

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherches Scientifiques
Université de Blida 1
Faculté de science et technologie
Département de génie des procédés



Mémoire de fin d'étude
Pour l'Obtention d'un Diplôme de
Master professionnalisant en Gestion Durable des Déchets et Procèdes de Traitement
Étude préliminaire d'élaboration d'un compost à base de fumier
bovin et grignon d'olive

Réalisé par :

M. CHENOUFI IMADEDDINE

M. HAMMOUDA ADEL

Encadre par :

Pr. Wahib Naceur

2019/2020

Remerciement

Nos remerciements vont à **Dieu**, le tout puissant, le miséricordieux, qui nous a donné la force, la santé, la volonté et la patience pour mener à terme ce travail

Ces quelques lignes vont nous permettre de remercier les responsables et les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail soit au niveau scientifique mais aussi personnel, et sans qui, notre travail n'aurait pu aboutir

Nous tenons à remercier, **M. Wahib Naceur** professeur à l'université de BLIDA I, qui a accepté de nous encadrer et diriger ce travail de recherche, ça ne sera pas suffisant pour lui exprimer toute nos grandes reconnaissances pour la confiance, l'optimisme, la sympathie et le grand soutien qu'il nous a accordé pour faire aboutir ce travail.

Nous sommes très honorés par la présence de **M^{me} Taoualit Nadjet**, pour avoir accepté de présider le jury de la soutenance de notre mémoire, qu'elle trouve ici nos vifs remerciements.

Nos remerciements sont aussi adressés au membre de jury **M^{me} Allal Noura** qui nous a fait l'honneur en acceptant d'examiner ce travail et qu'elle accepte ici nos sentiments de gratitude.

Dédicace

Je dédier ce travail et ma profonde gratitude :

A mon exemple éternel, mon soutien morale et source de joie et de bonheur, celui qui s'est sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde toujours à côté de moi, à toi
mon père.

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, **maman** que j'adore.*

À celle que j'aime beaucoup, ma source d'inspiration et de bonheur, à ma chère
*fiancée **Khaoula**.*

*Aux personnes dont j'ai aimé leurs présences dans ces jours, à mes frères **Abdelkrim et Omar**, mes amis, et à chaque personne de la famille **Chenoufi, Hammouda et Tebbouche**, je dédier ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides et encouragements.*

Aux personnes qui m'ont aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes cotes, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'étude supérieurs, mes aimables amis, collègues d'étude.

Imadeddine

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

-Mes très chers parents, dont ce travail constitue une légère compensation pour tous leurs Nobles sacrifices afin d'assurer mon bien être et mon éducation, Que Dieu les protège et les gardent en bonne santé

À

-La mémoire de mes défunttes grand-mères que dieu les accueille dans son vaste Paradis

À

-Mes chers frères : Mohamed Moncef et Ismail

À

-Toutes mes tantes, mes oncles. Leurs maris, femmes et enfants -Toutes la famille HAMMOUDA

À

-Mes chers cousins, et tous mes amis : FAYCAL, FOUZI, SIDAHMED, ABDELMALEK, RACHID, MOHAMED, YAZID, BRAHIM YACINE, TOUFIK FRIHI, KHADRAOUI YAZID, SAI KHALID HICHAM

Adel

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Listes des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Résumé

Introduction

Synthèse bibliographique

I. Présentation de la société	13
II. Généralités.....	13
II.1. Le compostage des déchets	14
II.2. Facteurs influençant le procédé de compostage	15
II.2.1. Teneur en Oxygène	15
II.2.2. Teneur en eau	15
II.2.3. Teneur en azote	15
II.2.4. Teneurs en matière organique et en carbone organique	15
II.2.5. Température	16
II.2.6. Évolution du pH	17
II.2.7. La conductivité électrique(CE).....	17
II.2.8. Matière organique et Rapport C/N	18
II.2.8. Taille des particules.....	18
II.2.9. Maturité et stabilité du compost.....	18
III. Les procédé de compostage	20
III.1. Compostage en andains	20

III.1.1. Andains retournés	21
III.1.2. Andains aérés passivement	21
III.2. Compostage en récipients clos	22
III.3. Étapes de compostage	22
III.3.1. Préparation du déchet	22
III.3.2. Fermentation	23
IV. Avantages du compost	23
Matériels et Méthodes	25
I. Description de la station pilote	26
I.1. Mise en place de l'andain	26
I.2. Conditions du compostage	26
I.3. Méthode d'échantillonnage	27
II. Analyses physico-chimiques	27
II.1. Détermination de l'humidité et la teneur en matière sèche	27
II.2. Détermination de pH	28
II.3. Détermination de la conductivité électrique spécifique	29
II.4. Détermination de la matière organique et des cendres (NT.76.04,1983) ..	30
II.5. Dosage de l'azote	31
Résultats et discussion	32
I.1. Évolution de la température	33
I.2. Évolution du pH	34
I.3. Évolution de la conductivité électrique	35
I.4. Évolution du rapport Carbone/azote(C/N)	35
I.4.1. Carbone organique total	35
I.4.2. Évolution de l'azote total	36

I.4.3. Rapport C/N..... 36

I. 5. Classification du compost produit selon les Normes..... 36

Conclusion Générale

Références bibliographiques

Liste des figures

Figure 1. Sarl ATNA usine de compostage.	13
Figure 2. Représentation schématique de processus de compostage	14
Figure 3. Courbe de l'évolution de la température au cours du compostage.....	16
Figure 4. Compostage en andains avec une turbine à andains à face relevable.....	21
Figure 5. Méthode d'andain aéré passivement pour le compostage du fumier.	22
Figure 6. Préparation de la zone de fermentation.....	26
Figure 7 . Mettre la matière organique en place.....	26
Figure 8. Andin mise en place.....	26
Figure 9. Calcul du taux d'humidité.....	27
Figure 10. Mettre l'échantillon dans l'étuve	28
Figure 11. Préparation d'échantillon.....	28
Figure 12. Échantillon représentatif d'andain.....	28
Figure 13.. Mesure du PH	28
Figure 14. Plan de travail, préparation de la suspension.....	28
Figure 15. Un essaie de filtration	29
Figure 16. Décantation de la suspension.....	29
Figure 17. Préparation de la suspension	29
Figure 18. Plan de travail	29
Figure 19. Mesure de la CE.....	30
Figure 20. Le four de calcination	30
Figure 21. Placement de l'échantillon pour la calcination	30

Figure 22. Préparation de l'échantillon	30
Figure 23. L'échantillon avant la calcination.....	31
Figure 24. L'échantillon après la calcination	31
Figure 25. La mesure de la température.....	33
Figure 26. Évolution de la T°(C) durant le processus.	33
Figure 27. evolution du pH	34
Figure 28. L'évolution de la Conductivité électrique en fonction du temps.....	35
Figure 29. Norme de classification des composts dans les différents pays	37
Figure 30. Critères, relatifs à la composition, pour la classification des produits issus du traitement des résidus organiques comme amendements ou engrais, en France.....	38

Liste des tableaux

Tableau 1. Définition des classes de maturité des composts à partir de la production du Carbone organique total après trois mois de compostage.....	20
Tableau 2. Évolution de température moyenne.....	33
Tableau 3. Hygiénisation du compost en fonction de la température.	34
Tableau 4. Évolution du pH.....	34
Tableau 5. Évolution de CE.....	35
Tableau 6. OM, C/N ratios.....	36

Liste des abréviations

AFNOR :	Association Française de Normalisation
CE :	Conductivité Électrique
CET :	Centre d'enfouissement technique
COT :	Carbone Organique total
C / N :	Carbone / Azote
H% :	Humidité
MM :	Matière minérale
MO :	Matière organique
MS :	matière sèche

Abstract

The primary objective of this work is the valorization by the process of aerated composting of organic waste (cattle manure-olive pomace) towards a fertilizer used in the agricultural field to improve the physical-chemical and biological quality of the soil and to avoid the environmental risks linked to it by burying it in landfills. To this end, a monitoring of the composting process of the mixture of cattle manure and olive pomace allowed a characterization of the composting of this mixture. Moisture content, temperature, conductivity and pH were monitored over a period of three months in order to control the composting process carried out within the company ATNA.

In addition, a bibliographical review allowed the identification of the characteristic parameters of this type of compost, namely, the evolution of carbon and total nitrogen. It appears, through this study, that the behaviour of the organic matter coming from animal digestat and agro-industrial by-products during the composting process, allows, according to an adequate control, the valorization of this type of organic waste.

Key words: Composting parameters, Organic matter, valorization, fertilizer, cattle manure.

ملخص

الهدف الأساسي من هذا العمل هو التثمين من خلال عملية التسميد بالهواء للنفايات العضوية (سماد الأبقار - ثقل الزيتون) نحو سماد يستخدم في المجال الزراعي لتحسين الجودة الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية للتربة وتجنب المخاطر البيئية المرتبطة بدفنها في مراكز الردم التقني. ولهذه الغاية، أتاح رصد عملية التسميد لخليط السماد البقري وثقل الزيتون توصيف عملية تحويل هذا الخليط إلى سماد. تم رصد مستوى الرطوبة ودرجة الحرارة والتوصيلية ودرجة الحموضة على مدار ثلاثة أشهر، وذلك للتحكم في عملية التسميد التي تتم داخل الشركة. بالإضافة إلى ذلك، أتاح الملخص البليوغرافي تحديد المعالم المميزة لهذا النوع من السماد، أي تطور الكربون والنيتروجين الكلي. يبدو من خلال هذه الدراسة أن سلوك المواد العضوية الناتجة عن نفايات الحيوانات والمنتجات الثانوية الصناعية الزراعية أثناء عملية التسميد يسمح، وفقاً للتحكم المناسب، باستعادة هذا النوع من النفايات العضوية.

