

Dédicaces

Je dédie ce travail de fin d'études à ...

À mes très chers parents

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon profond amour, mon grand respect et mon estime. Votre affection, soutien et encouragement constants m'ont été d'un grand réconfort et ont contribué à l'aboutissement de ce travail. En reconnaissance de tous les sacrifices consentis pour me permettre d'atteindre cette étape de ma vie. Que Dieu vous garde et vous procure longévité et santé pour ne jamais vous décevoir et être à la hauteur de vous attentes.

À mes frères (Najim, Adil, Abdelmajid, Bahia et bilal)

Vous qui m'avez toujours défendu, aidé et soutenu le long de mon cursus de formation, veuillez trouver dans ce modeste travail le témoignage de mon profond respect et dévouement. Que Dieu vous garde, vous protège et vous comble de santé, de bonheur et de réussite. Soyons toujours unis.

À la mémoire de mes grands-pères

J'aurais tant aimé que vous soyez présents. Que Dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde.

**A l'équipe de travail (biofertilisant) Pr . Bouamrri, Mohemmed ,
Meryem, Nouhailla...**

A Tous et toutes les membres de laboratoire protection des plantes

À mes copines et copines

Mohammed, Rabie, Nabil, Said, Bilal, Jbilou, Jalal, Khalid, Anas, Bader, Yassir, Omar, Yassin, Youssef, Meryem, Wijdane, Aziza, Yassmin, Hajar, Nouhailla...

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

À tous mes collègues de la promotion 2022 Master GCB

Que Dieu vous aide à compléter toutes vos ambitions

À tous mes amis et ceux qui me sont chers

À moi-même

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, je tiens à exprimer ma gratitude et mes vifs remerciements au **Pr BOUAMRI Rachid** enseignant-chercheur à l'ENA de Meknès et au **Pr BENJELLON Meryem** enseignante-chercheuse à FST de Fès, pour leurs disponibilités, encadrements, conseils fructueux et instructifs et pour leurs qualités humaines. Leurs directives m'ont été d'une aide précieuse dans la réalisation de ce travail, qu'ils trouvent ici le témoignage de ma reconnaissance et mon profond respect.

Je profite aussi de l'occasion pour exprimer ma vive gratitude, mon profond respect et mes sincères reconnaissances aux membres du jury **Pr. DERRAZ Khalid, Pr. FADIL Fatima et Pr. RACHIQ Saad** pour leur présence et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Ma sincère gratitude va à tous les enseignants-chercheurs du Département de biologie en particulier et les professeurs de la faculté des sciences et techniques de Fès en général.

Je remercie vivement Monsieur **OU-ZINE Mohammed** doctorant à l'ENA de Meknès pour son aide et son soutien le long de mon projet de fin d'études.

J'adresse mes remerciements aussi aux **mesdemoiselles Meryem et Wijdane** doctorantes à l'ENA de Meknès pour leurs aides et leurs soutiens le long de mon projet de fin d'études.

Il m'est également agréable d'adresser mes remerciements à tous les membres de l'école nationale d'agriculture de Meknès, les enseignants-chercheurs, les doctorants, les techniciens, les sécurités, les ouvriers, tous les travailleurs internes et externes

Un grand hommage est rendu, au terme de ces remerciements, à ma famille pour l'amour et l'appui inconditionnels

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Résumé

Le compostage présente plusieurs intérêts tels que l'amélioration de la fertilité et de la qualité du sol, favorisant ainsi une augmentation de la productivité agricole, une meilleure biodiversité du sol et préserver l'environnement. C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude dont l'objectif est de valoriser les sous-produits organiques agricoles en fertilisant et suivre l'évolution des propriétés physico-chimiques des sous-produits organiques agricoles au cours du compostage, puis évaluer la maturité du produit fini.

Le mélange utilisé pour cette étude a été préparé avec 25 kg de résidus du romarin et 10 kg de fiente de volaille avec un rapport C/N égale 33%. Le compostage a duré deux mois dans un bioréacteur à aération forcée, durant lesquels nous avons effectué périodiquement des contrôles des principaux paramètres physico-chimiques (T°, Humidité, EC, pH, C, MO, N et C/N) et la phytotoxicité du mélange à une concentration 100% et concentration 50%. Les résultats obtenus ont montré que le produit fini contient 29,67 % de carbone organique, 52,81 % de matière organique, 1,39 % d'azote, 21,34 % du rapport C/N, un pH de 8,62, une conductivité électrique de 3,56 mS /cm et une humidité de 39%. A une concentration de 100% de l'extrait du compost, la phytotoxicité est modérée (taux de germination est 62%). Pour la concentration 50%, la phytotoxicité est absente (taux de germination est 82%).

Ces résultats montrent que la qualité de compost s'améliore avec le temps, et donc ce compost ne peut être utilisé comme amendement qu'à la fin de sa maturité.

Mots clés : Compostage, Sous-produits organiques, Biofertilisant, Phytotoxicité, paramètres physicochimiques, Maturation.

Abstract

Composting presents several interests such as the improvement of the fertility and the quality of the soil, thus promoting an increase in agricultural productivity, a better biodiversity of the soil and to preserve the environment. It is in this context that the present study was carried out with the objective to valorize the agricultural organic by-products as fertilizer and to follow the evolution of the physicochemical properties of the agricultural organic by-products during the composting process, then to evaluate the maturity of the finished product.

The mixture used for this study was prepared with 25 Kg of rosemary residues and 10 Kg of poultry droppings with a C/N ratio equal to 33%. The composting lasted two months in a forced aeration bioreactor, during which we carried out periodic controls of the main physicochemical parameters (T°, Humidity, EC, pH, C, MO, N and C/N) and the phytotoxicity of the mixture at 100% concentration and 50% concentration. The results obtained showed that the finished product contains 29.67% organic carbon, 52.81% organic matter, 1.39% nitrogen, 21.34% C/N ratio, pH of 8.62, electrical conductivity of 3.56 mS /cm and humidity of 39% . At a concentration of 100% of the compost extract, phytotoxicity is moderate (germination rate is 62%). At 50% concentration, phytotoxicity is absent (germination rate is 82%).

These results show that the quality of compost improves with time, and therefore this compost can be used as an amendment only at the end of its maturity.

Keywords : Composting, Organic by-products, Biofertilizer, Phytotoxicity, Physicochemical parameters, Maturation.

Liste de figures

Figure 1: Répartition de la production estimée de résidus de culture au	4
Figure 2: Représentation d'une courbe de pH typique dans un processus de compostage par lots ; le pH diminue initialement, et le début de la phase de haut débit coïncide	12
Figure 3 : Courbe théorique d'évolution de la température et du pH au cours des différentes phases du compostage d'après Mustin (1987)	15
Figure 4: Sous-produits utilisés, a : fiente volaille, B : résidus de romarin	20
Figure 5: Balance de type HYHO (60 kg max).....	21
Figure 6: Processus d'homogénéisation manuelle avec l'arrosage du mélange	21
Figure 7: Bioréacteurs utilisés à aération forcée	22
Figure 8: Système d'aération automatique connecté avec le bioréacteur	22
Figure 9: Thermomètre KIMO KIT 220 (A) équipé de deux sondes métalliques	23
Figure 10: Test de phytotoxicité a des concentrations 50%, 100% et témoin	28
Figure 11: Incubation des boîtes de culture a une température de 27 °C.....	28
Figure 12: Évolution de la température de bioréacteur et la température ambiante au cours du compostage.....	32
Figure 13: Évolution de l'humidité au cours du compostage.	35
Figure 14 : Corrélation linière négative entre l'humidité et la température au cours du compostage (model Pearson)	36
Figure 15 : Évolution du pH au cours du compostage	37
Figure 16 : Évolution de la conductivité électrique (EC) durant	38
Figure 17 : Évolution de carbone organique total (COT) durant	39
Figure 18 : Evolution de la matière organique total (MO) durant la période du compostage	40
Figure 19 : Evolution de l'azote total (NKT) durant la période du compostage	40
Figure 20 : Evolution du rapport C/N durant la période du compostage	41
Figure 21 : Figure 21 : Test de phytotoxicité de l'extrait du compost évalué par le taux de germination (TG) des graines de cresson. (T0 : témoin ; 50 % et 100 % sont des	43
Figure 22: Évolution des taux de germination des deux concentrations (50% et 100%) avec témoins en fonction des nombres des jours du compostage (T0 : témoin)	44
Figure 23 : Corrélation linière négative entre le rapport C/N et le taux de la germination (phytotoxicité) au cours du compostage (model Pearson)	45

Liste des tableaux

Tableau I : Caractéristiques physico-chimiques de certains résidus de cultures	5
Tableau II : Estimations des quantités de fumier humide (10 à 30 % d'eau) produit par chaque animal au Maroc en tonnes / tête/an (Sabir et Roose, 2017).....	6
Tableau III : Estimations de la production annuelle totale de fumier par chaque espèce animale	6
Tableau IV : Caractéristiques physicochimiques de certains sous-produits organiques agricoles d'origine animale (Chambres d'Agriculture du Nord France) (Trochard et al., 2019).....	7
Tableau V : Caractéristiques physico-chimiques de certains sous-produits des industries d'agroalimentaires (Chouchene, 2010) (rapporte de l'institut français de la vigne et du vin, 2013) (Khenoussi et al., 2013).....	9
Tableau VI : Propriétés physico-chimiques initiales des sous-produits utilisés et du mélange initial.....	31

Liste des abréviations

PIB : Produit intérieur brut

DEPF : Direction des Études et des Prévisions financières

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

COT : Carbone organique total

NTK : Azote total kjeldahle

EC : Conductivité électrique

pH : potentiel hydrogène

FAOSTAT : Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database

An : Année

L : Litre

kg : kilograms

ISO : Organisation internationale de normalisation

NF-EN : Normes européennes et internationales

NF-U : Norme d'amendements organiques

S-N-K : Student-Newman-Keuls

ANOVA : Analyse de la variance

SPSS : Statistical Package for the Social Sciences

Table des matières

Introduction

Partie bibliographique

1	Sous-produits organiques agricoles.....	3
1.1	Généralités.....	3
1.2	Sous-produits organiques agricoles végétaux au Maroc.....	3
1.2.1	Production.....	3
1.2.2	Caractéristiques physicochimiques	4
1.3	Sous-produits organiques agricoles animaux au Maroc.....	5
1.3.1	Production.....	5
1.3.2	Caractéristiques physicochimiques	6
1.4	Sous-produits de l'industrie agro-alimentaire au Maroc	7
1.4.1	Production.....	7
1.4.2	Caractéristiques physicochimiques	8
2	Technologie du compostage	9
2.1	Définition	9
2.2	Intérêts.....	10
2.3	Paramètres principaux du compostage	10
2.3.1	Température	10
2.3.2	Humidité.....	11
2.3.3	Aération.....	11
2.3.4	pH.....	11
2.3.5	Conductivité électrique	12
2.3.6	Carbone organique.....	13
2.3.7	Azote totale.....	13
2.3.8	Rapport C / N.....	13
2.4	Phases du compostage	14
2.4.1	Phase mésophile.....	14

2.4.2	Phase thermophile	14
2.4.3	Phase de refroidissement	14
2.4.4	Phase de maturation.....	15
2.5	Techniques du compostage	15
2.6	Maturité des composts.....	16
2.7	Norme et qualité d'un compost.....	17
2.8	Avantages et inconvénients du compostage.....	17

Partie matériel et méthode

3	Matériel biologique utilisé.....	20
3.1	Résidus de romarin.....	20
3.2	Fiente de volaille	20
4	Méthodologie du travail	20
4.1	Formulation.....	20
4.2	Homogénéisation.....	21
5	Conduite du compostage	22
6	Observations	22
7	Échantillonnage.....	23
8	Paramètres physico-chimiques évalués.....	23
8.1	Température.....	23
8.2	Humidité.....	24
8.3	pH.....	24
8.4	Conductivité électrique EC.....	24
8.5	Carbone organique total	24
8.6	Matière organique MO %	25
8.7	Azote total.....	25
8.8	Rapport C/N.....	26
9	Test de phytotoxicité	27
9.1	Extraits aqueux du compost	27

9.2	Évaluation de phytotoxicité	27
10	Analyses statistiques.....	29

Partie résultats et discussion

11	Propriétés physico-chimiques des matières premières et du mélange initial	31
12	Évolution des paramètres physicochimiques du compost	32
12.1	Évolution de la température	32
12.2	Évolution d'humidité.....	35
12.3	Evolution du Ph	37
12.4	Conductivité électrique (CE)	38
12.5	Évolution de carbone organique total (COT)	39
12.6	Evolution de la matière organique (MO)	40
12.7	Evolution de l'azote total (NKT)	40
12.8	Evolution du rapport C/N.....	41
13	Évolution de la phytotoxicité et la maturité du compost	43

Conclusion et perspectives

Références bibliographiques

Références webographiques

Annexes

Introduction

Au Maroc, l'agriculture revêt une importance économique et sociale indéniable, avec une part autour de 38% dans l'emploi total au niveau national et environ 74% en milieu rural. Cette activité contribue, par ailleurs, pour près de 13% du PIB, sachant que cette contribution est variable selon les territoires. Pour certaines régions, le secteur agricole représente une part prépondérante de l'activité économique (DEPF, 2019).

Les principales productions végétales du pays sont constituées par les céréales (blé, orge), les agrumes (oranges, clémentines), les olives, les rosacées fruitières (amandes, pommes, abricots...), les betteraves à sucre, les légumineuses alimentaires, les cultures maraîchères, dont les pommes de terre et les tomates. Toutes ces productions pourraient être destinées aux exportations. L'élevage (ovin, caprin, bovin, camelin, avicole) constitue aussi une composante importante du secteur agricole en contribuant à hauteur de 30 % à sa valeur ajoutée (MAPM, 2018).

Ce secteur génère une grande quantité de sous-produits organiques (déchets) qui s'élève à environ 55 millions de tonnes (Elmakki et *al.*, 2015). Précisément, les sous-produits organiques produits par le secteur végétal s'élèvent à environ de 19 millions de tonnes par an. Ainsi que, les sous-produits organiques qui génèrent le secteur d'élevage, atteignent à 35,7 millions de tonnes par an (Belmakki et *al.*, 2015).

Les déchets agricoles sont à l'origine des problèmes environnementaux dans le monde depuis l'antiquité, mais ils sont aujourd'hui devenus plus nocifs pour la santé des individus et d'environnement, en raison de leurs quantités qu'elle s'est doublées, d'explosion démographique et du développement industriel et technologique que le monde a atteint (Basalo, 1974 ; Golueke, 1979).

L'objectif principal de ce travail consiste à valoriser ces sous-produits organiques agricoles en biofertilisants, et les objectifs spécifiques sont :

- Suivre l'évolution des propriétés physico-chimiques des sous-produits organiques agricoles au cours du compostage.
- Évaluer la maturité du produit fini.

Ce mémoire sera présenté comme suites :

- La première partie sera consacrée à l'étude bibliographique sur la production des sous-produits organiques agricoles au Maroc.
- La deuxième partie est la partie pratique qui traitera la méthodologie du travail.
- La dernière partie comportera les résultats trouvés, la conclusion et les perspectives.

Première partie
Étude bibliographique

1 Sous-produits organiques agricoles

1.1 Généralités

Au Maroc, plusieurs unités de production comme l'agriculture, coopératives et industries agroalimentaires se retrouvent avec des quantités énormes de résidus et sous-produits organiques, et cherchent une solution pour une meilleure valorisation (Afilal, 2015) .

Selon les études statistiques du département marocain de l'environnement qui montre que la production de sous-produits domestiques atteint 6,5 millions de tonnes de sous-produits ménagers en 2012, autant que pour les déchets générés par le secteur industriel ; les dernières estimations indiquent une production nationale d'environ 1,6 million de tonnes des sous-produits. Par contre les déchets organiques générés par le secteur agricole n'ont jamais présence des statistiques spécifiques pour évaluer leur quantité (Belmakki, et *al.*, 2015), sauf qu'il y a des estimations accordées par des études ; montrent que le secteur agricole au Maroc génère une grande quantité de déchets organiques qui s'élève à environ 55 millions de tonnes (Elmakki et *al.*, 2015). Cette estimation est basée sur les ratios de résidus production par hectare provenant d'études antérieures et de recherches résultats de recherche de la FAO.

D'ailleurs ; les sous-produits organiques sont générés principalement par deux secteurs principales (Ajir, 2009) :

- ✓ Le secteur agro-industriel : des sous-produits de la transformation des produits agricoles tels que la bagasse et la mélasse (provenant du raffinage du sucre), les margines et les grignons (provenant de la trituration des olives), les tourteaux (provenant de la transformation du soja et du tournesol) ... etc.
- ✓ Le secteur agricole : résidus de culture, résidus de taille des arbres, fumier, racines.... etc.

1.2 Sous-produits organiques agricoles végétaux au Maroc

1.2.1 Production

Au Maroc, les sous-produits organiques qui produits par le secteur végétal s'élèvent à environ de 19 millions de tonnes par an. Ces sous-produits consistent principalement en résidus de cultures (feuilles, tiges et racines) laissés dans les champs après la récolte ou après la dégradation des espèces sauvages (Belmakki, et *al.* 2015). Ces résidus de culture sont l'une des ressources les plus abondantes, les moins chères et les plus renouvelables de la planète, nombreux avantages (Santana-Meridas et *al.*, 2012). En fonction de la fertilité du sol et des espèces cultivées, les résidus de culture apportent, après décomposition, plusieurs nutriments minéraux (Lal et *al.*, 2005). Cependant, les résidus de culture ayant un rapport C:N élevé peuvent initialement immobiliser l'azote disponible dans le sol (Garai et *al.*, 2020). Néanmoins, l'ajout continu et à

long terme de résidus de culture conduit finalement à une meilleure disponibilité des nutriments pour les cultures suivantes (Maqsood et *al.*, 2022).

Plus de 200 milliards de tonnes de résidus de culture sont produites annuellement dans le monde entier (Horváth et *al.*, 2016), les céréales représentent 74 % de la production de résidus de culture, 10 % étant apportés par les cultures sucrières, 8 % par les légumineuses, 5 % par les tubercules et seulement 3 % par les cultures oléagineuses (Maqsood et *al.*, 2022). Dans ce contexte, l'Asie représente environ 47 % de la production annuelle totale de résidus de culture, ainsi qu'environ 6 % du résidu de culture est produit en Afrique (Kamusoko et *al.*, 2021).

Au Maroc, les céréales sont les cultures les plus exportatrices de résidus avec un rapport d'environ 2,5 tonnes/ha, elles constituent 69% des résidus totaux (Figure 1). Une grande partie des résidus de culture sont collectés après la récolte sous forme de balles. En plus ; les plantations et les cultures maraîchères exportent également des quantités de résidus avec des rapports de production respectivement de 3,4 tonnes/ha et 6,8 tonnes/ha (Belmakki, et *al.* 2015).

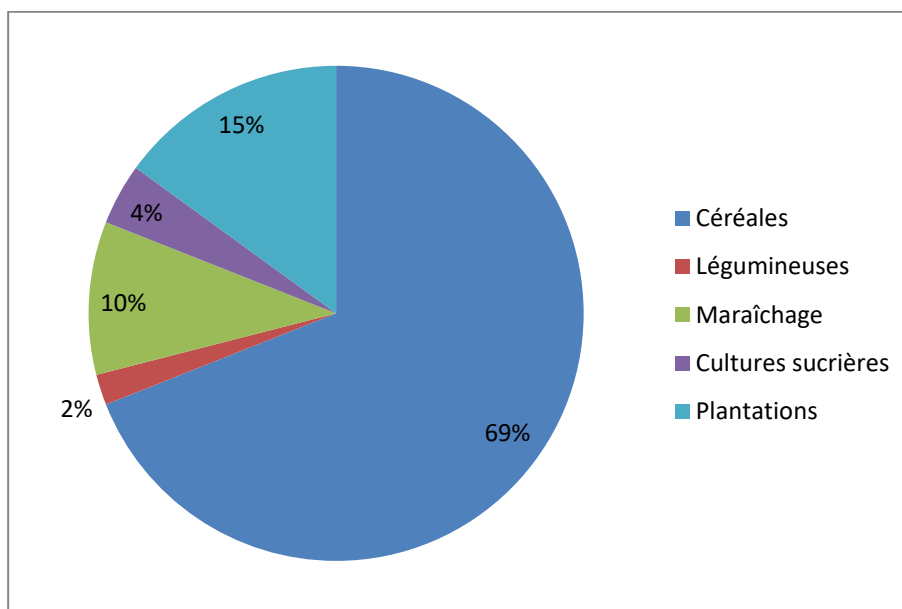


Figure 1: Répartition de la production estimée de résidus de culture au Maroc en 2013 (FAO, 2013).

