phase, une perte en poids sec atteignant jusqu'à 50 %. Les hautes températures caractérisant la phase thermophile ne concernent que le centre du tas, un ou deux retournements sont nécessaires pour permettre aux matériaux situés en périphérie d'être intégrés au cœur du tas et ainsi soumis aux mêmes conditions de compostage.

❖ La phase de refroidissement : (C)

Cette phase se caractérise par le retour à la température ambiante, et le milieu est colonisée de nouveau par des micro-organismes mésophiles est continue la dégradation des polymères restés intacts en phase thermophile et incorporent l'azote dans des molécules complexes.

❖ **La phase de maturation : (D)**

Cette phase du compostage est marquée par la recolonisation du milieu par des champignons. Cette phase est plus longue que les autres phases (A, B et C), elle est déterminée par la baisse de la température (Znaïdi,2002)

3. Conditions optimales du compostage (aération, humidité, température) :

❖ **Aération :**

L'oxygène est essentiel au compostage aérobie. On recommande de maintenir la concentration en O₂ à au moins 10% pour éviter l'anaérobiose processsensing.com. Le retournement mécanique des andains (chargeur frontal ou retourner d'andain) permet d'homogénéiser la pile et de recharger l'oxygène. Il est courant de retourner fréquemment le tas en début de compostage (1 à 2 fois par jour) puis de réduire la fréquence à environ 1 fois par semaine au fur et à mesure que le compost mûrit.

❖ **Humidité :**

Nécessaire pour assurer l'activité métabolique des micro-organismes. Le compost devrait avoir une teneur en eau de 40 à 65 %. Si le tas est trop sec, le processus de compostage est plus lent, alors qu'au-dessus de 65 % d'humidité, des conditions anaérobies se rencontrent, il est conseillé de commencer le tas avec une teneur en eau de 50 à 60 %, pour atteindre à la fin du processus, une humidité de 30 %.

❖ **Température :**

Le processus de compostage met en œuvre deux gammes de température : mésophile et thermophile. Alors que la température idéale pour la phase initiale de compostage est de 20 à 45°C, par la suite, les organismes thermophiles ayant pris le contrôle des étapes ultérieures, une température située entre 50 et 70°C est idéale. Les températures élevées caractérisent les processus de compostage aérobie et sont les indicateurs d'une activité microbienne importante. Les pathogènes sont en général détruits à 55°C et plus, alors que le point critique d'élimination des graines d'adventices est de 62°C. Le retournement et l'aération peuvent être utilisés pour réguler la température. (Fao,1999)

Chapitre 4 :

Matières premières pour la production d'un engrais organique

1. Résidus d'extraction des huiles végétales :

1.1. Résidus d'olive (grignons d'olive) :

Les grignons d'olive, résidus solides issus de l'extraction de l'huile d'olive, sont composés d'une matrice lignocellulosique (cellulose, hémicellulose, lignine), des composés phénoliques, des acides uroniques ainsi que des traces d'huile résiduelle. Leur nature et leur composition dépendent du procédé d'extraction employé. On distingue principalement le pressage traditionnel et les systèmes modernes de centrifugation à deux ou trois phases (MEDOUNI-HAROUNE L, 2018) (Figure N°03).



Figure 3 Tas de grignon d'olive extrait après la trituration (Naomi T,2012)

2. Types de résidus issus de l'extraction de l'huile d'olive (solides et liquides) :

Il est essentiel de classifier correctement les sous-produits issus de l'extraction de l'huile d'olive, car de nombreuses publications utilisent ces termes de manière ambiguë. On distingue principalement deux grandes catégories :

2.1. Les sous-produits issus directement de l'huilerie :

- Le grignon brut, issu de la première pression de l'olive entière, contient encore des quantités notables d'eau (24 %) et d'huile (9 %), ce qui le rend instable à l'air libre.
- Le grignon épuisé est obtenu après extraction de l'huile résiduelle du grignon brut à l'aide d'un solvant (comme l'hexane).
- Le grignon partiellement dénoyauté provient d'une séparation partielle du noyau. Il peut être encore gras ou déjà dégraissé selon le procédé utilisé.

- La pulpe d'olive est riche en eau et issue de fruits dont les noyaux ont été extraits avant pressage.
- Les margines sont les résidus liquides qui se séparent de l'huile après centrifugation.
- Les feuilles de lavage proviennent du nettoyage des olives à l'entrée de l'huilerie.

2.2. Les résidus de taille ou de récolte :

Les feuilles et petites branches récupérées après la taille peuvent être utilisées comme fourrage pour les ruminants. (FAO, s.d.)

3. Quantités produites annuellement en Algérie cas de la wilaya de Mila :

Selon la Direction des Statistiques Agricoles et des Systèmes d'Information, la wilaya de Mila se distingue par une activité oléicole en plein essor .la superficie consacrée à la culture de l'olivier et estimée à **9 778 hectares**, avec un total de **1 145 950 Oliviers**. Parmi ceux-ci, **977 750** arbres sont plantés d'une manière groupée dans des vergers organisés, tandis que **168 200** arbres sont isolés, environ **850 000** arbres sont actuellement en phase de productions. L'intérêt croissant des agriculteurs pour la culture de l'olivier s'explique par sa résistance aux conditions climatiques difficiles, sa rentabilité économique (**Figure N° 04**), ainsi que par la demande nationale constante et croissante en huile d'olive (MADR ,2019)

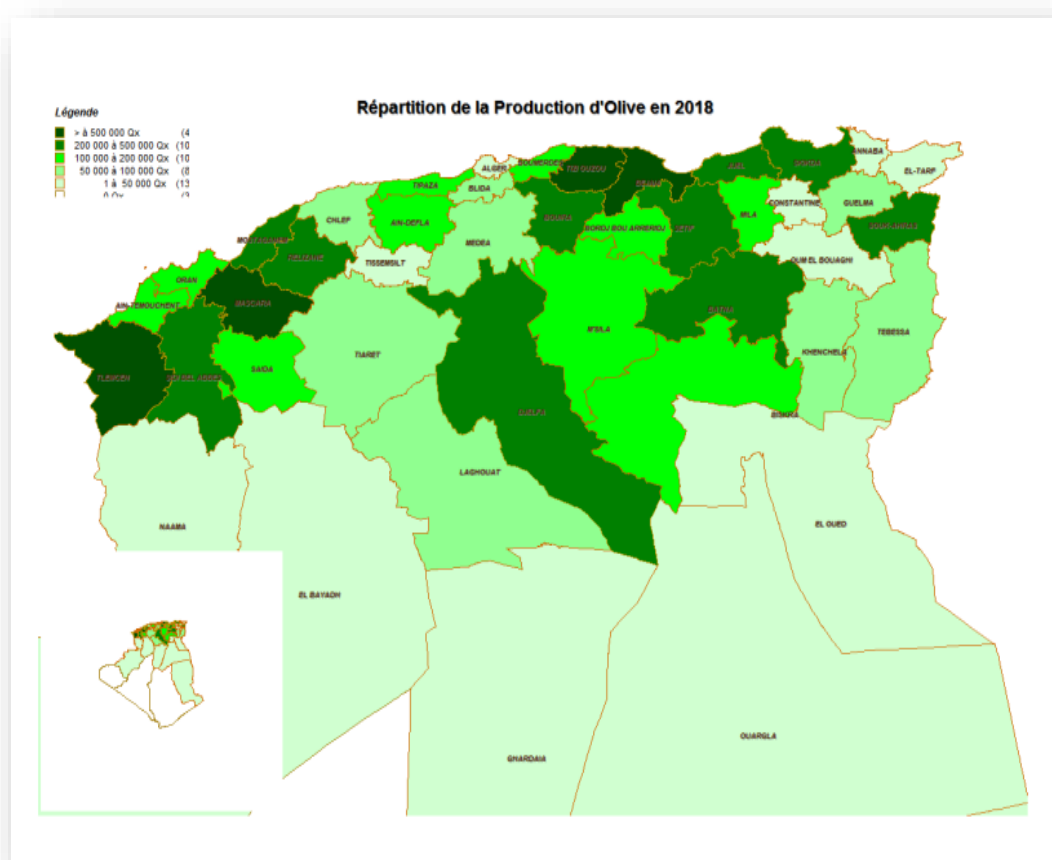


Figure 4 Répartition de la production d'olive 2018(MADR ,2019)

4. Compositions physico-chimiques :

Les grignons d'olive épuisés et les margines sont deux sous-produits issus de l'extraction de l'huile d'olive, qui posent de gros problèmes environnementaux dans la région méditerranéenne. Selon une étude réalisée par M'sadak et ses collaborateurs (2015) à Kalâa Kébira, dans le Sahel tunisien, intéressée à la caractérisation de ces résidus pour évaluer leur potentiel de compostage, et Selon les résultats obtenus, les grignons épuisés sont très secs, **riches en carbone et en fibres brutes**, mais **pauvres en azote**. Cette composition permet leur compostage, à condition de les mélanger avec d'autres déchets organiques comme des déchets verts broyés ou du fumier animal (bovin, ovin ou avicole). En plus, l'humidité nécessaire au processus de compostage peut être assurée en utilisant les margines, ce qui permet aussi d'enrichir le compost en éléments minéraux, l'amélioration de l'activité de la flore microbienne, et d'améliorer la fertilité des sols. (M'sadak et al, 2015)

Les grignons d'olive sont très riches en matière organique mais aussi en eau. Leur humidité est élevée (80 %). Ils présentent une forte teneur en carbone organique (environ 45–50 % de la matière sèche) et une matière organique totale de l'ordre de 70–80 % du sec. En revanche, leur teneur en azote total est faible ($\approx 0,8$ – $1,0$ % du sec), d'où un rapport C/N initial élevé (souvent 30–60, typiquement ≈ 50 –60). Les grignons ont également un pH acide, typiquement autour de 5,0 (souvent 4,8–5,3 selon les analyses) (Ameziane et al, 2020).

Ce déchet contient des composés secondaires influents pour le compostage :

- **Cellulose, hémicellulose, lignine** : ce sont les composants majeurs de la fraction lignocellulosique. Selon la littérature, la cellulose représente environ 13.8–30 % de la matière sèche, l'hémicellulose 18.5–32 % et la lignine ~ 30 –42 % (Freitas, L et al, 2022). Ces valeurs varient selon la variété et le procédé d'extraction (3- ou 2-phases).
- **Lipides résiduels** : une petite fraction d'huile reste dans les grignons (environ 3–8 % du poids humide)
- **Composés phénoliques** : les grignons contiennent des polyphénols ($\sim 10\,000$ – $23\,000$ ppm). (International Olive Council 2019).

Les valeurs typiques rapportées dans la littérature sont résumées dans le tableau 01 ci-dessous :

Tableau 1 Compositions physico-chimiques des grignons d'olive (Freitas, L et al,2022)

Paramètre	Valeur typique (plage)
Humidité (matière fraîche)	≈50–80 %
Matière organique (MS)	≈70–80 %
Carbone organique (MS)	≈45–50 %
Azote total (N) (MS)	≈0,8–1,0 %
Rapport C/N	≈30–60 (typiquement 50–60)
PH	≈5,0 (4,8–5,3)
Cellulose (MS)	14–30 %
Hémicellulose (MS)	19–32 %
Lignine (MS)	30–42 %
Lipides (huile résiduelle) (MS)	3–8 %
Composés phénoliques	(10 000–23 000 ppm)

5. Potentiel agronomique des résidus d'olive :

5.1. Rôle dans l'amélioration des propriétés du sol (structure, aération, capacité de rétention en eau...) :

Une étude menée par Ghaida Abu-Rumman (2016) a pour objectif d'étudier les modifications dans le sol ainsi que les propriétés physiques résultant de l'ajout des déchets solides de moulin à olive, telle que Profondeur de pénétration, capacité de rétention d'eau, apport accumulé et densité apparente. L'étude a été réalisée sur deux types de sols : un sol argileux et un sol argileux-sableux, les résultats ont montré que l'ajout des résidus d'olive améliore les propriétés physiques des sols testés par rapport aux sols non traités (témoins).

Cette étude montre que l'ajout des résidus d'olive peuvent constituer un amendement organique efficace, et capable d'améliorer la structure physique des sols, enrichir leur teneur en matière organique et de renforcer leur capacité de rétention en eau. (Ghaida, 2016)

5.2. Effets sur l'activité microbienne du sol :

5.2.1. Effets du grignon brut sur la biomasse et l'activité microbienne :

Une étude expérimentale menée par Saviozzi et al (2001) a évalué l'effet de l'application du grignon d'olives sur les propriétés microbiologiques des sols. L'expérience a consisté à incorporer différentes doses de grignon (40,81,120 et 160 tonnes par hectare) dans des échantillons du sol incubé en conditions aérobies, afin d'analyser l'évolution de la biomasse microbienne, l'activité biologique et la minéralisation du carbone

L'étude a montré que l'ajout des grignons d'olive au sol (40 t/h) a influencé de façon significative sur la biomasse et l'activité microbienne, notamment durant les premières

semaines de l'incubation, les résultats indiquent que les micro-organismes ont tiré profit de la matière organique contenu dans les grignons comme source d'énergie et de carbone. Lorsque la dose appliquée est augmentée (80,120,160, t/h) une augmentation de la biomasse carbonée est observée accompagnée d'une diminution de l'activité microbienne (Saviozzi, 2001).

5.2.2. Effets sur la diversité et abondance microbienne :

L'apport de grignon brut modifie la structure des communautés microbiennes. Les bactéries sporogènes (ex. *Bacillus*), les Actinobactéries et les levures voient généralement leur abondance augmenter en présence de grignon. En conditions d'apports successifs à long terme, les champignons, en particulier, deviennent plus abondants que les bactéries, vraisemblablement parce qu'ils décomposent en priorité la matière organique facilement dégradable (fractions labiles). Ainsi, le ratio champignons/bactéries dans le sol augmente sous amendement prolongé de résidus oléicoles. (Spyridon, 2013)

2. Valorisation des boues dans la production d'engrais organiques :

2.1. Définition et origine des boues :

Les boues d'épuration sont les résidus issus des stations d'assainissement, la loi n°05-12 du 4 août 2005 relative à l'eau impose au concessionnaire de service d'assainissement de prendre en charge « la collecte, l'évacuation et l'épuration des eaux usées ainsi que le traitement des boues résultant de l'épuration en vue de leur élimination finale ».