الكلمات المفتاحية: اعدادات السماد، المادة العضوية، التقييم، السماد، سماد الماشية.

Résumé

L'objectif principal de ce travail est la valorisation par le procédé de compostage aéré des déchets organiques (fumier bovin-grignon d'olive) vers un fertilisant utilisé dans le domaine agricole pour améliorer la qualité physique- chimique et biologique du sol et éviter les risques environnementaux qui y sont liés par l'enfouissement de la matière organique dans les centres d'enfouissements techniques (CET). À cet effet, un suivi du processus de compostage du mélange du fumier bovin et du grignon d'olive a permis une caractérisation du compostage de ce mélange. Le taux d'humidité, la température, la conductivité et le pH ont été suivis sur une durée de trois mois, afin de contrôler le processus du compostage effectué au sein de l'entreprise ATNA. Par ailleurs, une synthèse bibliographique, a permis de dégager les paramètres caractéristiques de ce genre de compost à savoir, l'évolution du carbone et de l'azote total. Il apparaît, à travers cette étude que le comportement des matières organiques issues des déjections animales et des sous-produits agroindustriels lors du processus du compostage, permet selon un contrôle adéquat de valoriser ce type de déchet organique.

Mots clés : Paramètres de compostage, Matières Organiques, valorisation, fertilisant, fumier bovin.

Introduction

La quantité de déchets de fumier bovin et grignon d'olives en Algérie a augmenté de manière significative avec le développement rapide des exploitations d'élevage et des usines de l'extraction d'huile d'olive. Ces déchets peuvent entraîner des risques d'hygiène, des nuisances olfactives et une pollution des eaux souterraines et de surface par lixiviation des polluants, s'ils ne sont pas traités correctement. Le fumier bovin et le marc d'olives sont des ressources précieuses en tant qu'engrais pour le sol, fournissant des niveaux élevés de macro- et de micronutriments pour la croissance des cultures, et représentent une alternative peu coûteuse aux engrais minéraux **(1)**. Cependant, la surproduction des déchets organiques par l'élevage de bétail et les industries de l'huile d'olive a conduit à des pratiques d'élimination inappropriées ; par exemple, leur application sans discernement sur les rivières et les champs agricoles et leur application à un moment inapproprié, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas appliqués au moment où ils seraient le plus bénéfiques pour les cultures. Ces pratiques pourraient entraîner de graves problèmes environnementaux, notamment un apport excessif de métaux traces, de sels inorganiques et d'agents pathogènes potentiellement nocifs **(2)** ; une augmentation de la perte de nutriments des sols par lixiviation, érosion et ruissellement, du fait que les besoins en nutriments des cultures ne sont pas pris en compte **(3)** ; et l'émission de sulfure d'hydrogène, d'ammoniac et d'autres gaz toxiques **(4)**.

Dans le but de protéger l'environnement et d'intégrer le développement durable dans la gestion des déchets industriels organiques (élevage/huile d'olive), cette étude vise à valoriser cette fraction de déchets organiques mal gérés vers un produit utilisable en agriculture par un processus biologique et écologique.

Le processus de compostage peut réduire considérablement les problèmes environnementaux liés à la gestion des fumiers en les transformant en un matériau plus sûr et plus stabilisé pour l'application au sol, le compostage est une méthode écologique pour la valorisation des déchets organiques. L'objectif principal du processus est de transformer les matières organiques en un produit stable et utilisable, idéalement exempt d'agents pathogènes, qui peut être appliqué avantageusement sur les terres **(5)**. Pour obtenir un compost de haute qualité, il est nécessaire de comprendre les changements que la matière subit avec le processus de compostage. La stabilité et la maturité du compost sont essentielles pour une application réussie, en particulier pour les composts utilisés dans les cultures horticoles de haute valeur **(6)**

Par conséquent, notre travail consiste à étudier le compostage du fumier bovin et grignon d'olives et à la qualité des composts qui en résultent.

Cette étude comprend trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique, qui commence par une présentation de site d'étude, et explique le processus de compostage dans sa deuxième partie ;
- Le deuxième chapitre traite la méthodologie de travail ;
- Le troisième chapitre est consacré aux résultats obtenus et à leur interprétation ; Enfin, une conclusion générale.

Dans la section des résultats, les facteurs influençant le processus de compostage ont été abordés, et en raison de la pandémie de Covid-19, il n'a pas été possible de déterminer la séquencées résultats de maturité et de qualité du compost.

Synthèse bibliographique

I. Présentation de la société

La société ATNA (**figure 1**) est une entreprise spécialisée dans la valorisation des matières organiques issues des déjections animales et des sous-produits agroindustriels à un amendement organique (compost), localisé à la position 536.437587 2.753525°) Chiffa, Sidi Madani, Blida. Algérie, elle s'occupe une surface de 2.300M², avec une production de 700 tonne/ans, gérée par monsieur le directeur générale Riadh Mahmoud Moundji.



Figure 1. Sarl ATNA usine de compostage.

II. Généralités

II.1. Le compostage des déchets

Le compostage est généralement défini comme la décomposition biologique oxydative des constituants organiques des déchets dans des conditions contrôlées. Il est nécessaire des conditions particulières, notamment de température, d'humidité, d'aération, de pH et de rapport C/N (**figure 2**), liées à une activité biologique optimale aux différents stades du processus. Les principaux produits du compostage aérobie sont le dioxyde de carbone, l'eau, les ions minéraux et la matière organique stabilisée, souvent appelée humus (**7**).

Le traitement par compostage est un procédé biologique aérobie de dégradation de la matière organique, permettant d'obtenir, à partir d'un déchet, un produit valorisable par retour au sol ou un déchet stabilisé pouvant entrer dans une autre filière de traitement (**8**). Les procédés de traitement par compostage sont traditionnellement décrits selon deux phases. La première, dite phase de fermentation (**9**) ou phase active (**10**), constitue une étape, dont l'effet majoritaire est la dégradation rapide de la matière organique. La seconde, dite phase de maturation, met en œuvre plus majoritairement des réactions de biosynthèse de macromolécules organiques : les molécules humiques. L'humification peut néanmoins débuter au cours de la phase active, de même que la dégradation se poursuit minoritairement au cours de la phase de maturation (**8**).

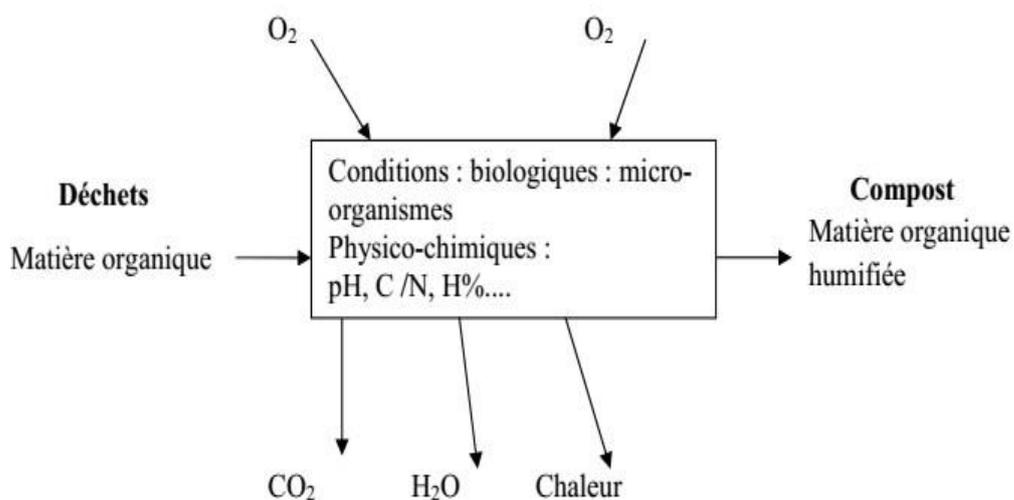


Figure 2. Représentation schématique de processus de compostage (**11**)

II.2. Facteurs influençant le procédé de compostage

II.2.1. Teneur en Oxygène

Le compostage aérobie consomme de grandes quantités d'oxygène, en particulier au cours des premières étapes. Si l'apport en oxygène est limité, le processus de compostage peut devenir anaérobie, ce qui est un processus beaucoup plus lent et odorant. Une concentration minimale d'oxygène de 5 % dans les espaces poreux du compost est nécessaire pour le compostage aérobie. Les niveaux d'oxygène dans les andains ou les tas peuvent être reconstitués en retournant les matériaux à l'aide d'une chargeuse frontale, ou au moyen d'une agitation mécanique avec un retourneur de compost spécial **(12)**.

Étant donné que le compostage est une oxydation biologique, la disponibilité de l'oxygène pendant le processus est d'une importance primordiale, la teneur de l'oxygène dans l'aire circulaire ne doit pas tomber en dessous de 18% **(13)**.

Une bonne ventilation est atteinte en tournant le tas de compost et faire en sorte qu'il est ici classé dans le prochain tas peut prendre de trois à quatre fois plus longtemps pour créer l'humus bénéfique **(14)**.

II.2.2. Teneur en eau

L'humidité est 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. En pratique, 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 % **(7)**.