1.2.2 Caractéristiques physicochimiques

Les résidus agricoles végétaux regroupent l'ensemble des parties de la production végétale, elles sont caractérisées par des propriétés physicochimiques propres (Tableau 1) et très variables entre eux (Decam, 2013).

Tableau I : Caractéristiques physico-chimiques de certains résidus de cultures

Résidus	C : N (%)	Densité g/cm ³	P2O5 (%)	K2O (%)	pH	Humidité (%)	Références
Déchets de pistache	65.1 ± 1.87	0.28 ± 0.7	0.4 ± 0.01	0.5 ± 0.01	8.1 ± 0.01	-	Esmaeili, 2020
Canne à sucre	-	0.12	0.18	0.28	-	15	Decam, 2013
Marc de café	22	1.16	0.20	2.02	-	15.2	Salsabila, 2019
Bios taille	56.5	0.17 ± 0.05	0.25	0.70	8	15.5	Decam, 2013

1.3 Sous-produits organiques agricoles animaux au Maroc

1.3.1 Production

En 2015, le Maroc est occupé la première place sur le podium des pays d'élevage (poulets, bovins et buffles) dans la région du Maghreb, avec une production d'environ 195 millions de têtes de poulets, 3 millions de têtes produites de bovins et de buffles, et une deuxième place pour l'élevage d'ovins et de caprins (25 millions de têtes) (FAOSTAT, 2015). Par cela le secteur de l'élevage est le secteur agricole qui produit le plus de sous-produits organiques, avec une production annuelle de 35,7 millions de tonnes de fumier (Belmakki et *al.*, 2015).

D'ailleurs, les fumiers sont des sous-produits organiques d'origine animale qui très riches en éléments fertilisants (surtout, l'azote) et en matières organiques. Leurs pouvoirs d'utilisation comme un amendement organique pour les cultures maraîchères essentiellement sous serres, les agrumes et les arbres fruitiers (FAO, 2017). En plus, les quantités de fumier produites sont, généralement, variables suivant l'espèce animale (bovins, ovins et caprins), la durée de stabulation et de la nature de la litière, telles que le fumier produit à partir de l'activité avicole, est estimé entre 0,4 et 1 million de tonnes par an (Sabir et Roose, 2017) . D'ailleurs les résultats d'une enquête à l'échelle nationale réaliser par des chercheurs dans le cadre de Projet Morocomp (composting) en 2008, qui consiste la production du fumier à l'état humide (70 à 90 % de MS) par espèce sont donnés dans le Tableau (2) et la production annuelle totale de fumier de chaque espèce des animaux ont été également estimé par Bartali et Belmakki, (2013) dans le Tableau (3) En plus de ça, le Maroc est le premier pays classé pour l'élevage de poulets de chair en Afrique du Nord, avec 195 millions de têtes produites en 2013 (FAOSTAT 2015) . Il produit donc plus de 519 000 tonnes de fientes de poulets de chair par an, dont plus de 95 % sont de poulets de

chair par an, dont plus de 95 % sont directement utilisés comme engrais pour l'agriculture sans prétraitement (Elasri et Afilal, 2014) . En plus que la production annuelle en tonne par tête des poules est estimée de 14,3 (pour 1 000 poules) (Sabir et Roose, 2017) . Ces déchets organiques peuvent avoir un impact négatif sur l'environnement et la santé publique, car les fientes contiennent des teneurs élevées en azote (4,48 %), de carbone organique total (16,5 %) et de bactéries pathogènes, principalement des Staphylocoques et des Enterobacteriaceae (Elasri et Afilal, 2016) .

Tableau II : Estimations des quantités de fumier humide (10 à 30 % d'eau) produit par chaque animal au Maroc en tonnes / tête/an (Sabir et Roose, 2017)

Espèces animales	Quantité de fumier produit en tonnes/tête/an
Bovins	9
Ovins	0.7
Caprins	0.7
Équidés	7

Tableau III: Estimations de la production annuelle totale de fumier par chaque espèce animale en tonnes / an (Bartali et Belmakki, 2013)

Espèces animales	Production de fumier (1000 tonnes/an)
Bovins	15 539
Ovins	6 590
Chèvres	3 349
Équidés	6 322
Chameaux	2 435
Total	35 741

1.3.2 Caractéristiques physicochimiques

Les caractéristiques physico-chimiques varient fortement en fonction des espèces, du mode de logement, de nutriments et des pratiques d'élevage comme dans le Tableau (4) suivant.

Tableau IV : Caractéristiques physicochimiques de certains sous-produits organiques agricoles d'origine animale (Chambres d'Agriculture du Nord France) (Trochard et *al.*, 2019)

	Fumier de bovins	Fumier d'ovins	Fientes de volailles
Matière sèche (MS) %	26	45	50
Matière organique (MO) %	19	36	32
C/N %	15.5	ND	7.8
Azote total (NKT) %	6.6	6.7	21.5
pH	8.9	ND	8.5
Phosphore total (P205) %	3.3	4	22.4
Potassium total (K20) %	8.8	12	17.7
Calcium total (Ca0) %	9.4	ND	59.1
Magnésium total (MgO) %	1.8	ND	7.3

1.4 Sous-produits de l'industrie agroalimentaire au Maroc

1.4.1 Production

Au Maroc, la production totale de sous-produits par l'industriel est estimée en 1,2 million de tonnes par an, dont 289,385 tonnes de déchets dangereux. Environ les deux tiers de ces déchets (67%) sont produits par l'industrie alimentaire (Rapport sur l'état de l'environnement au Maroc 2015) . Certains sous-produits rejetés par les industries agroalimentaires sont généralement des sous-produits organiques, dont la composition convient à la biogénèse microbienne. Leur composition est propice à la biodégradation microbienne, qui peut conduire à des substances humiques (Majbar et *al.*, 2017) .

Parmi eux, on trouve d'abord les sous-produits oléicoles qui proviennent à partir de l'extraction d'huile dans les huileries marocaines génère des quantités importantes. Il s'agit essentiellement des grignons (pâteux) et des margines (liquides). En effet, 100 kg d'olive produisent en moyenne 35 kg de grignons et 100 L de margines (Chouchene, 2010) . Les quantités de margines produites annuellement au Maroc sont estimées à 685.000 m³/an, ce qui engendre des problèmes habituels à chaque période de trituration dans les principales régions de production d'huile d'olive (Fès-Meknès, Marrakech-Safi...) (Afilal et *al.*, 2019) .

On trouve aussi les sous-produits vinicoles générés par la Société des boissons marocaine qui produit des résidus solides (marcs de raisin) et liquides (lies de vin et bourbes) (rapport de société des boissons du Maroc, 2019) . En effet , les caractéristiques physicochimiques du marc de raisin (Tableau 5) montrent que le taux de matière sèche et la composition agronomique des

marcs de raisins varient en fonction du type de vinification, autant que les valeurs moyennes d'ISMO (Indice de Stabilité de la Matière Organique) trouvées sur les marcs de raisin correspondent à ce qu'on trouve pour les fumiers, plus que sont plus faibles que celles des composts de fumier (moyenne autour de 70) ou les composts de déchets verts (moyenne autour de 80), (rapporte de l'institut français de la vigne et du vin, 2013) .

Il y a aussi la production des sous-produits des conserveries qui sont classées en fonction du produit traité, de sa saison de croissance et de son emplacement géographique comme le traitement de légumes, les fruits et les agrumes qu'ont caractériser par une période de récolte et de traitement très courte, en plus que les sous-produits de ces usines sont principalement organiques (K.Theodore et Théodore, 2021). Ces sous-produits sont le résultat du pressage, du blanchiment, de la pasteurisation des matières premières, du nettoyage de l'équipement de traitement et du refroidissement du produit fini . D'ailleurs, les fruits qui représentent des problèmes les plus courants en matière de rejet de sous-produits (déchets) après leur transformation sont les pêches, les tomates, les cerises, les pommes, les poires et les raisins, leurs sous-produits proviennent du lavage par pulvérisation, du pelage à la lessive, du tri, du calibrage, du tranchage et de la mise en conserve, de l'élimination des condensats, du refroidissement des boîtes et du nettoyage des installations (K.Theodore et Théodore, 2021) . La quantité de sous-produits diffère selon les pays, les produits transformés et l'échelle de transformation dans chaque usine. Par exemple, le secteur de conservation de poissons au Maroc génère des bio résidus d'un volume total environ de 13000 tonnes/an à partir de l'année 2015 jusqu'à 2020 (Belmekki, et *al.* 2015).

Le secteur d'abattoirs marocain génère aussi des quantités importantes des sous-produits. Il existe plus de 550000 tonnes/an de viande préparée à partir de 900 abattoirs (communication personnelle du Ministère de l'Agriculture du Maroc, 2019). Ces dernières ne sont pas encore équipées des systèmes de récupération des sous-produits d'abattage en vue d'une éventuelle valorisation. Ses sous-produits se composent surtout de sang, d'une partie des peaux, d'une partie des abats, le contenu stomacal, fèces des animaux et contenus des intestins. Certains de ses sous-produits sont éliminés et drainés avec les eaux de nettoyage vers le collecteur des eaux usées. Après, la plus grande partie des matières solides sont collectées et envoyées vers la décharge (afilal et *al.*, 2020).

1.4.2 Caractéristiques physicochimiques

Les caractéristiques physico-chimiques des sous-produits génèrent par le secteur agroalimentaire variantes en fonction des produits transformés, par exemple ; les margines, les grignons, marcs

de raisin et effluent d'abattoir sont caractérisés par des propriétés physico-chimiques différentes comme dans le Tableau (5) (Khenoussi et *al.*, 2012).

Tableau V: Caractéristiques physico-chimiques de certains sous-produits des industries d'agroalimentaires (Chouchene, 2010) (rapporte de l'institut français de la vigne et du vin, 2013) (Khenoussi et *al.*, 2013)

Paramètres	Margine	Grignons	Marc de raisins	Effluent d'abattoir
pH	5,0	-	3.89	6,4 - 7,6
CE (mS.cm-1)	10,50	-	-	1340
Humidité (%)	94,00	-	-	-
Matière Sèche (MS)		75-80%	37.2 %	
COT (%)	36,60	-	-	22.40
Matière organique (MO) (%)	92,42	-	0.630	-
N (%)	-	5-10%	0.6	20
C/N (%)	-	-	28.6	-
P2O5 (%)	-	-	0.29	-
K2O (%)	-	-	1.19	
Fer (mg•L-1)	-	-	-	0.2
Oxygène dissout (mg•L-1)	-	-	-	0.15
Cellulose (%)	-	24	-	-
Lignine (%)	-	48,4	-	-

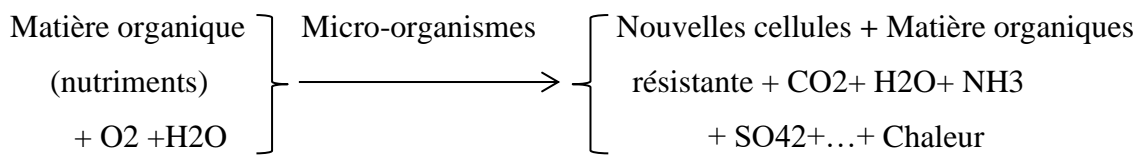
2 Technologie du compostage

2.1 Définition

Selon FAO (2005) Le compostage est un processus naturel aérobie de « dégradation » ou de décomposition de la matière organique par les micro-organismes dans des conditions bien définies. Les matières premières organiques, telles que les résidus de culture, les déchets animaux, les restes alimentaires, certains déchets urbains et les déchets industriels appropriés, peuvent être appliquées aux sols en tant que fertilisant appelé compost, une fois le processus de compostage terminé.

La matière organique qui a été décomposée par les communautés microbiennes au cours du processus du compostage libère des produits et sous-produits tels que H₂O, CO₂, NH₃, SO₄²⁻ et

des substances humiques. Cette dernière est les sous-produits du processus de compostage qui les différencient de celles que l'on trouve dans le sol naturel, les charbons et les tourbes (Thi Thien et *al* , 2022) .



2.2 Intérêts

Le compost joue un rôle très important dans les cultures, il peut améliorer le rendement des cultures et la teneur en matière organique du sol qui est due à la présence de suffisamment de nutriments et de substances favorisant la croissance des plantes telles que l'humus dans le matériau de compost. Ce dernier pourrait être considéré comme un matériau utile pour augmenter le pH des sols acides, améliorer les caractéristiques physiques, chimiques et biochimiques des sols salinité . De plus, l'utilisation du compost dans l'agriculture est bénéfique pour réduire les gaz à effet de serre (Thi Thien et *al* , 2022) . Ainsi, il peut augmenter l'activité enzymatique du sol et assurer la résistance des plantes à certaines maladies (Medjahd, 2016) .

2.3 Paramètres principaux du compostage

2.3.1 Température

Selon FAO (2005), la température un facteur important qu'est caractérisée le processus du compostage aérobie et un indicateur pertinent de l'activité microbienne. En plus, le processus de compostage met en œuvre deux gammes de température respectivement mésophile et thermophile. Alors que la température idéale pour la première phase est de 20 à 45°C, par la suite, la température idéale située entre 45 et 70°C en raison que les organismes thermophiles ayant pris le contrôle des étapes ultérieures dans la deuxième phase. En plus, 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 . La régulation de la température effectuée par le retournement et l'aération.

Selon Toundou (2016), les micro-organismes, grâce à leur respiration, dégagent une chaleur qui permet d'augmenter la température parfois jusqu'à 80°C ou 90°C dans un tas bien isolé, peuvent leur devenir létales. D'ailleurs, L'optimisation du processus consiste donc à assurer de ne pas dépasser une température de 70°C, de même en respectant une température supérieure à 55°C qui permet une bonne maturation. Généralement, le suivi de la température renseigne sur la qualité du processus de dégradation et permet si nécessaire d'adapter les conditions du système.

2.3.2 Humidité

Selon FAO (2005), l'humidité est nécessaire pour assurer l'activité métabolique des micro-organismes. D'ailleurs, au cours du processus de compostage, l'humidité doit être comprise entre 40 à 65 pour cent. Si le réacteur est trop sec, le processus de compostage est plus lent. En pratique, il est conseillé de commencer le processus du compostage avec une teneur en eau de 50 à 60 pour cent, afin d'atteindre à une humidité de 30 pour cent à la fin du processus.

Plus précisément, un manque d'eau provoqué l'apparition du 'blanc' (forme de résistance des actinomycètes et champignons) qui explique un ralentissement de l'activité microbienne, il a besoin donc d'un arrosage régulé pour rétablir le processus de décomposition. En plus, les chercheurs déclarent que de ne pas apporter l'eau vers la fin du processus de compostage, puisque l'on ne relancera pas de phase thermophile et que l'on n'a aucun intérêt à augmenter le taux d'humidité, par contre un excès d'eau (taux de matière sèche inférieur à 20%) provoque en revanche des conditions anaérobies défavorables (Toundou, 2016) .

2.3.3 Aération

Selon FAO (2005) l'aération est la source d'oxygène, et se trouve être ainsi un facteur indispensable pour le compostage aérobie. Parce que si l'approvisionnement en oxygène n'est pas suffisant, la croissance des micro-organismes aérobies se trouve limitée, ce qui entraîne à le ralentissement de la décomposition. Puis, l'aération permet d'éliminer la vapeur d'eau et les autres gaz piégés dans le tas et de diminuer l'excès de chaleur, alors, une bonne aération est indispensable pour un compostage efficace. Celle-ci pourra être atteinte si la qualité physique des matières (taille des particules et teneur en eau), la quantité des traitements et la ventilation sont contrôlées et si le mélange est fréquemment retourné. .

Chukwudi et *al.* (2017) Souligné que l'aération aide à maintenir la température du compost pour la décomposition thermophile des déchets organiques et indiqués que l'effet du débit d'air sur le taux de décomposition de la matière organique, la distribution de la température et d'autres paramètres dans la masse de compostage dépend largement du temps, des conditions ambiantes et de l'emplacement dans la masse du compostage.

2.3.4 pH

Selon Sundberg (2005), au cours du compostage, le pH est influencé par trois systèmes acide-base. Le premier est composé de plusieurs acides organiques, dont les acides acétique et lactique dominant. Ce système peut réduire le pH jusqu'à 4,14 et il est important au début du compostage. Le deuxième est le système carbonique, avec le dioxyde de carbone (CO₂), qui se forme pendant la décomposition et peut s'échapper sous forme de gaz ou se dissoudre dans le liquide en formant de l'acide carbonique (H₂CO₃), du bicarbonate (HCO₃⁻) et de carbonate (CO₃²⁻). Ce système

peut augmenter le pH faible et réduire le pH élevé. Le troisième système est l'ammonium (NH_4^+) - ammoniac (NH_3), qui se forme lors de la décomposition des protéines. Pendant la phase initiale du compostage, la plupart d'azote métabolisé est retenu par les micro-organismes en croissance, mais au cours de la phase à haut débit, l'ammoniac est libéré. Ce système peut augmenter le pH vers une valeur basique .

Ces trois systèmes se combinent pour former la courbe de pH typique du compostage en discontinu, avec une baisse initiale du pH et une forte augmentation pendant la dégradation à haut débit (figure 2).

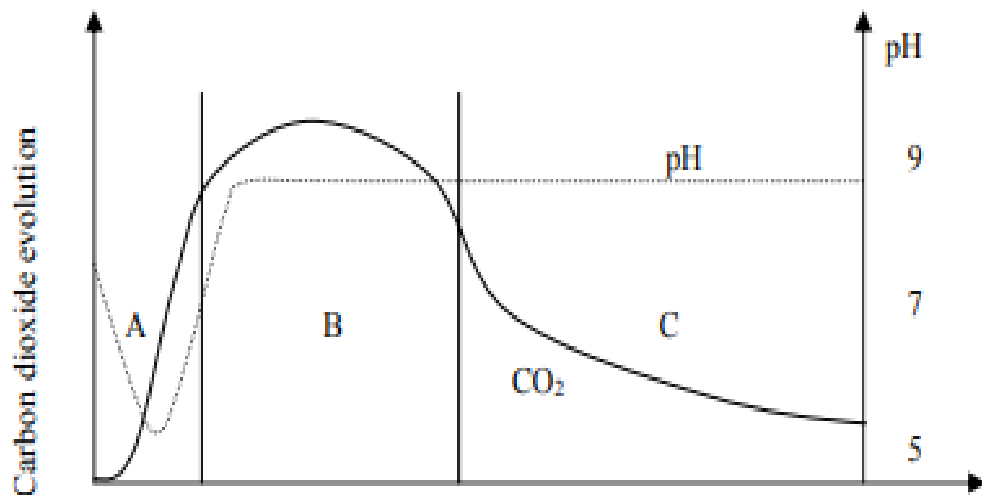


Figure 2: Représentation d'une courbe de pH typique dans un processus de compostage par lots ; le pH diminue initialement, et le début de la phase de haut débit coïncide avec une augmentation du pH. (A - phase initiale, B - phase de haut débit, C - phase de maturation).

Représentation d'une courbe de pH typique dans un processus de compostage par lots ; le pH diminue initialement, et le début de la phase de haut débit coïncide avec une augmentation du pH. (A - phase initiale, B - phase de haut débit, C - phase de maturation).

Les réactions du compostage modifient le pH qui favorisant certaines espèces de micro-organismes, où un pH acide permet de développer 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 processus du compostage ont leur optimum compris entre des pH de 6 à 8 (Toundou, 2016)

2.3.5 Conductivité électrique

L'augmentation de la conductivité électrique (concentration en sels) au cours du compostage s'explique par la minéralisation de la matière organique lors du compostage, entraîne une augmentation de la concentration en sels et donc une augmentation de la conductivité. Pourtant, il y a une proportionnalité entre phytotoxicité et conductivité électrique (Francou, 2003) .