Également, le décret exécutif n°10-23 (17 jan 2010) sur les systèmes d'épuration précise qu'une station d'épuration comprend « une filière de traitement des eaux usées ainsi qu'une filière spécifique de traitement des boues issues de l'épuration ». En pratique, les boues d'épuration sont classées comme déchets spéciaux dangereux. La loi n°01-19 du 2001 (Joradp, 2001) (Déchets) interdit en particulier leur enfouissement non contrôlé (Figure N° 05).



Figure 5 séchage solaire des boues– procédé Heliantis (SUEZ)

2.2. Classification des types de boues :

On classe les boues d'épuration selon origine, leur composition et les procédés de traitement appliqués, on distingue :

- **Boues primaires** (décantation primaire) : issues de la décantation physique des eaux usées brutes (bassin de décantation). Elles contiennent des particules grossières (sables, matières inorganiques) et des matières organiques particulières. Elles ont un pouvoir de décantation élevé et une densité relative élevée (INRAE ,2020).
- **Boues biologiques (secondaires ou activées)** : issues du traitement biologique aérobie des eaux usées (boues activées, boues humiques). Ce sont essentiellement des floccs microbiens (micro-organismes aériens) formés lors de l'aération. Elles sont de couleur brun-jaunâtre, très humides (siccité brute $\approx 1-2\%$ MS) et difficiles à décantation. Leur fraction minérale est plus faible, mais elles sont plus *minéralisées* (c'est-à-dire déjà partiellement digérées) que les boues primaires. En pratique, la plupart des stations (capacité $>2\,000$ EH) ne produisent quasiment que des boues activées (Amorce ,2012).
- **Boues tertiaires (ou physico-chimiques)** : produites par un traitement de « polissage » (nitrification, déphosphatation chimique, filtration, etc.). Dans l'épuration tertiaire, on ajoute souvent des coagulants (sels de fer ou d'aluminium) pour éliminer N ou P. Les boues tertiaires sont proches des boues biologiques en composition (floccs bactériens) mais présentent une concentration en MES plus faible. Elles sont plus difficiles à déshydrater du fait des agents flocculants et contiennent des précipités métalliques. Par exemple, la déphosphatation chimique entraîne des boues riches en fer ou aluminium fixant le phosphore. (INRAE ,2020).

➤ **Boues mixtes** : mélange de boues primaires et biologiques (et parfois tertiaires) issue de l'ensemble de la STEP. Elles héritent des caractéristiques intermédiaires des deux types. Les boues contiennent aussi divers contaminants tels les métaux lourds (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn...), les micro-organismes pathogènes, et les résidus pharmaceutiques en faibles concentrations.

2.3. Caractéristiques physico-chimiques des boues :

Les boues urbaines déshydratées (issues de STEP) contiennent typiquement de l'ordre de 10–30 % de matière sèche (MS), selon le degré de traitement (boue « pâteuse » vs « solide »). Leur matière organique représente une large fraction de la MS, typiquement 40–80 % de la MS. Elles sont en outre riches en nutriments : la teneur en azote total est souvent de l'ordre de 1,6–6 % sur MS, dont une fraction ammoniacale non négligeable (qui peut atteindre 20–50 % de l'azote total après stabilisation). Le phosphore (P_2O_5) vaut en général 1–4 % de la MS et le potassium (K_2O) est plus faible (typiquement 0,2–1 % de la MS). Ces boues constituent ainsi un amendement organo-minéral, apportant carbone (MO), N et P.

Tableau 2 Paramètres physico-chimiques typiques des boues déshydratées

Paramètre	Valeurs typiques (boues déshydratées)
Matière sèche (MS)	~10–30 % (boues pâteuses à solides)
Matière organique (MO) (% MS)	40–80 % de la MS
Azote total (N) [%MS]	1,6–6 %
Azote ammoniacal (NH_4-N) [%MS]	≈20–50 % de N_{total} (variable)
Phosphore (P_2O_5) [%MS]	1–4 %
Potassium (K_2O) [%MS]	0,2–1 %
PH	≈6–8 (souvent ≈ neutre)
Conductivité électrique	Élevée (plusieurs dS/m, dûe aux sels et NH_4)
Rapport C/N	Typ. <20 (compost mature visé ≤15–20)

Le pH des boues fraîches est généralement proche de la neutralité ou légèrement basique, et la conductivité électrique est relativement élevée en raison de la teneur en sels dissous et en ammonium. Un bon rapport C/N (souvent <20 dans un compost mûr) est recherché pour l'amendement final.

2.4. Métaux lourds (valeurs et seuils) :

Les boues d'épuration peuvent concentrer des métaux lourds issus des effluents urbains. Les teneurs varient beaucoup selon l'origine, mais pour fixer les idées, les limites réglementaires européennes (Directive 86/278/CEE) stipulent des valeurs maxi par kg de MS de boue : **Cd 20–40, Cu 1000–1750, Ni 300–400, Pb 750–1200, Zn 2500–4000, Hg 16–25** (mg/kg MS). Le chrome n'était pas fixé dans la directive originelle. Ces seuils varient selon les pays et normes nationales, mais donnent l'ordre de grandeur (par ex. l'arrêté français 1998 fixe $Cd \leq 10$, $Cu \leq 1000$, $Ni \leq 50$, $Pb \leq 800$, $Zn \leq 3000$ mg/kg MS). En pratique, des boues “bonnes pour compost” restent souvent bien en dessous des limites supérieures, mais la concentration en Zn et Cu peut s'approcher de quelques centaines à mille mg/kg.

Tableau 3 Valeurs limites (mg/kg MS) des métaux lourds selon Directive UE 86/278

Métal	Directive UE 86/278 (valeurs limites, mg/kg MS)
Cadmium (Cd)	20 – 40
Cuivre (Cu)	1 000 – 1 750
Nickel (Ni)	300 – 400
Plomb (Pb)	750 – 1 200
Zinc (Zn)	2 500 – 4 000
Mercure (Hg)	16 – 25
Chrome (Cr)	Non défini dans directive

➤ Indices de stabilité/maturité

En compostage, les boues (très riches en N et avec C/N initial faible) sont mélangées à des supports carbonés pour améliorer le rapport C/N. Un bon compost mûr issu de boues compostées présente typiquement un rapport **C/N ≤ 20 –30**. La norme NF U44-051 ou NF U44-095 pour composts exige une analyse du C/N, dont la valeur est généralement précisée sur les certificats de produit (mais sans seuil réglementaire strict). Un autre indicateur de stabilité souvent utilisé est le **rapport NH_4/N** : un compost « mûr » aura un faible taux d'azote ammoniacal résiduel (NH_4-N) par rapport à l'azote total.

➤ **Normes internationales et recommandations :**

La **directive européenne 86/278/CEE** (1986) régit l'épandage agricole des boues (urbaines/mixtes). Outre les seuils métalliques ci-dessus, elle impose l'analyse semestrielle des boues (MS, MO, pH, N, P, Cd, Cu, Pb, Zn, Hg, Cr) et limite l'apport annuel de métaux (par ex. $Cd \leq 0,15 \text{ kg/ha/an}$ sur 10 ans). Elle recommande d'interdire l'épandage sur sols acidifiés ($pH < 5$) ou de chauler les boues sur sols $5 < pH < 6$.

La **norme ISO 19698 :2020** (Valorisation des boues – usage agricole) fournit un cadre de bonnes pratiques (traitement des boues, contrôle des pathogènes, choix des sites, etc.) pour garantir une valorisation durable et sécuritaire des boues sur sol. Elle ne fixe pas de nouvelles valeurs limites de métaux, mais souligne l'importance de traiter les boues pour réduire leur fermentescibilité et leurs contaminants.

D'autres organismes (OMS/FAO) évoquent la sécurité sanitaire (réduction des pathogènes) plutôt que des critères chimiques précis. Le **Codex Alimentarius FAO/OMS** recommande par exemple de privilégier des fertilisants organiques à faible teneur en Cd, mais sans norme chiffrée globale pour les boues.

2.5. Traitements des boues avant valorisation agricole :

Le traitement des boues d'épuration varie suivant l'utilisation que l'on souhaite en faire : le recyclage, l'élimination, la revalorisation énergétique ou la mise en décharge.

2.5.1. Épaississement :

- **Objectif** : réduire le volume des boues en concentrant les solides, pour faciliter les étapes suivantes.
- **Principe** : séparation solide/liquide par décantation gravitaire (bassins) ou procédés dynamiques (flottaison, centrifugation, etc.) après ajout éventuel de flocculants.
- **Avantages** : procédé simple et peu énergivore, coût d'exploitation faible, préparation efficace à la déshydratation ultérieure.
- **Inconvénients** : siccité limitée (ténacité en MS typiquement 2–10 % seulement, la boue reste fluide. Pas de stabilisation biologique ni d'élimination des pathogènes (pas de réduction notable du pouvoir fermentescible).
- **Effet sur la qualité** : aucune stabilisation ou hygiénisation supplémentaire. Nutriments et polluants sont simplement concentrés par la perte d'eau. La boue épaissie conserve sa biodégradabilité et sa fertilité originelle (matière organique, N, P) sans amélioration de stabilité ni neutralisation des germes (Berland, 2024).

2.5.2. La déshydratation :

Pour but d'augmenter la siccité des boues le résultat est une boue pâteuse ou solide (siccité comprise entre 15 % et 40 %). Il Existe 02 techniques de déshydratation :

- La déshydratation mécanique
- La déshydratation par géomembranes : technique plus récente. (Centre d'Information sur l'Eau)

2.5.3. Le séchage :

Procédure permet le séchage complète de la boue, pour faciliter le stockage et le transport des boues, Il existe deux types de séchage :

- **Le séchage thermique** : direct ou indirect, permettant d'atteindre un taux de siccité de 95 %
- **Le séchage thermique** : utilise les rayons de soleil (Le Centre d'Information sur l'Eau)

Enfin, Pour transformer les boues en compost destiné à un usage agricole, une stabilisation biologique (aérobie) en présence d'oxygène est nécessaire.

2.6. Avantages agronomiques de l'utilisation des boues :

L'utilisation des boues sous forme de compost présente de nombreux avantages agronomiques, tant pour les plantes que pour le sol. Riche en matière organique, elle contribue à l'amélioration de la structure se sol et sa porosité ainsi que sa stabilité structurale, cela favorise l'infiltration de l'eau et le développement des racines de façon générale la fertilité des sols(Bouras,2024).Les boues sont aussi considérées comme une source naturelle d'éléments nutritifs nécessaire pour la croissance des plantes tel que l'azote, le phosphore, le potassium et des oligo-éléments tels que le soufre, le calcium, le zinc ou le cuivre (FNADE, Fédération Nationale Des Activités De La Dépollution Et De l'Environnement). Lors de son incorporation au sol, une fraction importante de cet azote organique se minéralise en ammonium et nitrate, environ 40–50 % de l'azote organique des boues est rendu disponible la première année (JEMALI et al,1998)

2.7. Cadre réglementaire pour les boues:

❖ Réglementations et normes nationales :

En Algérie, il n'existe pas de texte spécifique encadrant la valorisation agricole des boues :

« L'Algérie ne dispose pas de textes réglementaires concernant la gestion des boues résiduelles » (Brahimi ,2022). Elle relève donc des lois générales sur les déchets et l'environnement. La législation algérienne interdit l'enfouissement des déchets valorisables, pourtant les boues sont majoritairement éliminées. A cet égard, une norme algériennes relative à la valorisation des boues (NA 17731) a été élaborée par le ministère des Ressources en Eau, de plus un guide technique sur les bonnes pratiques d'utilisation agricole des boues a été réalisé par la DAPE en

2015, est en cours d'approbation par l'Institut Algérien de Normalisation (IANOR). (Farah Hamamouche Et Tariq Hartani,2022)

Plusieurs normes algériennes ont été élaborées dans cette optique :

- **NA 17671 (2010)** : relative aux matières fertilisantes et spécifiant les dénominations et caractéristiques des boues issues des ouvrages de traitement des eaux usées urbaines (IANOR, 2014).
- **NA 17672 (2011)** : concernant les amendements organiques, notamment les composts contenant des matières d'origine épuratoire (IANOR, 2014).
- **NA 17731 (2016)** : encadrant la valorisation agricole des boues résiduelles issues des stations d'épuration.
- En complément, un guide technique sur les bonnes pratiques agricoles liées à l'usage de ces boues, élaboré par la DAPE (2015), est en attente d'approbation officielle par l'IANOR.

Ces normes visent notamment à :

- Définir les dénominations et spécifications des boues ;
- Préciser les modalités de leur usage en agriculture ;
- Établir des restrictions d'utilisation en fonction des teneurs en éléments traces métalliques et en agents pathogènes ;
- Fixer les seuils maximaux admissibles pour les métaux lourds. (Farah Hamamouche Et Tariq Hartani,2022)

3. Valorisation du lentisque (*Pistacia lentiscus*) dans la production d'engrais organiques :

3.1. Description botanique du lentisque (*Pistacia lentiscus*) :

Comme le décrivent Vennetier et al. (2022) : « *Le pistachier lentisque (*Pistacia lentiscus* L.), parfois appelé aussi arbre à mastic, est un arbuste ou petit arbre tortueux et branchu à feuillage persistant, typique des garrigues et maquis méditerranéens. Il ne dépasse pas, sauf exception, 6 à 8 m de haut et 15 cm de diamètre à la base, et la plupart des individus rencontrés dans la nature ont une hauteur et une envergure de 2 à 3 m. Cependant, il possède intrinsèquement un potentiel beaucoup plus important : un individu exceptionnel en Corse qui aurait entre 800 et mille ans, élu arbre de l'année pour la France en 2011, possède un tronc de 60 cm de diamètre, approchant 50 cm pour ses plus grosses branches, une hauteur de 7 m, et un houppier de 80 m² (Figure N° 06). Il serait le plus vieux pistachier lentisque du bassin méditerranéen.* » (Vennetier et al,2022).