II.2.3. Teneur en azote

La teneur en azote de la matière sèche tend généralement à augmenter pendant la fermentation et montre une relative stabilité en maturation **(15,16)** cette augmentation, pas toujours perceptible **(17)**, est préalablement due en grande partie à la perte de masse sèche.

II.2.4. Teneurs en matière organique et en carbone organique

La teneur en C organique de la plupart des composts est d'environ 30 % en poids sec ; cette teneur élevée en matière organique fait du compost un amendement très intéressant pour augmenter la teneur en matière organique du sol **(13)** selon **(18)** Le carbone total se compose du carbone organique total (COT) et du carbone inorganique sous forme de carbonates et de bicarbonates. Le COT représente généralement plus de 90 % du carbone total des composts.

II.2.5. Température

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 ont une température idéale située entre 50 et 70°C (19).

Les températures élevées peuvent être utiles au début de compostage (phase thermophile) dans la lutte contre les agents pathogènes thermosensibles, mais après il est préférable de les réduire à des niveaux qui permettent le développement des eumycètes et des actinomycètes, qui sont les principaux décomposeurs des polymères à longue chaîne tel que la cellulose et la lignine (20). La montée en température à la phase thermophile est très nécessaire pour la destruction des graines de mauvaises herbes et des agents pathogènes dans le compost final et un suivi régulier de la température dans le tas de compost est nécessaire pour assurer la bonne décomposition de la matière organique (21).

Les deux premières phases qui sont des phases de dégradation des matières organiques sont regroupées sous le nom de fermentation (Figure 3), la dégradation de la matière organique y est intensive. Le compost évolue en condition aérobie. L'évolution de la température au sein du compost dépend de la production interne de chaleur et des échanges avec l'extérieur.

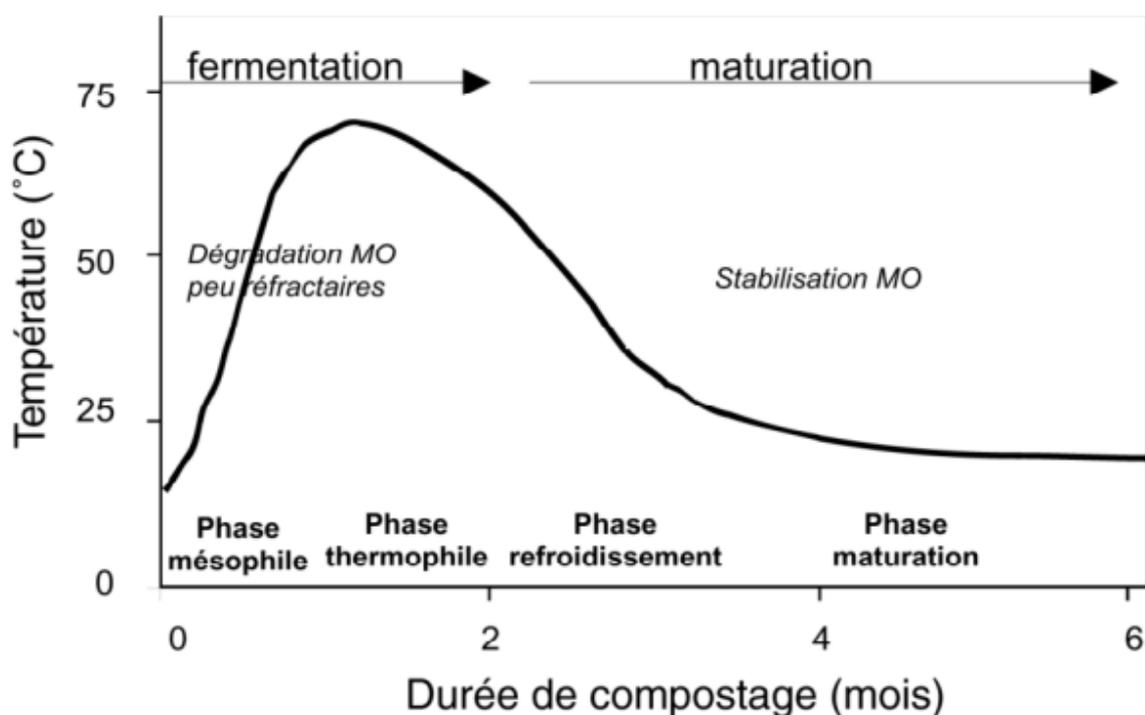


Figure 3. Courbe de l'évolution de la température au cours du compostage (22)

II.2.6. Évolution du pH

Les paramètres, tels que le pH, l'alcalinité et les acides volatils, sont étroitement liés dans le processus de compostage. Le pH, qui est déterminé, doit être contrôlé régulièrement. Il est souhaitable de maintenir le pH du processus entre 6 et 7,5 (selon le matériau de compostage), ce qui semble être la plage optimale. Il est à noter que, pendant le processus de compostage, le pH subit des modifications considérables. Au début, la formation de dioxyde de carbone et d'acides organiques provoque des valeurs d'environ 5-6, alors qu'au fur et à mesure que le processus progresse, la valeur du pH atteint même jusqu'à 8-8,5. Ceci est principalement dû à la décomposition des protéines, ainsi qu'à l'élimination du dioxyde de carbone (7) Le pH oriente les réactions du compostage en favorisant certaines espèces de micro-organismes. Un pH acide est propice au développement des bactéries et champignons en début de compostage, alors qu'en pH basique se développent plutôt les actinomycètes et les bactéries alcalines. La plupart des bactéries qui interviennent dans le compostage ont leur optimum compris entre des pH de 6 à 8 (23).

II.2.7. La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique est une mesure de sels dissous dans le compost. Cette mesure est importante parce qu'il reflète la salinité du compost, et de compost trop salin est probablement nuisibles aux végétaux. La conductivité électrique ne fournit pas d'informations sur le type de sels présents. Certains cations ou anions sont des nutriments tels que Ca, Mg, sulfate (SO₄), ou NO₃-N. Tandis que les sels contenant Na, le chlorure (Cl) ou le bore (B) peuvent être toxiques pour les plantes à des concentrations élevées (24).

La somme des sels solubles dans les extraits à l'eau est augmentée avec la maturation du compost, en raison de la libération des acides organiques et des sels solubles au cours de la décomposition des matières organiques, indiquant la stabilité du compost (25).

À cette fin, différents auteurs ont adopté des limites différentes pour la CE. Par exemple, (26,27) et (28) ont adopté 4 ms.cm⁻¹ comme limite pour la valeur CE du compost à appliquer au sol. Cependant, (29) n'étaient pas d'accord avec cette valeur limite de la CE pour une application sûre du compost et ont indiqué une plage de CE de <3,5 dS/m comme valeur limite pour une application sûre du compost en agriculture. En revanche, ont indiqué une valeur CE maximale de 3 ms.cm⁻¹ comme critère à respecter avant d'utiliser le compost pour l'amendement organique des sols. Dans leur avis, (30) ont indiqué des valeurs inférieures à 2,5 mS/cm comme valeur limite pour l'application en agriculture.

II.2.8. Matière organique et Rapport C/N

Disposé d'une matière présentant un rapport C/N adéquat au départ est une condition indispensable pour le bon déroulement du processus de compostage (31). La décomposition est optimale lorsque le mélange des intrants tend vers un rapport C/N de 30/1. De façon pratique les bactéries ont besoins de 30g de carbone pour décomposer 1 gramme d'azote (32).

Un C/N initial élevé peut limiter la croissance microbienne par carence d'azote, tandis qu'un C/N initial faible conduit à des pertes par dégazage ammoniacal. Le rapport C/N évolue tout au long de la fermentation, une bonne partie du carbone organique étant transformé en CO₂ (33).

Bien qu'il soit important, le rapport C/N ne doit pas être utilisé comme paramètre absolu, comme il est important d'identifier la nature de C dans les matières compostées. La complexité des composées C affecte la vitesse à laquelle les déchets organiques sont décomposés (25).

II.2.8. Taille des particules

La répartition de la taille des particules du compost final est importante car elle détermine les échanges de gaz et d'eau, et surtout la capacité de rétention d'eau (27). La taille des particules a une grande influence sur le maintien d'une porosité adéquate pour une bonne aération. La taille des particules des substrats pour le compostage ne doit pas être trop importante car elles se décomposent lentement. La taille des particules ne doit pas non plus être trop petite car elles peuvent former une masse compacte et réduire la porosité du substrat de compostage (34). Selon (35), la principale méthode pour déterminer la distribution de la taille des particules est le tamisage.

II.2.9. Maturité et stabilité du compost

La maturation s'effectue à température ambiante, sous les microorganismes mésophiles (bactéries et champignons) (36). La micro et le macrofaune apparaissent au cours de cette phase. Des relations d'antagonisme et de prédation se développent entre les organismes. Des antibiotiques sont synthétisés en quantités appréciables. Enfin, la libération de chaleur et la perte de poids restent faibles (37). (38) ont déclaré que pendant la phase de maturation, il y a des réactions secondaires de polymérisation et de condensation, qui conduisent à la formation d'humus avec les acides humiques, sont particulièrement résistants à la dégradation. Le matériau composté arrive à maturité lorsque :

- ✓ Ne pas chauffer davantage après le retournement,
- ✓ Ne pas devenir anaérobie pendant le stockage,
- ✓ Ne pas apporter d'azote au sol après son amendement.

Au cours de cette phase, une partie de l'azote provenant des protéines devient résistante à la dégradation microbienne par son incorporation dans les acides humiques **(39)**.