Selon Guedira et al. (2011), la conductivité électrique (CE) peut être un bon indicateur de la richesse des composts en nutriments, c'est-à-dire quand celle-ci est élevée, cela signifie plus d'éléments minéraux. En plus, la conductivité électrique optimale d'un compost est inférieure à 10 (mS/cm) alors que d'autres travaux ont montré que la CE doit être inférieure à 40 (mS/cm) .

2.3.6 Carbone organique

La teneur en carbone organique totale diminue au cours du compostage, ceci revient au fait que les microorganismes utilisent la substance organique pour leur métabolisme conduisant à la minéralisation en CO₂ (Beck-Friis et *al.*, 2003).

2.3.7 Azote total

Au cours du compostage, l'azote organique se minéralise, une partie de cet azote minéral est réincorporée dans le métabolisme microbien des microorganismes, une partie est incorporée dans la matière organique des composts au moment de leur humification et une partie est libérée dans la matrice sous forme d'azote minéral ; c'est-à-dire, au cours de la phase thermophile, l'azote organique est minéralisé sous forme ammoniacale (NH₄⁺), qui se trouve en général rapidement incorporée dans la biomasse microbienne (assimilation de carbone) . Puis, à la phase de refroidissement, une partie de l'azote est oxydée par les bactéries nitrifiantes dès que la température devient inférieure à 45°C et d'autre partie de va réagir avec des sucres et autres composés carbonés pour se retrouver dans les composés humiques (Medjahd, 2016).

2.3.8 Rapport C / N

Généralement, les éléments comme C, N, P et K sont les principaux nutriments dont ont besoin les micro-organismes impliqués dans le processus du compostage. Ils ont les acquérir à partir de la décomposition des matières organiques. C'est pour cela le C et le N sont les des éléments les plus importants, où le carbone (C) est utilisé comme source d'énergie tandis que l'azote (N) est utilisé pour construire la structure cellulaire (Chen et *al.*, 2011). Igoni et *al.* (2008) ont déclaré que lorsque la quantité de N est limitante, la croissance microbienne diminue, ce qui entraîne une décomposition lente du carbone disponible. Ils ont également ajouté que si la quantité d'azote présente est supérieure aux besoins de la population microbienne, la décomposition du carbone est ralentie. Par conséquent, le rapport C/N est un indicateur du degré de décomposition d'une matière organique. Petric et *al.* (2015) ont toutefois adopté des valeurs initiales de C/N initiales entre 25 et 40 et même jusqu'à 50 comme valeurs recommandées pour le compostage. Parce que les rapports C/N impliquent que les microorganismes utilisent le C disponible 30 à 35 fois plus rapidement que la vitesse à laquelle ils convertissent l'azote (Igoni et *al.*, 2008) . Mohee et *al.* (2015) ont observé qu'un rapport C/N de départ faible donnait une mauvaise caractéristique dans le compost d'alimentation. Par contre, un rapport plus élevé signifie que l'azote est insuffisant

pour une croissance optimale des microorganismes, de sorte que le compost reste relativement frais et la décomposition progresse à un rythme lent (Chen et *al.*, 2011) .

2.4 Phases du compostage

Le processus de compostage comporte quatre phases : Mésophile, thermophile, refroidissement et maturation (Francou, 2003 et Godden, 1995).

2.4.1 Phase mésophile

La phase mésophile est la phase initiale du compostage. Au cours des premiers jours de compostage, la présence des matières organiques facilement biodégradables (la cellulose) entraîne une forte activité microbienne (surtout les champignons et les bactéries mésophiles) qui permettent de générer une forte production de chaleur et montent rapide de la température au cours du compost (de 10-15°C à 30-40°C), (Francou, 2003 ; Insam et Bertoldi, 2007) .

2.4.2 Phase thermophile

La phase thermophile est caractérisée par une température élevée atteinte jusqu'à 60°C à 75°C. Cette température permet de développement seul les micro-organismes thermorésistants (arrêt de l'activité des champignons développement des actinomycètes et des bactéries thermophiles) (Mustin,1987) tels que les organismes mésophiles précédemment florissants meurent et sont finalement dégradés par les organismes thermophiles qui leur succèdent, ainsi que le substrat restant, facilement dégradable. Les champignons thermophiles ont des maxima de croissance entre 35 et 55°C, tandis qu'une température plus élevée inhibe habituellement la croissance fongique . Les bactéries thermotolérantes et thermophiles et les actinobactéries sont connus pour rester actives également à des températures plus élevées. Malgré la destruction de la plupart des microorganismes au-delà de 65°C, la température peut encore augmenter et dépasser 80°C (Insam et Bertoldi, 2007) ..

Durant de cette phase, une part importante de matière organique est perdue sous forme de CO₂, et un assèchement du compost lié à l'évaporation de l'eau est souvent observé visuellement (Francou, 2003) .

2.4.3 Phase de refroidissement

La phase de refroidissement est la phase intermédiaire entre la phase thermophile et la phase de maturation. Elle prend fin avec le retour à la température ambiante. Le milieu est caractérisé par le retour des micro-organismes mésophiles qui dégradent les polymères restés intacts en phase thermophile comme l'amidon ou la cellulose et incorporent l'azote dans des molécules complexes, parmi eux, on trouve à la fois les bactéries et les champignons (Godden, 1995 ; Insam et Bertoldi, 2007) .

2.4.4 Phase de maturation

Les matières organiques sont stabilisées et unifiées par rapport aux matières premières mises à composter. En plus, cette phase présente peu d'activités microbiologiques (recolonisation par des champignons), par contre l'apparition des macrofaunes, en particulier les lombrics lorsque ceux-ci sont présents dans l'environnement du tas. D'ailleurs, cette phase dure jusqu'à l'utilisation des composts (Francou, 2003 et Zeglès et Masscho, 1999). En plus, Il est difficile de définir une période de maturation puisque celle-ci dépend de la composition des matières premières (Bekhalel et Akila, 2019)

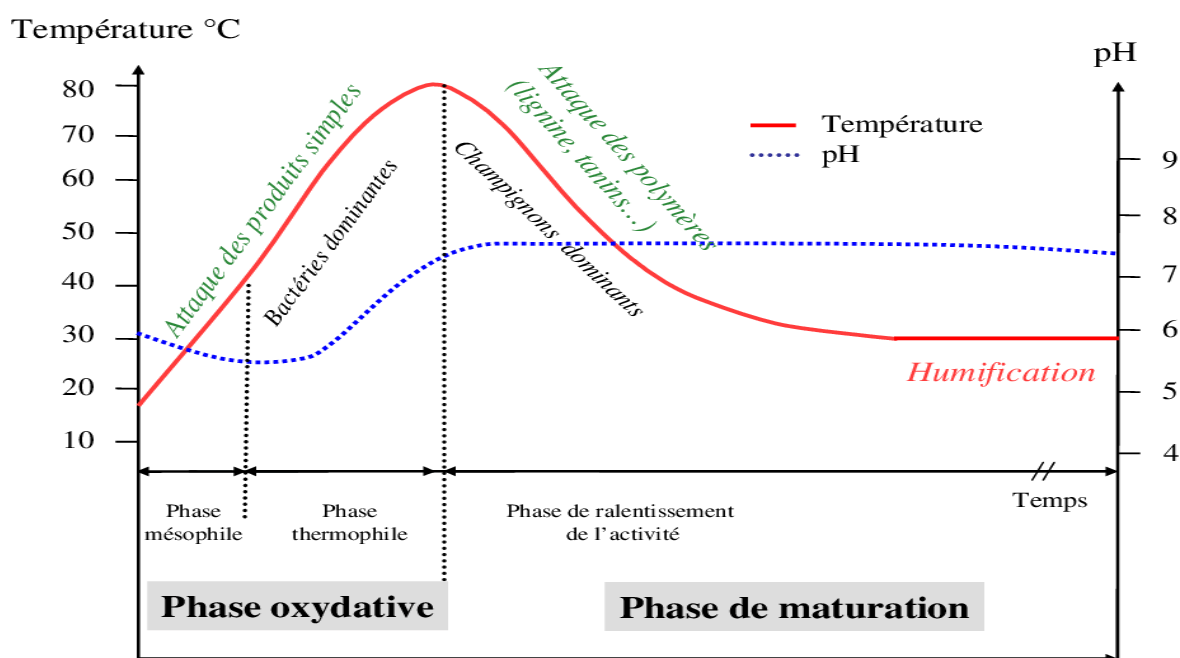


Figure 3 : Courbe théorique d'évolution de la température et du pH au cours des différentes phases du compostage d'après Mustin (1987)

2.5 Techniques du compostage

Selon Guillaume (2011), il existe différentes techniques de compostage à l'échelle industrielle qui peuvent être utilisées une fois que le choix de base a été défini. Parmi eux c'est le compostage en andains est le plus simple, le moins mécanisé et le moins coûteux. Il comporte cependant certains désavantages vis-à-vis le compostage plus technique. Il besoin d'une surface plus grande que le compostage en tube rotatif, il est réalisé à l'extérieur et doit composer avec les conditions climatiques et la production d'odeur. Ensuite Le compostage en conteneur ou en tunnel a un avantage de réduire la surface nécessaire, et se situe à mi-chemin entre le compostage en andain et le compostage en tube rotatif. Le même pour le compostage en box (ouverts ou couverts) ou en silo qui permet de limiter la surface nécessaire, et se situe aussi à mi-chemin

entre le compostage en andain et le compostage en tube rotatif . Dernièrement c'est le compostage en tube rotatif est une activité autorisée utilisation décentralisée (Kalamdhad et Kazmi, 2008). Large gamme de matériaux du compostage, rapidité et protection de la santé des travailleurs qui sont moins en contact avec les matières résiduelles sont des avantages mesurables au niveau de l'opération (Tolvanen et *al.*, 1998). Il y a deux aspects importants du tube rotatif qui permettent l'accélération du procédé de compostage ; le premier est le matériel en mouvement constant assure un contact permanent avec l'oxygène, et la deuxième est que la matière fraîche ajoutée est aérée par l'air chaud chargé en ammoniac (Kalamdhad et Kazmi, 2008) . Une étude menée par Cabaraban et *al.* (2008) indique que les émissions des gaz à partir d'un bioréacteur fermé provoqué à un potentiel de réchauffement climatique évalué à 0,86 kg d'équivalent CO₂/kg de matières résiduelles. L'utilisation d'un bioréacteur représente donc une économie nette de près de 45% d'émission de gaz à effets de serre par rapport à des technologies généralement utilisées. Mohee et Mudhoo (2005) assurent qu'elle y a des changements physiques dans le compostage de copeaux de bois, fumier de poule et résidus de légumes verts pendant une période de 36 jours dans un bioréacteur. Hu et *al.* (2009) ont suivi les propriétés physico-chimiques d'une production de compost en bioréacteur à partir des résidus de mollusques et des copeaux du bois pour en assurer le respect des normes américaines. Par conséquent, l'obtention de compost mûr à partir de diverses matières résiduelles a été étudiée, et l'éligibilité à la maturité du compost est maintenant mieux comprise.

2.6 Maturité des composts

Kuo et *al.* (2004) ont montré que la maturité d'un compost est basée sur trois critères qui mentionner son terme :

- Critères physiques : par l'observation du compost, par son odeur (proche de l'humus), sa couleur et sa granulométrie (El Fels, 2014) .
- Critères biologiques : évaluation du compost par des tests biologiques qui consistent en la croissance des semences ou des plantes, pour avoir son effet pathogène et phytotoxique sur les plantes (test de germination...etc.) (Noël et *al.*, 2002) .
- Critère chimique, au cours du processus nombreuses modifications chimiques se produisent de maturation du compost, tels que l'augmentation du pH dans les premières étapes de la dégradation de la matière organique en raison de la présence des substances unifiées a forte concentration ou la libération d'ammoniac, les changements dans la capacité d'échange cationique en se basant aussi sur des indices tels que le protocole d'extraction de la matière organique à l'eau (WEOM), ou encore les matrices d'excitation-émission de fluorescence ont été utilisées (van de Kerkhove, 1990) . En plus,

les activités des enzymes telles que la phosphatase, glucosidase, la lipidase, et la déshydrogénase montrent précisément la dégradation de la matière organique des matières premières mis à compostés et par conséquent montrent la maturité du compost (El Fels, 2014) .

2.7 Norme et qualité d'un compost

La qualité du compost utilisé comme amendement organique peut être appréciée par ses propriétés physico-chimiques et agronomiques et son innocuité pour l'environnement (phytotoxicité) (Noël et al., 2002) .

Au Maroc, dans les circonstances actuelles, il n'y a pas de norme pour le compostage. Au fur et à mesure que l'industrie du compostage s'est développée, les normes de compostage sont devenues nécessaires. En fait, le nombre croissant de produits de compostage importés et approuvés sur le marché a soulevé des questions sur la sélection et la bonne utilisation de ces produits (El Fels, 2014) . Par contre, en France, la norme existante actuellement et s'appliquant au compost, est la norme relative aux amendements organiques NF U 44-051 qu'est déclaré que tous les composts urbains doivent de plus respecter les exigences suivantes :

- Matière organique MO > 20 % sur le poids brut, > 30 % sur le poids sec,
- Taux maximal d'azote total de 2% en masse sur matière sèche,
- Teneur en azote kjeldhal NTK < 3 % sur le poids sec,
- Rapport C/N inférieur à 12,
- Rapport MO/N < 55 sur le poids sec,
- Teneur en P_2O_5 < 3 % sur poids sec,
- Teneur en K_2O < 3 % sur poids sec,
- Échauffement naturel supérieur à 60 °C pendant 4 jours consécutifs.

2.8 Avantages et inconvénients du compostage

La technique du compostage comporte de nombreux avantages répondus parfaitement aux contraintes environnementales, écologiques et économiques (Sellami, 2021) .

Pour le côté environnemental ; le compostage réorganise la matière organique pour piéger une partie importante du carbone dans les composés humiques et par conséquent une diminution de l'effet de serre additionnel. En plus, lorsque le compost est valorisé en tant qu'amendement organique directement permet d'augmenter le stockage du carbone dans les sols agricoles. Il permet de limite également la pollution des eaux superficielles les et souterraines par la réduction des pertes d'azote nitrique (Houéro,1993).

Pour le côté écologique ; le compostage contribue à la Réduction des volumes des déchets afin de détruire les phytopathogènes, ainsi permet de détruire les graines adventices et la destruction partielle ou totale des résidus de produits phytosanitaires. (Hacala 1998).

Pour le côté économique ; le compostage permet de maintenir ou de créer une activité économique génératrice de revenus, comme il peut offrir des possibilités d'emploi (Sellami, 2021) .

D'autre part, il y a aussi des inconvénients du compostage tels que la nécessité d'un réaménagement dans le choix des options de valorisation des déchets des huileries de palme, la nécessité d'aménagement d'un site de compostage, le temps de travail est élevé, le risque élevé d'adventice, ainsi que la réponse des cultures à ce compost varie selon le type de ferment utilisé et la dose d'application (Koura et *al.*, 2018) .

Deuxième partie
Matériel et Méthodes

3 Matériel biologique utilisé

Le matériel biologique utilisé pour cette étude est les résidus du romarin et la fiente de volaille

3.1 Résidus de romarin.

Les résidus de romarin qui sont sous forme des petits morceaux de tige, des racines et des feuilles fractionnées (figure 4B), ont été amenés d'une usine de distillation dans la région de Meknès. Tout en étant conditionnés dans des sacs plastiques de 50kg.

3.2 Fiente de volaille

La fiente de volaille qui est de couleur blanc vers le grise, sous forme des petits morceaux broyés (figure 4 A), a été amenée des fermes d'élevage de poulets de chair et poules pondeuses dans la région de Meknès . Tout en étant conditionné dans des sacs en plastique de 50 kg sous forme sèche (Annexe 1) .

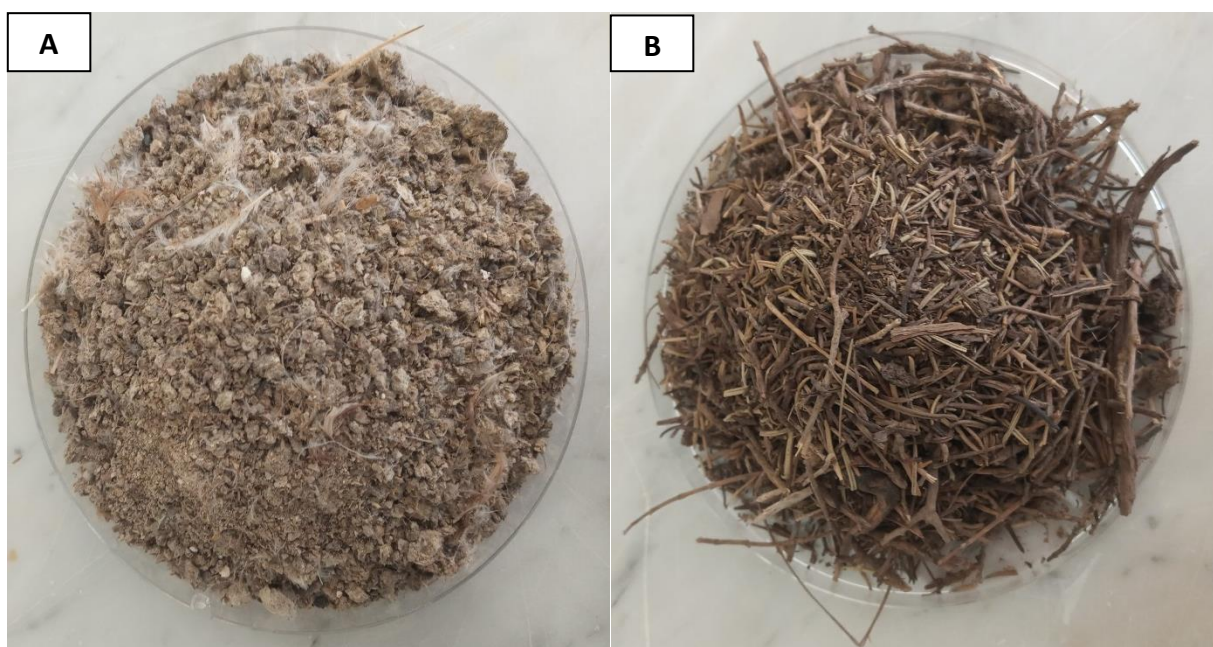


Figure 4: Sous-produits utilisés, a : fiente volaille, B : résidus de romarin

4 Méthodologie du travail

Nous avons lancé un essai du compostage dans un bioréacteur a aération force, que ce fait en deux étapes complémentaires qui sont la formulation et l'homogénéisation (Faverial, 2016).

4.1 Formulation

Il s'agit d'un essai qui comporte 70% de résidus de romarin et 30% de fiente de volaille, afin d'obtenir un rapport C/N = 33 % .

Nous avons pesé 25 kg de résidus de culture et 10 kg de fiente de volaille avec une balance de type HYHO (60 kg max) (figure 5), afin d'obtenir un mélange de 35 kg .

- **Traitement :** 70% Résidus de romarin (25 kg) + 30% Fiente de volaille (10 kg)



Figure 5: Balance de type HYHO (60 kg max)

4.2 Homogénéisation

Le mélange a été homogénéisé manuellement avec l'arrosage régulièrement (figure 6). Ensuite, il a été transféré dans un bioréacteur installé dans une serre expérimentale à aération forcée .



Figure 6: Processus d'homogénéisation manuelle avec l'arrosage du mélange

Le bioréacteur est connecté avec un système d'aération automatique (figure 8) (Annexe 2) . Sous forme d'un fut plastique vertical, d'un volume de 200 litres. L'épaisseur du plastique est de 3 mm. Il est conçu avec une ouverture dans la face supérieure pour l'introduction des sous-

produits. En plus, est muni d'une soupape pour injecter et une pour retirer l'air et un robinet pour le lixiviat (figure 7) .



Figure 7: Bioréacteurs utilisés à aération forcée



Figure 8: Système d'aération automatique connecté avec le bioréacteur

5 Conduite du compostage

Au cours de compostage a été contrôlé l'évolution de la température du produit et la température ambiante, l'arrosage, le retournement à chaque fois que c'est nécessaire (Annexe 3).

6 Observations

Nous avons réalisé des observations visuelles qui sont très importantes pour évaluer le compost au cours du processus de compostage. On observe régulièrement la granulométrie et la couleur du compost, mais aussi l'apparition des microorganismes (souche des champignons et insectes).