Figure 6 *Pistachier lentisques* (Isabelle M,2024)

3.2. Classification taxonomique :

Pistachier lentisques appartient à la famille des Anacardiaceae (Boukeloua A, 2009)

D'après (Quezel P. et Santa S., 1962) cité par Boukeloua A 2009, quatre espèces représentent le genre *Pistacia* en Algérie :

- *Pistacia lentiscus*,
- *Pistacia terebinthus*,
- *Pistacia vera*
- *Pistacia atlantica*

Règne : Plantae

Embranchement : Spermatophyta

(Angiospermae)

Classe : Dicotyledones

Ordre : Sapindales

Famille : Anacardiaceae

(Pistaciaceae) (Boukeloua A, 2009)

Valorisation des résidus issus de l'extraction de l'huile de *Pistacia lentiscus* :

À ce jour, aucune étude approfondie ne semble avoir été menée sur la valorisation des résidus issus de l'extraction de l'huile de *Pistacia lentiscus* en tant qu'amendement ou fertilisant organique. Cette absence de données scientifiques représente à la fois une lacune à combler et une opportunité unique pour proposer une approche innovante, locale et durable de gestion des déchets organiques. Le présent travail s'inscrit dans cette logique, en cherchant à évaluer pour la première fois le potentiel agronomique de ces résidus dans un contexte algérien.

Partie expérimentale

Chapitre 01

Matériel et Méthodes

L'objectif de cette étude c'est d'évaluer l'efficacité d'un engrais organique élaboré à partir d'un mélange des résidus d'extraction d'huiles végétales (huile d'olive et huile de lentisque), et les boues issues des stations d'épuration, avec l'ajout d'un activateur biologique (fumier bovin). Avec ce travail, nous cherchons à répondre à un double objectif : valoriser des résidus biodégradables et améliorer la qualité des sols. On vise à déterminer l'effet de cette engrais organique sur la croissance du l'orge, cultivé dans deux types de sol contrasté (un sol fertile et un sol pauvre) face à un sol témoin sans apport d'engrais et un sol traité avec un engrais minérale de type NPK. L'étude a été réalisé dans la région de Ferjioua Wilaya de Mila (Algérie), Pour déterminer l'effet de cet engrais sur l'orge plusieurs paramètres ont été suivis : la hauteur des plantes, le nombre des feuilles, ainsi que la couleur des feuilles, ce dernier qui indique l'état nutritionnel des plantes. Pour justifier scientifiquement le dosage et le mélange des composants on a réalisé des analyses physico-chimiques au niveau d'un laboratoire privé (AIDA lab), En prenant en considération le rôle de stimulateur biologique (fumier bovin) pour accélérer le processus de compostage.

L'étude répond à deux problématiques majeurs : la gestion durable et la valorisation des résidus agro-industriels, ainsi que l'amélioration de la fertilité des sols. Elle présente un intérêt à la fois scientifique, environnementale et sociologique.

L'utilisation de ces déchets polluant permet leur transformation en un intrant de haute valeur ajoutée. L'étude s'appuie sur les principes de l'économie circulaire, avec un soutien à l'agriculture durable. Scientifiquement, cela nous permet de mieux comprendre l'efficacité des engrais par rapport aux engrais chimiques.

Le but de cette initiative est d'offrir aux agriculteurs locaux une solution concrète et peu coûteuse, qui remplace totalement ou partiellement les engrais chimiques souvent importé et très chers. En soutenant une agriculture durable et mieux adaptée aux conditions locales.

1.1. Matériel :

Afin d'évaluer l'efficacité de notre produit, plusieurs types de matériaux ont été utilisé, dans cette section on va détailler les différents **résidus utilisés dans la formulation de compost**, types de **sols** et plante **test**.

a) Résidus :

On a choisi trois types de résidus pour leur disponibilité locale, leur richesse nutritive et leur potentiel agronomique :

- **Résidus d'extraction de l'huile d'olive** : Des sous-produits issus de l'extraction de l'huile d'olive fournis par les moulins de l'huile d'olive

- **Résidus d'extraction de l'huile de lentisque (*Pistacia lentiscus*)** Des sous-produits issus de l'extraction de l'huile de lentisque, Ces résidus sont fournis par les moulins d'huile de lentisque,

- b) Les boues (fournis par la station d'épuration des eaux usées de Ferdjioua et oued-endja zeghaia) :**

Un complément azoté permettant de rééquilibrer le mélange et de stimuler la dégradation des matières lignocellulosiques.

- c) Fumier bovin :**

Utilisé comme activateur biologique : Enrichit le substrat en micro-organismes décomposeurs ce qui accélère le processus de compostage et à l'amélioration de la qualité finale du compost.



Figure 7 (Photo personel,2025).

- d) Plante test : l'orge (*Hordeum vulgare* Variété Saïda 83) :**

La plante choisie est l'orge, variété Saïda 83, une variété algérienne traditionnelle, adaptée aux conditions semi-arides (figure 01). Ce choix repose sur sa sensibilité aux carences en nutriments (notamment N, P, K) et sa réponse rapide à la fertilisation.



Figure 8 variété Saïda 83 (Photo personel,2025).

e) Sols utilisés :

L'étude a été réalisée sur deux types de sols prélevés dans la région de Ferdjioua (wilaya de Mila) :

- **Un sol de bonne qualité :** texture équilibrée, structure meuble, bon drainage et bonne fertilité naturelle (figure 02). Le sol qualifié de bon a été prélevé dans une zone reconnue localement pour sa fertilité naturelle (forêt) le choix s'est appuyé sur plusieurs critères comme :
 - ❖ Présence de végétation dense.
 - ❖ Couleur foncé

Ces observations permettent de supposer que ce sol présente des caractéristiques favorables à la croissance végétale.

- **Un sol de mauvaise qualité :** compact, pauvre en matière organique, faible rétention d'eau et faible activité microbienne (figure 03). Prélevé dans une zone dégradée, reconnue par sa faible productivité naturelle. Le choix s'est basé sur les critères visuelles suivants :
 - ❖ Sol clair et compact, avec peu de couverture végétale.
 - ❖ Absence d'humus visible

Ces caractéristiques indiquent un sol structurellement et biologiquement appauvri, nécessitant une amélioration par apport organique.



Figure 9 Sol de bonne qualité (Photo personel,2025).



Figure 10 Sol de mauvaise qualité (Photo personel,2025).

1.2. Méthodes :

1.2.1. Analyses physico-chimiques (boues /tourteaux) :

Afin d'élaborer un mélange équilibré, chaque matière première (résidus) a été analysé séparément pour déterminer : les teneurs en azote (N), phosphore (P), potassium (K), carbone (C), pH, humidité, conductivité électrique (CE), ainsi que le rapport C/N), en ajustant les proportions de chaque composant selon ses propriétés chimiques.

On ce qui concerne les boues utilisés les analyses des métaux lourds sont fournis sous formes des bulletins par les établissements concernés (STEP Ain Baida Ahrich -Ferjioua et STEP d'oued endja zeghaia) (Tableau 04)

Tableau 4 Méthode d'analyse des métaux lourds des boues

Élément	Méthode d'analyse
Nickel (Ni)	Diméthylglyoxime
Chrome (Cr)	DIN EN ISO 7393 G4-2
Cuivre (Cu)	Cuprizone
Cadmium (Cd)	Dithizone
Plomb (Pb)	Dithizone
Zinc (Zn)	APHA 3500-Zn F
Mercure (Hg)	Vapeur

a. Préparation de compost :

❖ **Mode opératoire :**

Afin de déterminer la teneur en éléments essentielles de chaque composant, des analyses physico-chimiques individuelles ont été effectuées dans un laboratoire privé (AIDALAB) :

- La teneur en azote total (N)
- Le rapport C/N
- La teneur en phosphore (P), potassium (K) et le carbone (C)
- L'humidité et la conductivité électrique (CE)

Le dosage a été effectué Selon les protocoles établis par le laboratoire (AIDALAB) :

➤ **Dosage de l'azote total par la méthode de Kjeldahl :**

✓ **Matériel et équipements nécessaires :**

- Balance de précision (0,1 mg)
- Hotte chimique
- Gants résistants aux acides
- Verrerie de laboratoire : fiole jaugée, pipette, poire à pipette, éprouvette graduée, entonnoir (100 ml), fiole de Kjeldahl, fiole conique
- Appareil Kjeldahl (manuel ou automatisé) pour l'analyse des protéines.

✓ **Produits chimiques et réactifs :**

- Acide sulfurique concentré
- Catalyseur (mélange catalytique Kjeldahl)
- Acide borique à 4 %

- Solution d'hydroxyde de sodium à 40 %
- Acide chlorhydrique normalisé 0,1 N
- Indicateur coloré (rouge de méthyle)

Remarque : La préparation correcte des produits chimiques et des réactifs est essentielle pour garantir la précision des analyses.

✓ **Protocole expérimental :**

Étape 1 : Digestion

- Peser 2 g de l'échantillon homogénéisé, puis le placer dans une fiole de digestion.
- Peser 2 g de catalyseur et l'ajouter dans la même fiole contenant l'échantillon.
- Ajouter 20 ml d'acide sulfurique concentré.
- Agiter lentement pour bien mélanger les composants.
- Placer la fiole sur le digesteur Kjeldahl.
- Mettre en marche le système d'élimination des gaz et chauffer à 300–320 °C pendant 2 heures.
- À la fin de la digestion, le mélange doit être clair et de couleur vert clair.
- Laisser refroidir à température ambiante avant de passer à la distillation.
- Diluer le digestat avec 15 à 20 ml d'eau distillée, bien agiter.
- Transférer le contenu dans une fiole jaugée de 100 ml, compléter jusqu'au trait avec de l'eau distillée.

Étape 2 : Distillation

- Mesurer 30 ml d'acide borique à 4 % et le verser dans une fiole conique.
- Placer cette fiole à la sortie du condenseur pour recueillir le distillat.
- Verser 10 ml du jus digéré dilué dans le ballon de distillation.
- Ajouter successivement :
 - 50 ml de solution de NaOH à 40 %
 - 50 ml d'eau distillée
- Lancer l'unité de distillation et chauffer à 150 à 200 °C.
- Collecter environ 100 ml de distillat dans la fiole contenant l'acide borique.

Étape 3 : Titrage

- Préparer une burette contenant de l'acide chlorhydrique 0,1 N standardisé.
- Ajouter quelques gouttes d'indicateur rouge de méthyle dans la fiole contenant le distillat.
- Le mélange passera du transparent au jaune.
- Titrer avec l'HCl 0,1 N jusqu'au virage à l'orange.

- Noter le volume d'HCl utilisé en soustrayant la lecture initiale de la burette de la lecture finale.

Calculs :

- Mpe : Masse de l'échantillon (en grammes)
- V1 : Volume d'HCl 0,1 N utilisé lors du titrage
- N1 : Normalité réelle de l'HCl utilisé (souvent 0,1 N, à ajuster si nécessaire)
- F1 : Facteur d'acide (valeur prise : 1)
- Mn : Masse molaire de l'azote = 14,007
- F2 : Facteur de dilution = 10 (car seulement 10 ml sont utilisés sur un total de 100 ml de digestat)

Formule de calcul de la teneur en azote (% N) :

$$N\% = \frac{V1 * N1 * F1 * Mn}{Mpe * F2}$$

➤ Remarques finales :

- Cette méthode permet de déterminer la teneur totale en azote d'un échantillon, et par extrapolation, la teneur en protéines brutes.
- Elle repose sur la transformation de l'azote organique en ion ammonium, suivi de la distillation de l'ammoniac, sa capture dans une solution acide et son dosage par titrage.
- En multipliant le résultat obtenu par un facteur de conversion des protéines (souvent 6,25), on peut estimer la teneur en protéines brutes.