La "stabilité" est un terme général qui peut faire référence à la stabilité chimique et physique et/ou à la stabilité biologique. Dans le cas du compostage, la masse de compostage est jugée "stable" lorsqu'elle a atteint un état de décomposition qui permet de la stocker sans provoquer de problèmes de santé ou de nuisances, ce qui exclut la stabilité temporaire due à la déshydratation ou à d'autres conditions qui inhibent l'activité microbienne. En dépit de nombreuses affirmations contraires, il reste à mettre au point une méthode quantitative satisfaisante pour déterminer le degré de stabilité, dont au moins une qui peut être utilisée comme norme "universellement" applicable **(40)**.

La stabilité est une étape dans la décomposition de la matière organique et une fonction de l'activité biologique. Elle est fonction du processus et souvent liée à la durée du processus. Plus le compost est stable, plus l'activité biologique est faible ou lente. Dans un produit stable, il y a moins de risques d'odeurs et de réchauffement. Un produit instable, lorsqu'il est appliqué au sol, privera le sol de l'azote qui serait normalement disponible pour les plantes. La maturité est une condition organo-chimique du compost qui indique la présence ou l'absence d'acides organiques phytotoxiques. Elle est également liée au processus **(41)**.

La plupart des études sur la maturité du compost sont basées sur l'évolution des paramètres physico-chimiques tels que le pH, le rapport C/N, la teneur en matière organique, le taux d'humification, la capacité d'échange cationique (CEC) **(42)**.

Les différents stades de maturité du compost peuvent être définis par la teneur finale en carbone **(Tableau1)**.

Niveau de stabilité du compost	Taux de carbone organique après 3 mois (% brut)	Degré de maturité de Compost
Compost très stable	[0 - 10]	Maturité très élevée
Compost stable	[10 - 15]	Maturité élevée
Compost moyennement Stable	[15 - 20]	Maturité moyenne
Compost instable	[20 - 30]	Maturité faible
Compost très instable	>30	Maturité très faible

Tableau 1. Définition des classes de maturité des composts à partir de la production du Carbone organique total après trois mois de compostage (43).

III. Les procédé de compostage

III.1. Compostage en andains

Le compostage en andain (**figure 4**) est un compostage en tas généralement mené en extérieur. L'andain a le plus souvent une forme trapézoïdale afin de favoriser la circulation d'air par convection et, grâce à un faible rapport surface/volume, de limiter la pénétration de l'eau (en cas de pluie) et également de limiter les pertes de chaleur. Le compostage classique en andain nécessite la réalisation de retournements (mélanges) du déchet traité afin de reconstituer les conditions nécessaires à la circulation d'air (porosité) et de réhomogénéiser le massif. L'andain a souvent une longueur de plusieurs dizaines de mètres et une largeur de 3 à 6 mètres, mais sa hauteur dépend de la nature du substrat et de la technique de retournement. Ainsi pour traiter des substrats denses, les andains auront une hauteur plus faible, qui limitera les phénomènes de tassement. Par ailleurs, le retournement de l'andain peut se faire à l'aide d'un chargeur équipé d'un godet, la hauteur de l'andain dépend alors de la portée du bras du chargeur. Le retournement peut également se faire à l'aide de machine spécialisée : les retourneurs enjambeurs, qui limitent la hauteur de l'andain à environ 1 m, ou encore les retourneurs latéraux. Hormis le retournement, il existe des méthodes d'optimisation de l'aération lors du compostage en andain. Ainsi, les phénomènes de convection de l'air peuvent être facilités en disposant dans l'andain des tuyaux ouverts à leurs extrémités. Ces tuyaux facilitent le passage de l'air et augmentent les contrastes thermiques propices à la convection. On parle alors d'andain aéré

passivement. Enfin, il existe des plates-formes où l'andain est formé sur un système de canalisation d'air posé au sol et relié à un ventilateur (8).

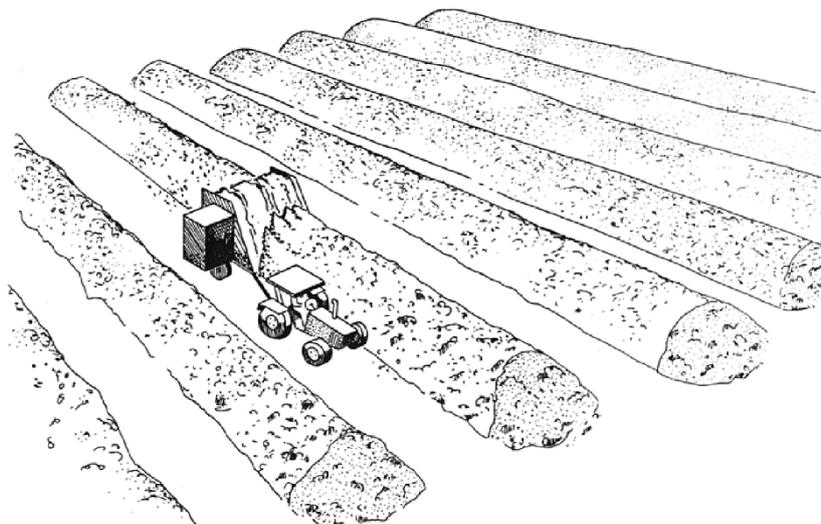


Figure 4. Compostage en andains avec une turbine à andains à face relevable (44).

III.1.1. Andains retournés

L'opération de retournement mélange les composants du compost et améliore l'aération passive. De manière générale, les andains ont une hauteur qui varie de 90 cm pour les matières denses telles que le fumier, à 360 cm de haut pour les matières légères, volumineuses telles que les feuilles. Leur largeur varie de 300 à 600 cm. L'équipement utilisé pour retourner les andains est déterminé par leur taille et leur espacement. Les chargeuses/pelleteuses, dotées d'une longue portée, peuvent construire des andains hauts. Les retourneuses produisent des andains larges et bas (19). Les andains retournés sont placés en piles longues et étroites qui subissent un mélange fréquent. Le retournement des matériaux assure un mélange complet des matériaux et augmente l'aération (45).

III.1.2. Andains aérés passivement

Avec la méthode des andains aérés passivement (figure 5), de l'air est fourni au compost grâce à des tuyaux perforés enfoncés dans l'andain, ce qui élimine la nécessité du retournement. Les extrémités des tuyaux sont ouvertes. L'air circule dans les tuyaux et à travers l'andain en raison de l'effet de tirage créé par les gaz chauds qui s'élèvent hors de l'andain. Les andains devraient avoir une hauteur de 90 à 120 cm, être bâtis sur une base de paille, de tourbe ou de compost prêt à l'emploi afin d'absorber l'humidité et isoler l'andain. Une couverture composée de tourbe ou de compost isole également l'andain, éloigne les mouches, et permet de conserver l'humidité, les odeurs et l'ammoniac (19). L'avantage des tas aérés passivement est d'éviter le retournement des matériaux de compost.

L'air est fourni aux matériaux par des tuyaux perforés au bas de chaque tas. Les deux côtés du tuyau sont maintenus ouverts pour le flux d'air, à travers lequel les tas sont aérés (46).

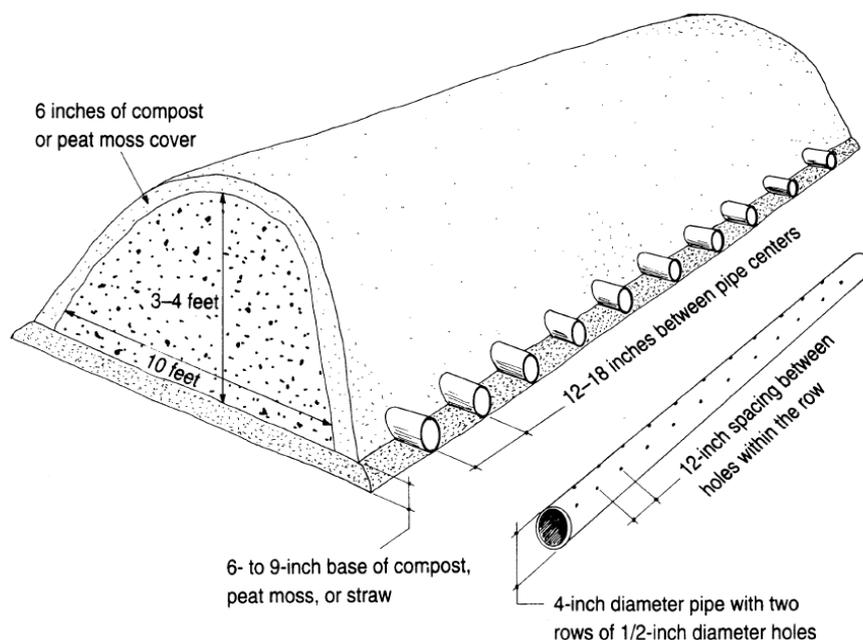


Figure 5. Méthode d'andain aéré passivement pour le compostage du fumier (44).

III.2. Compostage en récipients clos

Le compostage en récipient fait référence à un ensemble de méthodes qui confinent les matières à composter dans un bâtiment, un container ou un récipient (44). Ces méthodes sont basées sur l'aération forcée et des techniques de retournement mécanique qui visent à accélérer le processus de compostage. Beaucoup de méthodes combinent les techniques des andains et des tas aérés dans le but de surmonter les faiblesses et exploiter les avantages de chaque méthode. Il existe une gamme de méthodes de compostage en containers utilisant différentes combinaisons de récipients, de systèmes d'aération et de mécanismes de retournement. Les méthodes examinées ci-après ont été utilisées ou proposées pour le compostage au niveau de l'exploitation agricole (19).