Ses observations nous permettent d'apprendre une idée sur la maturation du compost grâce à certains critères comme l'aspect du substrat, sa couleur, sa granulométrie, son odeur, son humidité, pourcentage de dégradation (FAO, 2005).

7 Échantillonnage

Des échantillons du compost ont été prélevés en deux stades (début et fin du compostage) à différents niveaux de traitement afin d'obtenir un échantillon représentatif (Annexe 4), puis les conserver à 4 °C. Après, ils ont été analysés dans notre laboratoire sauf le carbone total et l'azote total a été analysé dans un laboratoire privé.

8 Paramètres physico-chimiques évalués

Plusieurs paramètres principaux ont été réalisés et suivis au cours du processus de compostage dans le bioréacteur :

8.1 Température

La température de bioréacteur a été mesurée automatiquement durant tout le processus du compostage par un thermomètre à sonde connecté avec un appareil de type KIMO KTT 220 (enregistreurs autonomes kistock) (figure 9). La sonde de 50 cm de longueur est introduite complètement dans le bioréacteur pour avoir sa moyenne de la température.

Il est à noter qu'à chaque fois la température ambiante journalière dans la serre est contrôlée.

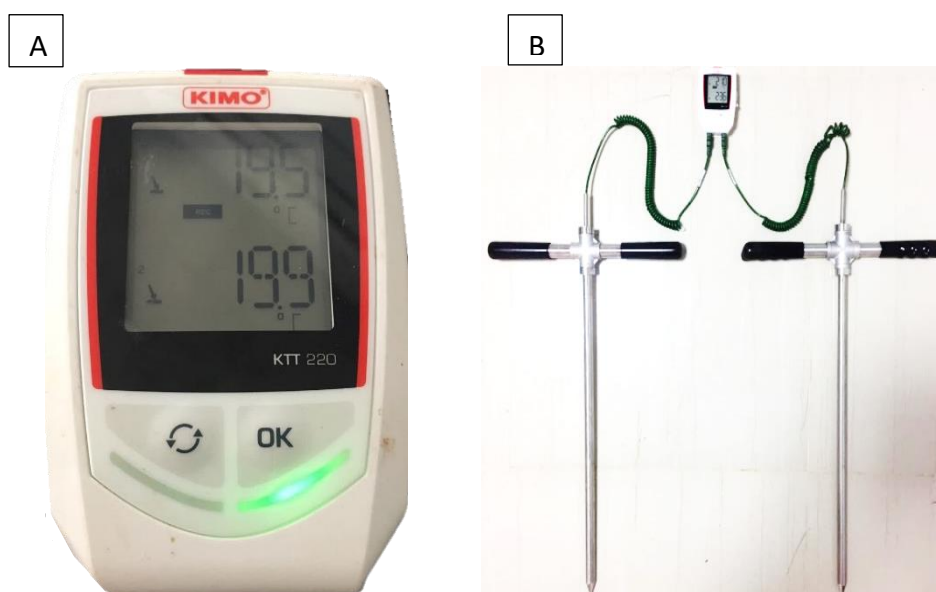


Figure 9: Thermomètre KIMO KIT 220 (A) équipé de deux sondes métalliques de type K (B)

8.2 Humidité

La détermination de la teneur en eau a été réalisée selon la norme (NF-EN 12880, 2000). Un échantillon de 100 g de compost a été prélevé dans le traitement et porté à l'étuve à une température de 70 °C. Après refroidissement, celui-ci a été pesé à l'aide d'une balance sensible de marque KERN et d'une précision de +/- 0,1 g .

La valeur de l'humidité de chaque traitement a été déterminée et exprimée en pourcentage (%) selon la formule suivante (Mounier et Domeizel, 2016) :

$$H (\%) = \frac{MB - MS}{MB} \times 100$$

Avec : MB : masse de la matière brute

MS : masse de la matière sèche

8.3 pH

La mesure du pH de la suspension aqueuse du compost a été réalisée selon la méthode standard (NF ISO 10390, 2005). Nous avons mélangé 20 g de compost avec 100 ml d'eau distillée, dans un becher selon le ratio compost (m) /eau (v) de 1/5. La suspension est agitée pendant 1 heure à 150 rpm sur un agitateur orbital. Après agitation puis 2 h de décantation, le pH (pH1/5) a été mesuré avec un pH-mètre à électrode combinée de type METLLER TOLIDO .

8.4 Conductivité électrique EC

La mesure de la conductivité électrique (CE) d'une suspension aqueuse du compost a été réalisée selon la norme internationale (ISO, 1994), elle est représentée la mesure de la concentration des ions solubles afin d'apprécier la salinité du substrat (M'Sadak et *al.*, 2012) .

Un échantillon de compost est extrait avec de l'eau à $20 \pm 1^\circ\text{C}$ (Rapport d'extraction de 1/5 pour dissoudre les électrolytes). Elle est déterminée par conductimètre et elle est exprimée en (mS/cm) . La salinité (S) a été estimée à partir de la conductivité électrique (C.E) en utilisant l'équation suivante : $S = 0,7 \times CE$,

avec : CE : Conductivité électrique, exprimée en mS/cm .

S : Salinité, exprimée en g/l de sels.

8.5 Carbone organique total

Selon FAO (2019), le carbone organique total (COT) a été mesuré par la méthode de titration de Walkley-Black. Il a été pesé 1 g d'échantillon de compost séché dans une fiole erlenmeyer de 500 mL . Ensuite, ajouter 10 ml de K₂Cr₂O₇ (bichromate de potassium) 1N et agiter doucement la fiole pour disperser le compost dans la solution.

Puis, avec précaution, ont été ajoutés rapidement 20 ml de H₂SO₄ (acide sulfurique) concentrés 98 % sous hotte et agités immédiatement la fiole jusqu'à ce que le compost et les réactifs soient mélangés. Pour réduire au minimum la perte de chaleur a été laissée la fiole pendant 30 minutes dans une hotte.

Puis ont été ajoutés 200 ml d'eau dans la fiole et 10 ml de H₃PO₄ (acide phosphorique) à 85%, plus 10 à 15 gouttes d'indicateur de ferroïne . La solution prend une teinte verdâtre puis devient vert foncé. En suit, a été titré l'excès de bichromate de potassium avec la solution de sulfate ferreux (FeSO₄) 0.5 M, goutte à goutte jusqu'à ce que la couleur passe brusquement du bleu au rouge (couleur marron en lumière réfléchiée sur fond blanc) et ont été notés les volumes utilisés.

En plus a été préparé un témoin avec la même méthode par l'eau distillée.

Puis a été calculé le pourcentage de COT selon la formule suivante (FAO, 2019) :

$$\text{COT \%} = \frac{(V \text{ blanc} - V \text{ sample}) \times M_{\text{Fe}^{2+}} \times 0.003 \times 100 \times f \cdot mc}{P}$$

Où,

V blanc = volume du titrant dans le blanc, mL

V sample = volume du réactif de titrage dans l'échantillon, mL

MFe²⁺ = concentration de la solution normalisée de FeSO₄ normalisée, en molarité

0,003 = carbone oxydé

mcf= facteur de correction, 1,3

P = poids du compost en g

8.6 Matière organique MO %

Après avoir été calculée la teneur en carbone organique total, a été déterminée la teneur en matière organique selon la méthode par convention :

$$\text{Matières organiques} = \text{carbonique organique (C)} \times 1,72$$

8.7 Azote total

L'azote total a été mesuré des échantillons de compost sec selon la norme ISO 11261:1995 (Méthode de Kjeldahl modifiée)

À été placée une prise d'essai d'un échantillon compost séché à l'air de 1 g dans le matras de minéralisation, ajouté 4 ml d'acide salicylique/sulfurique et agité le matras jusqu'à ce que la solution d'acide soit bien mélangée au compost. Le mélange a été laissé reposer quelques heures (pendant une nuit). Ensuite, ont été ajoutés 0,5 g de thiosulfate de sodium à l'aide d'un entonnoir

sec, dont la tige descend dans la partie bombée du matras. Le mélange a été chauffé avec précaution sur le dispositif de minéralisation jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de mousse. Le matras a été refroidi et ajouté 1 g du mélange catalytique . Puis a été chauffé le mélange réactionnel jusqu'à ce qu'il devienne clair. A été porté le mélange à débuller pendant 5 h de façon que l'acide sulfurique se condense à approximativement 1/3 du col du matras .

Ensuite, le matras a été laissé refroidir, et ajouté lentement, sous agitation, approximativement 20 ml d'eau. A été agité le matras afin d'amener tout produit insoluble en suspension et transférer son contenu dans l'appareil de distillation .

5 ml d'acide borique (H_3BO_3) ont été ajoutés dans une fiole conique de 100 ml et placés celle-ci en sortie du condenseur, de manière à ce que son extrémité plonge dans la solution. Puis ont été ajoutés 20 ml d'hydroxyde de sodium (NaOH)) dans un entonnoir de l'appareillage et laisser doucement couler la base dans le ballon de distillation.

Ensuite ont été distillés 40 ml de distillat avec rinçage de l'extrémité du condenseur, quelques gouttes d'indicateur coloré ont été ajoutées au distillat .

Le distillat a été titré avec l'acide sulfurique (H_2SO_4) 0,01 mol/l jusqu'à virage au violet.

Parallèlement a été effectué un essai de blanc avec les mêmes conditions, mais sans sol. Nous avons noté le volume d'acide sulfurique utilisé pour l'essai de blanc et pour les essais avec des échantillons du sol .

La teneur totale d'azote (W_N), en milligrammes par gramme, est calculée selon la formule suivante .

$$W(N) \% = \frac{(V_i - V_o) \times C(H^+) \times MN}{m} \times \frac{100 + W(H_2O)}{100}$$

Où,

V_i : le volume, en millilitres, d'acide sulfurique utilisé pour le dosage de l'échantillon

V_o : le volume, en millilitres, d'acide sulfurique utilisé dans l'essai à blanc

$C(H^+)$: la concentration en H^+ de l'acide sulfurique, en moles par litre [si, par

Exemple, 0,01 mol/l d'acide sulfurique est utilisé, $C(H^+) = 0,02$ mol/l];

MN : masse molaire de l'azote, en grammes par mole (= 14)

m : masse initiale du compost utilisé

8.8 Rapport C/N

Selon Rucakumugufi et *al.* (2021), le rapport C/N du mélange des substrats de départ doit être fixé selon le rapport des matières premières. Pour déterminer le rapport C/N du mélange de départ, la formule suivante ci-après a servi de base de calcul :

$$R_m = (n_1 * R_1 + n_2 * R_2) / (n_1 + n_2)$$

Avec,

R_m : rapport moyen

n_1 et n_2 : les quantités respectives de composants

R_1 et R_2 : les rapports C/N de ces composants.

Le rapport C/N (R_m) du mélange de départ a été fixé à 33% . Les inconnues des masses (en kg) des matières premières sur 35 kg de mélange total sont :

x ; résidus de romarin et y ; fiente de volaille

Pour déterminer les inconnues de l'équation précédente, un système a été utilisé :

$$\begin{cases} R_m = (x * 44.70 + y * 6.41) / 35 \\ x + y = 35 \end{cases}$$

Avec ;

44,7 et 6,41 qui sont respectivement les rapports des résidus de romarin et fiente de volaille.

Le système d'équations a été résolu et les proportions de matières premières utilisées sont :

$x = 25$ kg des résidus du romarin et $y = 10$ kg de fiente de volaille .

9 Test de phytotoxicité

La phytotoxicité des extraits du compost a été évaluée par la technique de germination des graines de cresson (*Lepidium sativum*, L.) (Selim et al., 2012) .

9.1 Extrait aqueux du compost

Un extrait aqueux du compost a été préparé en secouant les échantillons avec l'eau distillée dans un rapport de 1:10 (p/v) pendant 1 heure, puis filtré à travers une membrane filtrante de 0,45 mm et en recueillant le surnageant (Selim et al., 2012 et Wang et al., 2022) .

9.2 Évaluation de phytotoxicité

Les graines de cresson (*Lepidium sativum*, L.) ont été stérilisées par immersions dans l'alcool à 75 % pendant trois minutes, suivies d'un transfert dans une solution de NaClO (hypochlorite de sodium) à 50 % pendant dix minutes (Benson et al., 2017) avec agitations périodiques et enfin lavées avec l'eau distillée stérilisée pour éliminer les produits chimiques toxiques (Selim et al., 2012) .

Ensuite, 10 ml d'extrait du compost aqueux ont été ajoutés sur un papier filtre dans une boîte de Pétri, 20 graines ont été placées sur le papier filtre . Toutes les expériences ont été réalisées en

trois répétitions (Figure 7). En plus a été préparé un témoin par l'eau distillée de même méthode . Les boîtes de Pétri ont été fermées et incubées dans l'obscurité pendant 72 heures à une température de 27 °C (Figure 8) (Selim et al., 2012) .

Après trois jours, a été calculé le taux de germination (TG) selon la méthode suivante (Wang et al., 2022) .

$$\text{Le taux de germination} = \frac{\text{Nombre de graines germées dans l'extrait de compost}}{\text{Nombre de graines germées dans témoin}} * 100$$

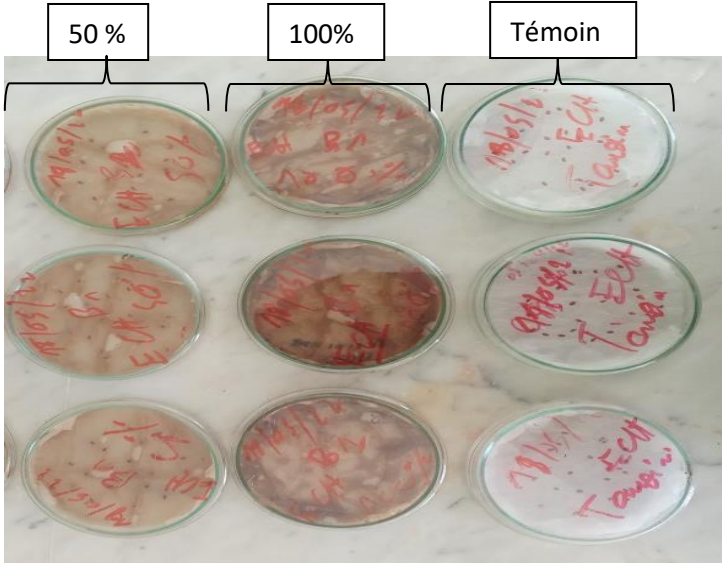


Figure 10: Test de phytotoxicité a des concentrations 50%, 100% et témoin



Figure 11: Incubation des boîtes de culture a une température de 27 °C

10 Analyses statistiques

Les données obtenues à dans notre essai ont été enregistrées sur le logiciel Excel (version 2016) .
Ensuit toutes les données d'évolutions ont été représentées par des graphes par l'Excel (version 2016) et les données de phytotoxicité ont été traitées par le logiciel d'analyses statistiques SPSS (version 23), en utilisant le Test S-N-K et le modèle d'ANOVA pour avoir la différence et la signification entres les traitements et les variables .

Troisième partie

Résultats et discussion

11 Propriétés physico-chimiques des matières premières et du mélange initial

Les résultats des analyses des paramètres physico-chimiques initiaux des sous-produits du résidu de romarin et de la fiente de volailles et du mélange initial sont représentés dans le tableau 7 :

Tableau VI : Propriétés physico-chimiques initiales des sous-produits utilisés et du mélange initial

Paramètres physico-chimiques	Unité	Résidus de romarin	Fiente de volailles	Mélange initial
Humidité	%	13,17	8,48	58
pH	-	6,81	7,87	7.79
Conductivité électrique (CE)	ms/cm	0,84	8,08	3,29
Azote total (NTK)	%	0,88	4,07	1,17
Carbone organique %	%	39,37	28,8	38,87
Rapport C/N	%	44,7	6,41	33
Matière organique	%	67,08	48,16	69,18

L'analyse de ces résultats montre que la valeur d'humidité des sous-produits de la fiente de volaille 8,48 % sont inférieure à celle obtenue pour le résidu du romarin 13,7 %, c'est-à-dire le résidu du romarin est plus sec que la fiente de volaille. En plus, la valeur du pH de résidus du romarin 6,81 est inférieure à celle obtenue pour la fiente de volailles 7,87, même les deux valeurs tournent autour de la neutralité. Même chose pour la conductivité électrique, qu'est représenté 8,08 ms/cm pour la fiente de volaille et 0,84 ms/cm pour le résidu du romarin, ce qu'est montre que la fiente de volaille est plus salin par apport les résidus du romarin. Pour l'azote total, la fiente de volailles est beaucoup plus riche en azote 4,07 % contrairement aux sous-produits de résidus du romarin 0,88 %, par contre ce dernier est très riche en carbone 39,37 % par apport le fiente de volaille 28,8 %, ce qui explique la différence entre les deux rapports C/N (6,41% pour la fiente de volaille en comparaison avec 44,7 % chez les sous-produits de résidus du romarin). Or, les sous-produits de résidus du romarin sont riches en matière organique (67,08%) par rapport à la fiente de volailles (48,16%).

Après les résultats des analyses des paramètres du mélange initial, nous remarquons que la valeur du pH 7,79 du mélange initial tourne autour de la neutralité. Même chose pour la conductivité électrique qui prend la valeur de 3,29 ms/cm. En plus, il comporte 1,17 % d'azote

total et 38,87 % de carbone organique. Ceci permet d'avoir un rapport C/N d'une valeur de 33% qu'est nécessaire pour déclencher notre essai. Or, ce mélange est riche en matière organique par une proportion de 69,18 %.

Généralement, ces résultats dépendent des propriétés des sous-produits initiales. Chacun caractérisé par des propriétés physico-chimiques propres, par exemple le résidu du romarin est très riche en carbone organique, par contre la fiente de volaille est très riche en azote minéral.

12 Évolution des paramètres physicochimiques du compost

12.1 Évolution de la température

Le suivi de la température permet une mesure indirecte de l'intensité de la dégradation aérobie, où lorsque la température inférieure à 20°C, les micro-organismes psychrotrophes seulement sont actifs. Entre 20 et 40°C, il est le tour de ceux mésophiles, mais les micro-organismes thermophiles sont actifs seulement à une température comprise entre 40 et 70°C (Mustin, 1987).

La figure 12 représente l'évolution de la température au cours du processus du compostage, d'un délai de 2 mois .