➤ Le phosphore :

✓ Appareillage

- Fioles Erlenmeyer : 125 ml
- Entonnoirs
- Bêchers : 5 L, 1 L, 500 ml
- Flacons en polyéthylène à large ouverture, avec couvercle : 125 ml
- Fioles jaugées : 1 L, 250 ml, 100 ml, 50 ml
- Éprouvettes graduées : 100 ml, 50 ml
- Tubes à essai : capacité de 20 ml
- Pipette réglable : 1-10 ml, 0.1-1 ml
- Pipette jaugée : 50 ml, 20 ml, 10 ml
- Spectrophotomètre UV-VIS capable de mesurer l'absorbance à 882 nm, avec réglage des cuvettes pour la densité optique

- Balance analytique avec une précision de 0,0001 g pour la préparation des réactifs
- Agitateur oscillant (shaker) : 60-260 oscillations/min
- Vortex
- Pipette graduée : 10 ml
- Papier filtre Whatman N° 42 ou équivalent

✓ **Matériaux et réactifs :**

- Eau déionisée ou distillée, avec conductivité < 0,001 dS/m
- Solution extractante : bicarbonate de sodium 0,5 M, pH 8,5
 - Dissoudre 42 g de NaHCO_3 dans de l'eau déionisée.
 - Ajuster le pH à 8,5 avec de la soude (NaOH 1 M), puis ajuster le volume à 1 L.
- Acide sulfurique 4 M
- Solution de molybdate d'ammonium à 4 %
- Solution de tartrate d'antimoine potassium à 0,275 %
- Solution d'acide ascorbique à 1,75 %

✓ **Réactif mixte** (préparé frais pour chaque série) :

- 200 ml d'eau distillée
- 50 ml d'acide sulfurique 4 M
- 15 ml de solution de molybdate d'ammonium
- 30 ml de solution d'acide ascorbique
- 5 ml de solution de tartrate d'antimoine potassium
- Solution étalon de phosphate à 100 mg/L
 - Soit prélevée à partir d'une solution mère certifiée,
 - Soit préparée en dissolvant 0,4390 g de KH_2PO_4 séché (2h à 110°C) dans la solution extractante, ajustée à 1 L
- Solution étalon secondaire à 4 mg/L :
 - Prélever 10 ml de la solution à 100 mg/L et compléter à 250 ml avec la solution extractante
- Série d'étalons de travail :
 - Pipeter dans des fioles jaugées de 100 ml : 0, 10, 20, 30, 40, 50 ml de la solution à 4 mg/L
 - Compléter au trait avec la solution extractante → concentrations finales : 0, 0,4, 0,8, 1,2, 1,6, 2,0 mg/L

➤ **Préparation de l'échantillon de sol**

- Sécher à l'air (ou dans un four à moins de 35 ± 5 °C)
- Broyer et tamiser à < 2 mm

➤ **Procédure expérimentale :**

✓ **Courbe d'étalonnage :**

- Prélever 3,0 ml de chaque standard dans un tube à essai
- Ajouter 3,0 ml de réactif mixte à l'aide d'une pipette
- Homogénéiser avec un vortex
- Laisser réagir pendant **1 heure** pour développer la coloration bleue

✓ **Extraction du phosphore disponible du sol :**

- Peser 5,00 g de sol sec (précision $\pm 0,01$ g).
- Ajouter 100 ml de solution extractante dans un flacon en polyéthylène de 125 ml
- Agiter mécaniquement pendant 30 minutes à 180–200 oscillations/min
- Filtrer avec un papier filtre Whatman N° 42 ou équivalent
- Prélever 3 ml du filtrat (échantillon) dans un tube à essai
- Ajouter lentement 3 ml du réactif mixte
- Homogénéiser à l'aide d'un vortex
- Laisser reposer 1 heure pour le développement complet de la couleur bleue

➤ **Lecture et mesure :**

- Lire l'absorbance des étalons, du blanc et des échantillons à 882 nm à l'aide du spectrophotomètre
- Si l'absorbance est trop élevée, diluer l'extrait avec la solution extractante et noter le facteur de dilution

➤ **Calcul**

Formule du phosphore disponible dans le sol :

$$P \text{ disponible (mg/kg)} = \frac{(a-b) \times V \times 1000 \times DF \times mcf}{W}$$

Où :

- **a** = concentration de P dans l'échantillon (mg/L)
- **b** = concentration de P dans le blanc (mg/L)
- **V** = volume de solution extractante (en ml)
- **W** = masse de sol utilisée (en g)
- **DF** = facteur de dilution (si dilution effectuée)
- **mcf** = facteur de correction selon l'humidité

Détermination du potassium dans le sol par électrode ionique sélective (ISE) :

➤ **Principe**

La concentration des ions potassium (K^+) présents dans l'extrait du sol est mesurée directement à l'aide d'une électrode sélective aux ions potassium (ISE- K^+). Le potentiel mesuré par

l'électrode est proportionnel au logarithme de l'activité des ions K^+ en solution, conformément à l'équation de Nernst.

➤ **Matériel :**

- Électrode sélective pour ions potassium (ISE K^+) avec électrode de référence compatible ou électrode combinée
- PH-mètre ou ionomètre (mV-mètre)
- Agitateur magnétique
- Fioles jaugées, pipettes, béchers
- Centrifugeuse ou entonnoir + papier filtre

➤ **Réactifs :**

- Solution d'acétate d'ammonium 1 M (CH_3COONH_4) : utilisée comme solution d'extraction
- Solutions étalons de potassium : par exemple 10, 50, 100, 1000 mg/L (ppm)
- Ajusteur de force ionique (ISA) : généralement fourni avec l'électrode, ou préparé à base de NaCl ou NH_4Cl pour stabiliser la force ionique du milieu

➤ **Extraction du potassium du sol :**

- Peser 5,00 g de sol sec à l'air dans un bécher ou flacon en plastique ou en verre de 100 ml
- Ajouter 50 ml de la solution d'acétate d'ammonium 1 M
- Agiter mécaniquement pendant 30 minutes
- Filtrer ou centrifuger pour obtenir un extrait clair

➤ **Étalonnage de l'électrode :**

- Préparer une série de solutions étalons de K^+ (ex. : 10, 50, 100 mg/L) à partir d'une solution mère
- Ajouter un volume fixe d'ISA à chaque solution, selon les recommandations du fabricant
- Mesurer la réponse en millivolts (mV) de chaque solution à l'aide de l'électrode
- Tracer la courbe d'étalonnage : mV en fonction de $\log_{10}[\text{concentration } K^+]$

➤ **Mesure de l'échantillon :**

- Mélanger l'extrait de sol filtré avec une quantité proportionnelle d'ISA (même rapport que pour les étalons)
- Mesurer le potentiel (mV) de la solution avec l'électrode sélective
- Déterminer la concentration en potassium à partir de la courbe d'étalonnage (en mg/L)

➤ Calcul :

Pour obtenir la concentration de potassium en mg/kg de sol sec :

$$K \text{ (mg/kg)} = C * \frac{V}{M}$$

Avec :

- **C** = concentration obtenue de l'étalonnage (mg/L)
- **V** = volume d'extractant utilisé (ml)
- **m** = masse de sol (g)

Dans le cas courant (5 g de sol, 50 ml d'extractant) :

$$K \text{ (mg/kg)} = C \times 10$$

Détermination de la matière organique du sol par la méthode de perte au feu (LOI) :

➤ Principe :

La méthode de perte au feu (Loss on Ignition, LOI) permet d'estimer la teneur en matière organique du sol par combustion à haute température. Lors de la calcination, la matière organique est oxydée et volatilisée. La perte de masse enregistrée correspond essentiellement à la fraction organique détruite thermiquement. Cette méthode est simple, rapide et adaptée aux analyses de routine.

➤ Matériel nécessaire :

- Four à moufle (capable d'atteindre 550 °C)
- Balance analytique (précision $\pm 0,001$ g)
- Creusets en porcelaine résistants à haute température
- Dessiccateur avec agent déshydratant (silice ou gel de silice)
- Spatule, pince métallique
- Étiquettes et marqueur résistant à la chaleur

➤ Protocole expérimental :

✓ Préparation des échantillons :

- Prendre un échantillon de sol homogène, préalablement tamisé à **2 mm**.
- Sécher le sol à **105 °C pendant 24 heures** afin d'éliminer toute l'humidité résiduelle.
- Laisser refroidir l'échantillon dans un **dessiccateur** pendant au moins 30 minutes.
- Peser un **creuset vide et propre**. Noter sa masse : **P₀**.
- Ajouter **5 à 10 g de sol sec** dans le creuset. Noter la masse totale (creuset + sol sec) : **P₁**.

✓ **B. Calcination :**

- Placer délicatement le creuset dans un **four à moufle préchauffé à 450–550 °C**.
- Laisser incinérer pendant **3 heures à 550 °C** (ou 4 heures à 450 °C si la matière organique est plus résistante).
- Retirer les creusets du four avec précaution, les laisser refroidir dans un **dessiccateur** pour éviter l'absorption d'humidité.
- Peser immédiatement le creuset refroidi contenant le sol calciné. Noter la masse : **P₂**.

➤ **Calculs :**

- **Teneur en matière organique (%) :**

$$MO (\%) = \frac{(P_1 - P_2)}{(P_1 - P_0)} * 100$$

- **P₀** : Masse du creuset vide (g)
- **P₁** : Masse du creuset + sol sec avant calcination (g)
- **P₂** : Masse du creuset + sol après calcination (g)

2. Estimation du carbone organique (%)

Une **conversion empirique** est souvent appliquée pour estimer la teneur en **carbone organique** :

$$C (\%) = MO (\%) \times 0,58$$

Ce facteur de 0,58 est basé sur la composition moyenne de la matière organique du sol, selon les données de Van Bemmelen.

➤ **Remarques importantes :**

- Ne jamais ouvrir le four pendant la calcination.
- Toujours laisser refroidir les échantillons dans un dessiccateur pour éviter l'absorption d'humidité.
- Cette méthode n'est pas spécifique : des composés inorganiques volatils (carbonates, sulfates) peuvent fausser les résultats dans certains sols.

1.2.2. Préparation du compost (la formulation) :

La formulation ou la préparation de produit s'est faite sur la base de l'analyse préalable des matières premières choisies pour l'étude, avec un rapport (C/N) compris entre 25 et 30 (FAO) pour un meilleur compostage, ainsi qu'une richesse en éléments nutritifs essentiels (N, P, K).

L'objectif principal de cette formulation est la production d'un compost équilibré, un rapport C/N compris entre 25 et 30 favorise non seulement le développement optimal des micro-organismes et la dégradation des matières organiques, mais permet également de prévenir le blocage de l'azote ainsi que ses pertes par volatilisation.

➤ Mode opératoire :

La réalisation de produit s'est déroulée selon plusieurs étapes :

- ✓ Les résidus ont été broyés pour homogénéiser la texture.
- ✓ Chaque composant a été pesé selon leur pourcentages établis.
- ✓ Les matières ont été mélanger progressivement dans un bac de compostage aéré.
- ✓ Le fumier bovin a été ajouté et incorporer dans le mélange.
- ✓ Une Humidification régulière a été établis par l'ajout d'eau, afin de maintenir une humidité comprise entre 50 et 60 % idéale pour l'activité microbienne.

➤ Suivi du processus de compostage : (L'Agence Nationale des Déchets AND) (L'Agence Nationale des Déchets AND)

- ✓ **La Durée** : de 6 jusqu'à 8 semaines
- ✓ **Température** : contrôlée régulièrement ; les phases thermophiles ont été atteintes
- ✓ **Retournement** : peut être effectué une fois par semaine ou une fois tous les trois jours pour assurer l'aération.
- ✓ **Maturité** : le compost est considéré mature lorsque la température se stabilise, l'odeur devient terreuse, et la structure friable.

Traitements des sols :

Deux types de sols ont été utilisés :

- ❖ Sol fertile (bon sol)
- ❖ Sol pauvre (mauvais sol)

Chaque type de sol a été soumis aux trois traitements suivants (Tableau 05) :

Tableau 5 traitements effectués sur les deux types de sol

Le traitement	Description
Témoin (T)	Sol sans apport d'engrais (témoin absolu)
NPK	Sol + fertilisation minérale NPK standard
Produit (Pro)	Sol + compost organique élaboré (notre produit)

Chaque combinaison (sol × traitement) a été réalisée en trois répétitions indépendantes, soit :

- **2 types de sol × 3 traitements × 3 répétitions = 18 unités expérimentales**

Tableau 6 Les répétitions (sol × traitement)

Sol	Témoin	NPK	Produit
Bon sol	3 répétitions	3 répétitions	3 répétitions
Mauvais sol	3 répétitions	3 répétitions	3 répétitions
Total	6 traitements × 3 répétitions = 18 pots		



1.2.3. Processus de semis :

Une graine d'orge a été semée dans chaque pot contenant un volume homogène de sol, est placé à la même profondeur :

- ✓ **La date de semis** : 04 mai 2025
- ✓ **Période de suivi de croissance** : du 8 mai au 29 mai 2025
- ✓ **La fréquence d'arrosage** : régulière, pour éviter le stress hydrique (02 jours)
- ✓ **Les conditions environnementales** : naturelles, sans traitement phytosanitaire
- ✓ **Les paramètres mesurés** :
 - Hauteur des plantes (mesures tous les 3 jours)
 - Nombre de feuilles (comptabilisé à la fin de l'expérience, le 29 mai)
 - Couleur des feuilles.

Cette méthode permet :

- D'évaluer le potentiel agronomique réel du compost dans des conditions semi-contrôlées.
- De comparer les effets sur sols contrastés, ce qui est essentiel pour déterminer l'adaptabilité du produit.
- De réduire la variabilité grâce à la répétition, augmentant ainsi la fiabilité statistique des résultats.

Dans le cadre de notre étude, trois traitements distincts ont été appliqués afin de comparer l'efficacité agronomique : un traitement chimique (engrais NPK), notre produit organique, ainsi qu'un témoin (sans fertilisation).

- Le témoin (T) :

Un pot contient uniquement le sol, sans apport fertilisant. Pour but d'évaluer la croissance naturelle de l'orge on conditions naturelles, sans intervention. Et aussi utiliser comme référence pour mesurer l'effet des fertilisants.

- Traitement NPK :

Ce traitement représente la fertilisation chimique classique, utilisée comme référence, pour comparer l'efficacité de notre produit organique à celle d'une fertilisation minérale. Il permet de vérifier si le compost formulé peut égaler, ou bien dépasser les performances d'un engrais à base chimique. L'engrais minérale utilisé contient les trois éléments majeurs essentiels pour la croissance des plantes : **azote (N), phosphore (P) et potassium (K)**.

- Traitement compost (Produit) :

C'est notre produit (compost) élaboré dans le cadre de cette étude à base de :

- ✓ Résidus d'extraction d'huile d'olive.
- ✓ Résidus d'extraction d'huile de lentisque (*Pistacia lentiscus*)
- ✓ Les boues issues des stations d'épurations
- ✓ Un stimulateur biologique (fumier bovin) sert comme activateur de compostage.