III.3. Étapes de compostage

III.3.1. Préparation du déchet

Cette première étape doit permettre le suivi des déchets réceptionnés sur l'installation. Elle prend en compte une analyse complète des intrants : quantité nature des déchets (rapport C/N, teneur en eau,) et contrôle de la qualité (absence d'impuretés, notamment des résidus de plastique ou des gravats) (47).

III.3.2. Fermentation

La phase de fermentation active il s'agit de la phase de dégradation intense des matières organiques avec une consommation élevée en oxygène. Durant cette phase, des apports d'oxygène doivent être maintenus, soit par des retournements mécaniques, soit par un système de ventilation forcée. Le manque d'oxygène conduira à une anaérobiose et un dégagement de mauvaises odeurs. Un arrosage est souvent nécessaire pour maintenir une humidité suffisante. Dans cette étape du compostage, seuls les micro-organismes (bactéries et champignons) sont actifs. Elle comprend les phases mésophile, thermophile et phase de refroidissement.

La phase mésophile correspond à la montée en température du compost résultant de l'activité microbienne l'énergie présente dans les combinaisons organiques est transformée en chaleur lors de l'oxydation partielle de la matière organique. L'inertie thermique forte du tas de compost a pour conséquence une montée de la température par accumulation de Chaleur.

La phase thermophile démarre pour des températures supérieures à 35 °c jusqu'à l'obtention de la température maximale de compostage qui peut atteindre plus de 65 °c au cœur de l'andain. Au cours de cette phase, il est admis que les germes pathogènes et les graines adventices éventuellement présents sont neutralisés c'est "l'hygiénisation" du compost. La température du compost redescend progressivement (phase de refroidissement) (47).

IV. Avantages du compost

L'ajout de compost améliore les liaisons physiques, chimiques et biologiques des sols et des mélanges de pots. Le compost est une forme relativement stable de matière organique. L'ajout de compost aux sols réduit sa densité apparente. Le compost améliore l'aération et le drainage des sols denses ainsi que la capacité de rétention d'eau et l'agrégation des sols sableux. Le compost augmente également la capacité d'échange du sol, c'est-à-dire sa capacité à absorber les nutriments (44).

(48) estiment que le compostage aide à gérer de grandes quantités de déchets organiques de manière durable ; le compostage recycle les matières organiques en produits utiles. Le compostage s'est avéré efficace pour réduire les composés organiques relativement persistants tels que les produits pharmaceutiques vétérinaires (49). Le produit du compostage (le compost) présente également de nombreux avantages. Il a récemment été prouvé que les composts dérivés de déchets organiques sont de meilleure qualité que les engrais inorganiques commerciaux (50). Selon (51), les composts peuvent remplacer les amendements de sol pour favoriser la formation d'humus, ce qui est un avantage qui ne

peut être obtenu artificiellement. La fraction humique des composts améliore la croissance et la santé des plantes et exerce également un biocontrôle sur différents phytopathogènes du sol tels que les champignons (52). Les œufs de *Parascaris equorum* (généralement connus pour leurs effets pathologiques sur des animaux tels que les chevaux lorsqu'ils sont ingérés) ont été effectivement rendus non viables par le compostage (53). L'augmentation de la température pendant le compostage a entraîné l'élimination des organismes pathogènes dans les déchets (54). (55) ont reconnu la contribution du compost à l'amélioration de la capacité de rétention d'eau des sols. Ils ont en outre déclaré que le compost permettait de mieux incliner les sols.

Matériels et Méthodes

I. Description de la station pilote

I.1. Mise en place de l'andain

Pour préparer l'andain, nous avons préparé deux types de matière organique (fumier et grignons d'olive) avec une proportion de 50% de chacun, à l'aide d'un rétro-chargeur nous avons mis la MO dans un andain de 25m de longueur, 3m de largeur et 1,5m de hauteur, en veillant à ce que la MO soit bien mélangée lors de la mise en place de cet andain (**Figure 6,7,8**).



Figure 6. Préparation de la zone de fermentation



Figure 7. Mettre la matière organique en place



Figure 8. Andain mise en place

I.2. Conditions du compostage

Les conditions pour assurer une bonne fermentation de la MO sont l'humidité et l'aération pour cela nous procédons à un retournement avec arrosage chaque 4 jours. Quand les conditions sont optimales humidité 40-50%, et une concentration en O₂ =5% la montée en température s'effectue jusqu'à 60° à 70° C dans les 3 jours.

I.3. Méthode d'échantillonnage

Tout au long du processus, nous avons besoin de plusieurs échantillons pour évaluer le processus ; pour cela, nous prenons 8 échantillons de différentes parties de l'andain, ces échantillons seront mélangés pour obtenir un échantillon représentatif de cet andain (**Figure 10,11,12**).

II. Analyses physico-chimiques

II.1. Détermination de l'humidité et la teneur en matière sèche

La méthode consiste à prendre un échantillon de masse M₀ et le mettre dans une étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante M (**Figure 10,11,12**).

Dans notre cas l'échantillon est resté dans l'étuve pendant 24h à une température de 105°C.

Le taux d'humidité est déterminé par simple calcul de la différence entre la masse initiale et la masse finale (**Figure 9**).

$$H\% = \frac{M_0 - M}{M_0} \times 100$$

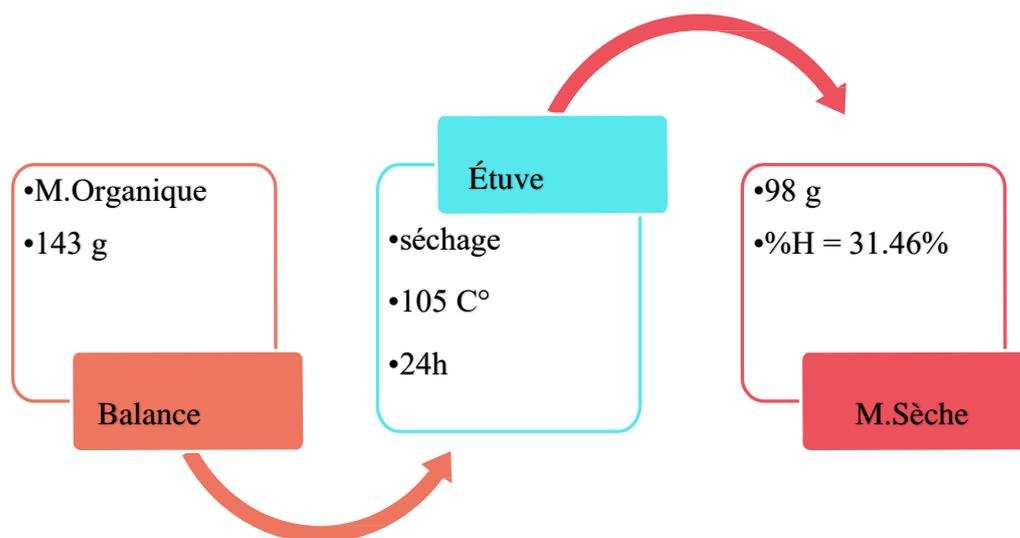


Figure 9. Calcul du taux d'humidité.



Figure 3. Échantillon représentatif d'andin



Figure 11. Préparation d'échantillon



Figure 2. Mettre l'échantillon dans l'étuve

II.2. Détermination de pH

La mesure du pH a été réalisée selon la norme internationale ISO 10390 (1994) ; la méthode consiste à préparer une suspension de compost dans cinq fois son volume d'eau, la laisser en agitation pendant 5 minutes puis la faire reposer pendant au moins deux heures mais pas plus que 24 heures. Le pH est ensuite mesuré à l'aide d'un pH mètre (**Figure 13,14**).



Figure 13. Plan de travail, préparation de la suspension



Figure 14. Mesure du PH

II.3. Détermination de la conductivité électrique spécifique

Elle est déterminée selon la norme ISO 11265 (1994) qui consiste à extraire l'échantillon avec de l'eau à $20\pm 1^\circ\text{C}$ dans une proportion au 1/5 ; cette extraction a pour but de faire dissoudre les électrolytes.

L'extraction consiste à placer 20g de l'échantillon dans 100 ml d'eau, et à laisser agiter la solution pendant 30 minutes puis la filtrer. De la même manière, on effectue une détermination à blanc en mesurant la conductivité de l'eau à la même température.

Lors de l'étape de filtration, la solution était très concentrée, c'est pourquoi elle était placée dans un tube pour la décantation (**Figure 15,16,17,18,19**).



Figure 15. Plan de travail



Figure 16. Préparation de la suspension



Figure 17. Un essai de filtration



Figure 4. Décantation de la suspension



Figure 19. Mesure de la CE

II.4. Détermination de la matière organique et des cendres (NT.76.04,1983)

Après évaporation de l'échantillon ($M = 10 \text{ g}$) à 105°C , on place les creusets en porcelaine qui contiennent la matière sèche dans un four à moufle à chauffage électrique à 900°C pendant deux heures afin de calciner la matière organique (MO) (**Figure 20,21,22,23,24**).

La matière organique MO est déterminée par simple calcul de la différence entre la matière sèche MS et la matière minérale MM.

$$\text{MO} = \frac{\text{MS} - \text{MM}}{\text{MS}} \times 100$$

Les résultats sont exprimés en pourcentage de la matière sèche.