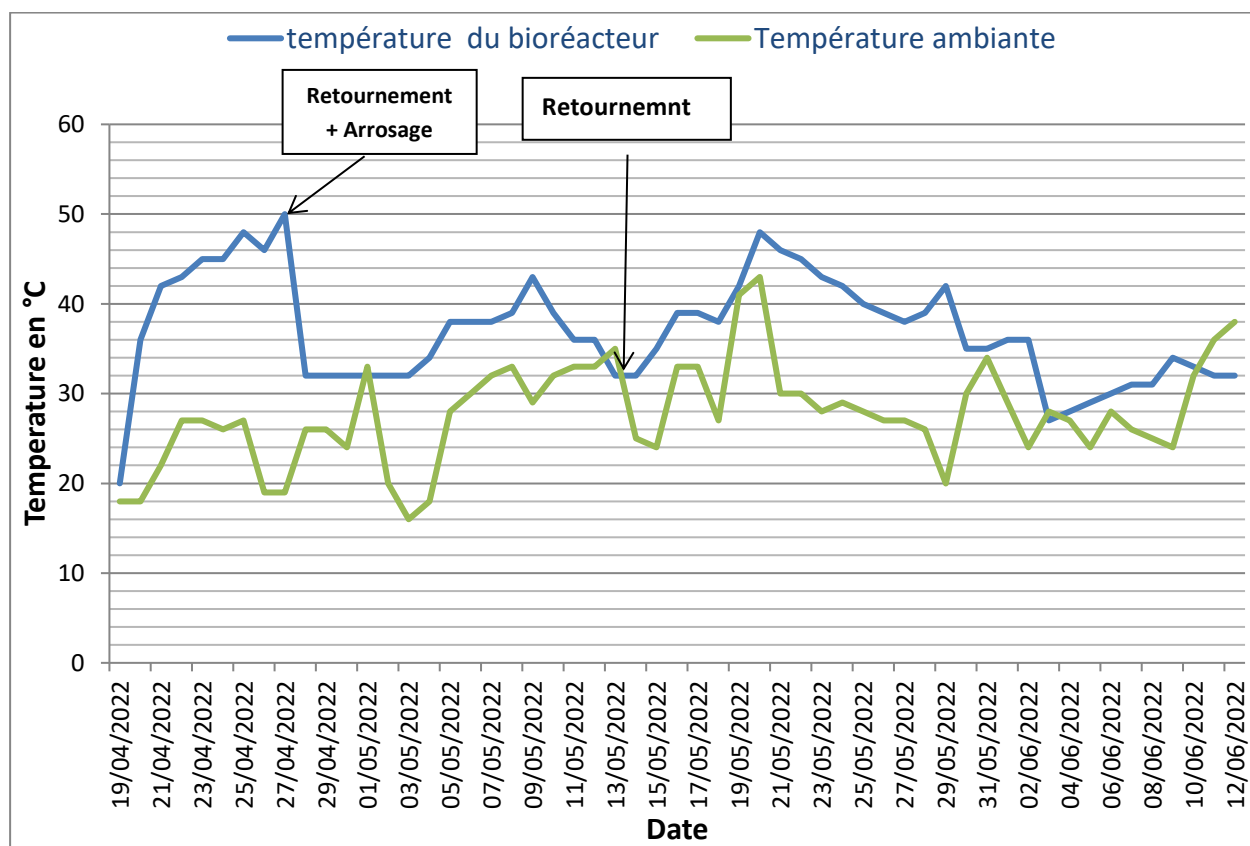


Figure 12: Évolution de la température de bioréacteur et la température ambiante au cours du compostage

Au début de l'essai du compostage (premier jour), l'évolution de la température à l'intérieur du réacteur a connu une augmentation très rapide s'étalant sur une durée de 7 jours (Figure 12) . Cette élévation rapide de la température caractérise une phase initiale dite phase mésophile qui a commencé au début de compostage, là où la température a augmenté rapidement jusqu'à 42°C après les 3 premiers jours. Une seconde phase appelée phase thermophile, la température a continué croître et a atteint une valeur maximale de 50°C . Pendant cette phase nous avons fait un retournement avec arrosage ce qu'a baissé rapidement la température jusqu'à 33°C. Cette température s'est stabilisée pendant 5 jours puis elle a commencé à croître jusqu'à 48°C, qu'a duré 25 jours du compostage. Juste après la phase thermophile, le processus de compostage arrive à une troisième phase dite phase de refroidissement, caractérisée par une diminution progressive de la température s'approchant ainsi de la température ambiante et qui s'étale sur une durée de 13 jours . Une fois la température du processus de compostage rejoint la température ambiante à la fin de la phase de refroidissement (généralement 45 jours de compostage), débute la phase de maturation caractérisée par une légère augmentation de la température, puis nous assistons à des fluctuations de cette dernière entre 24 et 34°C. Cette phase reste en cours jusqu'à la fin du compostage, là où la température du mélange diminue et rejoint la température ambiante.

Au début du compostage, pendant les 3 premiers jours, l'élévation de la température peut-être résulte de la forte activité microbienne notamment les bactéries mésophiles qui dégradent (biodégradation aérobie) les composés facilement biodégradables tels que les sucres, les protéines et les lipides (Chennaoui et *al.*, 2016). En plus, cette élévation de la température est la conséquence directe de l'oxydation de la matière organique des substrats (Hassen et *al.*, 2001 ; Ahn, 2009). Cette oxydation permet ainsi la libération de l'énergie contenue dans les liaisons chimiques des molécules constitutives (Ryckeboer, 2003). Alors selon Lopez et *al.* (2016), l'évolution de la température au cours du compostage va dépendre de la décomposition du mélange mis à fermenter et de son pouvoir calorifique. Or, les sous-produits des résidus du romarin mélangés à la fiente de volaille sont riches en composés fermentescibles ce qui explique l'atteinte rapide des températures à 50°C . Chakroune *et al.*, (2005) montrent que durant la phase thermophile de l'essai, les actinomycètes, les champignons thermophiles et les bactéries thermophiles sont actifs. Ces derniers contribuent à accélérer la décomposition de la matière organique ainsi que l'élimination des pathogènes qui ont survécu aux températures atteintes au début de compostage . Mustin (1987) montre que les actinomycètes et les champignons thermophiles dégradent les sources de carbone complexes comme la cellulose et l'hémicellulose ce qui se traduit par l'élévation de la température et aboutissent directement à l'altération des liaisons entre les différents composés cellulosiques sauf la lignine (Hoitink *et al.*, 1991). Krigstin Wetzel (2016) montre que l'augmentation de la température de compostage en des tas peut être

due à trois mécanismes distincts, à savoir ; la respiration des cellules vivantes, la réaction d'oxydation thermochimique ou la dégradation biologique, où le premier mécanisme, ainsi que la dégradation biologique précoce, est médié par la présence de sucres solubles facilement disponibles dans les cellules (Ferrero et al., 2009), tandis que la production de chaleur physique et chimique nécessite des températures très élevées et est donc moins fréquente (Everard et al., 2013).

À la fin de la phase thermophile de notre essai, l'abaissement progressif de la température ça peut être dû à l'inhibition de l'activité des microorganismes thermosensibles. Ceci sont accordés avec les résultats de Chakroune *et al.*, (2005) qu'ont montré que dans cette phase, la température devient limitante pour l'activité biologique, ce qui réduit la quantité de chaleur produite et la température se stabilise jusqu'à ce que certaines conditions deviennent limitantes, notamment la décomposition du mélange ce qui aboutit à une baisse progressive de la température, là où la phase de refroidissement, c'est une phase de ralentissement de l'activité biologique et durant laquelle la température de l'essai diminue à des valeurs situées entre 34 et 24°C qui sont assez proches de la température ambiante. Selon les études des Godden (1995) ; Insam et Bertoldi, (2007) ce stade est caractérisé par le retour des micro-organismes mésophiles qui dégradent les polymères restés intacts en phase thermophile comme l'amidon ou la cellulose et incorporent l'azote dans des molécules complexes, parmi eux, on trouve à la fois les bactéries et les champignons. À la fin de compostage, nous assistons à des fluctuations de la température jusqu'à ce qu'elle se stabilise ; c'est la phase de maturation. Ces fluctuations peuvent être expliquées par les échanges thermiques avec la salle de compostage et aussi par les différents retournements du mélange que nous avons effectués. .

selon Chakroun *et al.*, (200) le but de ces retournements au cours des premiers jours du compostage est principalement d'augmenter la température des mélanges, de les rendre plus homogènes afin qu'ils soient bien accessibles et attaqués par la flore microbienne et de fournir l'oxygène aux organismes décomposeurs pour but de redémarrer l'activité biologique afin d'assurer une fermentation complète et permettent de chasser les gaz produits par la biodégradation .

Généralement, les résultats de l'évolution de la température de notre essai s'accordent avec plusieurs des études scientifiques précédents.

En addition, la phase de maturation de notre essai ne s'arrête pas, elle reste en cours jusqu'à que le compostage devient stable et homogène.

12.2 Évolution d'humidité

L'évolution du taux d'humidité au cours du compostage est illustrée dans la figure 13 :

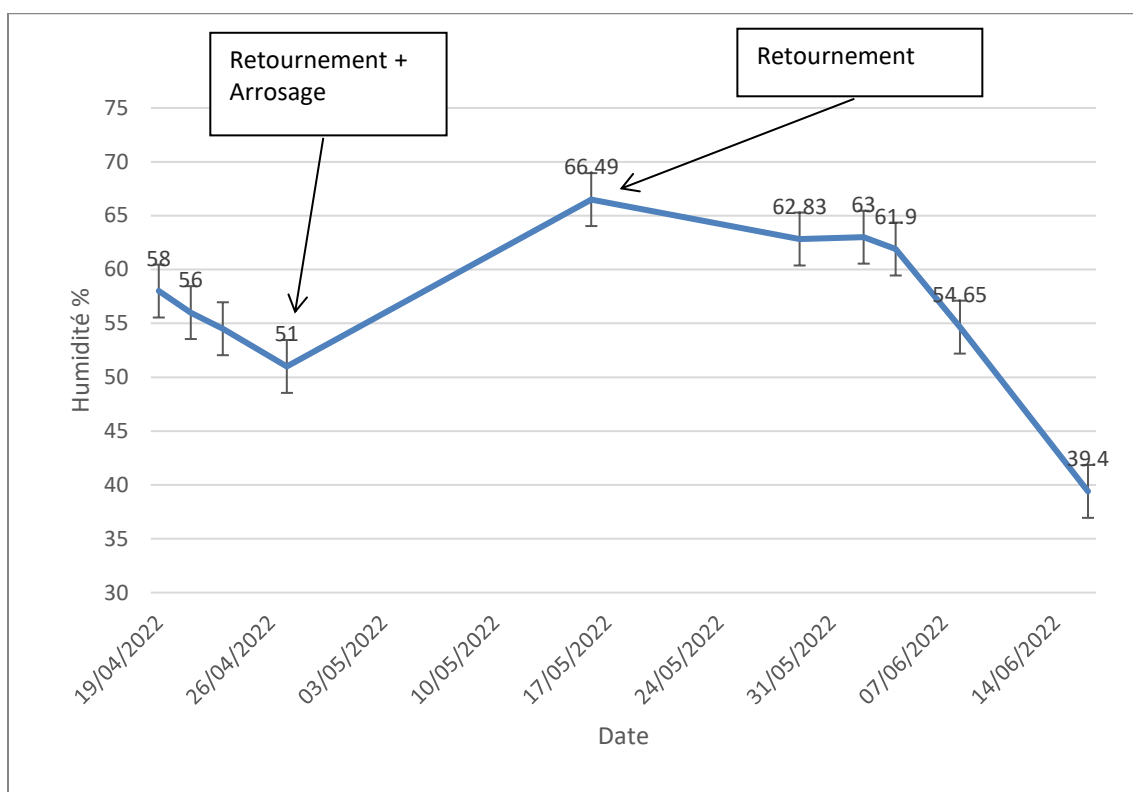


Figure 13: Évolution de l'humidité au cours du compostage.

L'humidité du mélange initial de nos essais a été fixée à 58%. Après 9 jours cette humidité a diminué jusqu'à une valeur minimale de 51 %. À ce stade, un retournement avec arrosage était nécessaire. Après 20 jours, cette humidité a augmenté de nouveau et atteint à une valeur de 66,49 % ce qu'a nécessité un autre retournement sans arrosage. Après, elle a commencé à chuter jusqu'à atteindre 61 % (phase de refroidissement). Par la suite, l'humidité continue a diminué jusqu'à 39,4 % sans retournement (phase de la maturation).

Au début du compostage, la diminution de l'humidité se peut-être à cause d'une perte d'eau par l'évaporation (Chennaoui et *al.*, 2016b) . Selon FAO (2005) un manque d'eau entraîne l'apparition du 'blanc' (forme de résistance des actinomycètes et champignons) qui explique un ralentissement de l'activité microbienne. Le produit a besoin donc d'un arrosage régulier pour rétablir le processus de décomposition. L'arrosage a été fait pour accélérer le processus, ce qui conduit à une augmentation de l'humidité jusqu'à une valeur plus élevée, ceci peut être expliqué par les déchets qui retiennent plus d'eau et sont donc plus hydrophiles au début du processus. Ainsi, cette forte humidité pourrait s'expliquer par une insuffisance de micro-organismes décomposeurs pouvant utiliser l'eau pour la décomposition de la matière organique (Sommer et *al.*, (1999) ; Coventry et *al.*, (2002) ; Goyal et *al.*, (2005)) .

Après la forte humidité, un deuxième retournement a été fait pour diminuer le taux d'humidité, car un excès d'eau (taux de matière sèche inférieur à 20%) provoque en revanche des conditions anaérobies défavorables (Toundou, 2016) . Sachant que FAO (2005) conseille qu'au cours du processus de compostage, l'humidité doit être comprise entre 40 à 65 pour cent.

Après un mois, l'humidité est stabilisée puis diminue progressivement, ce qui s'explique par une évaporation importante d'eau due à des activités importantes des macros et microorganismes (Jemali et *al.*, 1997)

L'étude statistique par le modèle de Pearson montre une corrélation négative et significative (0,005) entre l'humidité et la température (Annexe 7), avec un coefficient de corrélation égale - 0,98336351, c'est-à-dire si l'humidité augmente, la température diminue et le contraire. Ce résultat est accordé avec les résultats de Chennaoui et *al.*,(2016b) (Figure 13) .

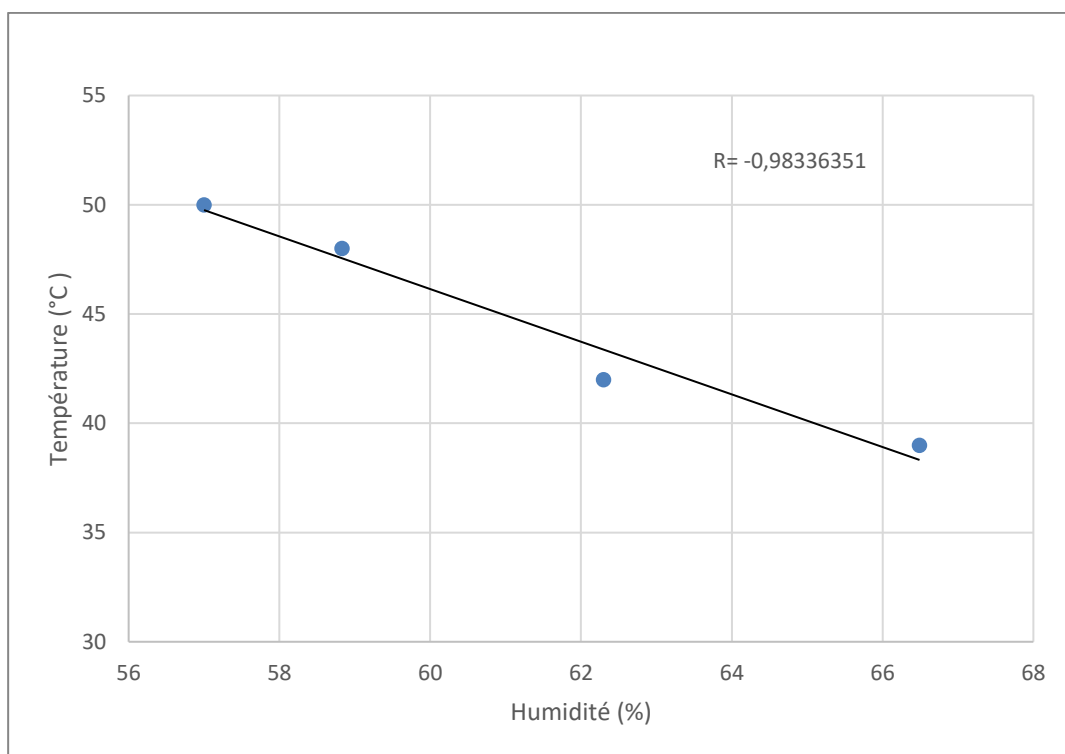


Figure 14 : Corrélation linière négative entre l'humidité et la température au cours du compostage (model Pearson)

12.3 Évolution du pH

Les résultats du pH obtenus sont représentés dans le graphe de la figure 15 suivante :

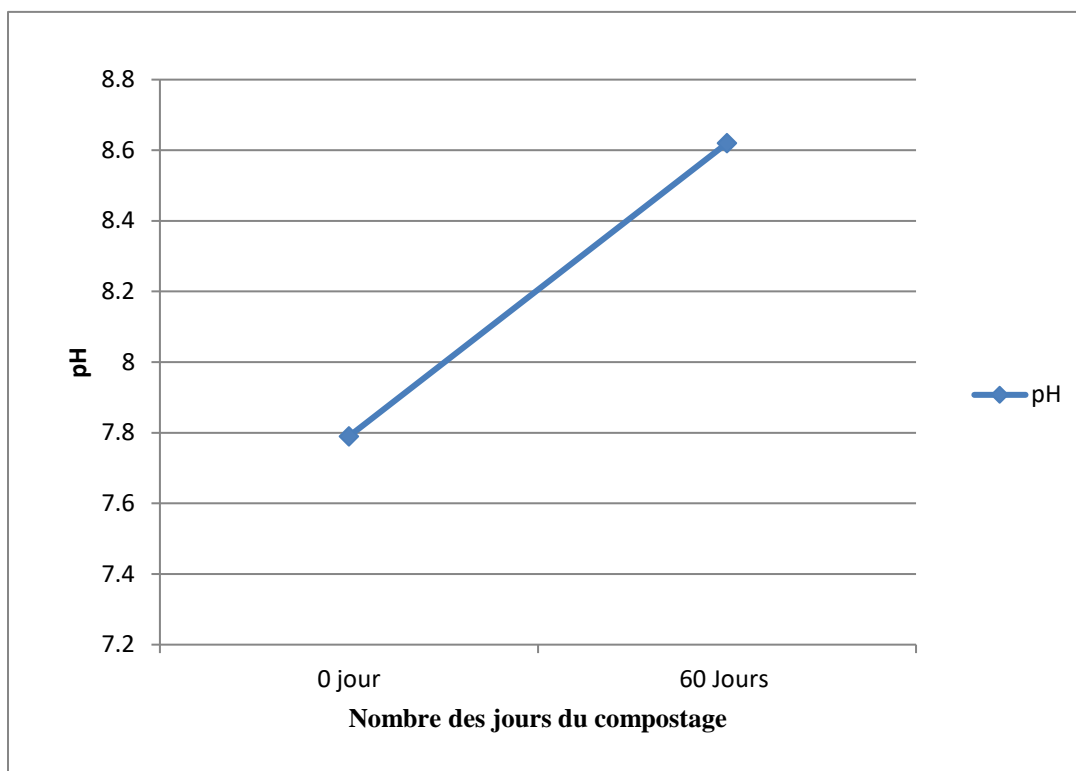


Figure 15 : Évolution du pH au cours du compostage

Au début de compostage, nous avons constaté une forte augmentation du pH progressant de 7,79 à 8,62 pour le produit de l'essai après -60 jours du compostage. Afin d'obtenir un compost final d'un pH alcalin et stable.

Cette augmentation du pH au cours de notre essai du compostage ça peut être lié à la libération de l'ammonium par le procédé d'ammonification des protéines surtout au cours des premières phases de compostage, d'autre part d'une libération des bases auparavant intégrées à la matière organique (Peters *et al.*, 2000).

À la fin du processus, le pH est stabilisé. Ceci est aussi la conséquence de la présence d'ions Ca^{2+} qui augmente au cours du compostage suite à l'humification et qui joue un rôle de tampon dans le milieu (Morel *et al.*, 1986) .

12.4 Conductivité électrique (CE)

Les résultats de l'évolution de la conductivité électrique au cours du compostage sont illustrés dans la figure 16 :

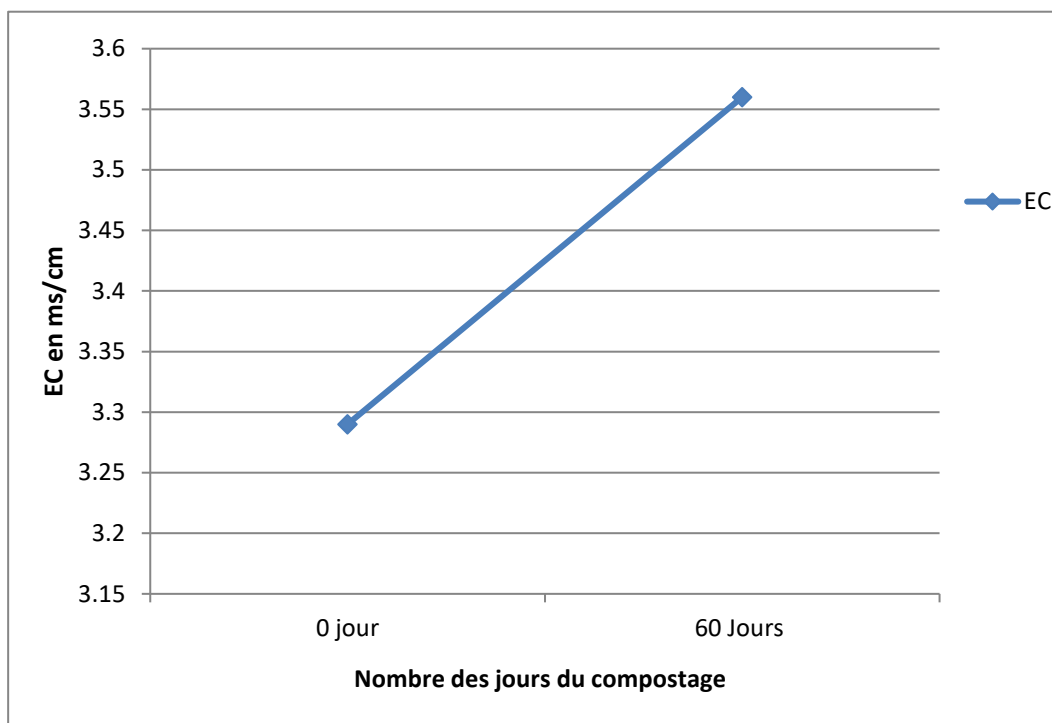


Figure 16 : Evolution de la conductivité électrique (EC) durant la période du compostage

Généralement, la conductivité électrique est liée directement à la salinité. À partir des résultats obtenus (figure 16), nous observons une augmentation notable de ce paramètre allant de 3,29 à 3,56 ms/cm pour le mélange de notre essai pendant 60 jours du compostage.