1.2.4. Méthodes de mesure :

Afin d'évaluer l'impact des différents traitements (témoin, NPK, compost produit) sur la croissance de l'orge cultivée sur deux types de sols. Plusieurs paramètres morpho-physiologiques ont été suivis régulièrement : hauteur des plants, nombre de feuilles et couleur des feuilles. Ces paramètres ont été retenus car ils reflètent directement la vigueur végétative et la réponse des plantes aux différents amendements organiques testés. La taille donne une mesure quantitative simple mais efficace de la croissance, le nombre de feuilles informe sur la capacité photosynthétique potentielle, et la couleur des feuilles constitue un indicateur visuel de la santé nutritionnelle.

a. Hauteur des plants :

La hauteur des plants d'orge a été mesurée à l'aide d'une règle graduée depuis la base de la tige au niveau du sol jusqu'à l'extrémité de la feuille la plus haute. Cette mesure a été prise deux fois par semaine, afin de suivre l'évolution de la croissance en hauteur durant tout le cycle de l'étude.

b. Nombre de feuilles :

Le comptage de nombre total de feuilles par plan a été effectué à la fin de la période expérimentale, pour chaque répétition et chaque traitement. Ces paramètres donnent une indication qualitative supplémentaire sur la vigueur de la plante et sa capacité photosynthétique influencée par la nutrition et la fertilité du sol.

c. Couleur des feuilles :

On a observé visuellement la couleur des feuilles et on l'a comparée entre les différents traitements et types de sols. Une teinte plus verte, homogène et intense a été perçue comme un signe indirect de la bonne santé des plantes, reflétant un état nutritionnel satisfaisant, surtout en ce qui concerne l'azote. Cette observation qualitative a été confirmée par les données de croissance.

✓ Fréquence et conditions de mesure :

- Les mesures de hauteur ont été réalisées deux fois par semaine, sur une période de 4 semaines.
- Le comptage des feuilles a été effectué à la fin de l'expérimentation.
- L'observation de la couleur des feuilles a été faite à chaque séance de mesure de hauteur, afin de suivre l'évolution de l'état nutritionnel des plantes.

Chapitre 02

Résultats et discussion

2.1. Résultats de l'analyse des paramètres physico-chimiques :

Dans notre étude nous avons réalisé des analyses physico-chimiques de chaque matériau entrant dans la composition du compost. À savoir : les résidus d'extraction d'huile d'olive, les résidus d'huile de lentisque, et les boues. Ces analyses ont permis de savoir la composition chimique exacte de chaque matière première, une condition essentielle pour produire un compost équilibré. Tant sur le plan du rapport carbone/azote (C/N) que de la valeur nutritive globale pour les plantes.

➤ Résidus d'extraction d'huile d'olive :

Leur analyse a révélé les teneurs suivantes :

- ✓ Azote total (N): 6 880 mg/kg (0,688 %)
- ✓ Phosphore (P): 2 020 mg/kg (0,202 %)
- ✓ Potassium (K) : 9 243 mg/kg (0,924 %)
- ✓ Rapport C/N : 70,7 (indiquant une matière très carbonée, nécessitant un équilibre avec des sources riches en azote)

➤ Résidus d'extraction d'huile de lentisque (*Pistacia lentiscus*) :

Leur composition les rend intéressants pour leur potentiel à structurer le compost :

- ✓ Azote total (N): 5 145 mg/kg (0,514 %)
- ✓ Phosphore (P): 1 184 mg/kg (0,118 %)
- ✓ Potassium (K) : 1 242 mg/kg (0,124 %)
- ✓ Rapport C/N : 107,3 (extrêmement élevé, nécessitant une forte correction azotée)

➤ Boues organiques :

Issues des stations d'épurations, ces boues riches en azote ont été analysées séparément :

- ✓ Azote total (N): 52 614 mg/kg (5,261 %)
- ✓ Phosphore (P): 7 368 mg/kg (0,737 %)
- ✓ Potassium (K) : 1 682 mg/kg (0,168 %)
- ✓ Rapport C/N : 6,69 (indiquant une dégradation organique avancée et un excellent potentiel comme source azotée)

D'après ces résultats il ressort que les valeurs mesurées de **l'azote (N)** sont particulièrement élevées dans la boue (52 614 mg/kg), modérées dans les résidus d'huile d'olive (6 880 mg/kg) et lentisque (5 145 mg/kg).

Pour le phosphore (P) les concentrations sont de l'ordre de 7 368 mg/kg dans la boue, 2 020 mg/kg dans les résidus d'huile d'olive et 1 184 mg/kg dans les résidus de lentisque. On ce qui concerne le **potassium (K)** qui est considéré comme élément régulateur important de l'équilibre

hydrique et de la résistance au stress, on note des teneurs élevées dans les résidus d'huile d'olive (9 243 mg/kg), moindres dans la boue (1 682 mg/kg) et les résidus de lentisque (1 242 mg/kg). **Pour le carbone (C)**, source principale d'énergie pour les micro-organismes impliqués dans le processus de compostage, Les rapports C/N, qui expriment la proportion carbone/azote, sont particulièrement élevés dans les résidus d'huile (70,7) et de lentisque (107,3), et faibles dans la boue (6,69).

❖ Rapport carbone/azote (C/N) :

Dans notre travail nous avons accordé une attention particulière au rapport carbone azote, un indicateur essentiel pour suivre l'évolution du compost lorsque ce rapport est trop élevé comme c'est le cas avec les résidus d'huile d'olive ou de lentisque cela signifie que le matériau contient beaucoup de carbone par rapport à l'azote, ce qui ralentit la dégradation. Pour équilibrer cette situation nous avons utilisé des matériaux riches en azote, comme les boues et le fumier bovin. Ce dernier ne fournit pas seulement de l'azote mais stimule aussi l'activité microbienne, ce qui accélère le compostage.

Même si nous avons aussi mesuré d'autres paramètres comme le phosphore le potassium l'humidité ou le CE (Conductivité électrique), notre objectif principal restait de comprendre la richesse en azote et en carbone de chaque matière première. C'est à partir de ces données que nous avons pu formuler un mélange équilibré, capable de produire un compost de bonne qualité, adapté à l'amélioration de la fertilité du sol testés.

2.2. Résultats de la croissance en hauteur des plants d'orge :

➤ Le cas d'un bon sol (sol fertile) :

Les résultats de la hauteur des plans dans un bon sol sont représentés dans la figure N°11

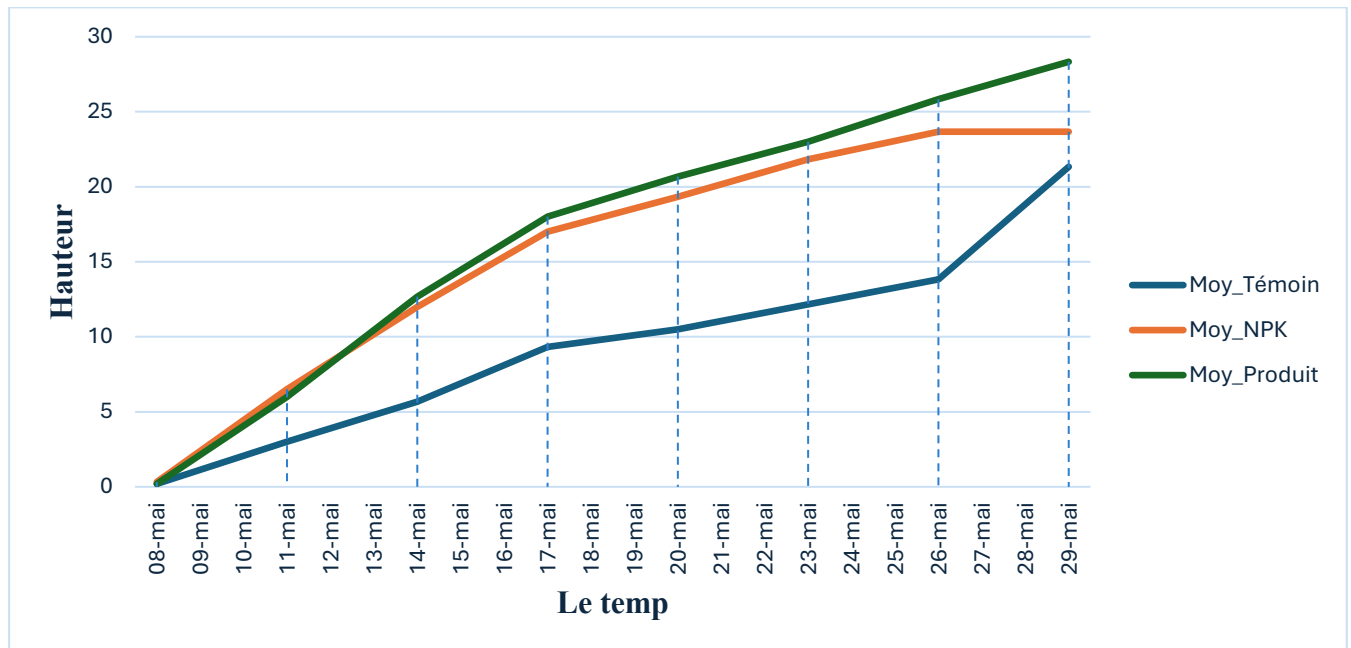


Figure 11 Hauteur des plants (en cm) au cours du temps dans un bon sol

D'après les résultats représentés dans la figure 11 il ressort que :

- La croissance avec le traitement par compost est supérieure à celle du témoin et du NPK
- La croissance s'est identifiée significativement à partir du 14/05 pour les traitements organiques.
- La couleur plus verte observée sur les feuilles en fin de période témoigne d'une meilleure assimilation des nutriments, notamment l'azote, avec le compost.

➤ Le cas d'un mauvais sol (pauvre) :

Les résultats de la hauteur des plans dans un mauvais sol sont représentés dans la figure N°12

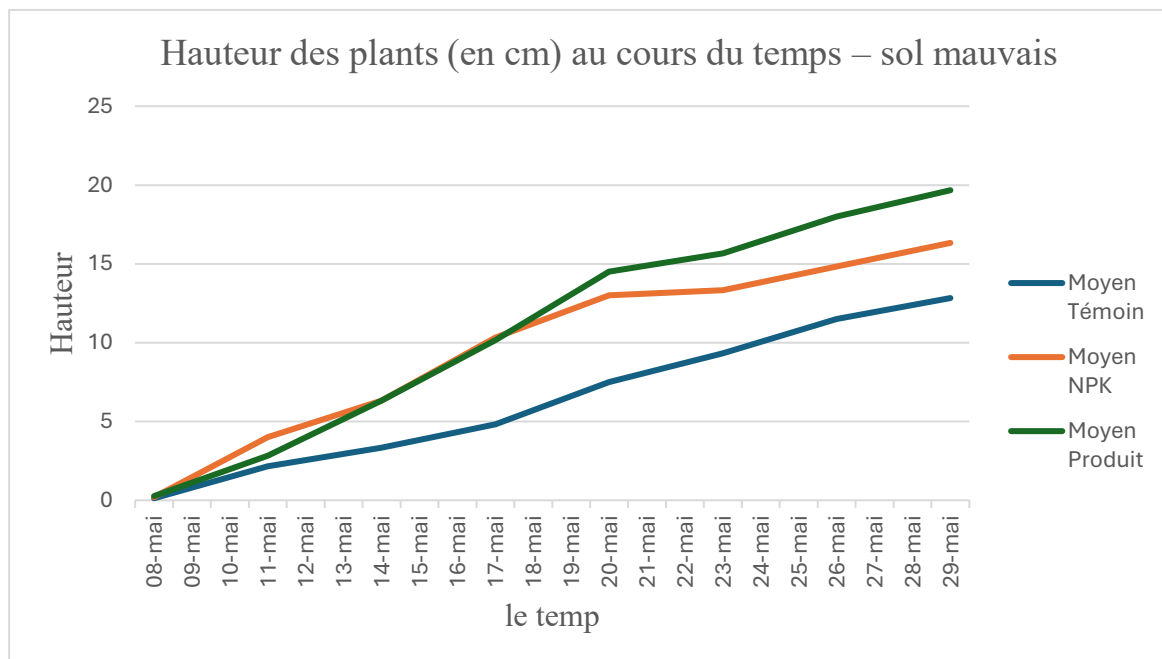


Figure 12 Hauteur des plants (en cm) dans un mauvais sol

Les résultats de la hauteur des plants dans un mauvais sol traité par compost se trouvent plus importants que les résultats du mauvais sol traité par NPK.

Ces résultats montrent l'efficacité du compost dans l'amélioration de la structure du sol et la disponibilité des éléments NPK.

Ces mesures de la hauteur des plantes d'orge pendant la période durée du 08/05 au 29/05 montrent une croissance affectée par le type de traitement et la qualité du sol.

Dans la période durée 08/05 - 14/05, la croissance est faible et comparable entre les différents traitements. Les plants mesurent en moyenne moins de 1 cm. Parce que c'est la phase de germination et de développement initial de la plante. A ce stade les jeunes plantules utilisent d'abord leurs réserves internes avant d'exploiter les ressources du sol, Cependant, et à partir du 17/05, le compost produit et le traitement NPK stimulent une croissance significative par rapport au témoin, et une faible différence entre les traitements est bien observée. Sur un bon sol, le compost produit dépasse légèrement le traitement NPK (environ 23.67 cm), et de manière plus marquée que le témoin (environ 21.33 cm), et permet d'atteindre une hauteur moyenne maximale autour de 29 cm. Globalement la croissance est apparue plus limitée sur le mauvais sol, mais l'effet avantageux du compost reste évident, avec une hauteur moyenne atteignant environ 20 cm à la fin de l'observation, contre 16.33 cm pour NPK et 12.83 cm pour le témoin. L'amélioration de la croissance par le compost est liée à la fois à la libération progressive des nutriments (N, P, K), et à l'amélioration de la structure et de la capacité de rétention en eau du sol, ainsi qu'à la stimulation microbienne induite par le fumier bovin. Le compost agit donc à

la fois comme fertilisant et comme amendement améliorant la qualité physique et biologique du sol.