Figure 20.
Préparation de
l'échantillon



Figure 21. Le
four de
calcination



Figure 22.
Placement de
l'échantillon pour
la calcination



Figure 23. L'échantillon avant la calcination



Figure 24.
L'échantillon après la calcination

II.5. Dosage de l'azote

L'azote total est déterminé par minéralisation de l'échantillon de masse égale à 5g par l'acide sulfurique concentré en présence d'un catalyseur (sélénium) à 400°C pendant 2 heures. Une alcalinisation des produits de la réaction s'effectue ensuite par une solution de NaOH de concentration 400 g/l, une distillation et un titrage de l'ammoniac libéré se fait en dernière étape à l'aide d'une solution d'acide sulfurique de concentration égale à 0.05 M. de la même façon, on un blanc. L'azote total est donné par :

$$N(\%) = \frac{(V - V_0) \times C \times 14 \times f}{M} \times 100$$

- V : volume de **H₂SO₄** qui sert pour le titrage de l'échantillon ;
- V₀ : volume de **H₂SO₄** qui sert pour le titrage du blanc ;
- C : Concentration de la solution de l'acide sulfurique pour le titrage de l'ammoniac ;
- F : Facteur de correction de la solution d'acide sulfurique ;
- M : masse de l'échantillon en mg.

Résultats et discussion

I.1. Évolution de la température



Figure 25. La mesure de la température

jours	1	4	8	11	15	17	21	23	30	32	40	42	49	51	57
T° C	33.12	37.3	44.1	42.1	47.5	44.8	63.3	58.5	64.6	51.8	65.3	53	62.8	52.1	51.6

60	66	68	47	46	82	84	91	97	100
50.8	47.2	47.8	42.5	42.6	39.3	36.8	31.6	30.6	28.7

Tableau 2. Évolution de température moyenne.

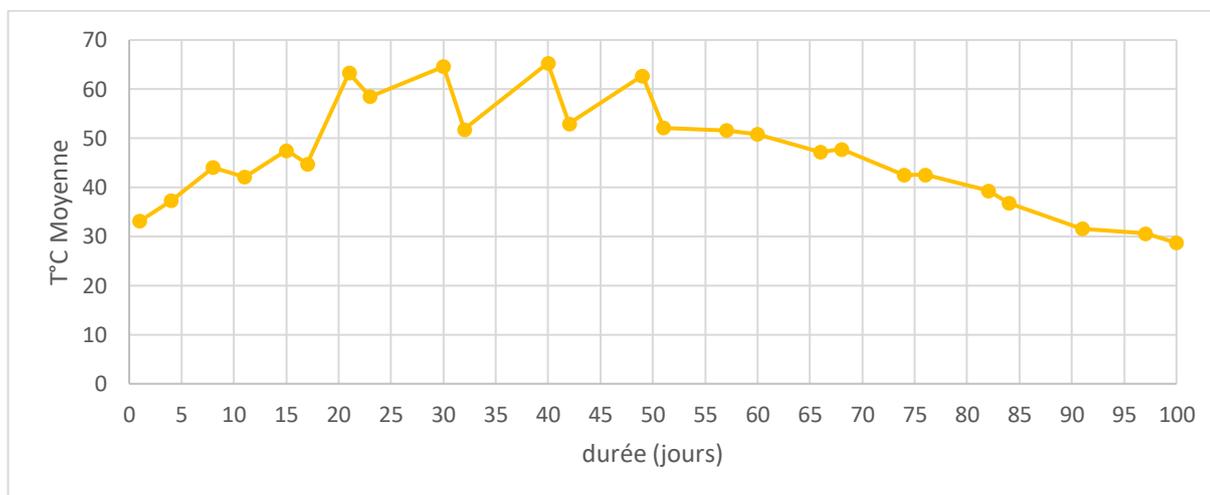


Figure 26. Évolution de la T°(C) durant le processus.

L'évolution de la température (**figure 26**) traduit une bonne évolution de processus de compostage, par succession de deux phases d'activité microbologique.

- Phase de stabilisation caractérisée a une élévation de la température jusqu'à une température maximale de 56.33 c° à correspondront à la dégradation des composés organiques simples.
- Phase de maturation caractérisée par une diminution de la température et correspondront à la dégradation des molécules lignocellulosiques, et processus de l'humification.

L'évolution de la T° assure l'hygiénisation du compost tout au long du procédé (**Tableau 3**).

	Température	Type de décomposition	Effet sur les germes pathogène
1	0 à 40° C	Fermentation froide	Virulence intacte pas d'effet désinfectant
2	40 à 50° C	Fermentation a température moyenne	Désinfection biochimique
3	50 à 60° C		Désinfection biophysique
4	65 à 80° C	Fermentation à chaud	Désinfection thermique

Tableau 3. Hygiénisation du compost en fonction de la température

I.2. Évolution du pH

Échantillon	1	2	3	4	5
<i>PH</i>	6.7	5.6	6.3	7.5	6.98

Tableau 4. Évolution du pH

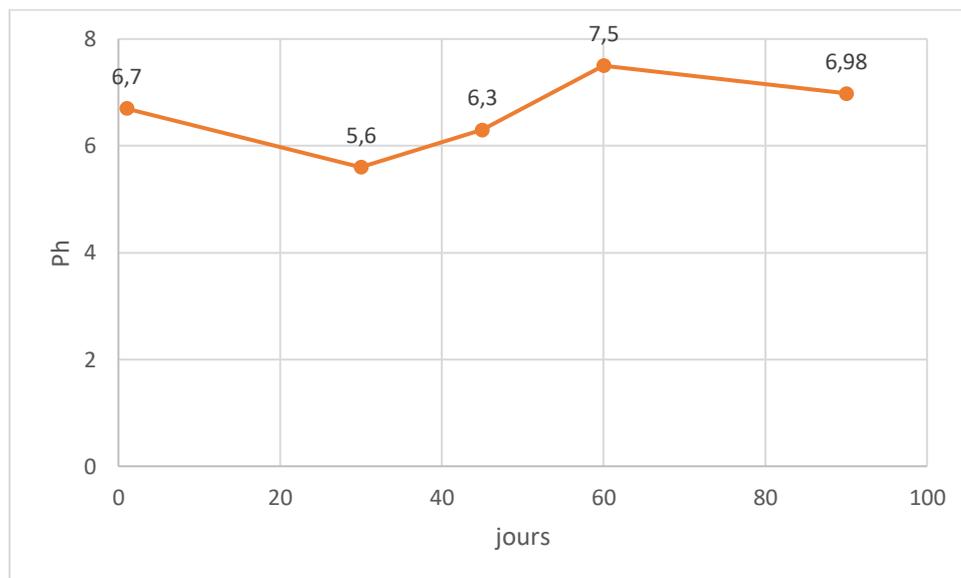


Figure 27. Evolution du pH

Au début du processus de compostage le pH se caractérise par une valeur initiale égale à 7,2 (**figure 27**). Par la suite, nous avons observé après quatre semaines une diminution du pH jusqu'à 5,4. Cette phase est appelée phase acidogène qui résulte de la production du gaz carbonique (CO₂) et de l'acide organique issue d'une activité microbienne.

Le compostage passe par une phase d'alcalinisation où le pH atteint 7,4. Cette phase est le résultat d'une production ammoniacale d'une part à partir de la dégradation des amines protéiques lors du

processus d'ammonification et d'autre part d'une libération des bases auparavant intégrées à la matière organique.

I.3. Évolution de la conductivité électrique

Échantillons	1	2	3
CE (ms/cm)	9.6	3.9	3.2

Tableau 5. Évolution de CE

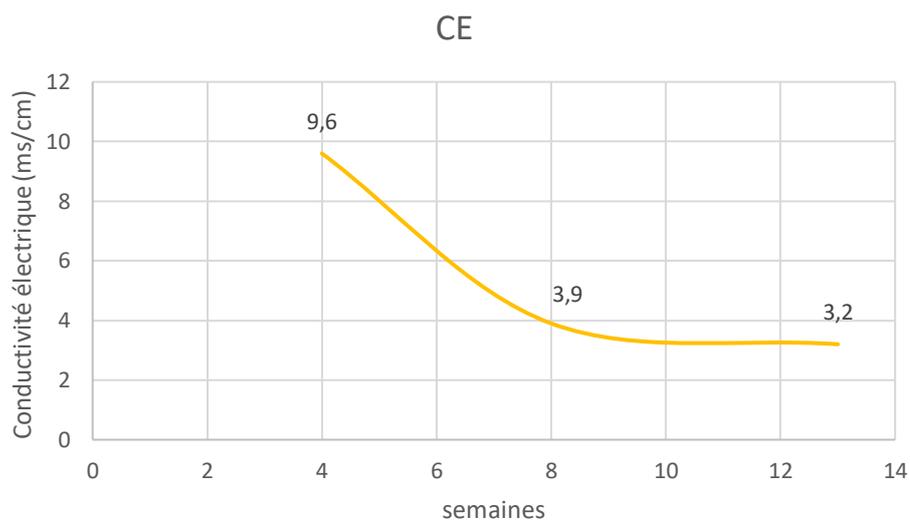


Figure 28. L'évolution de la Conductivité électrique en fonction du temps

L'évolution de la CE (**figure 28**) montre que les différents tests du premier mois partent d'une valeur de 9,6 ms/cm cette valeur est assez élevée est peut s'expliquer par la salinité des matériaux de départ environ de 40^{ème} jours du compostage, Il est à noter que la conductivité accuse une diminution en fonction du temps. En effet, le lessivage des sels suite aux précipitations et à l'arrosage de l'échantillon pour assurer la fermentation.