Gómez-brandon et al., (2008) ont montré que l'augmentation de la conductivité électrique pourrait être causée par la libération de sels minéraux tels que les phosphates et les ions ammonium par la décomposition des substances organiques . Plus précisément, elle est due au métabolisme conduisant à la minéralisation en dioxyde de carbone le CO₂ (50 % du carbone organique des déchets est transformé en CO₂, d'O₂, de molécules d'ammoniac (NH₃), de composés soufrés en faible proportion (H₂S)) .

12.5 Évolution du carbone organique total (COT)

Les résultats d'évolution du carbone organique obtenus sont représentés dans le graphe de la figure 17 :

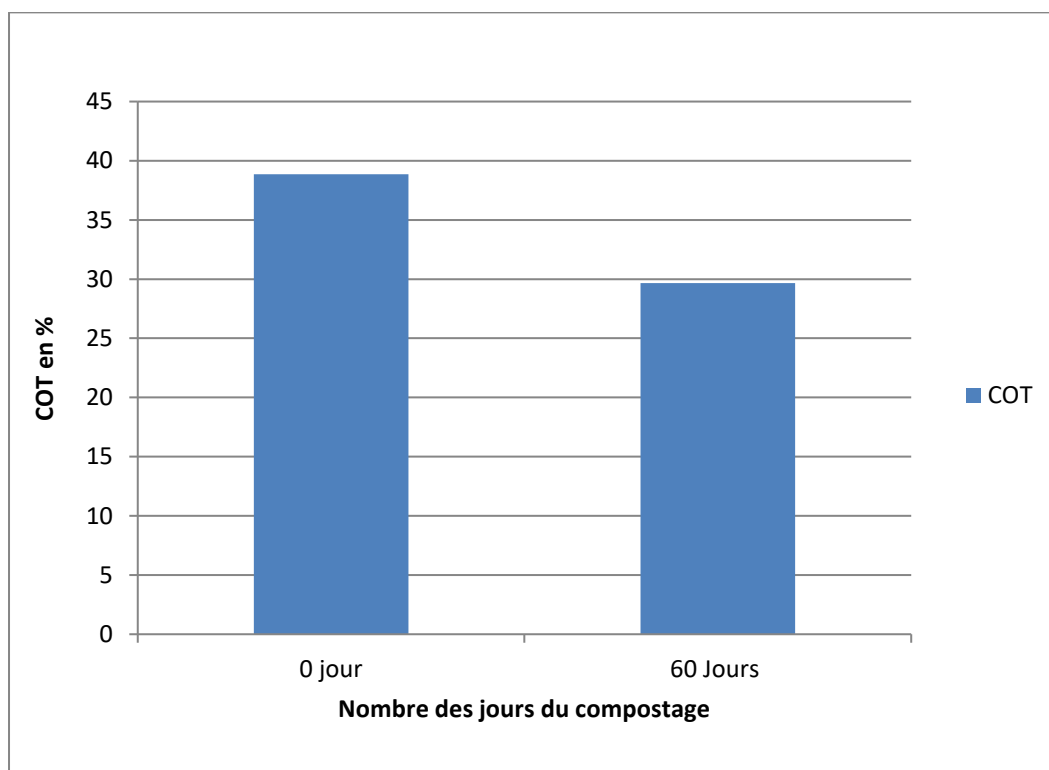


Figure 17 : Évolution de carbone organique total (COT) durant la période du compostage

À partir des résultats obtenus (figure 6), nous observons que le taux de carbone organique a diminué progressivement jusqu'à 29,67 % à la fin de processus du compostage.

La diminution du taux de carbone organique total du mélange au cours de notre essai, ça peut être due à la minéralisation de la matière organique en CO₂ résultat de l'activité des microorganismes aérobies (Gaid S. *et al.*, 2000 ; Beck-Friis *et al.*, 2003) .

Said-Pullicino *et al.* (2007) ont montré que pendant la phase de maturation, la teneur en carbone se stabilise relativement. En effet, dans cette phase les pertes de carbone sont ralenties et on assiste à une redistribution de carbone par les mécanismes de l'humification. D'ailleurs les voies de repolymérisation et condensation qui conduisent à la formation des substances complexes caractérisées par un poids moléculaire très grand et une faible solubilité .

12.6 Évolution de la matière organique (MO)

Les résultats de l'évolution de la matière organique au cours du compostage sont illustrés dans la figure 18 :

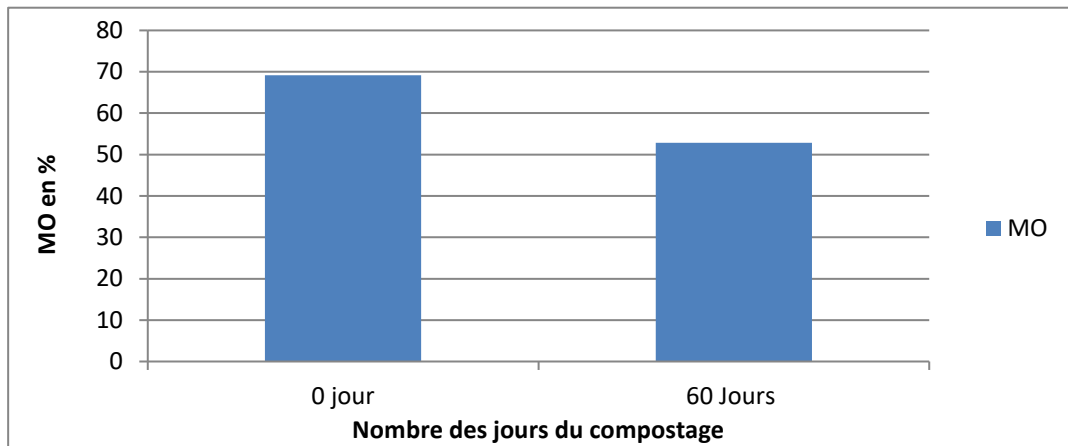


Figure 18 : Evolution de la matière organique (MO) durant la période du compostage

D'après ce résultat, le taux de matière organique au début de processus du compostage démontre la richesse du mélange initial en matière organique (taux de l'ordre de 69,18 %) . Puis il a diminué jusqu'à 52,81 % à la fin du processus.

Ces résultats sont en accord avec ceux de M'Sadak (2013) qui confirme que le compost mûr doit avoir une teneur en MO inférieure à 50 % . De même auteur a montré que la diminution des pourcentages de MO est rapportée à la minéralisation de matière organique par les micro-organismes.

12.7 Évolution de l'azote total (NKT)

Les résultats de l'évolution de l'azote total au cours de notre essai du compostage sont illustrés dans le graphe de la figure 19 :

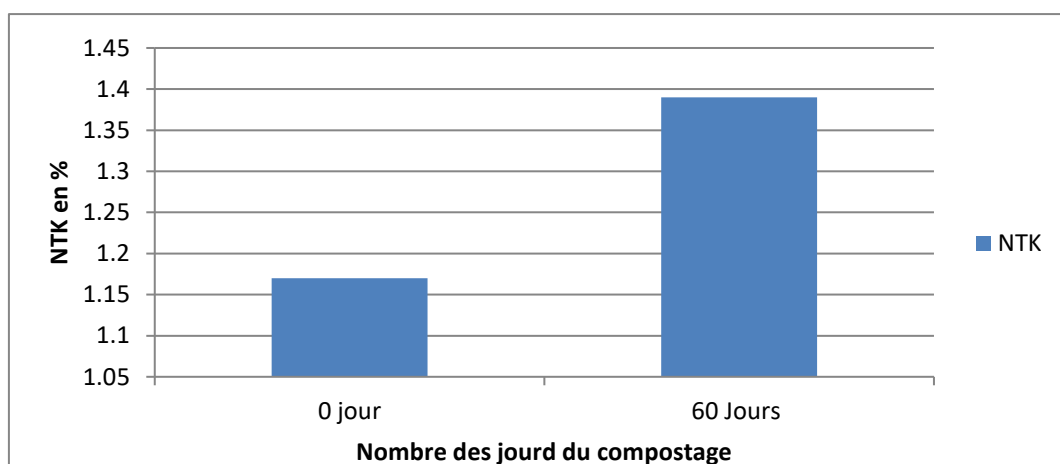


Figure 19 : Evolution de l'azote total (NKT) durant la période du compostage

Au cours de notre essai du compostage, nous avons constaté une augmentation notable d'azote total passant de 1,17 à 1,39 % à la fin de l'essai (après 60 jours de compostage) .

Selon les études des Paredes *et al.*, (2000) ; Mustin, (1987) et Roig *et al.*, (2000) nous avons déclaré que l'augmentation rapide de l'azote total au début des deux essais de compostage est due à la décomposition de la matière organique et surtout la décomposition des protéines et des acides aminés ainsi que leur transformation en composés ammoniacaux surtout lors de la phase thermophile. Barje *et al.*, (2012) ont montré que l'enrichissement du compost final en NO₃ - par rapport à NH₄ + traduit l'évolution du substrat vers un compost exempt de phytotoxicité . Ces résultats sont en accord avec ceux des littératures précédentes.

12.8 Évolution du rapport C/N

Les résultats d'évolution du rapport C/N obtenus sont représentés dans le graphe de la figure 20 :

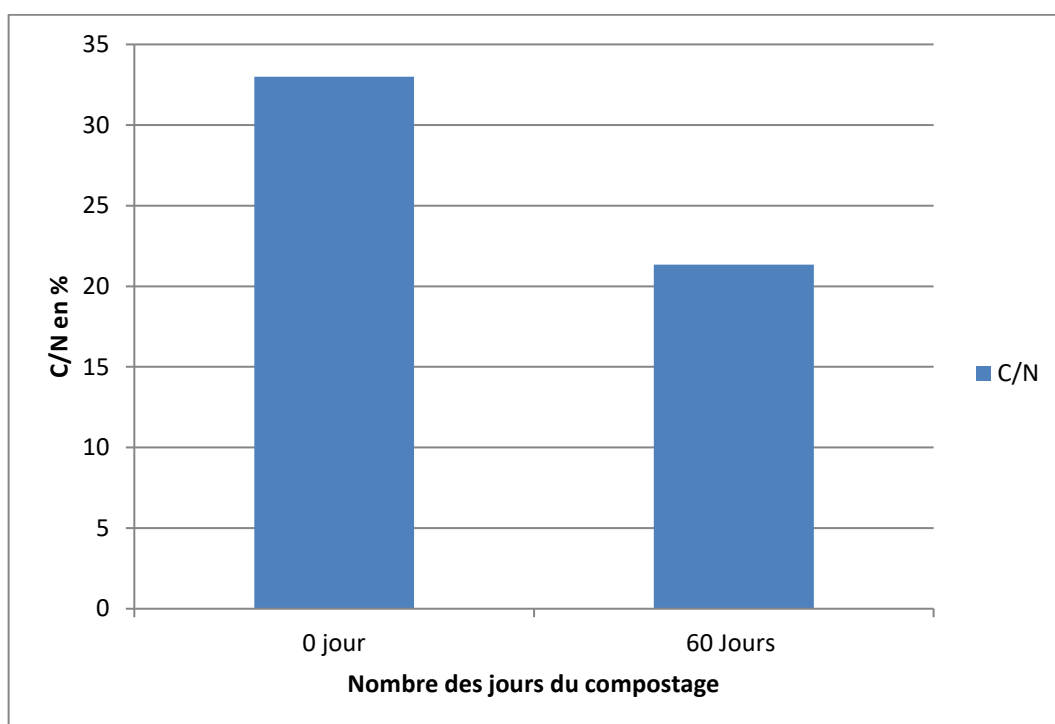


Figure 20 : Evolution du rapport C/N durant la période du compostage

Généralement, le rapport C/N est un paramètre très important au cours d'un processus de compostage. Ce rapport est le critère le plus courant pour déterminer la maturité d'un compost, il contrôle l'équilibre microbologique d'un sol, alors que les matières organiques sont stables.

Au cours de notre essai du compostage, le rapport C/N du mélange de départ est égal à 33%, ce rapport décroît progressivement pour atteindre 21,34 % à la fin de l'essai (après 60 jours du compostage), indiquant une stabilisation moyenne des composés organiques. Habituellement, le rapport C/N diminue au cours du compostage pour arriver à des valeurs comprises entre 10 et 15

idéales et optimales pour les composts finis, stables et matures (Eggen *et al.*, 2001 ; Kalemelawa *et al.*, 2012 ; Konaté *et al.*, 2018) . Du fait que notre essai toujours en cours de maturation ce qu'explique que la rapport C/N en cours diminué.

La diminution du rapport C/N s'explique par le fait que les microorganismes aérobies par leur activité consomment plus de carbone que d'azote ce qui contribue à une évolution des matières organiques vers des formes plus stables et plus humidifiées (Chakroun *et al.*, 2005). En addition, l'élévation du taux d'azote total durant les premières phases de compostage ainsi que les pertes du carbone organique sous forme du CO₂ par minéralisation conduit à une chute du rapport C/N tout au long du processus.

Amir, (2005) et Barja, (2010) ont montré que la diminution de ce rapport est étroitement liée à la perte de carbone organique par biodégradation de la matière organique et le dégagement du CO₂, et d'autre part à l'augmentation du taux de l'azote total du milieu. La baisse de ce rapport est atténuée par les pertes de l'azote sous forme ammoniacale au cours de la phase thermophile .

En plus, Petric *et al.* (2015) a toutefois adopté des valeurs initiales de C/N initiales entre 25 et 40 et même jusqu'à 50 comme des valeurs recommandées pour le compostage. Ceci est en accord avec notre valeur initiale du rapport C/N et nos résultats .

13 Évolution de la phytotoxicité et la maturité du compost

L'évaluation du taux de germination (GT) des graines de cresson cultivées dans différentes concentrations d'extraits de compost (50% et 100%) (Annexe 9), a révélé différents niveaux de phytotoxicité en fonction du temps du compostage (Figure 21).

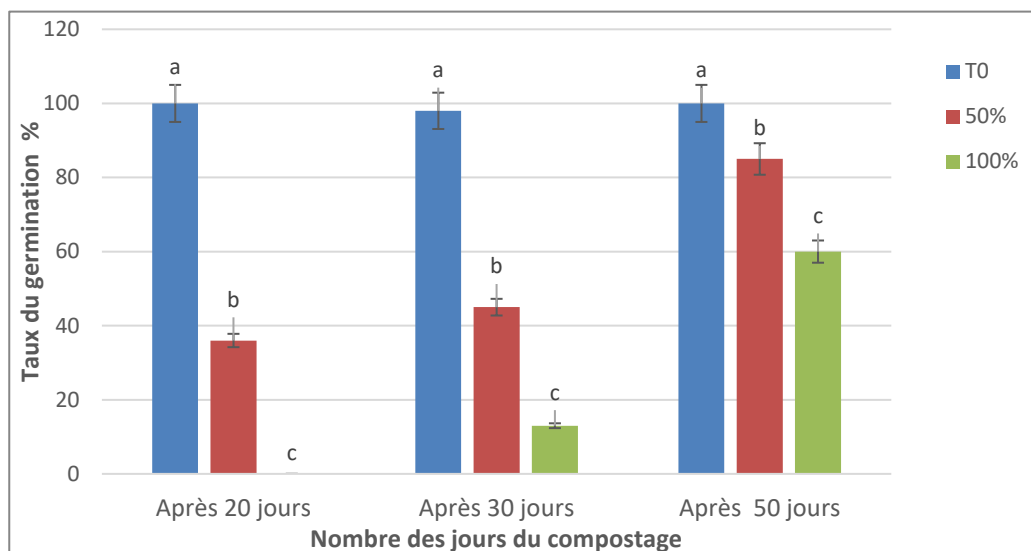


Figure 21 : Figure 21 : Test de phytotoxicité de l'extrait du compost évalué par le taux de germination (TG) des graines de cresson. (T0 : témoin ; 50 % et 100 % sont des concentrations ; les concentrations suivies de lettres communes a, b et c sont statistiquement différentes selon le test de S-N-K a P = 0,05 et les barres d'erreur représentent les écarts types de trois répétitions).

L'étude statistique par l'ANOVA à deux facteurs montre un effet significatif de concentration (50% et 100%) et de temps sur la germination des grains de cresson à un seuil de 5% (P = 0,005), et le test S-N-K montre une différence significative entre les traitements (concentration) à un seuil de 5% (Annexe 10).

Zucconi et al., (1981) ont suggéré qu'un taux de germination des graines de cresson est inférieur à 50%, le degré de phytotoxicité chez le compost étudié est important, les valeurs entre 50 et 80% indiquent un niveau de phytotoxicité modérée, et si le taux de germinations supérieur est à 80%, il y a absence de la phytotoxicité chez le compost.

Selon ces critères, tous les extraits bruts testés à des concentrations 50% et 100% après 20 jours et 30 jours du compostage, ont montré une forte phytotoxicité avec des valeurs de TG de 36 et 0% pour les concentrations 50% et 100% respectivement après 20 jours et 45 de compostage et 13 % pour les concentrations 50% et 100% respectivement après 30 jours de compostage. Après 50 jours du compostage, le résultat montre une phytotoxicité modérée pour la concentration

100% (taux de germination est 60 %). Pour la concentration 50 %, il y a absence de phytotoxicité (taux de germination est 85 %).

Ces résultats nous montrent que la phytotoxicité varie selon la concentration d'extrait du compost en fonction du temps de compostage . Plus précisément, le graphe de figure 22 montre que la phytotoxicité des deux concentrations de notre extrait augmente en fonction du temps, ce qu'elle se jusqu'aux stabilisés a une valeur de 100% lorsque le compost devient mature 100% .

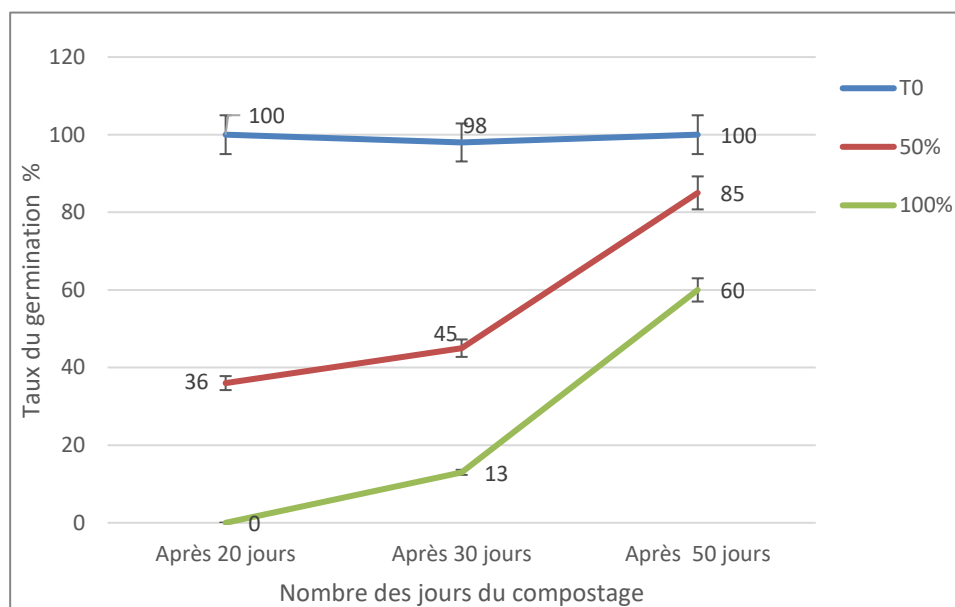


Figure 22: Évolution des taux de germination des deux concentrations (50% et 100%) avec témoins en fonction des nombres des jours du compostage (T0 : témoin) .