2.3. Résultats de nombre de feuilles :

➤ Nombre de feuilles – bon sol (le 29/05/2025) :

Les résultats du nombre de feuilles dans un bon sol sont illustrés dans la figure N°13

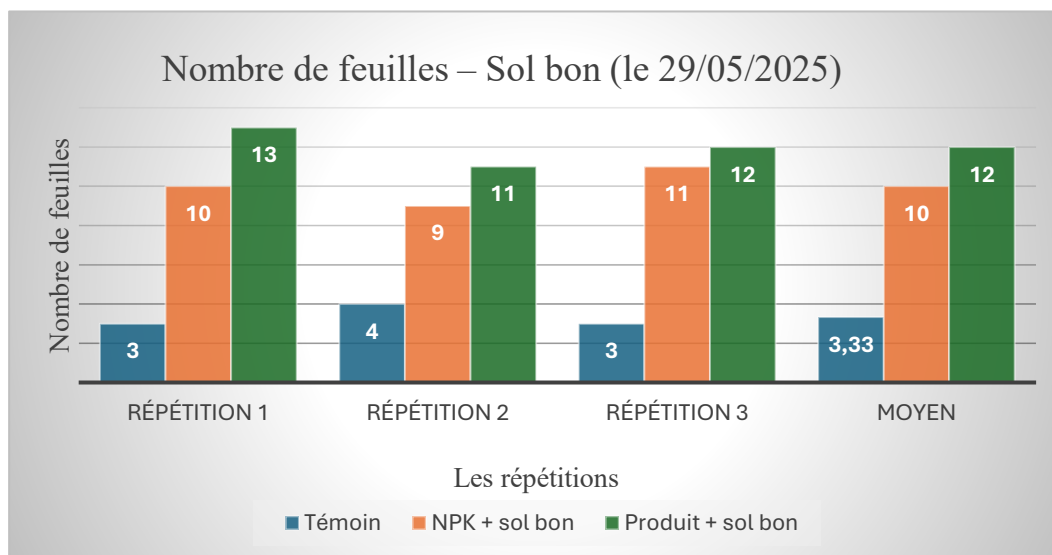


Figure 13 Nombre des feuilles – bon sol (le 29/05/2025)

D'après les résultats mentionnés dans figure N°13 on observe que

- Le nombre des feuilles calculés chez le témoin est resté très faible dans les trois répétitions, ce qui reflète une croissance limitée de l'orge sur le bon sol sans traitement.
- Un traitement NPK a montré une amélioration significative de nombres des feuilles, ce qui confirme que les engrais minéraux apportent les éléments nutritifs essentielle au bon développement de l'orge.
- Le traitement avec notre produit donne le nombre le plus élevée des feuilles, ce qui indique une meilleure stimulation de la croissance foliaire, probablement grâce à une libération progressive des nutriments et une amélioration de la structure du sol.
- La différence entre le produit et NPK suggère que le compost organique n'est pas seulement une source d'éléments nutritifs, mais aussi un amendement bénéfique pour la qualité du sol, favorisant la santé globale de la plante.

➤ Nombre de feuilles – mauvais sol (le 29/05/2025):

Les résultats du nombre de feuilles dans un mauvais sol sont illustrés dans la figure N°14

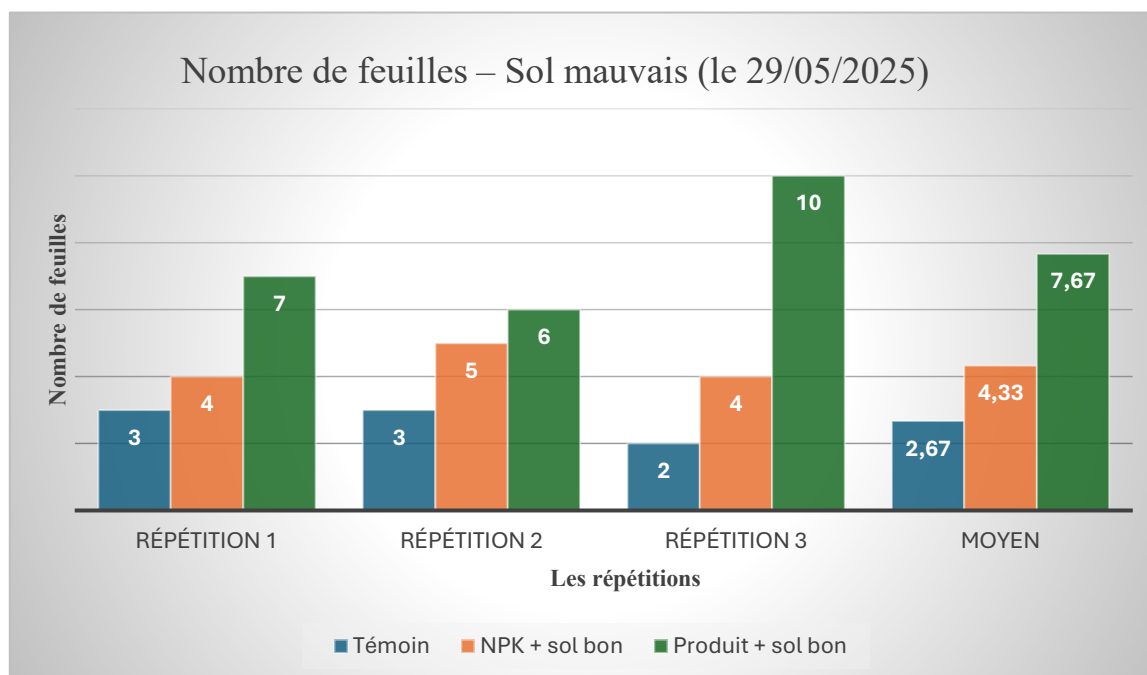


Figure 14 Nombre de feuilles – Sol mauvais (le 29/05/2025)

Le nombre de feuilles joue un rôle crucial dans les processus de la photosynthèse des plantes et donc il est considéré comme un indicateur clé du développement végétatif. Au début le nombre de feuilles est faible et identique entre les trois traitements, généralement entre 1 et 3 feuilles. Progressivement, ce nombre augmente, reflétant un développement végétatif actif. Le traitement au compost produit génère une augmentation plus rapide et plus importante du nombre de feuilles, atteignant en moyenne 12 feuilles à la date finale (29/05) sur bon sol, contre environ 10 pour le NPK et seulement 3 à 4 pour le témoin. Sur un mauvais sol, le compost produit permet aussi une augmentation importante du nombre de feuilles (moyenne autour de 7), largement supérieure au témoin (3 feuilles). Un nombre plus élevé de feuilles permet une meilleure interception de la lumière et une photosynthèse accrue, favorisant la production de biomasse.

Ce résultat indique que le compost produit stimule efficacement la vigueur des plants, probablement par un apport équilibré d'éléments nutritifs et une meilleure disponibilité de l'azote, élément fondamental pour la croissance foliaire.

2.4. Résultats de coloration des feuilles :

On a observé une coloration verte plus foncée sur les plantes traitées par le compost, en comparaison avec les feuilles de témoin. Les feuilles traitées par le traitement NPK sont vertes mais légèrement moins intenses par rapport à celle de compost.

Une bonne coloration reflète un métabolisme sain, une photosynthèse efficace et un meilleur état général.

2.5. Résultats des analyses des métaux lourds dans les boues utilisées :

Dans notre étude, on a utilisé les boues d'épuration comme matière première pour la fabrication de compost, les boues provenant de deux stations :

- La STEP de Ferjioua, avec des données d'analyse fournies pour les années 2020 et 2022.
- La STEP de Oued Endja, avec des résultats datant de 2020.

Il est à noter que les analyses physico-chimiques des métaux lourds n'ont pas été réalisées par nous-même, mais ont été remises directement par les établissements producteurs des boues, sous forme de bulletins de laboratoire déjà établis.

➤ Tableaux des résultats fournis :

Tableau 7 Tableaux des résultats fournis STEP Ferjioua(2020)

Élément	Résultat (mg/kg MS)
Nickel (Ni)	389.25
Chrome (Cr)	12.75
Cuivre (Cu)	19.25
Cadmium (Cd)	4.40
Plomb (Pb)	6.10
Zinc (Zn)	19.00
Mercure (Hg)	0.0125

Tableau 8 Tableaux des résultats fournis STEP Ferjioua(2022)

Élément	Résultat (mg/kg MS)
Nickel (Ni)	7.48
Chrome (Cr)	3.60
Cuivre (Cu)	6.50
Cadmium (Cd)	5.40
Plomb (Pb)	23.30
Zinc (Zn)	4.80
Mercure (Hg)	0.0300

Tableau 9 Tableaux des résultats fournis STEP Oued Naja (2020)

Élément	Résultat (mg/kg MS)
Nickel (Ni)	49.00
Chrome (Cr)	5.70
Cuivre (Cu)	32.70
Cadmium (Cd)	1.98
Plomb (Pb)	18.80
Zinc (Zn)	11.10
Mercure (Hg)	0.0030

- **Référentiel utilisé pour l'évaluation** : l'interprétation des résultats s'est basée sur la **directive européenne 86/278/CEE**, largement utilisée comme référence dans les laboratoires algériens.

Tableau 10 Référentiel utilisé pour l'évaluation des métaux lourds

Élément	Limite maximale admise (mg/kg MS)
Plomb (Pb)	750 à 1200
Zinc (Zn)	2500 à 4000
Cuivre (Cu)	1000 à 1750
Nickel (Ni)	300 à 400
Chrome (Cr)	« Il n'est pas possible à ce stade de fixer des valeurs limites pour le chrome. Le Conseil fixera ces valeurs limites à un stade ultérieur Sur la base de propositions que la Commission présentera Dans un délai d'un an suivant la notification de la présente directive. »
Cadmium (Cd)	20 à 40
Mercure (Hg)	16 à 25

Les valeurs mentionnées dans les tableaux indiquent que toutes les concentrations sont inférieure aux seuil admis, Les valeurs de nickel, plomb, zinc, cuivre, chrome, cadmium et mercure sont faibles dans les trois échantillons.

3. Discussion :

A partir des résultats obtenus, on a constaté que le compost réalisé et efficace sur les deux types de sol utilisés dans l'expérience (bon sol, mauvais sol), notamment en termes de hauteur des plants et le nombre de feuilles, dans la période du 08/05/2025 jusqu'au 29/05/2025. Ce qui montre clairement l'efficacité de notre produit préparé à partir des déchets des résidus d'extraction d'huiles végétales et des boues des stations d'épurations, enrichi par le stimulateur biologique (fumier bovin) sur la croissance, le développement foliaire et la santé générale de l'orge, tant sur un bon sol que sur un mauvais sol et parfois supérieur à celle du traitement NPK. Ces résultats confirment que le compost est adapté à l'agriculture durable et la valorisation des déchets organiques.

Bien évidemment le sol bon favorise la croissance de l'orge parce qu'il est riche en matières organiques et en éléments nutritifs naturels, tandis que le sol pauvre présente des conditions défavorables pour la croissance due au manque des éléments nutritifs essentiels, le produit (compost) permet de corriger partiellement cette carence.

➤ Comparaison entre engrais chimique et compost :

L'engrais chimique NPK a stimulé la croissance par un apport direct d'éléments nutritifs rapidement disponibles. Cependant, le compost enrichi (Produit) a montré une efficacité comparable, voire supérieure, notamment grâce à sa libération progressive des nutriments, son amélioration de la structure du sol et sa richesse en matière organique.

Ces résultats montrent que le compost organique produit localement peut constituer une alternative durable et efficace aux engrais chimiques, aussi bien sur sol fertile que sur sol dégradé. Il améliore non seulement la croissance des plantes, mais contribue également à la préservation de la fertilité des sols sur le long terme.

Pour l'effet du compost sur la croissance en hauteur on dit que l'apport de compost organique issu de déchets d'huiles végétales (huile d'olive et lentisque), de boues et de fumier bovin comme activateur biologique a significativement amélioré la hauteur des plants d'orge. De nombreuses études confirment qu'une fertilisation organique accrue en matière organique stimule la croissance en hauteur et la biomasse aérienne des céréales. Par exemple, **Ghouili et al. (2022)** ont observé qu'une application de compost a entraîné une augmentation notable de la hauteur des plants d'orge, de la teneur en chlorophylle et de la biomasse totale par rapport au témoin sans amendement. Ces effets bénéfiques résultent de la libération progressive de nutriments assimilables (C, N, P, K) et de substances bioactives (acides aminés, hormones de croissance) contenus dans le compost, qui favorisent l'allongement des tiges et le développement des organes aérien. Des essais en serre montrent également que des apports

élevés de compost accroissent significativement la longueur des tiges et le nombre de pousses chez l'orge.

Pour l'effet sur la croissance foliaire, le compost organique influence positivement la croissance foliaire de l'orge. Les amendements organiques accroissent typiquement la surface et le nombre de feuilles, ainsi que leur richesse chlorophyllienne. Ghouili et al. (2022) ont rapporté une augmentation marquée du contenu en chlorophylle des feuilles d'orge après fertilisation au compost, ce qui reflète une activité photosynthétique améliorée. De même, la richesse en nutriments et la meilleure structure du sol confèrent aux plantes une plus grande capacité d'absorption de l'azote et du magnésium, essentiels à la synthèse des pigments chlorophylliens et au développement des tissus foliaires. En pratique, les plants d'orge amendés au compost produisent plus de feuilles et des feuilles plus épaisses et vigoureuses que les plantes non traitées, ce qui contribue à accroître le potentiel photosynthétique et la biomasse foliaire globale.

Les résultats de la comparaison avec la fertilisation minérale (NPK) suggèrent que le compost peut se substituer partiellement ou totalement aux engrais minéraux. Dans plusieurs expérimentations, les amendements organiques ont produit des rendements en biomasse et en grains comparables, voire supérieurs, à ceux obtenus avec un apport exclusif d'engrais NPK. Ainsi, Szulc et al (2024) ont montré que le rendement en grains d'orge a été maximal sous apport de vermicompost, supérieur à celui avec NPK seul, l'amendement combiné (moitié compost + NPK) étant intermédiaire. De même, Pasqualone et al. (2017) ont constaté qu'une dose modérée de compost de boues, associée à de l'azote minéral, était aussi efficace que la fertilisation minérale NPK seule sur la croissance de l'orge. En d'autres termes, les composés organiques améliorent significativement la fertilité du sol (carbone organique, échange cationique, microbiome) et fournissent des nutriments à longue durée, ce qui permet souvent d'égaliser les performances des engrais chimiques tout en réduisant leur usage.