I.4. Évolution du rapport Carbone/azote(C/N)

I.4.1. Carbone organique total (COT)

La teneur en carbone organique total (COT) de tous les traitements a diminué pendant le compostage. Les taux de diminution ont été plus importants pendant la phase thermophile (67-92% de la perte totale de carbone) et moins importants pendant la phase de durcissement. Un total de 34-55% du COT initial. À la fin du compostage, le CO₂ était la principale source de perte de carbone, représentant 70 à 85 % des pertes totales de carbone (**56**). Les autres pertes de carbone étaient causées

par l'émission de CH₄ et d'autres composés organiques volatils (tels que le méthylmercaptan et le sulfure de diméthyle) (57).

I.4.2. Évolution de l'azote total

Au cours du compostage, le rapport C/N a généralement tendance à diminuer avec le temps : cette réduction est plus rapide dans la phase active, en raison de la minéralisation du carbone en CO₂ et ralentit pendant la phase de durcissement (58). Suite à la dégradation de la matière organique, l'azote organique (N_{org}), qui est la principale forme d'azote, est minéralisé en ammoniac (NH₃) et forme du NH₄⁺ dans la phase aqueuse, ce qui augmente le pH du substrat. L'ammoniac peut être strippé par aération, oxydé en nitrate (NO₃⁻) ou immobilisé dans des macromolécules complexes riches en N. Le (NO₃⁻) pourrait être réduit davantage en azote gazeux (N₂) par les micro-organismes dénitrifiants, agissant dans les zones anaérobies de la biomasse en cours de compostage (59). L'identification de la transformation de l'azote au cours des processus biologiques aérobies est très compliquée, car elle dépend de plusieurs facteurs, dont les caractéristiques du substrat (58) ainsi que les conditions de fonctionnement, comme la température et le taux d'aération (60).

I.4.3. Rapport C/N

La quantité de C et de N dans certaines proportions est importante pour les micro-organismes (61). Des rapports C/N de 25 :1 à 35:1 sont idéaux pour le compostage (28). Le rapport C/N est souvent utilisé pour évaluer le taux de décomposition des mélanges de compost, car il peut refléter la maturité du compost (62). Les micro-organismes utilisent 15 à 30 unités de carbone par unité d'azote pendant le métabolisme aérobie actif (63). (Le tableau 6) présente les résultats du rapport C/N au début et à la fin du compostage [C/N]_f. La diminution du rapport C/N est due à la perte de carbone sous forme de dioxyde de carbone (64). La réduction du rapport C/N est en accord avec celle de la MO pour les mélanges.

MO _i %	MO _f %	[C/N] _i	[C/N] _f
88.37	79.82	28.16	17.26

Tableau 6. OM, C/N ratios (61)

I. 5. Classification du compost produit selon les Normes.

Les normes réglementaires de qualité du compost ont été développés aux niveaux régional et national en prenant en compte de rendre compte de différents problèmes. Les questions environnementales sont plus souvent prises en compte que les questions relatives à sa valeur

agronomique (65). Le respect de la norme signifie généralement que le compost est suffisamment sûr pour être utilisé, mais ne garantit pas que le compost réponde aux besoins spécifiques de l'utilisation finale. (La figure 29) montre la classification des normes relatives au compost dans différents pays en fonction de différents critères, notamment la concentration de métaux lourds, le niveau de maturité/stabilité, les utilisations finales ou les types de matières premières. La classification des normes de compost est effectuée sur la base de diverses sources d'examen, comme décrit ci-après.

En se référant à la figure 29, l'ordonnance Autriche-Compost (66), l'ordonnance Espagne (67), le décret Allemagne-Biowaste (66), le décret Pays-Bas-BOOM (66) et le répertoire EUBiowaste (33) ont classé la qualité du compost en deux classes ou plus en fonction de la teneur en métaux lourds avec différentes valeurs seuils

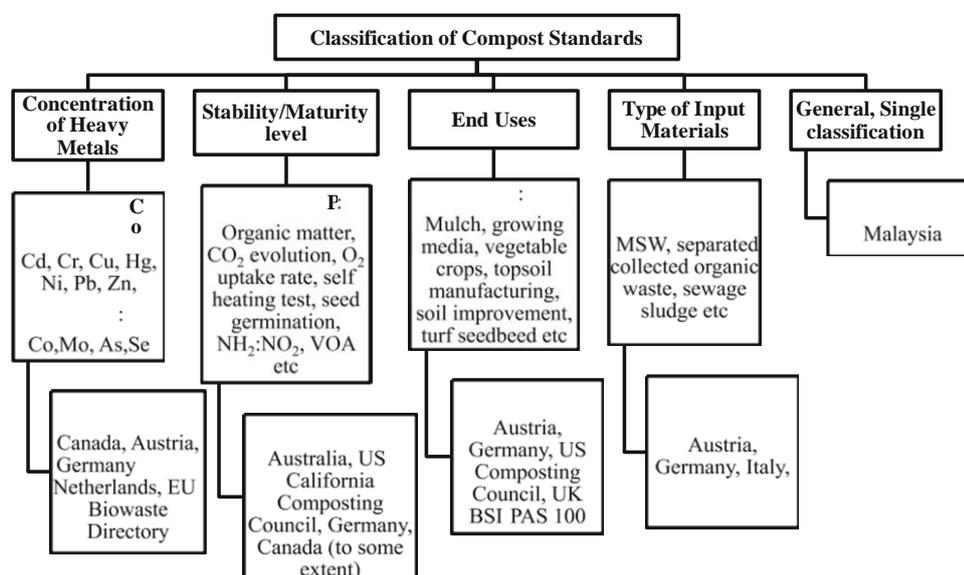


Figure 29. Norme de classification des composts dans les différents pays (68)

L'Algérie prend en considération les mêmes normes que celles appliquées en France AFNOR 44-051 (figure 30) présente les critères actuellement appliqués en France pour la classification des produits issus du traitement des résidus organiques comme amendements ou engrais. Ces critères sont liés à la composition des produits.

Products explicitly classified in French standards	French standard	N (%)	Organic N (%)	NO ₃ + NH ₄ + ureaic N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	N + P ₂ O ₅ + K ₂ O (%)	C/N	Organic matter (%)	Dry matter (%)
Organic amendments		Conditions to be met								
Manure (solid)	NFU 44-051	<3	–	<33 of N	<3	<3	<7	>8	>20	>30
Composted manure and litter (except poultry litter)	NFU 44-051	<3	–	<33 of N	<3	<3	<7	>8	>20	>30
Composted green waste	NFU 44-051	<3	–	<33 of N	<3	<3	<7	>8	>20	>30
Composted biowaste	NFU 44-051	<3	–	<33 of N	<3	<3	<7	>8	>20	>30
Composted animal and/or vegetal matter	NFU 44-051	<3	–	<33 of N	<3	<3	<7	>8	>20	>30
Vegetal and/or animal materials, raw or treated	NFU 44-051	<3	–	<33 of N	<3	<3	<7	>8	>25	>30

Figure 30. Critères, relatifs à la composition, pour la classification des produits issus dutraitementdesrésidusorganiquescomme amendements ou engrais, en France (69).

Conclusion Générale

La valorisation des déchets comme matière première s'avère nécessaire comme source de richesses, pour améliorer l'hygiène publique, protéger les sols et les nappes d'eau souterraines, atténuer les émissions de gaz à effet de serre, économiser les ressources naturelles et permettre le développement d'une économie circulaire sobre en carbone.

Cette étude met en exergue le comportement de la matière organique issue des déjections animales et des sous-produits agroindustriels lors du processus du compostage.

La voie naturelle de valorisation par compostage comporte nombreux avantages notamment la réduction des volumes de déchets, l'hygiénisation et la stabilisation de la matière organique, l'incorporation de compost aux sols s'avère efficace pour lutter contre la dégradation de la surface des sols et améliorer sa porosité et sa structure.

Dans ce contexte, nous avons préparé un andin de compost à base de fumier bovin/grignon d'olive, en respectant les différentes conditions de compostage. Nous avons par la suite effectué les analyses physico-chimiques de cet andin. Les principales conclusions à retenir sont :

- Le compostage représente une solution efficace pour la stabilisation biologique des déchets organiques.
- Les paramètres analysés ont montré la nécessité d'une surveillance avancée des conditions du processus
- La montée en température assure l'hygiénisation des déchets pendant le processus.
- Un pH proche de la neutralité, permet aux nutriments du compost d'être facilement absorbés par les plantes.

Références bibliographiques

1. Sharpley, A. N. and S. Smith (1995). "Nitrogen and phosphorus forms in soils receiving manure."
2. Hutchison, M., et al. (2005). "Analyses of livestock production, waste storage, and pathogen levels and prevalences in farm manures." *Applied and Environmental Microbiology* 71(3): 1231-1236.
3. Vervoort, R., et al. (1998). "Nutrient losses in surface and subsurface flow from pasture applied poultry litter and composted poultry litter." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 50(1-3): 287-290.
4. Salazar, F., et al. (2005). "Nitrogen budgets for three cropping systems fertilised with cattle manure." *Bioresource technology* 96(2): 235-245.
5. Carr, L., et al. (1995). "Commercial and on-farm production and marketing of animal waste compost products."
6. Wang, S. and Y. Zeng (2018). "Ammonia emission mitigation in food waste composting: a review." *Bioresource technology* 248: 13-19.
7. Sharma, V., et al. (1997). "Processing of urban and agro-industrial residues by aerobic composting." *Energy Conversion and Management* 38(5): 453-478.
8. Tremier, A., et al. (2009). "Le compostage." *Le traitement des déchets*: 407.
9. Mustin, M. (1987). "Le compost: Gestion de la matière organique, Ed." François Dubusc, Paris.
10. Epstein, E. (1996). *The science of composting*, CRC press.
11. Charnay, F. (2005). "Compostage des déchets dans les Pays en Développement : élaboration d'une démarche méthodologique pour une production pérenne de compost.": 448p.
12. Pace, M. G., et al. (1995). *The composting process*. 1: 2.
13. De Bertoldi, M. (2013). *The science of composting*, Springer Science & Business Media.
14. Cummings, D. (2015). *The Organic Composting Handbook: Techniques for a Healthy, Abundant Garden*, Simon and Schuster.
15. Riffaldi, R., et al. (1986). "Evaluation of compost maturity by means of chemical and microbial analyses." *Waste management & research* 4(4): 387-396.
16. Bernai, M. P., et al. (1998). "Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes." *Bioresource technology* 63(1): 91-99.
17. Morel, J., et al. (1979). "Contribution à la réalisation de tests de détermination de la maturité des composts urbains."

18. Navarro, A., et al. (1993). "Relationships between organic matter and carbon contents of organic wastes." *Bioresource technology* 44(3): 203-207.
19. Misra, R., et al. (2005). "Méthodes de compostage au niveau de l'exploitation agricole." FAO. ed. Rome.
20. de Bertoldi, M. d., et al. (1983). "The biology of composting: a review." *Waste Management & Research* 1(2): 157-176.
21. Maheshwari, D. K. (2014). *Composting for sustainable agriculture*, Springer.
22. LECLERC, B. (2001). "Guide des matières organiques. eds Guide Technique de l'ITAB."
23. Znaïdi, A. (2002). Etude et évaluation du compostage de différents types de matières organiques et des effets des jus de composts biologiques sur les maladies des plantes, Mediterranean Agronomic Institute of Bari.
24. Stoffella, P. J. and B. A. Kahn (2001). *Compost utilization in horticultural cropping systems*, CRC press.
25. Maheshwari, D. K. (2014). *Composting for sustainable agriculture*, Springer International Publishing.
26. Awasthi, M. K., et al. (2014). "Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting." *Bioresource technology* 168: 214-221.
27. Zhang, L. and X. Sun (2016). "Influence of bulking agents on physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage composting of green waste." *Waste Management* 48: 115-126.
28. Chowdhury, A. K. M. M. B., et al. (2013). "Olive mill waste composting: a review." *International Biodeterioration & Biodegradation* 85: 108-119.
29. Mohee, R., et al. (2015). "Assessing the potential of coal ash and bagasse ash as inorganic amendments during composting of municipal solid wastes." *Journal of Environmental Management* 159: 209-217.
30. Mulec, A. O., et al. (2016). "Composting of the solid fraction of blackwater from a separation system with vacuum toilets—Effects on the process and quality." *Journal of Cleaner Production* 112: 4683-4690.
31. Luxen, P., et al. (2006). "Le compostage des fumiers, une technique de valorisation des matières organiques en agriculture." Direction Générale de l'Agriculture (Ed), Les livrets de l'agriculture.
32. Michaud, L. and É. Smeesters (2007). *Tout sur le compost: le connaître, le faire, l'acheter et l'utiliser*, Éditions MultiMondes.
33. Brinton, W. F. (2000). "Compost quality standards and guidelines." Final Report by Woods End Research Laboratories for the New York State Association of Recyclers.

34. Bernal, M. P., et al. (2009). "Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review." *Bioresource technology* 100(22): 5444-5453.
35. Ge, J., et al. (2015). "Mechanism and kinetics of organic matter degradation based on particle structure variation during pig manure aerobic composting." *Journal of Hazardous Materials* 292: 19-26.
36. Makan, A., et al. (2013). "Effect of initial moisture content on the in-vessel composting under air pressure of organic fraction of municipal solid waste in Morocco." *Iranian journal of environmental health science & engineering* 10(1): 3.
37. Voběrková, S., et al. (2017). "Enzyme production during composting of aliphatic–aromatic copolyesters in organic wastes." *Environmental Engineering Science* 34(3): 177-184.
38. El Fels, L., et al. (2014). "Identification and biotransformation of lignin compounds during co-composting of sewage sludge-palm tree waste using pyrolysis-GC/MS." *International Biodeterioration & Biodegradation* 92: 26-35.
39. Román, P., et al. (2015). "Farmer's compost handbook." Experiences in Latin America. Santiago: FAO.
40. Diaz, L. F., et al. (2002). "Composting of municipal solid wastes." *Handbook of solid waste management*: 117-150.
41. Epstein, E. (2011). *Industrial composting: environmental engineering and facilities management*, CRC Press.
42. Albrecht, R. (2007). *Co-compostage de boues de station d'épuration et de déchets verts: nouvelle méthodologie du suivi des transformations de la matière organique*.
43. Francou, C., et al. (2005). "Stabilization of organic matter during composting: influence of process and feedstocks." *Compost science & utilization* 13(1): 72-83.
44. Rynk, R., et al. (1992). *On-Farm Composting Handbook* (NRAES 54), Northeast Regional Agricultural Engineering Service (NRAES).
45. Atalia, K., et al. (2015). "A review on composting of municipal solid waste." *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology* 9(5): 20-29.
46. Taiwo, L. and B. Oso (2004). "Influence of composting techniques on microbial succession, temperature and pH in a composting municipal solid waste." *African Journal of Biotechnology* 3(4): 239-243.
47. Debril, J., et al. (2005). "Gestion des déchets de Jussie par le compostage." *DIREN des Pays de la Loire, UMR INRA Agrocampus EQHC, Rennes*: 37.
48. Raut, M., et al. (2008). "Microbial dynamics and enzyme activities during rapid composting of municipal solid waste—a compost maturity analysis perspective." *Bioresource technology* 99(14): 6512-6519.
49. Li, Y., et al. (2015). "Effects of Cu exposure on enzyme activities and selection for microbial tolerances during swine-manure composting." *Journal of Hazardous Materials* 283: 512-518.

50. Chowdhury, A. K. M. M. B., et al. (2015). "Is physicochemical evaluation enough to characterize olive mill waste compost as soil amendment? The case of genotoxicity and cytotoxicity evaluation." *Journal of Cleaner Production* 93: 94-102.
51. Hermann, B., et al. (2011). "To compost or not to compost: Carbon and energy footprints of biodegradable materials' waste treatment." *Polymer Degradation and Stability* 96(6): 1159-1171.
52. Traversa, A., et al. (2010). "Water-extractable organic matter of different composts: A comparative study of properties and allelochemical effects on horticultural plants." *Geoderma* 156(3-4): 287-292.
53. Gould, J., et al. (2013). "The effects of windrow composting on the viability of *Parascaris equorum* eggs." *Veterinary parasitology* 191(1-2): 73-80.
54. Pandey, P. K., et al. (2016). "A new closed loop heating system for composting of green and food wastes." *Journal of Cleaner Production* 133: 1252-1259.
55. Mohammad, N., et al. (2012). "Effective composting of oil palm industrial waste by filamentous fungi: A review." *Resources, conservation and Recycling* 58: 69-78.
56. Guo, R., et al. (2012). "Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost." *Bioresource technology* 112: 171-178.
57. Hanajima, D., et al. (2010). "Key odor components responsible for the impact on olfactory sense during swine feces composting." *Bioresource technology* 101(7): 2306-2310.
58. Zhou, H., et al. (2018). "Transformation of organic nitrogen fractions with different molecular weights during different organic wastes composting." *Bioresource technology* 262: 221-228.
59. Wang, P., et al. (2004). "Maturity indices for composted dairy and pig manures." *Soil Biology and Biochemistry* 36(5): 767-776.
60. De Guardia, A., et al. (2010). "Comparison of five organic wastes regarding their behaviour during composting: Part 2, nitrogen dynamic." *Waste Management* 30(3): 415-425.
61. Ekinici, K., et al. (2020). "Aeration requirement and energy consumption of reactor-composting of rose pomace influenced by C/N ratio." *Environmental Monitoring and Assessment* 192(9): 1-9.
62. Nafez, A. H., et al. (2015). "Sewage sludge composting: quality assessment for agricultural application." *Environmental Monitoring and Assessment* 187(11): 709.
63. Haug, R. (1993). "The practical handbook of compost engineering."
64. Li, Z., et al. (2015). "Critical factors and their effects on product maturity in food waste composting." *Environmental Monitoring and Assessment* 187(4): 217.
65. Cesaro, A., et al. (2015). "Compost from organic solid waste: Quality assessment and European regulations for its sustainable use." *Resources, Conservation and Recycling* 94: 72-79.

66. Hogg, D., et al. (2002). "Comparison of compost standards within the EU, North America and Australasia." Main Report, The Waste and Resources Action Programme, Banbury, Oxon, UK.
67. Stretton-Maycock, D. and G. Merrington (2009). "The use and application to land of MBT compost-like output-review of current European practice in relation to environmental protection." Science Report-SC030144/SR3. Environment Agency, Bristol, UK.
68. Van Fan, Y., et al. (2016). "Economic assessment system towards sustainable composting quality in the developing countries." *Clean Technologies and Environmental Policy* 18(8): 2479-2491.
69. Avadí, A., et al. (2020). "Life cycle inventory data on French organic waste treatments yielding organic amendments and fertilisers." *Data in Brief* 28: 105000.