Selon Zucconi et *al.*, (1981) et Luo et *al.*, (2018), le test de germination des graines est un outil puissant pour examiner l'efficacité du compostage et donc, sa maturité. D'ailleurs, la maturité est l'un des aspects les plus importants qui déterminent la qualité finale du compost (Luo et *al.*, 2018). Elle indique mesurer l'effet des substances phytotoxiques et l'aptitude du compost à stimuler la croissance des plantes (Aslam et *al.*, 2008) . Car les composts immatures sont phytotoxiques et peuvent contenir des composés qui peuvent limiter la germination des graines et le développement des racines (Ou-Zine et *al.*, 2020) .

En plus, les tests de germination sont parfois sensibles aux conditions de compostage. Zucconi et *al.*, 1985 ont prouvé la persistance des substances phytotoxiques lorsque les conditions d'aération au cours du compostage sont insuffisantes. D'ailleurs, de nombreuses recherches ont montré que la phytotoxicité est significativement corrélée avec plusieurs paramètres. Ou-Zine et *al.*, (2020) ont montré qu'il y a une corrélation négative significative entre l'indice de germination et plusieurs paramètres telle que la conductivité électrique (EC), le rapport C/N et la teneur en phénol où l'IG le plus bas avec une phytotoxicité élevée était caractérisé par une CE de

10,12 dS.m⁻¹, un rapport C/N de 27,86, et par une concentration en phénol supérieure à 504 mg/g.

Dans notre étude, une corrélation négative significative au seuil de 5% ($P = 0.028$, $r = -0.999$) a été observée entre le taux de germination (TG) et le rapport C/N (figure 23) (annexe 2). En effet, au début du compostage, le TG est plus faible avec une phytotoxicité élevée et le rapport C/N est de 30%, par contre à la fin du compostage, le TG est plus élevé avec l'absence de phytotoxicité et le rapport C/N est de 21% .. Cette corrélation est montrée que la diminution du rapport C/N est impliquée dans la phytotoxicité du compost et par conséquent sa maturité. Ceci est confirmé les résultats obtenus par plusieurs auteurs. Gariglio et al., (2002) ont montré que le taux de germination devient de plus en plus important au fur et à mesure avec le niveau de maturité du compost.

Guo et al., (2012) ont montré que l'aération était le principal facteur influençant la stabilité et la maturité du compost. En plus Wong (1985) montre que la stabilité du compost est établie rapidement et sa phytotoxicité disparaît en présence d'une aération suffisante par rapport à une condition aérobique favorisant plutôt la production d'ammonium au cours de la dégradation des déchets organiques qui implique dans la phytotoxicité du compost.

D'autres facteurs peuvent être impliqués dans la phytotoxicité du compost, notamment la concentration en métaux lourds (Pahlsson 1989), la teneur en acides organiques (Zucconi et al., 1985 ; Himanen et al., 2006).

En se basant sur ces résultats, on déduit que les taux de germination les plus importants et qui dépassent 80% sont constatés dans les boîtes qui renferment une concentration de 50% et après 50 jours du compostage, c'est-à-dire à la phase de la maturation qui nous s'arrête pas et reste en cours jusqu'à que le compost final devient mature complètement avec un taux de germination 100%.

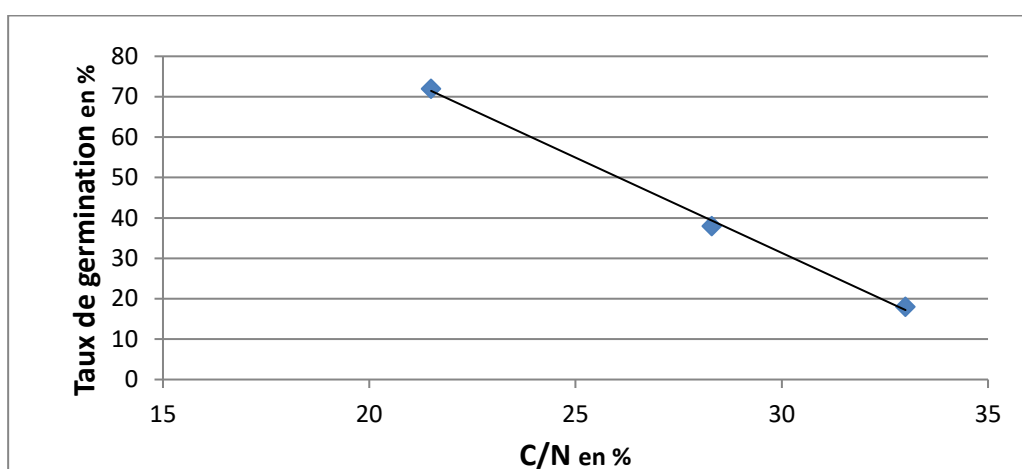


Figure 23 : Corrélation linéaire négative entre le rapport C/N et le taux de la germination (phytotoxicité) au cours du compostage (model Pearson)

Conclusion et perspectives

La valorisation des sous-produits organiques agricoles par la technologie du compostage est un mode de traitement visant à obtenir un compost qui contribue à améliorer la fertilité des sols, lutter contre les agents pathogènes et à limiter l'utilisation des engrais chimiques. C'est ainsi que les résidus de romarin ont été compostés pendant deux mois, avec la fiente de volaille dans le but d'avoir un compost à valeur fertilisante améliorée et de qualité.

Les résultats des analyses physico-chimiques réalisées sur le compost à la fin du processus montrent que le compost produit après 60 jours du compostage comporte des valeurs acceptables des éléments contrôlés. Pourrait être utilisé directement dans le sol.

Ces résultats d'analyse de produit fini confirment que le compost élaboré à un pH basique (pH = 8,62), a une humidité en cours de diminution, un rapport C/N optimal et une teneur en azote acceptable. Ces résultats sont confirmés aux proportions déclarées par les normes relatives aux amendements organiques NF U 44-051 . Le test de maturité de compost fini, nous a révélé que ce dernier est exempt de phytotoxicité, en raison que le taux de germination dépasse 60 % .

Cette étude scientifique réalisée sur la valorisation des sous-produits organiques agricole en biofertilisants par la technologie du compostage, nous permet d'envisager d'approfondir la recherche sur l'effet du compost produit sur la structure du sol et les maladies des plantes , afin d'éclaircir les mécanismes d'action, et faire un ensemble d'essais randomisés et plus contrôlés pour valider la production et la généralisation des composts à base des sous-produits organiques agricole qu'ont les plus trouver et moins chères.

Il va donc sans dire que la présente étude n'a pas la prétention de rechercher l'exhaustivité, mais seulement d'ouvrir la voie à d'autres recherches en guise d'alternative aux engrais chimiques et préserver les écosystèmes aux générations futures.

Pour ce fait, nous recommandons d'ouvrir un grand chantier de recherche pour isoler et valoriser les sous-produits organiques agricoles locaux en vue de les rentabiliser sur le plan agricole aussi bien que sur le plan commercial .

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **Abaker M.G. 2019** . Suivi de maturation de composts mixtes par spectrométrie d'absorption et de fluorescence UV-visible . These en doctorat. Université de Toulon . el-01941712v1
- **Afilal M. E. 2015** . Potentiel des déchets organiques et valorisation énergétique au Maroc . J. Mater Env . 12p .
- **Afilal M.A., Deh Ibrahim et Elfarh L. 2020** . Evaluation des effluents d'abattoir et proposition de solution valorisante pour le Maroc . Ewash & Ti Journal, V : 4 Issue 1, P : 300-306.
- **Afilal M.E., Elasri O., Merzak Z . 2014** . Caractérisations des déchets organiques et évaluation du potentiel Biogaz (Organic waste characterization and evaluation of its potential biogas). J. Mater Env, Sci 5 . P : 1160-1169 .
- **Afilal M.E., Elfarh L., Laich H., Chellali M., Ghanimi M. 2019** . Valorisation agronomique des Margines (déchets liquides) par fermentation méthanique . Revue espace géographique et société Marocaine . P : 247-256 .
- **Ahn H.K., Sauer T.J., Richard T.L., Glanville T.D. 2009** . Determination of thermal properties of composting bulking materials. Bioresource Technology, 100 : 3974–3981.
- **Ajir, A. 2009** . Gestion des déchets solides - PNDM. Department of the Environment. Rabat.
- **Amir S. 2005** . Contribution à la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage, devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost, Thèse de doctorat, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech.
- **Aslam, D.N., Horwath, W., VanderGheynst, J.S., 2008**. Comparison of several maturity indicators for estimating phytotoxicity in compost-amended soil. Waste Manage 28 (11), 2070–2076. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.026>.
- **Bartali, E.H. Belmakki M. 2013** . Morocco country report. Overview of potential biowaste and biobased residues for production of value added products . Rapport, Institut Agronomique et Vétérinaire

- **Basalo C., 1974** . Les ordures ménagères en agriculture. T. S. M., l'Eau, 69 : 15-23.
- **Beck-Friis B., Jonsson S., Eklind H., Kirchman Y. and Smars H. 2003** . Composting of source-separated household organics at different oxygen levels: gaining and understanding of the emission dynamics. Compost Science & Utilization. Publisher: Taylor et Francis V : 11: P : 41-50.
- **Bekhaled R., Akila Y. 2019** . Étude et Valorisation du Fumier Bovin par Compostage . Theme de master . Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem . 47p .
- **Belmakki E.H., Bartali H., Xiaoru B., Belinda A. 2015** . Identification and characterization of organic waste in Morocco,an important step towards the valorization of waste/ Rev. Mar. Sci. Agron. Vét. 3 (3):37-45 p .
- **Benson E., Rivero L., Chistopher S., Grotewold E., Brkljacic J. 2017.** Standardized Method for High-throughput Sterilization of Arabidopsis Seeds . Journal of Visualized Experiments Journal of Visualized Experiments . P : 128 .
- **Borja J., Taleon D.M., Auresenia J., Gallardo S. 2010** . Polychlorinated biphenyls and their biodegradation. Process Biochemistry, 40, 1999-2013.
- **Bouanani A., Baba-Hamed K., Fandi W. 2013.** Production et transport des sédiments en suspension dans l'oued Sikkak (Tafna – nord-ouest Algérie) Production and transport of suspended sediment in Sikkak wady (Tafna – North West Algeria) . Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science . V 26, numéro 2 . P 81-171 .
- **Cabaraban, M. T. I., M. V. Khire, et E. C. Alocilja, 2008.** Aerobic in-vessel composting versus bioreactor landfilling using life cycle inventory models. Clean Techn Environ . P : 39–52.
- **Chakroune, K., Bouakka, M. et Hakkou, A. 2005** . Incidence de l'aération sur le traitement par compostage des sous-produits du palmier dattier contaminés par *Fusarium oxysporum f.sp. albedinis*. Revue Canadienne de microbiologie, 51(1) : 69-77.
- **Chakroune, K., Bouakka, M. et Hakkou, A. 2005** . Incidence de l'aération sur le traitement par compostage des sous-produits du palmier dattier contaminés par *Fusarium oxysporum f.sp. albedinis*. Revue Canadienne de microbiologie, 51(1) : 69-77.
- **Chen, L., De Haro, M.M., Moore, A., Falen, C. 2011.** The Composting Process: Dairy Compost Production and Use in Idaho CIS 1179 . Journal of Environmental Management.
- **Chennaoui M., Salama Y., Makan A., Mountadar M. 2016** . Valorisation Agricole D'un Compost Produit à partir du compostage en cuve des déchets municipaux . European Scientific Journal ESJ . P : 247-265

- **Chennaoui M., Salama Y., Mekan A., Mountadar M. 2016 (b).** compostage en cuve des dechets menagers et valorisation agricole du compost obtenu . algerian journal of arid environment . p : 54-66 .
- **Chouchene A. 2010 .** Étude expérimentale et théorique de procédés de valorisation de sous-produits oléicoles par voies thermique et physico-chimique. Thèse en doctorat . Université de Haute Alsace – Mulhouse . 208p .
- **Chukwudi O., Victor C. I., Joyce N., Ifeanyichukwu E., Nwankwoala O., Ikemdinachi N. I., Lewis I. E. 2017 .** Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects . Journal of Environmental Management . p : 140-157
- **COMPOSTING, 2008 .** Marché du compost à base de boues d'épuration des eaux usées au Maroc. Projet Morocomp (Life 05 TCY/MA/000141), Rabat, 47 p.
- **Coventry E., Noble R., Mead A., Whipps J.M., 2002.** Control of Allium white rot (*Sclerotium cepivorum*) with composted onion waste. Soil Biol. Biochem., 34: 1037-1045.
- **Decam G. 2013 .** Effets de la nature et décomposition des mulchs de résidus végétaux sur les services assurés par les sols en agriculture de conservation : Étude expérimentale et modélisation . Ecole doctorale Sciences, technologies, santé ; Reins .
- **Eggen T., and Vethe O. 2001.** Stability indices for different composts. Compost Science & Utilization,9, 1 : 19-26.
- **Elasri O., Afilal M.A. 2016 .** Potential for biogas production from the anaerobic digestion of chicken droppings in Morocco Article . J. Mater Env, Sci 5 . Energy V : 85 (6), P : 430-438 .
- **Esmaili A., Khoram M.R., Gholami M., Eslami H. 2020 .** Pistachio waste management using combined composting/vermicomposting technique: Physico-chemical changes and worm growth analysis . J. of Cleaner Production, Elsevier . 242 . 7p .
- **Everard, C. D., Finnan, J., McDonnell, K. P., & Schmidt, M. 2013 .** Evaluation of self-heating in *Miscanthus x giganteus* energy crop clumps and the implications for harvesting time. Energy, 58, 350–356. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.06.022>
- **FAOSTAT, 2015 .** Statistics Division, compare data, production live animals, Morocco, Algeria, Egypt, Libya, Mauritania and Tunisia Chickens .

- **Faverial J. 2016** . Compostage et vermicompostage des effluents d'élevage. Une alternative durable pour le recyclage des déchets d'origine animale . Thèse de doctorat . université des antilles . 163 p .
- **Ferrero, F., Lohrer, C., Schmidt, B. M., Noll, M., & Malow, M. 2009** . A mathematical model to predict the heating-up of large-scale wood piles. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(4), 439– 448. <https://doi.org/10.1016/J.JLP.2009.02.009>
- **Francou C. 2003** . Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains : influence de la nature des déchets et du procédé de compostage - recherche d'indicateurs pertinents . These en doctorat . Planète et Univers [physics]. INAPG (AgroParisTech) . 260p.
- **Gaind S., Gaur A.C., 2000** . Quality assessment of compost prepared from fly ash and crop residue. *Bioresour. Technol.* 87, P: 125–127.
- **Garai S., Sarkar S., Skalicky M., Akbar H., Brestic M., Saha S., Ray K., Brahmachari k. 2020** . Management of Crop Residues for Improving Input Use Efficiency and Agricultural Sustainability . Puplicer dans journal Sustainability . 24 p .
- **Gariglio NF., Buyatti MA., Pilatti RA., González Rossia DE. et Acosta MR., 2002** . Use of a germination bioassay to test the compost maturity of willow sawdust. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 10, 135-139.
- **Gobat, J.M., Aragno, M. et Matthey, W. 2003** . Le Sol vivant Bases de pédologie Biologie des sols. Deuxième édition, Presse polytechniques et universitaires romandes pp 568.
- **Godden B., 1995** . La gestion des effluents d'élevage. Techniques et aspect du compostage dans une ferme biologique. *Revue de l'Ecologie*.No V : 13 . p37.
- **Golueke C. G., 1979** . Composting : a review of rationale, principles and public health. *Compost Sci.*, 17: 11-15.
- **Gómez-brandon M., Lazcano C., Domínguez J., 2008** . The evaluation of stability and maturity during the composting of cattle manure. *Chemosphere*, 70: 436-444.
- **Goyal S., Dhull S. K., Kapoor K. K., 2005**. Chemical and biological changes during Composting of different organic wastes and assessment of compost maturity. *Bioresour. Technol.*, 96: 1584-1591.
- **Guedira A., Lamhamedi M.S., Satrani B., Boulmane M., Serrar M., Douira A. 2011** . Valorisation des matières résiduelles et de la biomasse forestière au Maroc :

Compostage et confection de substrats organiques pour la production de plants forestiers .
Revue/ J. nature et technologie . P : 87 à 95

- **Guillaume C. T. 2011** . Optimisation des paramètres de fonctionnement d'un bioréacteur dans un procédé de tri-compostage . Thème d'un maitrise . Ecole de technologie supérieure, université du Québec . 63 p .
- **Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y., Shen, Y., 2012.** Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresour Technol* 112, 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.099>.
- **Hacala, S., 1998.** Le compostage du fumieren exploitation d'elevage. Recueil de s'interventions du 15 Decembre 1998. Paris. ACTA/ADEME/ Ministère de l'agriculture et de la pêche:28-43.
- **Hassen A. et Belguith K. 2001** . Microbial characterization during composting of municipal solid waste. *Bioresource Technology* 80(3) : 217-225.
- **Himanen, M., Latva-Kala, K., Itävaara, M., Hänninen, K., 2006** . A method for measuring low-weight carboxylic acids from biosolid compost. *J Environ. Quality*, 516–521 <https://doi:10.2134/jeq2004.0443>.
- **Horváth I.S., Tabatabaei M., Karimi K. Kumar R. 2016** . Recent updates on biogas production – a review. *Biofuel Res J* 3:394–402
- **Hu, Z., R. Lane, et Z. Wen, 2009.** Composting clam processing waste in laboratory and pilot-scale in-vessel system. *Waste Management* . P : 180–185.
- **Igoni, H.A., Ayotamuno, M.J., Eze, C.L., Ogaji, S.O.T., Probert, S.D., 2008.** Design of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. *Appl.*
- **Insam H., Bertoldi M. 2007** . Microbiology of the composting process / Chapter 3 . *Waste Management Series. J. sciencedirect, elsivier* . V : 8, P : 25-48 .
- **Jemali B., Soudi B., Lhadi E. K., 1996.** Contrôle des paramètres du compostage et appréciation de la qualité du compost des déchets ménagers de la Wilaya de RabatSalé. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 16 (2):.43-50.
- **Jianlong W., Shizong W. 2019** . Preparation, modification and environmental application of biochar: A review/ a Collaborative Innovation Center for Advanced Nuclear Energy Technology, INET, Tsinghua University.
- **Kalamdhad, A. S. et A. A. Kazmi, 2008** . Mixed organic waste composting using rotary drum composter. *International Journal of Environnement and Waste Management*, 2(1/2) : P : 24–36.