Pour le rôle du fumier bovin comme activateur biologique du compost on dit que le fumier de bovin, souvent riche en micro-organismes et en azote relativement rapidement disponible, joue un rôle d'activateur biologique dans le tas de compost. Il apporte directement des bactéries et champignons décomposeurs ainsi que de l'azote organique facilement minéralisable, ce qui accélère la dégradation de la matière organique. Par exemple, **Zhen et al. (2014)** ont observé que l'ajout de compost de fumier (éventuellement bovin) à un sol cultivé augmentait significativement la biomasse microbienne cultivable et l'activité respiratoire du sol, comparé au seul apport d'azote minéral. Ce gain de biomasse microbienne favorise la minéralisation (libération d'azote et de phosphore). Par ailleurs, l'inoculation de microorganismes sur un tas de fumier bovin « brut » accélère la montée en température et l'atteinte de l'état mûr du

compost, signe d'une dégradation plus complète de la matière organique. En résumé, le fumier bovin injecte un cocktail bactérien et fongique naturel dans le compost, réduit le temps de compostage effectif et améliore l'efficacité de la minéralisation des nutriments organiques pour la culture.

Concernant l'influence du type de sol sur l'efficacité du compost on voit que l'efficacité du compost dépend fortement de la fertilité initiale du sol. Dans un sol pauvre, le compost apporte un supplément de nutriments et de matière organique qui se traduit par de forts gains de rendement. **Agegehu et al. (2016)** comparent deux sites éthiopiens de fertilité différente : sur le site de faible fertilité (Robgebeya), les amendements organiques ont augmenté le rendement en grain de l'orge de 51–78% par rapport au témoin, alors que sur le site plus fertile (Holetta) l'augmentation n'était que de 30–49%. Autrement dit, l'effet relatif du compost est plus marqué en sol déficient. Ces résultats confirment qu'un sol pauvre bénéficie davantage en pourcentage de l'apport de nutriments et de matière organique du compost. En pratique, on peut s'attendre à ce qu'un sol fertile (riche en MO et éléments nutritionnels) réponde moins fortement à un amendement unique qu'un sol appauvri. Les essais existants indiquent donc que le type de sol module la réponse de l'orge au compost, les sols pauvres montrant les plus forts gains relatifs de croissance et de rendement.

Conclusion :

Ce travail s'inscrit dans une démarche de valorisation durable des résidus organiques disponibles localement, en particulier les tourteaux issus de l'extraction d'huile de lentisque et d'olive, ainsi que les boues issues des stations d'épuration. À travers une approche scientifique et technique rigoureuse, nous avons pu démontrer que ces matières, lorsqu'elles sont correctement formulées et compostées, peuvent constituer une alternative crédible, économique et écologique aux engrais chimiques.

Les analyses physico-chimiques effectuées sur les matières premières ont révélé des potentiels complémentaires :

- Les **boues d'épuration**, très riches en azote, constituent une excellente base azotée pour le compost.
- Les **résidus d'olive et de lentisque**, bien que fortement carbonés, offrent une bonne structuration de la matière organique et participent à l'équilibre du rapport C/N nécessaire à un compostage efficace.

La formulation d'un compost triplement valorisé, dans le cadre du projet **VERDIFERT**, permet non seulement de recycler des déchets organiques abondants en Algérie, mais également de proposer une solution adaptée aux besoins des sols agricoles locaux, souvent appauvris. Ce projet s'inscrit pleinement dans la dynamique de l'économie circulaire et du développement durable, en répondant à des enjeux environnementaux (réduction des déchets, protection des sols) et socio-économiques (valorisation locale, fertilisation à bas coût).

Enfin, cette étude ouvre la voie à des perspectives de recherche et de développement, notamment en ce qui concerne :

- L'optimisation des protocoles de compostage,
- L'évaluation agronomique sur différentes cultures,
- La mise en marché du produit fini et son acceptation par les agriculteurs.

Perspectives :

➤ Recommandations pour les futures études :

Pour garantir la sécurité des sols et des cultures, il est indispensable de :

- ❖ Etablir un programme de suivi régulier des concentrations des métaux lourds dans les boues utilisées dans la production de notre compost.
- ❖ Réaliser des analyses à chaque nouvelle production de compost.
- ❖ Dans les études futures, on va explorer des techniques de réduction de tout métal lourd susceptible de dépasser les normes.
- ❖ Tester l'engrais sur d'autres cultures (blé, légumes, arbres fruitiers...)
- ❖ Suivre les rendements à long terme en conditions réelles
- ❖ Analyse de l'impact sur la qualité des sols (pH, MO, microflore...)

Annexe :

Tableau 11 Hauteur des plants (en cm) bon sol

Date	Témoin 1	Témoin 2	Témoin 3	Moyen Témoin	NPK 1	NPK 2	NPK 3	Moyen NPK	Produit 1	Produit 2	Produit 3	Moyen Produit
08/05	0.2	0.1	0.3	0.20	0.5	0.1	0.4	0.33	0.1	0.2	0.3	0.20
11/05	2.0	4.0	3.0	3.00	7.0	6.0	6.5	6.50	5.0	6.0	7.0	6.00
14/05	4.0	8.0	5.0	5.67	13.0	11.0	12.0	12.00	13.0	11.0	14.0	12.67
17/05	7.0	13.0	8.0	9.33	20.0	14.0	17.0	17.00	18.0	16.0	20.0	18.00
20/05	8.0	14.5	9.0	10.50	22.0	16.0	20.0	19.33	19.0	17.0	26.0	20.67
23/05	9.5	16.0	11.0	12.17	25.0	17.5	23.0	21.83	21.0	19.0	29.0	23.00
26/05	12.0	17.0	12.5	13.83	27.0	18.0	26.0	23.67	23.0	24.0	30.5	25.83
29/05	23.0	18.0	23.0	21.33	29.0	20.0	22.0	23.67	25.0	27.0	33.0	28.33

Tableau 12 Hauteur des plants (en cm) – sol mauvais

	Témoin 1	Témoin 2	Témoin 3	Moyen Témoin	NPK 1	NPK 2	NPK 3	Moyen NPK	Produit 1	Produit 2	Produit 3	Moyen Produit
08/05	0.1	0.2	0.1	0.13	0.1	0.4	0.1	0.20	0.5	0.2	0.1	0.27
11/05	1.5	2.0	3.0	2.17	3.0	4.0	5.0	4.00	3.0	2.5	3.0	2.83
14/05	3.0	4.0	3	3.33	7.0	6.0	6	6.33	7.0	5.0	7.0	6.33
17/05	4.0	6.0	4.5	4.83	12.0	9.0	10.0	10.33	11.0	8.5	11.0	10.17
20/05	5.5	7.0	10.0	7.50	13.0	12.0	14.0	13.00	16.0	12.5	15.0	14.50
23/05	7.0	10.0	11.0	9.33	13.0	14.0	13.0	13.33	17.5	14.0	15.5	15.67
26/05	10.0	12.0	12.5	11.50	14.0	15.0	15.5	14.83	22.0	15.0	17.0	18.00
29/05	11.5	13.0	14.0	12.83	15.5	16.0	17.5	16.33	23.5	17.0	18.5	19.67

Tableau 13 Nombres de feuilles – bon sol

Traitement	Répétition 1	Répétition 2	Répétition 3	Moyen
Témoin	3	4	3	3.33
NPK + sol bon	10	9	11	10.00
Produit + sol bon	13	11	12	12.00

Tableau 14 Nombres de feuilles – mauvais sol

Traitement	Répétition 1	Répétition 2	Répétition 3	Moyen
Témoin	3	3	2	2.67
NPK + sol mauvais	4	5	4	4.33
Produit + sol mauvais	7	6	10	7.67

Références bibliographiques:

- Abu-Rumman, G (2016). Effect of Olive Mill Solid Waste on Soil Physical Properties. *International Journal of Soil Science* [en ligne], 11 ,3 (page consultée le 29/04/2025) <https://scialert.net/abstract/?doi=ijss.2016.94.101>
- Agegnehu, G. Nelson, PN. Bird, M I (2016). Crop yield, plant nutrient uptake and soil physicochemical properties under organic soil amendments and nitrogen fertilization on Nitisols. *Soil & Tillage Research* [en ligne]160(1) (consulté le 12 juin 2025) https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/6979526#:~:text=of%20productive%20tillers%20and%20nutrient,N%20significantly%20increased%20grain%20yield
- Agence Nationale des Déchets. Guide du compostage domestique [en ligne] (Consulté le 18 juin 2025)<https://and.dz/site/wp-content/uploads/guide-compostage.pdf>
- Agence Nationale des Déchets. Guide du compostage domestique [en ligne] (Consulté le 18 juin 2025)<https://and.dz/site/wp-content/uploads/guide-compostage.pdf>
- Ait Maamar, C. Kechout, A (2016). *Contribution à l'étude d'état de la gestion des déchets ménagers et assimilés dans la commune de Tizi-Ouzou*. Mémoire de Master : Gestion des déchets solides. Tizi-Ouzou : Université Mouloud Mammeri, 87 p.
- Algeriainvest. APN : adoption du projet de loi relatif à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets [en ligne] (page consultée le 26/04/2025) <https://algeriainvest.com/fr/premium-news/apn-adoption-du-projet-de-loi-relatif-a-la-gestion-au-controle-et-a-lelimination-des-dechets>
- Ameziane, H. Nounah, A. Khamar, M. Zouahri, A (2020). Composting olive pomace: evolution of organic matter and compost quality. *Agronomy Research* [en ligne] 18(1) (consulté le 28/04 / 2025) https://agronomy.emu.ee/wpcontent/uploads/2020/02/AR2020_Vol18No1_Ameziane.pdf
- Amorce. Boues De Station D'épuration : Techniques De Traitement, Valorisation Et Elimination [En Ligne] (Consulté Le 02 /05/2025)https://www.pseau.org/outils/ouvrages/amorce_boues_de_step_techniques_de_traitement_valorisation_et_elimination_2012.pdf

- Azis, F. A. Choo, M.Suhaimi, H.Abas, P. E (2023)The Effect of Initial Carbon to Nitrogen Ratio on Kitchen Waste Composting Maturity. Sustainability [en ligne]15(7)(page consultée le 16 /05/ 2025) <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/7/6191>
- Boukeloua, A (2009). Caractérisation botanique et chimique et évaluation pharmaco-toxicologique d'une préparation topique à base d'huile de Pistacia lentiscus L. (Anacardiaceae). Magister en Biologie, Biotechnologie Végétale. Constantine : Université Mentouri – Constantine, 79 p.
- Bouras, F (2024). Évaluation des effets de biocompost des boues résiduelles sur la croissance des plantes et les propriétés du sol. Mémoire de Master : : Écologie fondamental et appliqué. Constantine : Université Frères Mentouri Constantine 65p.
- BRAHIMI, R (2022). Caractérisation des boues résiduelles produites à la station d'épuration des eaux usées de Sidi Marouane, Mila. Thèse de doctorat : Chimie de l'Environnement. Constantine : Université Frères Mentouri Constantine 1, 150 pages.
- Cieau. Les boues d'épuration : comment les traiter pour mieux les réduire ou les valoriser ? [en ligne]. (Consulté le 03 mai 2025). <https://www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/boues-epuration-reduire-valoriser/>
- **CIHEAM – Institut Agronomique Méditerranéen De Bari.** Étude et évaluation du compostage de différents types de matières organiques et des effets des jus de composts biologiques sur les maladies des plantes [en ligne](page consultée le 17/05/2025)<https://orgprints.org/id/eprint/3064/1/Etude.pdf>
- Circemed. Projet de loi adopté pour une gestion plus durable des déchets en Algérie [en ligne] (page consultée le 26/04/2025) <https://www.circemed.org/articles/h/projet-de-loi-adopte-pour-une-gestion-plus-durable-des-dechets-en-algerie.html>
- Comité COSTEA. Chantier Costea "Reuse - Réutilisation Des Eaux Usées En Agriculture" Rapport De Synthèse 'Algérie' [en ligne]. (Consulté le 03 mai 2025). https://www.comite-costea.fr/wp-content/uploads/2022-03-Rapport_synthese_ALGERIE.pdf#:~:text=Actuellement%2C%20les%20boues%20sont%20principalement,les%20bonnes%20pratiques%20de%20l%E2%80%99utilisation
- Communauté économique européenne. Directive 86/278/CEE relative à la protection de l'environnement lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture [en ligne].

- (Consulté le 1er juin 2025). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:31986L0278>
- Compaoré, E. Nanéma, L. S. Bonkougou, S. Sédogo, M.P (2010). Évaluation de la qualité de composts de déchets urbains solides de la ville de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso pour une utilisation efficiente en agriculture. Journal of Applied Biosciences [en ligne], vol 33 (consulté le 16 /05/ 2025). <https://elewa.org/JABS/2010/33/4.pdf>
 - Cornell University. The Composting Microorganisms [en ligne] (page consultée le 17/05/2025) <https://compost.css.cornell.edu/microorg.html>
 - EAUFRANCE. Qu'est-ce qu'une boue d'épuration ? [En ligne] (Consulté le 02 mai 2025). <https://www.services.eaufrance.fr/les-boues>
 - Eur-lex.europa .COUNCIL DIRECTIVE of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture (86 / 278 /EEC) (Consulté Le 02 mai 2025)
 - Eur-lex.europa.COUNCIL DIRECTIVE of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture (86 / 278 /EEC) (Consulté Le 02 mai 2025) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31986L0278>
 - Eur-lex.europa.COUNCIL DIRECTIVE of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture (86 / 278 /EEC) (Consulté Le 02 mai 2025) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31986L0278>
 - Fao. Importance De La Production Oléicole Et Des Sous-Produits De L'olivier [En Ligne] (Page consultée le 26/04/2025). <https://www.fao.org/4/X6545F/X6545F01.htm>
 - Fao. Wind-row composting[en ligne] (page consultée le 17/05/2025) On-farm composting methods
 - Fédération Nationale des Activités de la Dépollution et de l'Environnement (FNADE). La valorisation des boues d'épuration : un enjeu collectif pour demain [en ligne]. (Consulté le 03 mai 2025) https://www.fnade.org/ressources/_pdf/2/3517-La-valorisation-des-boues-d-epurati.pdf

- Fonds de dotation roullier. Agriculture durable : définition, principes et avantages [en ligne]. (Consulté 21/04/2025). <https://www.fondsdedotationroullier.org/fr/le-fonds-de-dotation/agriculture-durable-definition-principes-et-avantages/>
- Freitas, L. Simões, R. Miranda, I. Peres, F. Ferreira-Dias, S (2022). Optimization of Autohydrolysis of Olive Pomaces to Obtain Bioactive Oligosaccharides: The Effect of Cultivar and Fruit Ripening. Catalysts [en ligne] (12)7(consulté le 28 /04/ 2025) <https://www.mdpi.com/2073-4344/12/7/788>
- Ghouili, E. Abid, G. Jebara, M. Nefissi Ouertani, R. Oliveira, A.C. El Ayed, M. Muhovski, Y (2022). Proteomic analysis of barley (*Hordeum vulgare* L.) leaves in response to date palm waste compost application. Plants [en ligne]11(23), (consulté le 12 juin 2025) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9737688/>
- Ghouili, E. Abid, G. Jebara, M. Nefissi Ouertani, R. Oliveira, A.C. El Ayed, M. Muhovski, Y (2022). Proteomic analysis of barley (*Hordeum vulgare* L.) leaves in response to date palm waste compost application. Plants [en ligne]11(23), (consulté le 12 juin 2025) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9737688/>
- GIZ (2019). Gestion des déchets et économie circulaire [en ligne] (page consultée le 26/04/2025) <https://www.giz.de/en/worldwide/29749.html>
- **HOUSATONIC RESOURCES RECOVERY AUTHORITY (HRRRA)**. *Compost and its benefits* [en ligne].. (consulté le 22 mai 2025). <https://hrra.org/wp-content/uploads/2020/04/Compost-and-Its-Benefits.pdf>

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31986L0278>
- Inrae. La digestion des boues de station d'épuration : état de l'art et paramètres clés [En Ligne] (Consulté Le 02 /05/2025) https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2021-05/2020_inrae_enquete_methanisation_aermc.pdf
- Inrae. La digestion des boues de station d'épuration : état de l'art et paramètres clés [En Ligne] (Consulté Le 02 mai 2025) https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2021-05/2020_inrae_enquete_methanisation_aermc.pdf

- Intérieure. La loi n°05 – 12 du 04 août 2005 relative à l'eau [en ligne] (page consultée le 02/05/2025) <https://interieur.gov.dz/index.php/fr/le-ministere/le-minist%C3%A8re/textes-legislatifs-et-reglementaires/40-le-dispositif-legal-regissant-la-wilaya-et-la-commune/396-la-loi-n%C2%B005-%E2%80%93-12-du-04-ao%C3%BBt-2005-relative-%C3%A0-1%E2%80%99eau.html>
- International Olive Council (2019). Good Practices for the Recycling of Vegetable Water and Olive Pomace on Agricultural Land[en ligne], (consulté le 28 /04/ 2025) <https://www.internationaloliveoil.org/wp-content/uploads/2019/12/GOOD-PRACTICES-1.pdf>
- ISO – Organisation internationale de normalisation. ISO 19698 :2020 – Valorisation, recyclage, traitement et élimination des boues – Utilisation bénéfique des boues d'épuration – Épandage [en ligne]. (Consulté le 22 juin 2025). <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/74262/e162969704df42c1bff3669055229d62/ISO-19698-2020.pdf>
- Jemali, A. Soudi, B. Berdai, H (1998). Valorisation agricole des boues résiduelles : valeur fertilisante et leur impact sur les sols. 13e Congrès International de Génie Rural [en ligne], vol. I. (Consulté le 03 mai 2025) https://www.susana.org/_resources/documents/default/2-1722-valorisation-boues.pdf
- Joradp. [en ligne] (Consultée le 30/04/2025) <https://www.joradp.dz/FTP/Jo-Francais/2001/F2001077.pdf>
- Khan, M T. Aleinikovienė, J. Butkevičienė, LM (2024). Innovative Organic Fertilizers and Cover Crops: Perspectives for Sustainable Agriculture in the Era of Climate Change and Organic Agriculture. Agronomy [en ligne] 14(12) (Consultée le 26/04/2025) <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/12/2871>
- Li, J. Wang, X. Cong, C. Wan, L. Xu, Y. Li, X. Hou, F. Wu, Y. Wang, L (2020). Inoculation of cattle manure with microbial agents increases efficiency and promotes maturity in composting. 3 Biotech [en ligne]10(3) (consulté le 12 juin 2025) <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32154041/>
- Liu, Y. Lan, X. Hou, H. Ji, J. Liu, X. Lv, Z (2024) Multifaceted Ability of Organic Fertilizers to Improve Crop Productivity and Abiotic Stress Tolerance: Review and

- Perspectives [en ligne]14(6) (consulté le 26/04/2025) <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/6/1141>
- M'sadak, Y. Makhoulouf, M. El Amrouni, S (2015). Évaluation qualitative et compostabilité des ressources en biomasse oléicole dans la délégation de Kalâa Kébira (Sahel Tunisien). Revue Agriculture [en ligne], 10 (consulté 27/04/2025) <https://www.jnsiences.org/agri-biotech/26-volume-18/78-evaluation-qualitative-et-possibilites-de-valorisation-biologique-de-la-biomasse-oleicole-reprise-dans-le-sahel-tunisien.html>
 - Medouni-Haroune, L. Zaidi, F. Medouni-Adrar, S. Kecha, M (2018). Olive pomace: from an olive mill waste to a resource – an overview of the new treatments. Journal of Critical Reviews [en ligne], (5)6(page consultée le 26/04/2025) <https://crrta.dz/wp-content/uploads/2023/01/2018-Olive-Pomace-from-an-olive-mill-waste-to-a-resource-an-overview-of-the-new-treatments.pdf>
 - Menegat, S. Ledo, A. Reyes, T (2022). Greenhouse gas emissions from global production and use of nitrogen synthetic fertilisers in agriculture. Scientific Reports [en ligne], 12 (14490) (page consultée le 26/04/2025) <https://www.nature.com/articles/s41598-022-18773-w>
 - Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (MADR). Statistique Agricole – Série B 2019 [en ligne] (consultée le 27/04/2025). <https://madr.gov.dz/wp-content/uploads/2022/04/SERIE-B-2019.pdf>
 - MVAD – Maison Du Volontariat Et De l'Agriculture Durable. Co-Compost De Fumier De Volaille Et De Broyat De Déchets Verts En Maraîchage [En Ligne]. (Consulté Le 16 /05/ 2025). <https://www.mvad-reunion.org/wp-content/uploads/2023/06/Compost-Fumier-Poulet-Chair-Et-Broyat-Dechets-Verts.Pdf>
 - N'guessan, N. Bijleveld, L. Nijmeijer, A (2021). Gestion des déchets organiques en Algérie : analyse sectorielle et opportunités d'affaires [en ligne] (page consultée le 26/04/2025) <https://www.agroberichtenbuitenland.nl/binaries/agroberichtenbuitenland/documenten/rapporten/2022/03/01/algerije-behoefte-aan-compost-biedt-kansen-voor-algerijnse-start-ups/Gestion%20des%20d%C3%A9chets%20organiques%20en%20Alg%C3%A9rie%20Analyse%20sectorielle%20et%20opportunit%C3%A9s%20d%E2%80%99affaires.pdf>
 - N'guessan, N. Bijleveld, L. Nijmeijer, A (2021). Organic Waste Management in Algeria

- NCBI. The Microbiology of Olive Mill Wastes [en ligne]. (Page consultée le 30/04/2025)
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3809369/#:~:text=Soil%20microbial%20activity%20appears%20to,loamy%20soils%20can%20affect%20bacterial>

- Ouamane, K (2024). De l'ombre à la lumière : feuille de route pour la formalisation des récupérateurs informels en Algérie [en ligne] (page consultée le 26/04/2025)
<https://elwatan-dz.com/de-lombre-a-la-lumiere-feuille-de-route-pour-la-formalisation-des-recuperateurs-informels-en-algerie>

- Pasqualone, A. Summo, C. Centomani, I. Lacolla, G. Caranfa, G.& Cucci, G (2017). Effect of composted sewage sludge on morpho-physiological growth parameters, grain yield and selected functional compounds of barley. Journal of the Science of Food and Agriculture [en ligne]97(5) (consulté le 12 juin 2025)
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27403893/>

- Petit, J. Pierre, J (2005). La fertilisation organique des cultures : les bases. Québec : Imprimerie Provinciale Inc. P21

- Sector Analysis and Business Opportunities: A study commissioned by the National Enterprise Agency (RVO) [en ligne] (consulté 21/04/2025)
<https://www.agroberichtenbuitenland.nl/binaries/agroberichtenbuitenland/documenten/rapporten/2022/03/01/algerije-behoefte-aan-compost-biedt-kansen-voor-algerijnse-start-ups/Business+opportunities+for+Algerian+private+sector+in+organic+residu+recycling.pdf#:~:text=transition%20to%20a%20circular%20economy,end%20up%20in%20composting%20activities>

- Segatelli, A. Pimenta, A. Peixoto, G. Silva, M. Dal Bosco, T (2020). Quality of Organic Compost for Vegetable Planting. Proceedings [en ligne]38(1). (Consulté le 26/04/2025)<https://www.mdpi.com/2504-3900/38/1/14>

- Shen, B.Zheng, L.Zheng, X.Yang, Y. Xiao, D.Wang, Y.Sheng, Z. Ai, B. (2024). Insights from meta-analysis on carbon to nitrogen ratios in aerobic composting of agricultural residues. Bioresource Technology [en ligne]413(131416)(page consultée le 16 /05/ 2025)
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39244105/>

- Shilev, S. Mitkov, A. Popova, V. Neykova, I. Minev, N. Szulc, W. Yordanov, Y. Yanev, M (2024). Fertilization Type Differentially Affects Barley Grain Yield and Nutrient Content,

- Soil and Microbial Properties. Microorganisms [en ligne]12(7) (consulté le 12 juin 2025)
<https://www.mdpi.com/2076-2607/12/7/1447>
- Shilev, S. Mitkov, A. Popova, V. Neykova, I. Minev, N. Szulc, W. Yordanov, Y. Yanev, M (2024). Fertilization Type Differentially Affects Barley Grain Yield and Nutrient Content, Soil and Microbial Properties. Microorganisms [en ligne]12(7) (consulté le 12 juin 2025)
<https://www.mdpi.com/2076-2607/12/7/1447>
 - Shu, X et al (2023). Meta-Analysis of Organic Fertilization Effects on Soil Bacterial Diversity and Community Composition in Agroecosystems. Plants [en ligne], 12(3801), (consulté le 26 /04/ 2025) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10675672/>
 - Springer. Suitability of Moist Olive Pomace as Soil Amendment[en ligne]. (Page consultée le 30/04/2025)
<https://link.springer.com/article/10.1023/A:1010361807181#citeas>
 - SUEZ. Séchage naturel des boues sous serre Heliantis [en ligne] (Consulté Le 02 /05/2025) <https://www.suezwaterhandbook.fr/technologies-degrement-R/traitement-des-boues/sechage/sechage-naturel-des-boues-sous-serre-Heliantis>
 - Sumreen Hina, N (2024). Global Meta-Analysis of Nitrate Leaching Vulnerability in Synthetic and Organic Fertilizers over the Past Four Decades. Water [en ligne], 16(3) (page consultée le 26/04/2025) <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/3/457>
 - Susana, Valorisation agricole des boues résiduelles : Valeur fertilisante et leur Impac clés [En Ligne] (Consulté Le 02 mai 2025)
https://www.susana.org/_resources/documents/default/2-1722-valorisation-boues.pdf#:~:text=
 - Susana, Valorisation agricole des boues résiduelles : Valeur fertilisante et leur Impac clés [En Ligne] (Consulté Le 02 mai 2025)
https://www.susana.org/_resources/documents/default/2-1722-valorisation-boues.pdf#:~:text=
 - Techniques de l'Ingénieur. Épaississement des boues : Gestion des boues résiduelles urbaines[En ligne](page consultée le 03 mai 2025). <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/gestion-de-l-eau->

[42234210/gestion-des-boues-residuaires-urbaines-c5221/epaississement-des-boues-c5221v3niv10004.html](https://www.mairie-lyon.fr/42234210/gestion-des-boues-residuaires-urbaines-c5221/epaississement-des-boues-c5221v3niv10004.html)

- United States Environmental Protection Agency. Benefits of Using Compost [en ligne](Consulté le 23 mai 2025).<https://www.epa.gov/sustainable-management-food/benefits-using-compost>
- Vennetier, M. Plazanet, N (2022). Écologie du pistachier lentisque, un arbuste d’avenir pour la forêt méditerranéenne. Forêt Méditerranéenne [en ligne] 43(1)(consulté le 04 mai 2025) <https://hal.inrae.fr/hal-03996250v1/document>
- **White, P. J. Brown, P. H(2010).** *Plant nutrition for sustainable development and global health. Annals of Botany* [en ligne] (105) 7(consulté le 26 /04 /2025) <https://doi.org/10.1093/aob/mcq085>
- Zhen, Z. Liu, H. Wang, N. Guo, L. Meng, J. Ding, N. Wu, G. Jiang, G (2014). Effects of manure compost application on soil microbial community diversity and soil microenvironments in a temperate cropland in China.PLoS ONE [en ligne]9(10) (consulté le 12 juin 2025) <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25302996/>
- Zhou, Z. Zhang, S. Jiang, N. Xiu, W. Zhao, J. Yang, D (2022). Effects of organic fertilizer incorporation practices on crops yield, soil quality, and soil fauna feeding activity in the wheat-maize rotation system. Frontiers in Environmental Science [en ligne] vol10 (Consulté le 26/04/ 2025) <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2022.1058071/full>