- **Kalemelawa F., Nishihara E., Endo T., Ahmad Z., Yeasmin R., Tenywa MM., Yamamoto S. 2012** . An evaluation of aerobic and anaerobic composting of banana peels treated with different inoculums for soil nutrient replenishment. *Biores Technol* 126 :375-382.
- **Kamusoko R., Raphael M.J., Parawira W., Chikwambi Z. 2021** . Strategies for valorization of crop residues into biofuels and other value-added products. View online at Wiley Online Library .
- **Koura T., Gustave D., Mensah G.A. 2018** . Production et utilisation des composts à base des déchets solides des huileries de palme . Fiche technique . Bibliothèque Nationale (BN) du Bénin ISBN: 978-99919-75-48-1
- **Krigstin, S., & Wetzel, S. 2016** . A review of mechanisms responsible for changes to stored woody biomass fuels. *Fuel*, 175, 75–86. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2016.02.014>
- **Kuo S., Ortiz-Escobar M.E., Hue N.V., Hummel R.L. 2004** . Composting and compost utilization for agronomic and container crops. *Recent Research Developments in Environmental Biology* . P : 451–513.
- **Lal R., Safriel U., Adeel Z., Niemeijer D., Fabregas J.P., White R., Winslow M., Ziedler J., Prince P., Archer E., King C., Shapiro B., Wessels K., Theis Nielsen T., Portnov, Inbal Reshef B., Thornell J., Lachman E., McNab D. 2005** . Puplicier dans dryland-systems p: 623-662 .
- **Levasseur P., Soulier A., Lagrange H., Trochard R., Foray S., Charpiot A., Ponchant P., Blazy V. 2019** . Valorisation agronomique des effluents d'élevages de porcs, bovins, ovins, caprins, volailles et lapins. *RMT Elevage et Environnement* . Paris . 83 pages.
- **Lopez R., Foster J. 2016**. Plant pathogène Survival during composting of agricultural wastes. In : Gasser JKR (ed). *Composting of agricultural and other wastes*. Elsevier, London, pp291-300.
- **Luo, Y., Liang, J., Zeng, G., Chen, M., Mo, D., Li, G., Zhang, D., 2018**. Seed germination test for toxicity evaluation of compost: Its roles, problems and prospects. *Waste Manage* 71, 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.023>.
- **M'Sadak Y, Ben M'Barek A. 2013** . Caractérisation qualitative du digestat solide de la biométhanisation industrielle des fientes avicoles et alternative de son exploitation agronomique hors sol. *Revue des Energies Renouvelables*, 16(1) : 33–42. DOI : doi.org/10.4314/jfas.v8i3.12

- **M'Sadak Y., Elouaer M. A., El Kamel R. 2012.** Evaluation du comportement chimique des composts sylvicoles, des tamisats et des mélanges pour la conception des substrats de culture . Revue « Nature & Technologie ». P : 54 à 60
- **Majbar Z., Rais Z., El Haji M., Ben Abbou M., Bouka H., Nawdali M. 2017 .** Olive mill wastewater and wine by-products valorization by co-composting . Journal of Materials and Environmental Sciences . 8 (9), P : 3162-3167
- **Maqsood M.A., Naqsh E.Z., Ashraf I., Rasheed N., Shah Z.H. 2022 .** Sources of nitrogen for crop growth: Pakistan's cas Nitrogen Assessment . Journal sciencedirect . 13-28p .
- **Medjahd N., 2016 .** Evaluation du compostage des sous-produits d'huile d'olive sur le rendement de quelques especes a interet agroalimentaire . Thèse en doctorat . Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf . 152p
- **Mella M. T., Zanguina A., Addam k. S., Laouali M. M., 2018 .** Composting of the Urban Garbage: Assessment of the Nutrient Elements for the Plants, Case of Niamey in Niger. International Journal of Scientific Engineering and Science, Vol. 2, Issue 12, 12 - 19 p. ISSN (Online) : 2456 - 7361
- **Mohee, R. et A. Mudhoo, 2005.** Analysis of the physical properties of an in-vessel composting matrix. Powder Technology . P : 92–99.
- **Mohee, R., Boojhawon, A., Sewhoo, B., Rungasamy, S., Somaroo, G.D., Mudhoo, A., 2015.** Assessing the potential of coal ash and bagasse ash as inorganic amendments during composting of municipal solid wastes. J. Environ. Manage . V : 159 . P : 209-217.
- **Morel J. L., Guckert A., Nicolardot B., Benistant D., Catroux G. and Germon, J.C. , 1986.** Étude de l'évolution des caractéristiques physico -chimiques et de la stabilité biologique des ordures ménagères au cours du compostage. Agronomie, 6 : 693-701.
- **Moroccan Ministry of Energy, Mines, Water and Environment. 2003.** Secteur des déchets solides: Situation actuelle et perspectives de développement. Rabat.
- **Mounier S., Domeizel M. 2016 .** Suivi de maturation de composts mixtes par spectrométrie d'absorption et de fluorescence uv-visible . Thèse de doctorat . université de toulon, 2 . 207p .
- **Mustin M., 1985 .** Le compost, gestion de la matière organique, Ed.François Dubusc, Paris, 954p.
- **Mustin M., 1987 .** Le compostage, gestion de la matière organique. Ed. François Dubusc. Paris . 954 p.

- **Noël L., Carre J., Legeas M. 2002** . Rapport d'étude : Eléments pour la prise en compte des effets des unités de compostage de déchets sur la santé des populations riveraines . Étude réalisée par l'Ecole Nationale de la Santé Publique
- **Oitink, H.A.J., et Fahy, P.C., 1991** . Basis for the control of soil borne plant pathogens with composts. *Annu.Rev. Phytopathol.*24 : 93–114.
- **Pahlsson, A.M.B., 1989**. Toxicity of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Pb) to vascular plants. *Water, Air, and Soil Pollut* 47 (3–4), 287–319. <https://doi.org/10.1007/BF00279329>
- **Paredes, C., Roig, A., Bernal, M.P., Sánchez-Monedero, M.A. et Cegarra, J. 2000**. Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes. *Biol. Fertil. Soils.* 32, 222–227.
- **Peters S., Schwieger S. K. F., Tebbe C. C., 2000** . Succession of microbial communities during hot composting as detected by pcr-single-stran-conformation polymorphism-based genetic profiles of small-subunit rna genes. *Appl. Environ. Microbiol.*, 66: 930-936.
- **Petric, I., Avdihodzic, E., Ibric, N., 2015**. Numerical simulation of composting process for mixture of organic fraction of municipal solid waste and poultry manure. *J. EcoL and Eng. V* : 75 . P: 242-249.
- **Roig, A., Paredes. C, Bernal, M.P., Sánchez-Monedero, M.A. et Cegarra, J., 2000** . Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes. *Biol. Fertil. Soils.* 32, 222–227.
- **Rucakumugufi D., Dieng M., Ntakarutimana V., Sambe3 F. M., Bigumandonder M. P . 2021** . Co-compostage des déchets solides ménagers avec les déjections d'élevage : optimisation du rapport C/N des substrats de départ . *Afrique SCIENCE.* P : 94 – 107
- **Ryckeboer J., Mergaert J., Vaes K., Klammer S., De Clercq D., Coosemans J., Insam H. et Swings J. 2003** . A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes. *Ann. Microbiol.*, 53 (4) : 349-410.
- **Sabir M., roos É. 2017**. Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens ; chapitre 14. Restauration des sols cultivés mais dégradation des parcours par l'élevage au Maroc. *Livre . Openedition* p. 197-210
- **Said-Pullicino D., Kaiser K., Guggenberger G., Gigliotti G., 2007** . Changes in the chemical composition of water-extractable organic matter during composting, Distribution between stable and labile organic matter pools. *Chemosphere*, 66 (21),P : 66- 76.

- **Salsabila Z. 2019** . Approche d'étude sur les perspectives de la valorisation Du marc de café . Theme de master ; Université des Frères Mentouri Constantine ; 53p .
- **Santana-Meridas O., Gonzalez-Coloma A., SanchezVioque R. 2012** . Agricultural residues as a source of bioactive natural products. *Phytochem Rev* 11:447–466
- **Selim M., Zayed S., Houssam M. 2012** . Evaluation of phytotoxicity of compost during composting process . Article in *Nature and Science of Sleep* . P : 69-77 .
- **Sellami H. 2021** . Étude de l'efficacité du compost de débris du palmier dattier et fiente de volaille sur le rendement de la tomate sous serre dans la région de Biskra . Thème de Master . Université Mohamed Khider de Biskra ; 53 p .
- **Sommer S. G., Dahl P., 1999**. Nutrient and carbon balance during the composting of deep litter. *J. Agric. Eng. Res.*, 74:145-143.
- **Sundberg C. 2005** . Improving Compost Process Efficiency by Controlling Aeration, Temperature and Ph . Department of Biometry and Engineering . 49p .
- **Teurki R. 2013** . Service Communication de la Chambre d'Agriculture de la Somme - Crédits photos : Chambres d'Agriculture du Nord, Pas-de-Calais et de la Somm . Analyses satege
- **Theodore M.K., Theodore L. 2021** . Introduction to Environmental Management. Livre, Second Edition . Boca Raton . London: CRC Press .
- **Thi Thien K. H., Van Tung T., Thanh H. L., Ngoc-Kim-Qui N., Cong-Sac T., Phuong-Thao N., Thi-Dieu-Hien V., Van-Nam T., Xuan-Thanh B. 2022** . Compost to improve sustainable soil cultivation and crop productivity . Published by Elsevier Ltd. 100211 . P : 11
- **Tolvanen, O. K., Hnninen, A. Veijanen, et K. Villberg, 1998**. Occupational hygien in biowaste composting. *Waste Management an Research*, 16 . P : 525–540.
- **Toundou O. 2016** . Evaluation des caractéristiques chimiques et agronomiques de cinq composts de déchets et étude de leurs effets sur les propriétés chimiques du sol, la physiologie et le rendement du maïs (*Zea mays* L. Var. Ikenne) et de la tomate (*Lycopersicon esculentum* L. Var. Tropimech) sous deux régimes hydriques au Togo . Université de Limoges . Université de Lomé (Togo) . 198 p .
- **Van de Kerkhove J.M. 1990** . Evolution de la maturite de trois dechets urbains en cours de compostage . Thèse de Doctorat INPL en Sciences agronomiques . Institut national polytechnique de lorraine . 77p .

- **Wang G., Yan Y., Yilin K., Ruonan M., Jing Y., Guoxue L. 2022.** Key factors affecting seed germination in phytotoxicity tests during sheep manure composting with carbon additives . *Journal of Hazardous Materials* 126809 P : 421 .
- **Wong J.W.C., Li S. W. Y. et Wong M. H., 1995 .** Coal fly ash as a composting material for sewage sludge : effects on microbial activities. *Environ. Technol.*, 16 : 527-537.
- **Wong, M.H., 1985.** Phytotoxicity of refuse compost during the process of maturation. *Environ Pollut. Series A, Ecol and Biol* 37 (2), 159–174. [https://doi.org/10.1016/0143-1471\(85\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0143-1471(85)90006-6).
- **Zeglels A., Masscho I. 1999 .** Quantité d’organismes vivants intervenant à un moment ou à un autre pendant le compostage ». C.I.H.E.A.M Mediterranean Agronomic Instituted of Bari. P : 29
- **Zucconi, F., Forte, M., Monaco, A., de Bertoldi, M., 1981.** Biological evaluation of compost maturity. *BioCycle* 22, P : 27–29.
- **Zucconi, F., Monaco, A., Forte, M., de Bertoldi, M., 1985.** Phytotoxins during the stabilization of organic matter. In: Gasser, J.K.R. (Ed.), *Composting of agricultural and other wastes*. Elsevier, London, pp. 73–86.

REFERENCES WEBGRAPHIQUES

- AFNOR NF U 44-051 . Amendements organiques - Dénominations, spécifications et marquage
<https://www.boutique.afnor.org/Store/Preview/DisplayExtract?ProductID=754&VersionID=6>
- DEPF, (2019) . Le secteur agricole marocain : Tendances structurelles, enjeux et perspectives de développement .
<https://www.finances.gov.ma/Publication/depf/2019/Le%20secteur%20agricole%20marocain.pdf>
- FAO, (2005) . Méthodes de compostage au niveau de l'exploitation agricole .
www.fao.org/3/y5104f/y5104f00.htm
- FAO, (2019) . Standard operating procedure for soil organic carbon . Walkley-Black method Titration and colorimetric method . www.fao.org/3/ca7471en/ca7471en.pdf
- FAO, 2017 . **Technologies et pratiques pour les petits producteurs agricoles** .
<https://teca.apps.fao.org/teca/fr/technologies/8979>
- FAOSTAT, 2013 . Statistics Division, compare data, production live animals, Morocco, Algeria, Egypt, Libya, Mauritania and Tunisia, Chickens, Stocks . <http://faostat3.fao.org/compare/E>.
- Fiche technique : Production et utilisation des composts à base des déchets solides des huileries de palme /
https://www.researchgate.net/profile/Tatianaoura/publication/344438928_Fiche_technique_Production_et_utilisation_des_composts_a_base_des_dechets_solides_des_huileries_de_palme/links/5f75a2a7299bf1b53e038d07/Fiche-technique-Production-et-utilisation-des-composts-a-base-des-dechets-solides-des-huileries-de-palme.pdf
- ISO 10390, (2005) . Qualité du sol : Détermination du pH. International Standardisation Organisation (ISO) . <https://www.iso.org/fr/standard/40879.html>
- ISO 11261, (1995) . Qualité du sol . Dosage de l'azote total . Méthode de Kjeldahl modifiée .
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:11261:ed-1:v1:fr>

- ISO 11265, (1994) . Qualité du sol : Détermination du pH et de la CE spécifique. International Standardisation Organisation (ISO), 4 p .
<https://www.iso.org/fr/standard/19243.html>
- MAPM (2018) .book_agricultures_en_chiffres_def.pdf
<https://www.agriculture.gov.ma/sites/default/files/19-00145>
- Rapport financier annuel 2019 . Présentation générale de la Société des Boissons du Maroc, https://www.ammc.ma/sites/default/files/SBM_RFA_2019_0_0.pdf
- Report on the State of Environment of Morocco, 2016 . oxford business group .
<https://oxfordbusinessgroup.com/analysis/waste-not-international-financing-supports-modernisation-waste-management-infrastructure-and>

Annexes

Annexe 1 : Sous-produits des fientes volailles secs en des sacs plastiques



Annexe 2 : Compresseur d'air « BLACK&DECKER »



Annexe 3 : Retournement et l'arrosage du compost



Annexe 4 : Échantillons représentatifs au cours du compostage



Annexe 5 : Tableau d'évolution de la température au cours du compostage

Date	Unité	Température Bioréacteur	Température Ambiante
19/04/2022	°C	20,5	ND
20/04/2022	°C	36	18
21/04/2022	°C	42	21,6
22/04/2022	°C	44,5	27,5
23/04/2022	°C	45	27
24/04/2022	°C	46	27,1
25/04/2022	°C	48	27,5
26/04/2022	°C	46	19
27/04/2022	°C	50	19,7
28/04/2022	°C	32	26
29/04/2022	°C	32,7	26
30/04/2022	°C	32,1	28
01/05/2022	°C	32	33
02/05/2022	°C	32	20
03/05/2022	°C	32	16
04/05/2022	°C	33,5	18,2
05/05/2022	°C	37,5	28,1
06/05/2022	°C	37,5	30,1
07/05/2022	°C	38	32
08/05/2022	°C	41	33
09/05/2022	°C	43	29,5
10/05/2022	°C	38,5	32,5
11/05/2022	°C	36	33
12/05/2022	°C	36	33,1
13/05/2022	°C	32	35
14/05/2022	°C	31,7	24,8
15/05/2022	°C	35	24
16/05/2022	°C	39	33,1
17/05/2022	°C	39	33,1
18/05/2022	°C	37,8	27,6
19/05/2022	°C	41,7	36,7
20/05/2022	°C	48,4	35,5
21/05/2022	°C	46	33
22/05/2022	°C	45	34
23/05/2022	°C	43,1	28
24/05/2022	°C	42,2	29,5
25/05/2022	°C	40	27,6

26/05/2022	°C	39	27
27/05/2022	°C	38,3	27,3
28/05/2022	°C	40,5	24
29/05/2022	°C	R 41,9	20,2
30/05/2022	°C	34,9	29,9
31/05/2022	°C	34,9	33,6
01/06/2022	°C	35,6	28,9
02/06/2022	°C	R 35,9	24,1
03/06/2022	°C	27,4	27,8
04/06/2022	°C	28,1	26,9
05/06/2022	°C	29	24
06/06/2022	°C	30	28
07/06/2022	°C	30	27
08/06/2022	°C	31,4	25
09/06/2022	°C	32,5	24
10/06/2022	°C	33,1	32,2
11/06/2022	°C	33	33
12/06/2022	°C	32	34
13/06/2022	°C	28	33
14/06/2022	°C	29	33
15/06/2022	°C	27	31
16/06/2022	°C	30	29

Annexe 6 : Tableau d'évolution d'humidité au cours du compostage

Date	Nature	Humidité
19/04/2022	Résidus de romarin	
19/04/2022	Fiente de volaille	
19/04/2022	Mélange T0	53
26/04/2022	Echantillon 1	58,90%
27/04/2022	Echantillon 2	59,96%
09/05/2022	Echantillon 3	
16/05/2022	Echantillon 4	63,49%
20/05/2022	Echantillon 5	
29/05/2022	Echantillon 6	62,83%
02/06/2022	Echantillon 7	63%
04/06/2022	Echantillon 8	61,90%
08/06/2022	Echantillon 9	54,65%
16/06/2022	Compost final	39,40%

Annexe 7 : Etude statistiques montre une corrélation négative significative entre l'humidité et la température

Corrélations			H	T
H	Corrélation de Pearson		1	-,998**
	Sig. (bilatérale)			,002
	N		4	4
T	Corrélation de Pearson		-,998**	1
	Sig. (bilatérale)		,002	
	N		4	4

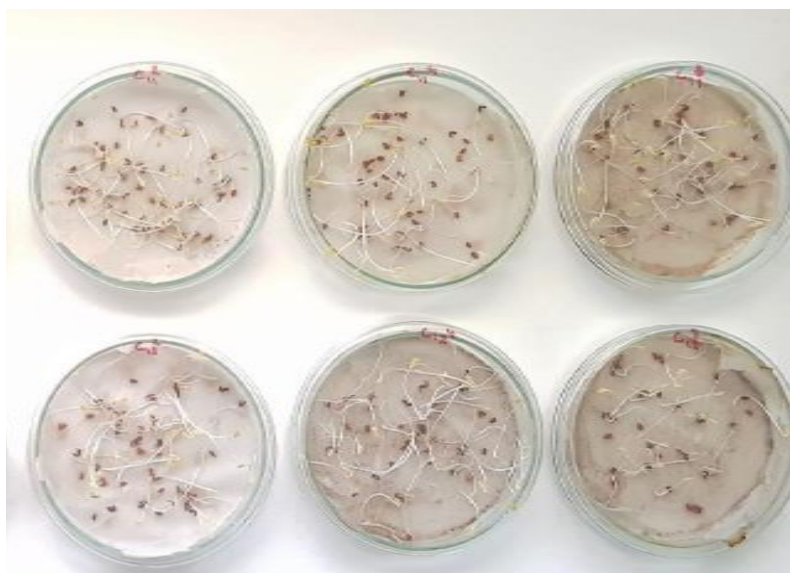
** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Annexe 8 : Evolution des paramètres du compostage

Paramètres	Unité	Fiente de volaille	Résidus de romarin	Mélange initial	Compost final
COT	%	28,8	39,37	38,87	29,67
NT	%	4,07	0,88	1,17	1,39
C/N		6,41	44,7	33,00	21,34
pH		7,87	6,81	7,79	8,62
EC	ms/cm	8,08	0,84	3,29	3,56
MO	%	48,16	67,08	69,18	52,81

Annexe 9 : Résultats de test du phytotoxicité au cours de notre essai du compostage

	Témoin	50%	100%
Après 20 jours	100	36	0
Après 30 jours	98	45	13
Après 50 jours	100	85	60



Annexe 10 : Étude statistiques du phytotoxicité : Test d'ANOVA a deux facteurs et Test de S-N-K

Tests des effets inter-sujets

Variable dépendante: TG

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.	Eta au carré partiel
Modèle corrigé	13866,667 ^a	5	2773,333	42,485	,000	,947
Ordonnée à l'origine	26450,000	1	26450,000	405,191	,000	,971
Temps	9233,333	2	4616,667	70,723	,000	,922
Concentration	4355,556	1	4355,556	66,723	,000	,848
Temps * Concentration	277,778	2	138,889	2,128	,162	,262
Erreur	783,333	12	65,278			
Total	41100,000	18				
Total corrigé	14650,000	17				

a. R deux = ,947 (R deux ajusté = ,924)

PG

Student-Newman-Keuls

Traitement	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
		a	b	c
100%	3	60,0000		
50%	3		80,0000	
Témoin	3			100,0000
Signification		1,000	1,000	1,000

Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.

Annexe 11 : Etude statistiques montre une corrélation négative significative entre le rapport C/N et le taux de germination du compost

Corrélations

		CN	TG
CN	Corrélation de Pearson	1	-,999*
	Sig. (bilatérale)		,028
	N	3	3
TG	Corrélation de Pearson	-,999*	1
	Sig. (bilatérale)	,028	
	N	3	3

*. La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral).