



République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche
Scientifique



Université Constantine 1 Frères Mentouri
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

جامعة قسنطينة 1 الإخوة منتوري
كلية علوم الطبيعة والحياة

Département : Écologie et Environnement

قسم : علم البيئة و المحيط

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Écologie et Environnement

Spécialité : Écologie fondamentale et appliquée

N° d'ordre :

N° de série :

Intitulé :

Contribution à la valorisation des déchets du marc de café par compostage.

Présenté par : Benchikha Halima
Boutamina Aya

Le : 28/06/2025

Jury d'évaluation :

Président : Dr Cheriti Oumnya (MCB - U Constantine 1 Frères Mentouri).

Encadrant : Mme Boughaba Rokia (MAA - U Constantine 1 Frères Mentouri).

Examinateuse : Dr Sahli Leila (Professeur - U Constantine 1 Frères Mentouri).

Année universitaire
2024 - 2025

Remerciement

Nous remercions tout d'abord dieu le tout puissant qui nous éclaire le bon chemin et de nous avoir la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide de notre chère encadrante **Boughaba Rokia**.

Nous la remercions pour la qualité de son encadrement exceptionnel, sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nous remercions chaleureusement tous nos enseignants, Monsieur **Touati Laid**, Madame **Sahli Lila** et Madame **Cheriti Oumnya**, pour leur accompagnement tout au long de notre parcours. Leur passion pour l'enseignement a été essentielle dans notre progression. Grâce à eux, nous avons grandi tant sur le plan académique que personnel.

Nous leur sommes profondément reconnaissants pour leur engagement et leur bienveillance.

Nous souhaitons également remercier chaleureusement :

Les ingénieurs des laboratoires **5, 1, 14 et 16**, qui ont grandement contribué à l'aboutissement de notre travail. Merci pour vos conseils précieux, votre travail méticuleux et vos instructions efficaces.

Et sans oublier de remercier Monsieur le chef de département **Bazri** qui a facilité notre travail pour réaliser ce mémoire.

Merci à tous ceux qui nous ont soutenus dans la réalisation de ce travail.



Dédicace

Louange à Dieu seul, par qui toute chose commence et s'accomplit.

Ce modeste travail est dédié spécialement

À l'âme de mes chers parents,

Leurs noms sont gravés dans mon cœur comme une prière silencieuse, un écho de l'amour pur qui a façonné mon existence. Chaque pas que je fais est éclairé par leur souvenir, chaque défi surmonté est une preuve de la force et de la résilience qu'ils m'ont transmises.

Ils ne sont plus là physiquement, mais leur essence demeure, un souffle constant d'inspiration et un baume apaisant. Leurs sacrifices sont les fondations solides sur lesquelles ma vie est bâtie, leur tendresse une mélodie douce qui résonne en moi.

Qu'Allah, dans Sa miséricorde infinie, les accueille en paix et leur accorde le plus haut degré du Paradis.

À ma sœur adorée et son mari,

Les mots ne suffisent pas à exprimer à quel point votre soutien compte pour moi. Dans les moments difficiles comme dans les joies, vous avez toujours été là, avec votre gentillesse et votre force. Merci pour tout ce que vous faites.

À mes frères **Akram, Mourad** et à ma petite sœur **Hiba** votre présence a toujours été un pilier dans ma vie. Merci pour tout ce que vous présentez pour moi je vous aime.

À ma petite princesse **Jouri**, je voulais juste te dire à quel point je t'aime et à quel point je suis chanceuse de t'avoir dans ma vie. N'oublie jamais que je serai toujours là pour toi.

À mon cousin **Mourad** et sa femme adorable, un immense merci pour tout votre soutien.

À mes précieuses **Syrine, Lamya, Marwa** et **Yassamine**. Chacune de vous apporte une touche unique à ma vie. Merci d'être mes piliers et de rendre chaque jour plus lumineux.

À mon super binôme **Aya**, Merci pour ton soutien, ta patience et ta bonne humeur. Travailler avec toi a été un vrai plaisir. Je suis heureuse de t'avoir rencontrée, et j'espère que notre amitié continuera au-delà de ce travail.

À mon partenaire

Pas besoin de grands discours, tu comprends sans mots. Merci d'être là, de tenir la vibe, de marcher avec moi. On avance, ensemble pas toujours parfait, mais toujours vrai.

Pour finir, à tous ceux que j'aime et qui m'aiment, je dédie ce mémoire.

BENCHIKHA Halima

إِقْرَاءُ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قَالَ تَعَالَى:

﴿ يَرْفَعُ اللَّهُ أَلَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ حَسِيبٌ ﴾ (المجادلة: ١١)

قَالَ رَسُولُ اللَّهِ ﷺ

مَنْ سَأَلَ طَرِيقًا يُؤْتَمِسُ فِيهِ عِلْمًا، سَهَّلَ اللَّهُ لَهُ بِهِ طَرِيقًا إِلَى الْجَنَّةِ. رَوَاهُ مُسْلِمٌ

وَقَوْلُهُ أَيُّهَا

"إن الملائكة لتصنع أجنحتها لطلاب العلم رضا بما يصنع" رواه أحمد

فالحمد والشكر لله أولاً الذي وفقني لطلب العلم، فكنت من طلاباته ونلت من فضله، وذاقت نفسي شيئاً من عظيم شأنه وخيره في الدنيا والآخرة.

أهدى نجاحي هذا إلى من أحمل اسمه بكل افتخار، إلى من حصد الأشواك عن دربي ليمهّد لي طريق العلم، إلى من كله الله بالهيبة والوقار... إلى من علمني العطاء بدون انتظار: إلى أبي الغالي.

إلى من كان دعاؤها سرّ نجاحي، إلى من حاكت سعادتي بخيوط منسوجة من قلبها، إلى بسمة الحياة وسر الوجود...

إلى أمي الحبيبة.

إلى الذين هم سندِي في هذه الحياة، وكانت لهم ميزة كبيرة في تشجيعي وتحفيزي، أولئك الذين اكتسبت بحضورهم قرةً وحباً لا حدود لهما... إلى إخوتي: مثال، ابتسام، عبد السلام.

إلى من كان سندِي ورفيقِ رب النجاح، إلى من كان التور حين اشتد الظلم، والقوة حين الضعف، والدافع حين التعثر: إلى خطيبِي العزيز، شكرًا لوجودك الثابت، ودعمك اللامحدود، لأنك آمنت بي حين شُكِّت بنفسي، وكانت كلماتك جسراً أعبر به الصعب. أهدى هذا النجاح لك بكل حب وامتنان.

إلى زميلتي العزيزة: بن شيخة حليمة، كنت لي أكثر من مجرد زميلة، كنت السند والعون في كل خطوة على هذا الطريق لك مني كل الشكر والامتنان، فنجاحي اليوم لا يكتمل دون ذكركِ، ولا تُكتب فرحتي دون أن تكوني جزءاً منها.

دمت لي صديقة وزميلة يندر وجودها.

إِلَيْهِ مَنْ قَالَ فِيمَهُ رَسُولُ اللَّهِ ﷺ

"إن الله وملائكته ليصلون على من علم الناس الخير"

إلى كل أستاذ وأستاذة كانوا معي في مشواري الدراسي، جعلها الله في ميزان حسناتكم.

بِوَطْمِينَةِ آتِيَةٍ

Listes des figures

N°	Titre de la Figure	Page
1	Processus de compostage (Hieronymus, 2001)	6
2	Courbe théorique d'évolution de la température au cours du compostage (Kaboré, 2015)	6
3	Tri des déchets	8
4	Déchets broyés	9
5	L'homogénéisation	9
6	Marc de café (Photo prise par nous)	12
7	Étapes de production de biocarburant à partir du marc de café (Gomez-de la Cruz et al., 2015)	16
8	Déchets des coquilles d'œufs (Photo prise par nous)	20
9	Structure d'une coquille d'œuf (Owuamanam et al., 2020)	22
10	Plan d'expérience	25
11	Les compostières de l'expérience	25
12	Montage de plan de l'expérience.	26
13	Mini serre en plastique opaque	27
14	Présentation de la méthode utilisée pour mesurer le pH	28
15	Méthodologie de mesure du taux de carbone dans notre expérience	29
16	Présentation de la méthode utilisée pour déterminer le taux d'humidité	30
17	Méthodologie de mesure de la conductivité électrique dans notre expérience	31
18	Plan d'expérience pour le test de germination utilisé	32
19	Les étapes du test de germination	33
20	Evolution mensuelle de la température (T°C)	36
21	Evolution mensuelle du pourcentage d'humidité (%H)	37
22	Evolution mensuelle du potentiel hydrogène (pH)	38
23	Evolution mensuelle de la conductivité électrique (EC)	39
24	Evolution mensuelle du taux de carbone (%C)	41
25	Evolution mensuelle du poids frais (g) du substrat	42
26	Evolution du taux de germination (%) dans les différentes compostières.	43
27	Evolution de la germination de l'orge dans différents substrats de compost	44

Liste des tableaux

N°	Titre de tableau	Page
1	Caractéristiques physiques du marc de café en fonction de l'humidité	13
2	Composition élémentaire du marc de café	14
3	Les principaux composés du marc de café	14
4	Composition des principaux minéraux du marc de café	14
5	Composition moyenne en fibres du marc de café	15
6	Proportions de chaque mélange utilisé pour l'expérience	24
7	Composition de chaque compostière lors de l'expérience	25
8	Moyennes des variables physico-chimiques (Pf, T°C, pH, CE, %H, %C) étudiées dans le compostage des marcs du café	35
9	Maturité des composts à partir de la production du carbone organique total après trois mois de compostage (Francou, 2003)	42

Liste des abréviations

C	Carbone
H	Humidité
Ph	Potentiel hydrogène
CE	Conductivité électrique
L	Longueur
H	Hauteur
g	Gramme
Pf	Poids frais
Ps	Poids sec
T°C	Température
ANOVA	Analyse de variance
C1,C2,C3	Compost 1,2,3
Fig	Figure
Tab	Tableau
Kg	Kilogramme
N	Azote
l	Largeur
Mo	Matière organique
MM	Matière minérale
Nt	Nombre de graines germées dans le traitement
Ns	Nombre de graines germées dans le témoin
µS/cm	Microsiemens par centimètre
M	La masse
Ms	La matière sèche

Table des matières

INTRODUCTION.....	11
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	14
1.1 LES DECHETS ORGANIQUES	15
1.1.1 Définition	15
1.1.2 La valorisation organique.....	15
1.1.2.1 La méthanisation	16
1.1.2.2 Le compostage.....	16
1.1.2.2.1 Définition du compostage	16
1.1.2.2.1.1 Les quatre phases du compostage	17
1.1.2.2.1.2 La phase mésophile :	18
1.1.2.2.1.3 La phase thermophile :	18
1.1.2.2.1.4 La phase de refroidissement :	18
1.1.2.2.1.5 La phase de maturation :	18
1.1.2.2.2 Différents types de compostage	18
1.1.2.2.2.1 Le compostage aérobie.....	18
1.1.2.2.2.2 Le compostage anaérobiose	18
1.1.2.2.3 Les étapes du compostage	19
1.1.2.2.3.1 Le tri	19
1.1.2.2.3.2 Le broyage.....	19
1.1.2.2.3.3 L'homogénéisation	20
1.1.2.2.3.4 Le suivi de compostage	21
1.1.2.2.3.5 Evaluation de la maturité du compost	21
1.1.2.2.3.6 Le tamisage et le stockage	21
1.1.2.2.4 Avantages du compost	21
1.1.2.2.4.1 L'amélioration de la structure	21
1.1.2.2.4.2 La rétention d'eau et la porosité	22
1.1.2.2.4.3 L'influence sur la chimie du sol	22
1.1.2.2.4.4 L'impact phytosanitaire	22
1.1.2.2.5 Quelques inconvénients du compost	22
1.1.2.2.6 Les modes de compostage.....	22
1.1.2.2.6.1 Le composteur	23
1.1.2.2.6.2 Compostage en tas.....	23

1.1.2.2.6.3 Compostage en fosse	23
1.2 LE MARC DE CAFE.....	23
1.2.1 Propriétés du marc de café	24
1.2.1.1 Propriétés physiques du marc de café :	24
1.2.1.2 Propriétés chimiques du marc de café :	24
1.2.1.3 Les composés bioactifs du marc de café :	26
1.2.2 Valorisation et utilisation du marc de café	26
1.2.2.1 Production de biocarburants.....	27
1.2.2.2 Production de compost	28
1.2.2.3 Substrat pour la culture de micro-organismes et de champignons comestibles	28
1.2.2.4 Industrie alimentaire.....	28
1.2.2.5 Production de biomatériaux et de produits d'encapsulation	29
1.2.2.6 Autres utilisations	29
<i>1.2.3 Impacts environnementaux.....</i>	30
1.3 LES COQUILLES D’ŒUFS	30
1.3.1 Définition de la coquille	31
1.3.2 Composition de la coquille.....	31
1.3.3 Structure de la coquille.....	32
1.3.4 Valorisation des coquilles d’œufs.....	33
<i>CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES</i>	34
2.1 LA VALORISATION DE MARC DU CAFE	35
2.1.1 Plan d'expérience.....	35
2.1.2 Montage proprement dit :	36
2.1.2.1 Préparation des compostières	36
2.1.3 Mise en place du composteur	37
2.1.4 Paramètres déterminés	38
2.1.4.1 Paramètres physico-chimiques	38
2.1.4.2 Évolution hebdomadaire de la température (°C)	38
2.1.4.3 Évolution hebdomadaire du poids (g) du substrat	38
2.1.4.4 Évolution hebdomadaire du potentiel hydrogène (pH)	39
2.1.4.5 Évolution mensuelle du taux de carbone (%C)	39
2.1.4.6 Évolution mensuelle d’humidité	40
2.1.4.7 Evolution mensuelle de la conductivité électrique	41

2.1.5 Test de germination :	42
<i>CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS</i>	45
3.1 RESULTATS PHYSICO-CHIMIQUES ET DISCUSSION :	46
3.1.1 Evolution mensuelle de la température (T°C) :.....	46
3.1.2 Evolution mensuelle du pourcentage d'humidité (%H) :.....	48
3.1.3 Evolution mensuelle du potentiel hydrogène (pH) :	49
3.1.4 Evolution mensuelle de la conductivité électrique (CE) :.....	50
3.1.5 Evolution mensuelle du taux de carbone (%C) :.....	51
3.1.6 Evolution mensuelle du poids frais (g) du substrat :.....	53
3.2 RESULTATS ET DISCUSSION DU TEST DE GERMINATION « COMPARTIMENT VEGETAL » :.....	54
<i>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</i>	56

INTRODUCTION

Le café, deuxième boisson la plus consommée après l'eau, riche en caféine et en antioxydants, joue un rôle essentiel dans la vie quotidienne et l'économie mondiale. Les variétés les plus courantes, l'arabica et le robusta. Durant la période 2022/2023, la consommation mondiale de café a atteint 178,53 millions de sacs de 60 kilogrammes [1].

L'Algérie, et plus spécifiquement sa ville historique Constantine, se distingue par une forte consommation de café, visible à travers le grand nombre de cafés qui s'y trouvent.

En raison de cette forte consommation de café, une grande quantité de déchets est produite, notamment le marc de café. Jeter ce résidu organique dans la nature sans le recycler peut avoir des conséquences néfastes pour l'environnement. Le marc de café a une acidité naturelle qui peut favoriser les plantes qui aiment l'acidité.

L'accumulation non maîtrisée de marc de café peut acidifier le sol. Cette acidification excessive peut alors déséquilibrer l'écosystème terrestre et nuire aux plantes [2]. De plus, lorsqu'il se décompose dans une décharge, il produit du méthane, un gaz à effet de serre [2].

Pour réduire ces effets néfastes, il est recommandé d'opter pour des solutions durables telles que le compost. Toutefois, étant donné que le café est un produit acide, il peut être équilibré en ajoutant d'autres matériaux organiques riches en minéraux, comme les coquilles d'œufs qui constituent une excellente source de calcium [3]. De plus, elles contribuent à neutraliser l'acidité du compost tout en le fertilisant. Ainsi, le compostage des résidus de café et des coquilles d'œufs permet de produire un fertilisant naturel efficace qui est bénéfique pour les plantes.

Le but de votre étude est la production de compost à partir des déchets organiques qui sont le marc de café et des coquilles d'œufs pour leurs propriétés complémentaires. L'objectif est d'obtenir un mélange homogène en expérimentant avec différentes proportions de ces deux composants. En ajustant les quantités, nous cherchons à identifier la formule idéale pour produire un bio engrais de qualité. L'étude de l'effet de chaque mélange sur la décomposition et la fertilité du compost permettra d'identifier les conditions les plus favorables à la germination.

Notre méthodologie est structurée de la manière suivante :

D'un premier chapitre présentant une synthèse bibliographique qui traite des définitions générales, des propriétés et des différentes valorisations. Ensuite, le deuxième chapitre est réservé au matériel et les méthodes utilisés pour la réalisation de cette étude.

Le troisième chapitre aborde les résultats obtenus et les discussions qu'ils soulèvent. Pour finir, une conclusion générale clôture cette étude.

CHAPITRE I

SYNTHESE

BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Les déchets organiques

1.1.1 Définition

Les déchets organiques regroupent tous les résidus ou sous-produits provenant des secteurs industriels agro-alimentaires, agricoles ou des collectivités urbaines, et qui représentent un défi de gestion pour leurs détenteurs. Sont habituellement constitués de matières organiques non artificielles, identifiées par la présence d'atomes de carbone provenant d'organismes vivants, qu'ils soient végétaux ou animaux. De plus, dans les régions périurbaines et rurales, les dépôts de déchets agricoles au sens large constituent une part importante des déchets organiques. En raison de leur composition chimique, ces déchets peuvent être sujets à un processus biologique connu sous le nom de fermentation. Par conséquent, ils sont putrescibles, c'est-à-dire qu'ils sont susceptibles d'une décomposition naturelle due à leurs propriétés intrinsèquement fermentescibles. Ainsi, ils peuvent être considérés comme biodégradables (Chauvin, 2004).

1.1.2 La valorisation organique

La matière organique a la capacité de se biodégrader, ce qui permet une décomposition rapide par des bactéries, naturelles ou induites, en molécules simples que les plantes peuvent utiliser. Cette décomposition peut se réaliser de deux façons : le compostage ou la méthanisation. Elle peut également être contrôlée industriellement et appliquée au traitement des déchets domestiques. Il s'agit donc de la suppression des déchets et de leur réduction en faveur de la valorisation, ce qui peut être utilisé comme fertilisant par les agriculteurs. Ce mode d'évaluation favorise une diminution de 40 à 50% du volume des déchets (Askri, 2015) ;(Gouilliard et Legendre, 2003).

Les principaux déchets concernés par le traitement biologique sont :

- Déchets des collectivités (voirie, marchés, boues...)
- Déchets d'agriculture et de sylviculture (élevage, culture, foret)
- Ordures ménagers (la fraction fermentescible de l'ordure ménagère est constituée essentiellement de déchets alimentaire, déchets vert et de papier/carton)
- Certain encombrants de déchets verts

1.1.2.1 La méthanisation

La méthanisation est un processus de digestion anaérobiose qui peut être appliqué à une large variété de matières organiques cellulosiques, telles que la bouse de bovins, la fiente de volailles, le lisier de porcins, les excréments humains, les résidus végétaux, ainsi que les fractions fermentescibles des déchets agricoles, agro-industriels et ménagers. Ce procédé présente un intérêt particulier non seulement pour le traitement des déchets organiques et la réduction de la pollution environnementale, mais aussi pour les opportunités qu'il offre grâce à ses trois principaux produits : le biogaz, le digestat solide et le liquide issu du digesteur. Ces sous-produits apportent des solutions innovantes et peuvent générer des revenus.

La méthanisation permet ainsi de transformer un problème coûteux en une solution économiquement viable. Le biogaz, en particulier, s'impose comme une alternative stratégique aux énergies renouvelables, notamment dans les communautés marginalisées, dans un contexte de changement climatique et de crise énergétique. De plus, le digestat liquide et solide trouve de nombreuses applications dans l'agriculture et les industries agroalimentaires (Walekhwa et al., 2009). Ce traitement anaérobiose répond généralement à un double objectif de valorisation :

- La stabilisation des déchets organiques, facilitant leur restitution partielle au sol pour une valorisation matière.
- La récupération du méthane, permettant une valorisation énergétique (Bayard, 2009).

1.1.2.2 Le compostage

Le compostage est un traitement biologique de gestion des déchets organiques. Avec l'évolution des méthodes de compostage et la problématique de la gestion des déchets ménagers, le domaine d'application du compostage a été étendu. Cette branche englobe tous les types de déchets organiques (Oudart, 2013).

1.1.2.2.1 Définition du compostage

Il existe plusieurs définitions du compostage, mais elles s'accordent toutes sur ses principes fondamentaux.

Le compostage est défini comme un traitement biologique des déchets organiques, reposant sur un processus contrôlé de dégradation de matières d'origine végétale ou animale. Cette décomposition est assurée par des communautés microbiennes successives, actives en milieu aérobie, ce qui entraîne une élévation progressive de la température et conduit à la formation d'une matière organique stable (Hieronymus, 2001).

D'autres auteurs décrivent le compostage comme un processus de transformation biologique basé sur l'activité de micro-organismes variés, évoluant dans un environnement oxygéné, permettant la minéralisation partielle de la matière organique et la production d'un compost mature (Toumela et al., 2000).

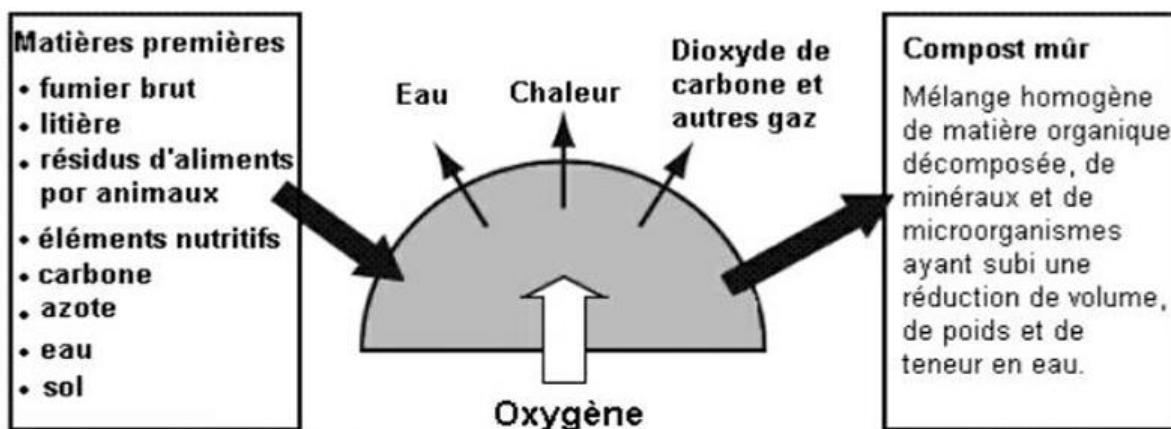


Figure 1 : Processus de compostage (Hieronymus ,2001)

1.1.2.2.1.1 Les quatre phases du compostage

La chaleur favorise le processus de compostage. On a longtemps considéré que la chaleur produite dans le compost est principalement d'origine biologique, c'est-à-dire en raison de l'activité microbienne (Francou, 2003).

L'évolution de la température dans le compostage (Figure 2) permet d'identifier quatre étapes durant le processus de compostage :

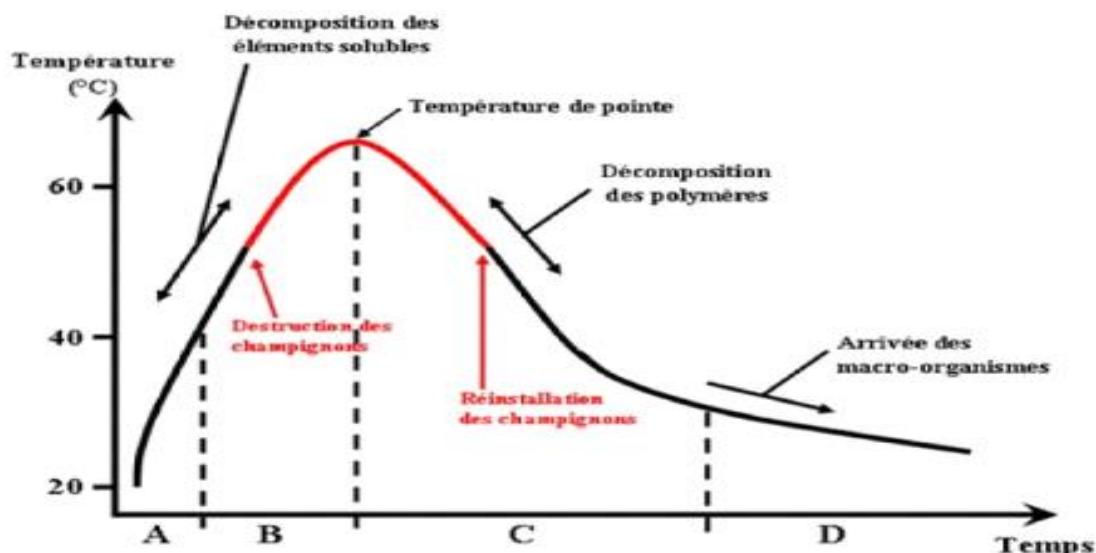


Figure 2 : Courbe théorique d'évolution de la température au cours du compostage (Kaboré, 2015)

1.1.2.2.1.2 La phase mésophile :

C'est la première étape du compostage où, durant les premiers jours, la présence de matières organiques aisément biodégradables provoque une intense activité microbienne qui accélère la hausse de température à l'intérieur du compost.

1.1.2.2.1.3 La phase thermophile :

Durant cette étape, la température s'accroît de 60°C à 75°C. Seules les bactéries sont capables de survivre à ces températures. L'essentiel de la matière organique est éliminé en tant que CO₂ et H₂O. (Francou, 2003).

1.1.2.2.1.4 La phase de refroidissement :

Cette phase est marquée par une réduction de la quantité de substances organiques aisément décomposables, entraînant un ralentissement de l'activité des microorganismes. Cela favorise un abaissement de la température du compost (Francou, 2003).

1.1.2.2.1.5 La phase de maturation :

Processus dominant d'humification et décomposition progressive des composés résistants. Ce processus de maturation se poursuit jusqu'à l'emploi du compost (Francou, 2003).

1.1.2.2 Différents types de compostage

Selon la nature du processus de décomposition, le compostage se divise en deux types :

1.1.2.2.2.1 Le compostage aérobie

Se produit en présence d'une grande quantité d'oxygène. Durant cette procédure, les micro-organismes aérobies dégradent la matière organique et génèrent du dioxyde de carbone, du dioxyde de carbone (CO₂), de l'ammoniaque, de l'eau, de la chaleur et de l'humus, qui représente le produit organique finale plutôt stable (Misra et al, 2005).

1.1.2.2.2.2 Le compostage anaérobie

Lors de ce processus, la décomposition a lieu en présence d'une quantité limitée d'oxygène. Dans ce contexte, les micro-organismes anaérobies prédominent et produisent des composés intermédiaires tels que le méthane, les acides organiques et d'autres matières.

En l'absence d'oxygène, ces substances s'accumulent et ne sont pas métabolisées, ce processus étant généralement à basse température et requérant souvent plus de temps que le compostage aérobie (Misra, 2005).

1.1.2.2.3 Les étapes du compostage

1.1.2.2.3.1 Le tri

Le tri est une méthode permettant de séparer les matières organiques qui peuvent fermenter des autres substances présentes dans les déchets non homogènes. Pour ce qui est de ces dernières, le tri peut être effectué à deux niveaux :

- Directement à la source via les collectes sélectives.
- Après la collecte, diverses méthodes sont mises en œuvre. Mentionnons uniquement le tri par filtrage, magnétique, par flottation (Diaz et al, 1993 ; Koledzi, 2011).

La figure 3 représente le tri des déchets de la cuisine.



Figure 3 : Tri des déchets

1.1.2.2.3.2 Le broyage

Fragmenter les déchets afin de favoriser leur décomposition par les micro-organismes et de leur fournir une taille appropriée pour jouer le rôle de structurant. Le degré de finesse du broyage doit découler d'un équilibre entre la diminution de la dimension des particules pour augmenter les surfaces d'attaque et un maintien adéquat des espaces entre les particules pour assurer une bonne circulation de l'air. Les broyeurs sont des dispositifs mécaniques de diverses sortes ((à marteaux, à lames...)), (Diaz et al, 1993 ; Koledzi, 2011).

Pour se débarrasser des éléments non désirés et récupérer les grandes particules organiques qui n'ont pas été suffisamment dégradées, celles-ci seront réintégrées dans un nouveau mélange destiné au compostage (Diaz et al, 1993 ; Koledzi, 2011). La figure 4 représente la méthode de broyage.



Figure 4 : Déchets broyé

1.1.2.2.3.3 L'homogénéisation

Cette étape est indispensable lors du compostage en tas, en bacs non retournés ou en fermentateurs non agités. C'est également à ce stade que sont intégrés les agents structurants et les éventuelles données de formulation. La figure 5 illustre le processus d'uniformisation des déchets compostables (Diaz et al., 1993 ; Koledzi, 2011).

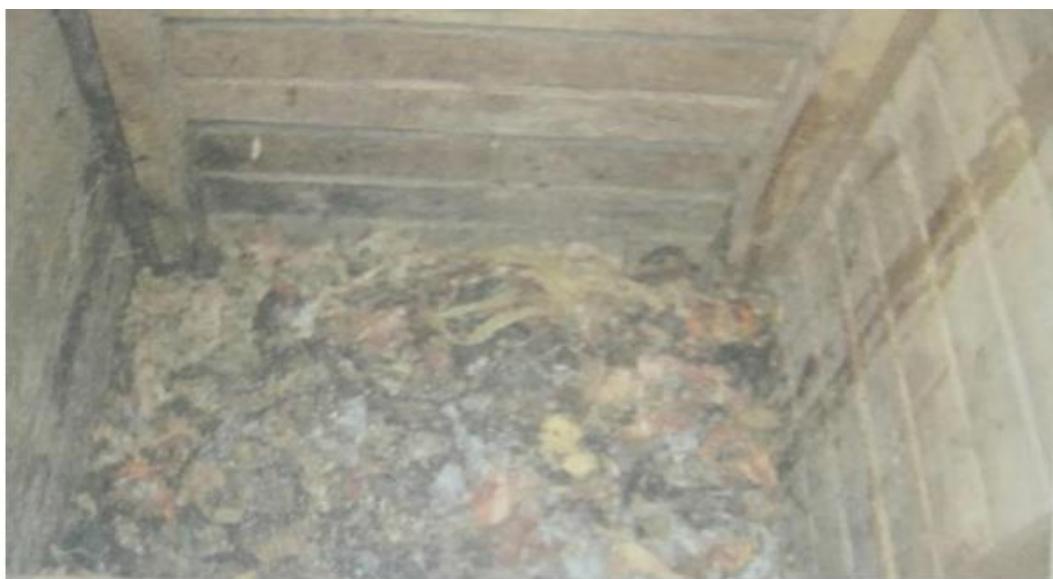


Figure 5 : L'homogénéisation

1.1.2.2.3.4 Le suivi de compostage

Dans cette phase, surveillez le compost en mesurant la température, l'humidité, le pH et le rapport C/N, et contrôlez la décomposition par l'aération et le retournement du compost pendant la phase de compostage (Diaz et al, 1993).

1.1.2.2.3.5 Evaluation de la maturité du compost

L'évaluation du compost se fait un comparaissent entre la stabilité et la maturité du compost:

- La stabilité représente une phase dans la décomposition de la matière organique et constitue une fonction de l'activité biologique (Morel et al, 1985).
- La maturité représente une condition organo-chimique du compost qui signale la présence ou l'absence d'acides organiques phytotoxiques. D'autres composés tels que selon Morel et al. (1985), la phytotoxicité est causée par des éléments tels que l'ammoniac.

1.1.2.2.3.6 Le tamisage et le stockage

Le compost doit être manipulé un peu plus avant d'être utilisé. Le criblage et le tamisage facilitent la présentation d'un produit fin et assez uniforme. Les rejets du criblage peuvent être réévalués pour leur équilibre, la présence de contaminants, l'odeur... et ne produisent qu'un compost de piètre qualité (Diaz et al, 1993).

1.1.2.2.4 Avantages du compost

Le compostage est une méthode très ancienne qui a pour objectif de recycler les déchets organiques afin de les transformer en humus. Cette valorisation aide à compléter les cycles naturels et à améliorer la productivité du sol (Oudart, 2013).

1.1.2.2.4.1 L'amélioration de la structure

Le compost a une fonction cruciale dans le mécanisme et la stabilité structurale du sol. Sa structure en couches lui confère une forte charge négative qui permet à un certain nombre de cations présents dans la solution du sol (comme : Ca²⁺, K⁺, H⁺, Na, etc.) de se fixer, ce qui favorise la formation d'agrégats stables. Cela rend le sol plus résistant aux effets du vent et de l'eau, réduisant ainsi sa vulnérabilité à l'érosion (Tahraoui, 2013).

1.1.2.2.4.2 La rétention d'eau et la porosité

Le compost, qui contient des substances organiques, a la capacité de retenir l'eau et d'améliorer la rétention hydrique du sol. Par conséquent, en augmentant le pourcentage d'humidité du sol à 0,2%, la quantité d'eau accessible aux plantes peut augmenter de 0,5% et la porosité du sol peut s'accroître de 1%. L'accroissement de la porosité conduit aussi à une aération améliorée du sol, favorisant ainsi le développement de l'activité biologique (Tahraoui, 2013).

1.1.2.2.4.3 L'influence sur la chimie du sol

Le compost contient des substances basiques et humiques qui aident à combattre l'acidification du sol et à stabiliser les éléments chimiques. On favorise l'activation des sols fortement altérés et la croissance de la végétation (Tahraoui, 2013).

1.1.2.2.4.4 L'impact phytosanitaire

En règle, le compost renferme des éléments qui stimulent la croissance des plantes et renforcent leur résistance à certains agents pathogènes, surtout en cas d'utilisation inadéquate (Tahraoui, 2013).

1.1.2.2.5 Quelques inconvénients du compost

- Il n'existe pas de formule unique pour produire un compost de qualité : l'expérience s'acquiert avec le temps.
- Le compostage nécessite un suivi régulier et une certaine période d'observation pour respecter les normes du processus.
- C'est un procédé relativement lent, pouvant s'étendre sur plusieurs mois.
- Sa mise en œuvre demande un espace suffisant pour le stockage, le retournement et la maturation.
- Enfin, cette pratique requiert un minimum d'équipement, notamment un tracteur équipé d'une pelle et un épandeur à fumier (André, 2014).

1.1.2.2.6 Les modes de compostage

Le choix d'un mode de compostage sera fonction du volume à composter et de votre sensibilité. Cependant, quel que soit le mode choisi, quelques règles sont à appliquer (Koledzi et al., 2012).

1.1.2.2.6.1 Le composteur

Il doit être posé en extérieur un dans matériel de bonne qualité (bois ou plastique recyclé et recyclable) en contact direct avec le sol, sur une surface plane, et dans une zone semi-ombragée.

1.1.2.2.6.2 Compostage en tas

Il consiste en un compostage direct des matières sur le sol, en un tas d'au moins 1 à 2 m³, à l'abri du vent et à l'ombre.

1.1.2.2.6.3 Compostage en fosse

Les déchets à composter sont déposés dans un trou de 30 à 50 cm de profondeur, creusé dans le sol.

1.2 Le marc de café

Le marc de café est la matière résiduelle issue de l'utilisation du café soluble, obtenue après la torréfaction et la mouture des grains, puis l'extraction par eau bouillante ou vapeur (Mansour-Benamar, 2016).

On distingue deux types de sources : celles produites par l'industrie du café soluble, qui constituent environ 50% de la production mondiale annuelle de café, et celles issues des cafés et du grand public, qui composent les 50% restants (Cruz et al., 2016)



Figure 6 : Marc de café (Photo prises par nous)

1.2.1 Propriétés du marc de café

Il possède diverses caractéristiques, tant physiques et chimiques que bioactives.

1.2.1.1 Propriétés physiques du marc de café :

Le marc de café possède un haut taux d'humidité variant entre 55 et 80 %. (GOMEZDE LA CRUZ et al., 2015) Plus l'humidité est élevée, plus la croissance microbienne est stimulée. Il est donc essentiel de mettre en place des stratégies de conservation efficaces pour obtenir un produit de qualité. Ces approches peuvent engendrer des dépenses économiques additionnelles liées au transport. Concernant la morphologie des grains de café (CARASSOU, 2015).

Tableau 1 : Caractéristiques physiques du marc de café en fonction de l'humidité

(SILVA et al., 2012)

Humidité (%)	Angle de talus (°)	Densité apparente (g/cm³)	Densité réelle (g/cm³)	Diamètre (μm)	Porosité
0,00	n. d.	n. d.	1,20	50-100	n. d.
15,2	38,7	0,43	1,16	583	0,63
17,7	37,8	0,43	1,16	617	0,63
43,1	37,7	0,41	1,11	880	0,63

1.2.1.2 Propriétés chimiques du marc de café :

Le marc de café est principalement constitué de polysaccharides, contenant une grande quantité de cellulose, d'hémicellulose et de lignine (Kondamudi et al., 2008 ; Ballesteros et al., 2010), ainsi que des lipides, des protéines, des minéraux et des polyphénols (Zamora et al., 2015). Les tableaux 2, 3, 4 et 5 représentent respectivement : la composition élémentaire du marc de café, les principaux composés présents dans le marc de café, les principaux minéraux du marc de café et la composition chimique moyenne de différentes fibres lignocellulosiques.

Tableau 2 : Composition élémentaire du marc de café (Limousy et al., 2013).

Eléments	Quantités
Carbone (C)	47,7%
Hydrogène (H)	s.d.
Azote (N)	2,3%
Oxygène	s.d.
Ratio H/C	s.d.
C/N	22

Tableau 3 : Les principaux composés du marc de café (Limousy et al., 2013).

Eléments	Quantités
Glucides	45,3%
Lipides	9,3-16,2%
Protéines	14%
Minéraux	6800 mg/kg de matière sèche
Polyphénols	13-18 mg sèche gallique

Tableau 4 : Composition des principaux minéraux du marc de café (Mussatto et al., 2011).

Minéraux	Quantités
Potassium	8824±4662
Phosphore	1534±503
Magnésium	2201±1341
Calcium	349±122
Fer	46±21
Manganèse	27±10
Cuivre	25±12

Tableau 5 : Composition moyenne en fibres du marc de café (Rabouhi, 2010).

Eléments	Quantités
Cellulose	18
Lignine	2
Hémicellulose	15
Pectine	4
Cires	2

1.2.1.3 Les composés bioactifs du marc de café :

Le marc de café contient plusieurs types de tanins. On trouve parmi ces composés la catéchine, la gallocatéchine, la gallocatéchine galate et l'acide chébulique (Low *et al.*, 2015). Le marc de café ne contient pas uniquement des tanins comme antioxydants. Effectivement, on retrouve également d'autres polyphénols et de la caféine. La quantité de polyphénols varie entre 13 et 18 mg d'équivalent en acide gallique par gramme de marc de café (Bravo *et al.*, 2013). Les principaux composés parmi ces polyphénols incluent les flavonoïdes, l'acide protocatéchuique et l'acide chlorogénique. On retrouve en majorité des acides chlorogéniques, plus particulièrement dans le résidu de café Arabica que dans celui du café Robusta. De plus, le marc de café Arabica provenant des filtres de cafetière présente une concentration plus élevée en acide chlorogénique par rapport au marc de café provenant des machines à expresso et des cafetières à piston. Quant à la caféine, sa concentration dans le marc de café commercial peut fluctuer considérablement. Ces fluctuations pourraient être attribuées aux variétés de plants de café utilisés ainsi qu'aux méthodes d'extraction mises en œuvre. Toutefois, lors du processus de préparation du café expresso, 75 à 85 % de la caféine est extraite. Ainsi, le marc de café résultant contient encore 15 à 25 % de la caféine initiale. Mis à part ces variations, il apparaît que le marc de café Robusta (753 mg/100 g) renferme une quantité de caféine plus élevée que celui de l'Arabica (520 mg/100 g) (Carassou, 2015).

1.2.2 Valorisation et utilisation du marc de café

Ces dernières décennies, l'augmentation de la sensibilisation à l'importance de réduire les déchets pour protéger l'environnement a encouragé la recherche de techniques pour valoriser le marc de café, soit en le compostant (Liu *et al.*, 2011), soit en produisant des agro-pellets pour combustion (Jeguirim *et al.*, 2014). Le marc de café bénéficie de multiples valorisations

et utilisations, il est employé dans la production d'éthanol, de biodiesel et de combustibles pour les fours industriels. Le marc de café peut également servir de compost en agriculture, dans la fabrication de charbon actif, pour le traitement des eaux résiduaires industrielles et de l'eau potable, etc...

1.2.2.1 Production de biocarburants

La production de biodiesel à partir des marcs de café consiste en l'exploitation de leur contenu lipidique. Effectivement, les granules de combustion fabriqués à partir du résidu de café ont une valeur calorifique de 25 240 kJ/kg, équivalant à environ 6 000 kcal/kg lorsque leur humidité est de zéro (Gomez et al., 2015). La figure 2 résume les différentes voies de ce résidu agricole pour la fabrication de biocarburant.

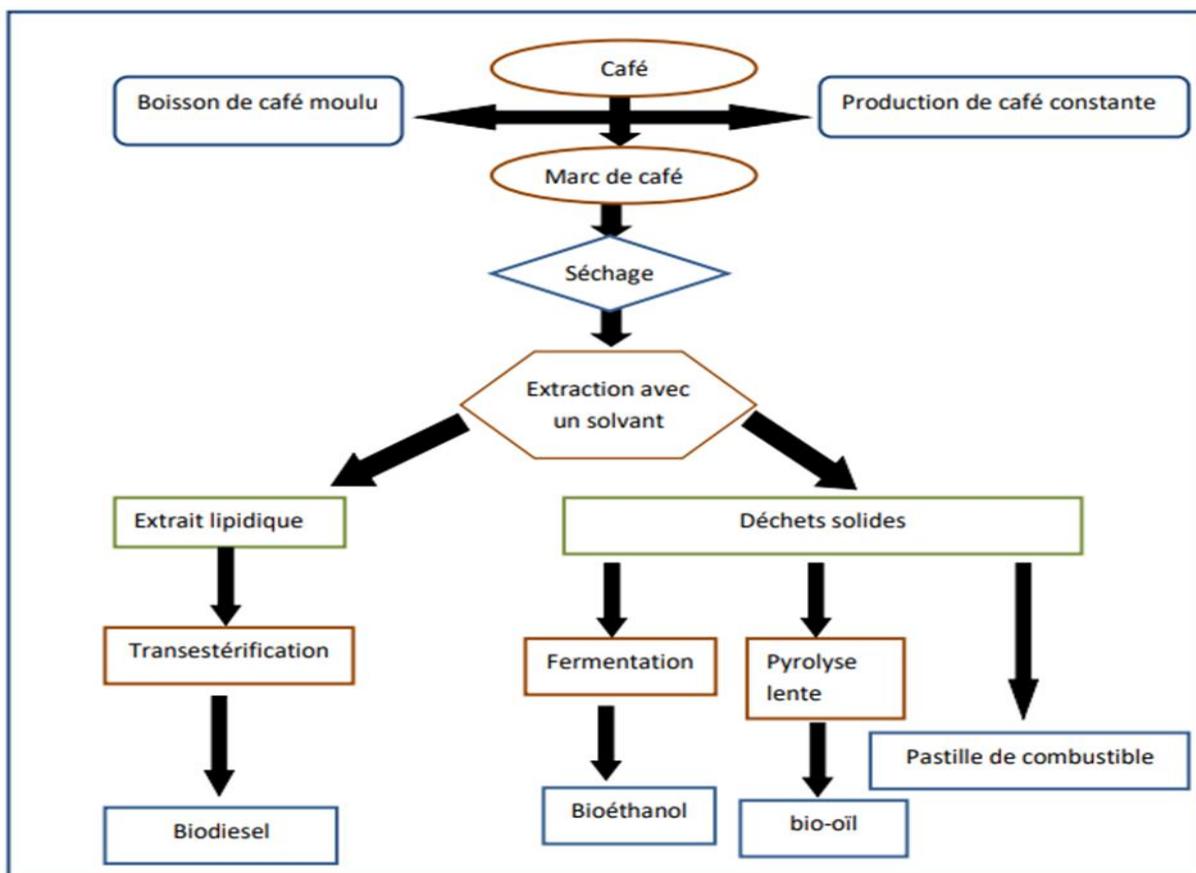


Figure 7 : Étapes de production de biocarburant à partir du marc de café

(Gomez-de la Cruz *et al.*, 2015)

1.2.2.2 Production de compost

Avec un bon ratio C/N, le marc de café peut être utilisé comme fertilisant. Ainsi, trois méthodes de compostage utilisant le marc de café ont été mises en comparaison : le vermicompostage, le compostage en cuve et le compostage en andain (Adi et Noor, 2009). Le compostage en cuve offre des résultats plus rapides, mais entraîne une perte plus importante d'azote. Cependant, le compostage en andain montre une augmentation plus importante de l'azote atteignant 75.

1.2.2.3 Substrat pour la culture de micro-organismes et de champignons comestibles

Le marc de café peut être utilisé comme substrat pour la production de caroténoïde grâce à la culture de levure. Les caroténoïdes, qui sont des composés de valeur, sont utilisés dans les secteurs alimentaires (comme colorant), cosmétiques et pharmaceutiques (Petrick et al., 2014). Le marc de café peut également être utilisé comme substrat pour la culture de champignons comestibles sans l'ajout de supplément nutritif (Leifa et al., 2001). Ce phénomène est sans doute dû à la riche composition du marc de café en protéines et en humidité, deux éléments cruciaux pour le développement des champignons et autres micro-organismes (Mussatto et al., 2011). Par exemple, le marc de café offre un terrain propice à la culture d'un champignon riche en protéines : *le Lentinus edodes*, qui présente également de nombreux bénéfices sur le plan nutritionnel. La qualité et le rendement des cultures sont influencés par le niveau d'humidité contenu dans le marc de café utilisé. Par conséquent, un taux d'humidité de 55-60% est idéal pour ce type de champignon (Leifa et al., 2000). Pour l'utilisation de résidus de café dans la culture de champignons, il est crucial de comprendre les conditions optimales de culture qui peuvent varier d'une espèce à l'autre, car ces conditions sont à la base des études de faisabilité techniques et financières.

1.2.2.4 Industrie alimentaire

- a) De nombreux composants du marc de café peuvent être utilisés par l'industrie alimentaire pour la production de spiritueux à saveur de café. En raison de sa teneur en protéines, elle est capable à être utilisée dans l'alimentation humaine. Le marc de café, riche en acides aminés à chaîne ramifiée (BCAA) et pauvre en acides aminés aromatiques, est demandé pour la production d'aliments physiologiquement actifs, répondant à des besoins spécifiques comme la malnutrition due à diverses maladies (cancer, brûlures, traumatismes, insuffisant

hépatique, etc.) (Vega et al., 2015). En raison de ces caractéristiques, le marc de café peut également être utilisé dans la lutte antimicrobienne, en tant que mélanoïde pour combattre la prolifération des pathogènes dans les aliments. Pour ce qui est de l'alimentation animale, le marc de café peut être ajouté à la nourriture des animaux ruminants, des cochons, des poulets et des lapins. Toutefois, la grande quantité de lignine présente dans le marc de café limite cette possibilité (Mussatto et al., 2011).

1.2.2.5 Production de biomatériaux et de produits d'encapsulation

Le marc de café est utilisable pour la production de polyhydroxylalkanoates (PHA) qui servent à la fabrication de contenants biodégradables (Cruz et al., 2014). En effet, le marc de café peut contribuer à améliorer les caractéristiques d'absorption mécaniques, thermiques et hydriques des composites. Toutefois, pour obtenir des résultats satisfaisants, le marc de café nécessite des traitements adaptés, ce qui entraîne des dépenses dans son processus de valorisation (Garcia et al., 2015). Il a été montré que 0,77 kg de PHA peut être extrait d'un kilogramme d'huile de marc de café, ce qui correspond à 97 kg de PHA pour une tonne de marc de café (Murthy et al., 2012).

1.2.2.6 Autres utilisations

Suite à l'extraction de caféine et de polyphénols, le marc de café peut être utiliser comme remblai pour les bords des routes. La composition chimique du marc de café offre des possibilités pour de nombreux secteurs industriels. Par exemple, la cellulose est une substance utilisée dans la production de papier. De plus, la capacité actuelle à convertir la cellulose en glucose facilite la production de nombreux autres composés chimiques d'intérêt, tels que l'éthanol, le butanol, l'hydrogène, les acides organiques, le glycérol et ainsi de suite. De ce fait, l'industrie chimique peut être mise à contribution. (Lee et al., 2015)

Il existe aussi d'autres utilisations ou possibilités d'usage. Effectivement, le marc de café peut également utiliser dans la fabrication de nanocomposites, de bijoux, dans la production de dihydrogène, de résine, de lubrifiants, et ainsi de suite. Toutefois, ces applications nécessitent des traitements dont la durée et le coût peuvent varier considérablement. Par conséquent, l'emploi du marc de café comme source de combustible paraît être le plus bénéfique sur ce plan (Lee et al., 2015).

1.2.3 Impacts environnementaux

Le marc de café est un produit riche en composés, parmi lesquels sont la caféine, des tanins et des polyphénols. Il est essentiel que ces substances écotoxiques ne soient pas présentes dans l'environnement, en particulier dans les rivières et les cours d'eau. Effectivement, le marc de café génère une demande importante en oxygène (Silva et al, 2012). Par conséquent, le recyclage du marc de café a des effets sur l'environnement. De plus, selon l'évaluation réalisée, celle-ci peut également avoir des conséquences sur l'environnement, y compris la réduction des pressions exercées sur le territoire, sur certaines ressources naturelles, ainsi que sur la qualité de l'eau.

1.3 Les coquilles d'œufs

Les coquilles d'œufs sont souvent récupérées des déchets de restauration et de transformation alimentaire. Elles sont peu coûteuses et abondantes, avec des caractéristiques intéressantes pour une multitude d'applications potentielles. La coquille d'œuf est composée à 95,1 % de minéraux, principalement du carbonate de calcium sous forme de calcite cristallisée, mais également de 3,3 % de protéines qui forment la structure initiale de la coquille et de 1,6 % d'eau qui est principalement constituée de carbonate de calcium (CaCO_3). En raison de sa composition, la coquille d'œuf est couramment utilisée comme nourriture animale, comme alternative à la chaux (Ca(OH)) ou comme fertilisant (Byckahouad, 2022)



Figure 8 : Déchets des coquilles d'œufs (Photo prises par nous)

1.3.1 Définition de la coquille

La coquille d'œuf de poule est un résidu issu de sources domestiques, notamment les couvoirs, les fabriques d'ovo-produits, les ménages et les restaurants (Ray et al., 2017). C'est la coquille dure extérieure de l'œuf de poule qui peut être de couleur blanche ou brune (Owuamanam et al., 2020). Un œuf de poule contient 60% d'albumen (substance liquide blanche), 30% de jaune d'œuf (substance liquide jaune) et 10-11% de coquille (coquille solide et membrane organique). Le poids total d'un œuf moyen entre 60,0 et 60,2 g, tandis que sa coquille vide a un poids qui varie de 6,6 à 7,3 g (Owuamanam et al., 2020). La coquille et les membranes de l'œuf sont des sous-produits non comestibles de faible valeur économique, mais qui pourraient renfermer des composés biologiquement actifs (Ray et al., 2017).

1.3.2 Composition de la coquille

La coquille d'œuf est constituée de (2%) d'eau et de (98%) de matière sèche ; cette dernière comprend (5%) de protéines brutes et (93%) de cendres (Ray et al., 2017). Environ

(96%) de la coquille est du carbonate de calcium, les autres éléments étant la matrice organique (2%), le magnésium, le phosphore ainsi qu'une gamme d'oligoéléments.

La membrane contient près de 60% de protéines, dont 35% sont du collagène, suivis par la glucosamine (10%), la chondroïtine (9%) et l'acide hyaluronique (5%), en plus d'autres composants inorganiques tels que le Ca, Mg, Si, Zn, etc., en petites quantités. La densité de la coquille est d'environ de $2,53\text{g/cm}^3$, ce qui dépasse largement celle de la membrane qui est de $1,358\text{g/cm}^3$ (Gandhi et al., 2021).

1.3.3 Structure de la coquille

La structure de la coquille d'œuf de poule illustrée à la figure 4 est composée de trois couches principales : la couche extérieure entourant la coquille, appelée cuticule, la couche inférieure, appelée testa (la coquille) et la couche intérieure, appelée couche mamillaire (Owuamanam et al., 2020). Deux membranes sont positionnées juste en dessous de la coquille, à savoir la membrane interne et la membrane externe. La membrane externe reste attachée à la couche mamillaire de la coquille, alors que la membrane interne entoure le liquide de l'œuf (Gandhi et al., 2021). La couche cuticule (mucus séché) est un film fin d'environ $10\ \mu\text{m}$ qui protège l'embryon des infections bactériennes et de la perte d'humidité. Dans la littérature, on fait parfois référence à la testa comme couche palissade, étant donné qu'elle renferme des cristaux de calcite. La couche spongieuse, également appelée couche palissadique, est organisée en colonnes et représente la plus épaisse des couches présentes dans la coquille d'œuf (environ $100\mu\text{m}$). Des petits pores sont présents entre les colonnes de palissade. On estime que la coquille renferme entre 7000 et 17000 ouvertures de pores circulaires distribuées de façon inégale, facilitant l'échange gazeux de l'oxygène atmosphérique et la libération du dioxyde de carbone généré par le poussin (Owuamanam et al., 2020)

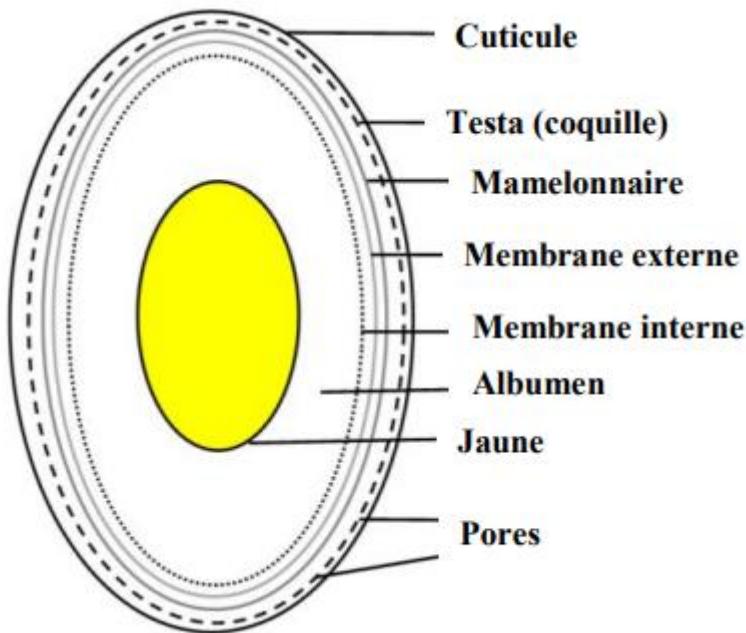


Figure 9 : Structure d'une coquille d'œuf (Owuamanam et al., 2020)

1.3.4 Valorisation des coquilles d'œufs

L'emploi des résidus de coquille d'œuf dans diverses applications offre des bénéfices à la fois pour l'environnement et sur le plan économique (Mignardi et al., 2020). On considère plusieurs options pour la valorisation de ces déchets, telles que l'exploitation de la coquille d'œuf comme modèle biologique pour la catalyse et les applications antibactériennes (Zhang et al., 2019), la production d'additifs alimentaires (Quina et al., 2017), de conditionneurs de sol (Saldanha et al., 2021), de matière première pour les cosmétiques (Ovuoayeetal., 2021), de carbonate de calcium pur (Render et al., 2016) ainsi que des biomatériaux (Kinayturk et al., 2021). Plus précisément, la coquille d'œuf pourrait servir de matière première pour la fabrication de l'hydroxyapatite destinée au traitement durable des eaux polluées par les métaux toxiques (De Angelis et al., 2017). Par ailleurs, la transformation des déchets de coquille d'œuf en adsorbant, un matériau utilisé pour la dépollution des métaux toxiques, peut atténuer l'impact de l'exploitation minière sur les ressources naturelles du phosphate qui figure parmi les matières premières jugées critiques par la Commission européenne (Commission, 2018).

CHAPITRE II

MATERIEL

ET METHODE

1.4 La valorisation de marc du café

Le but de notre essai est de valoriser marc du café, par compostage. Pour ce faire, un essai expérimental a été mené à l'air libre pendant 90 jours (15 Février au 15 Mai 2025), suivi d'un test de croissance qui a duré 2 semaines. Ainsi, l'expérimentation à durer en tout 3 mois et demi.

Nous présentons successivement, le plan d'expérience les différentes étapes du montage, les paramètres suivis et le test de croissance mené et les méthodes statistiques utilisées.

1.4.1 Plan d'expérience

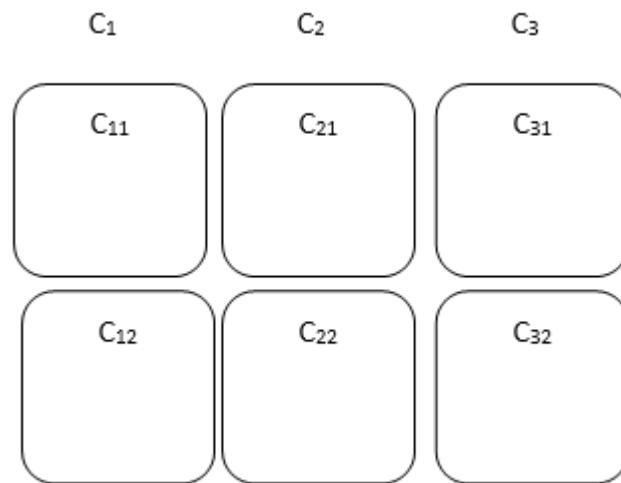
A cause de l'acidité élevée des déchets de marc du café, nous suggérons un ajustement du pH par l'ajout des coquilles d'œufs.

Ainsi, nous avons choisi d'une part 3 compositions du milieu constituées par un mélange de marc du café (A) et de coquilles d'œufs (B). Les valeurs de ces derniers sont portées sur le tableau (tab 6), pour chaque expérience nous avons fait deux répétitions.

Tableau 6 : Proportions de chaque mélange utilisé pour l'expérience

Compostière	Réplicats	Proportion marc de café (%)	Proportion coquilles d'œufs (%)
1	2	50	50
2	2	75	25
3	2	25	75

La figure 10, montre d'une part 3 mélanges de marc de café et coquilles d'œuf (Tab 6). C1, C2 et C3 représentant respectivement les proportions de 75%, 50% et 25% de marc de café et coquilles d'œufs. Par ailleurs 2 répétitions ont été faites pour chaque expérience. Ainsi, 6 compostières ont été préparées.

**Figure 10 :** Plan d'expérience

1.4.2 Montage proprement dit :

1.4.2.1 Préparation des compostières :

Nous avons préparé 6 boîtes en plastique (L=25cm, l=16.5cm, H=12.5cm). Les boîtes sont préalablement trouées (aération, évacuation de lixiviat), (Fig11).

**Figure 11 :** Les compostières de l'expérience

Pour cette expérience, nous avons mis en place six compostières, organisées en trois groupes selon des proportions différentes de deux composants : le marc de café et les coquilles d'œufs. Chaque compostière contient un mélange d'un kilogramme, complété par l'ajout de billes en verre (Tab 7).

Tableau 7 : Composition de chaque compostière lors de l'expérience

Composition de compostières	Symboles des compostières
500g du marc de café + 500g coquilles d'œufs + 10 billes en verre	C1.1 / C1.2
750g du marc de café + 250g coquilles d'œufs + 10 billes en verre	C2.1 / C2.2
250g du marc de café + 750g coquilles d'œufs + 10 billes en verre	C3.1 / C3.2

1.4.3 Mise en place du composteur :

Nous avons créé un composteur à l'air libre couvert par un film plastique opaque afin de conserver notre compost dans des conditions idéales (Fig12).

**Figure 12 : Montage du plan de l'expérience.**

Les compostières ont été recouvertes d'un film plastique noir pour éviter les insectes et les pluies.
(Fig13).



Figure 13 : compostières recouvertes en plastique opaque

1.4.4 Paramètres déterminés :

1.4.4.1 Paramètres physico-chimiques :

Nous avons suivi mensuellement le poids frais, le pH, l'humidité, la conductivité et la température et le carbone (%C).

1.4.4.2 Évolution mensuelle de la température (°C) :

Nous avons déterminé la température ($T^{\circ}\text{C}$) dans les compostières avec un thermomètre à sonde (IONMETER).

1.4.4.3 Évolution mensuelle du poids (g) du substrat :

L'évolution du poids frais du substrat (g) dans les 6 compostières été suivie à l'aide d'une balance analytique.

1.4.4.4 Évolution mensuelle du potentiel hydrogène (pH) :

Les mesures du pH dans les 6 compostières ont été suivies mensuellement à l'aide d'un pH-mètre IONMETER à sonde (McKeague, 1978 ; McLean, 1982).



Figure 14 : Présentation de la méthode utilisée pour mesurer de pH

1.4.4.5 Évolution mensuelle du taux de carbone (%C) :

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

Dosage du carbone : cendre.

La méthode cendres a été utilisée pour déterminer le carbone (%C).

Après évaporation de l'échantillon ($M = 10 \text{ g}$) à 105°C , on place les creusets en porcelaine qui contiennent la matière sèche dans un four à moufle à chauffage électrique à 550°C pendant 6 heures afin de calciner la matière organique (MO).

La matière organique MO est déterminée par simple calcul de la différence entre la matière sèche MS et la matière minérale MM. (Anonyme, 2000).

Les résultats sont exprimés en pourcentage de la matière sèche.

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

Le % carbone est établie par

$$\% \text{ C} = \frac{\% \text{ MO}}{2}$$



Figure 15 : Méthodologie de mesure du taux de carbone dans notre expérience

1.4.4.6 Évolution mensuelle d'humidité :

C'est le pourcentage d'eau contenue dans une masse de déchets de marc de café et de coquilles d'œufs.

$$H\% = \frac{P_f - P_s}{P_f} \times 100$$

P_f : poids frais.

P_s : poids sec



Figure 16 : Présentation de la méthode utilisée pour déterminer le taux d'humidité

1.4.4.7 Evolution mensuelle de la conductivité électrique :

La conductivité électrique est une approximation de la teneur en sels solubles présents dans l'échantillon. Le rapport de l'extraction est de 1:10 (m/V) avec de l'eau distillée, afin de dissoudre les électrolytes (Richards, 1954).

Principe

Le principe est basé sur l'extraction des sels d'un échantillon soluble dans l'eau, dans des conditions bien définies et avec un rapport sédiments secs/eau de 1/10.

Mode opératoire

2 g de l'échantillon de sédiments préparés pour l'essai sont pesés et placés dans un flacon en polyéthylène fermé, puis 20 ml d'eau distillée sont ajoutés. Le mélange est bien agité pendant 30 minutes, laissé à décanter, puis filtré.

Résultat

La conductivité électrique de l'extrait filtré est mesurée à l'aide d'un conductimètre et exprimée en us/cm. Le résultat est corrigé à une température de 25 °C.

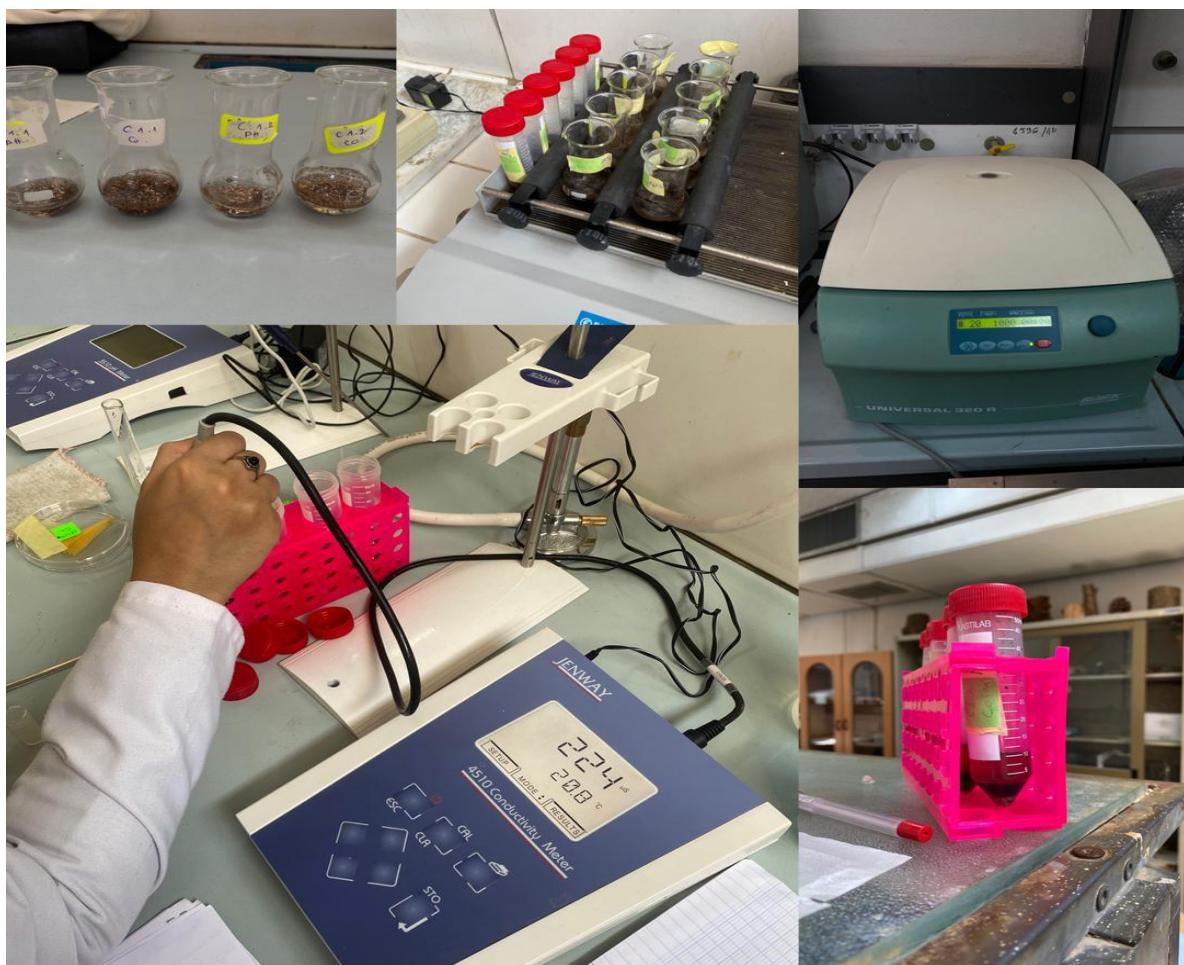


Figure 17 : Méthodologie de mesure de la conductivité électrique dans notre expérience

1.4.5 Test de germination :

Un test de germination avec des grains d'orge a été effectué pour déterminer la qualité du compost par la méthode suivante (Fig18) :

Des pots ont été rempli de différents mélanges sol/bioengrais avec des rapports volumétriques de 0/1, 1/3 ,1/1 ,3/1, 1/0. Pour chaque proportion nous avons fait 2 répétitions. Ainsi 30 pots ont été préparé.

Procédé	Rapport sol/bioengrais					
C1		0/1	1/3	1/1	3/1	1/0
C2		0/1	1/3	1/1	3/1	1/0
C3		0/1	1/3	1/1	3/1	1/0

Figure 18 : Plan d'expérience pour le test de germination utilisé

Après le semi d'un échantillon d'environ 10 graines pour chaque milieu, Après 2 semaines nous avons compté le nombre de graines germées. Les paramètres mesurés sont le pourcentage de germination et la biomasse (g) et le poids frais (%) des plantules (stade 3 feuilles) ainsi le pH du compost (bandelettes)

Selon WHO,1978. Le pourcentage de germination est donné par la relation suivante

$$\% \text{ de germination} = 100 \times \frac{NT}{10} \times \frac{NC}{10}$$

Où : NT= nombre de graines germées dans le traitement

NC= nombre de graines germées dans le témoin

4.4 Méthodes statistiques

Dans ce travail en plus des statistiques élémentaires nous avons eu recours aux techniques de la variance (ANOVA). L'ANOVA a essentiellement pour objectif d'étudier la variation d'un ou de plusieurs facteurs mesurés sur des échantillons provenant de la réalisation d'un plan expérimental préétabli. Les observations obtenues sont alors modélisées en conséquence, et les résultats des analyses statistiques associées sont souvent résumés dans une table d'ANOVA.

Le modèle associé pour étudier les actions des différents milieux aux cours des séances d'observations est le suivant :

$$Y_{smr} = \mu + \alpha s + \beta m + \gamma r + \varepsilon_{smr}$$
 où :

μ = effet moyen ;

αs = effet semaine

βm = effet milieu (compostières)

γr = effet interaction (milieu – semaines)

εsmr = erreur résiduelle

Y_{smr} = représentera l'une des caractéristiques mesurées : le pH, la température

T°C ou le poids frais.



Figure 19 : Les étapes du test de germination

CHAPITRE III

RESULTATS

ET DISCUSSIONS

2.1 Résultats physico-chimiques et discussion :

Afin d'évaluer l'efficacité du processus de compostage du marc de café, plusieurs paramètres physico-chimiques ont été mesurés tout au long de l'expérience. Ces paramètres englobent le poids frais(g), la température (°C), le potentiel hydrogène (pH), la conductivité électrique (CE), ainsi que les taux d'humidité (%H) et de carbone (%C). Ces données servent à suivre l'évolution du processus de compostage et à établir la qualité du compost obtenu.

Le tableau suivant résume les valeurs moyennes de ces variables pour les trois milieux étudiés (C1, C2 et C3) avec l'écart type (entre crochets), ainsi que les valeurs minimale et maximale (entre parenthèses).

Tableau 8 : Moyennes des variables physico-chimiques (Pf (g), T°C, pH, conductivité électrique CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$), % H et %C, étudiées dans le compostage des marcs du café.

	C1	C2	C3
Poids frais(g)	[927.33±157,39] (705-1200)	[994±198,86] (727-1260)	[916.37±103.77] (748-1010)
T°C	[20±3,54] (15-24)	[21.62±3.81] (16-26)	[24±4] (18 -28)
pH	[8.01±0,22] (7.79-8.38)	[7,75±0,34] (7.33-8.28)	[8.25±0.2] (7.33-8.55)
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	[849±112.83] (66-999)	[957.12±217.51] (500-900)	[600±68.03] (529-726)
% H	[23.30±14.6] (1.39-41.80)	[69.82±10.42] (59.30-84)	[37.55±19.03] (24-55)
% C	[24.75±9.34] (14.5-36)	[34.91±0.31] (23,4-24.35)	[18.77±5.25] (12.25-27.5)

2.1.1 Evolution mensuelle de la température (T°C) :

Les moyennes des températures (°C) relevées, sont de [20±3,54], [21.62±3.81] et [24±4] °C respectivement dans C1, C2, et C3.

La figure suivante montre l'évolution des températures des trois milieux étudiés durant les trois mois de l'essai.

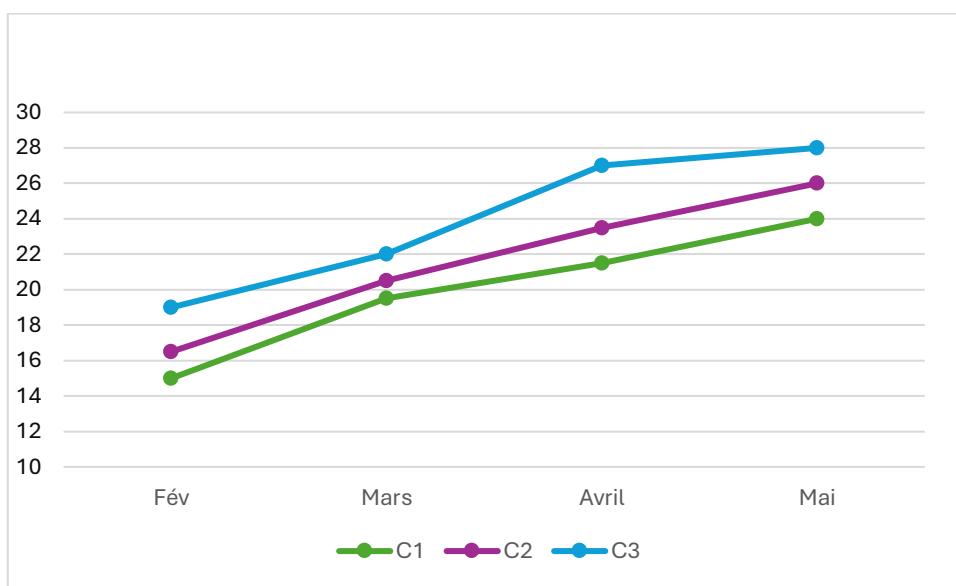


Figure 20 : Evolution mensuelle de la température (T°C)

La variation de la température est un paramètre essentiel au cours du compostage. La température des trois milieux augmentait progressivement vers une valeur significative pour les trois types de composts, due à l’oxydation de la matière organique biodégradable. Le suivi de la température pendant 90 jours a révélé un effet milieu non significatif ; un effet temps très significatif ($p<0.0001$) ; tandis que l’effet milieu*temps non significatif.

Au fait, la température est restée proche de la température ambiante, fluctuant entre 22 °C et 28 °C (Figure 20) selon les conditions climatiques extérieures, sans atteindre les seuils de 55 °C à 65 °C caractéristiques de la phase thermophile. Ce comportement est à cause du faible volume de compost utilisé (environ 1 kg), insuffisant pour générer et retenir la chaleur produite par l’activité microbienne. Ces observations sont en accord avec celles rapportées par Misra et al. (2005), qui expliquent que les composts de petit volume ne permettent généralement pas d’atteindre des températures élevées, en raison d’une perte rapide de chaleur vers l’extérieur. En revanche l’étude de Mamane Abdou et al. (2024) a montré des températures maximales supérieures à 52°C, grâce à l’utilisation d’un volume important de compost (plusieurs dizaines de kilogrammes).

Le maintien des valeurs de température des composts après 90 jours marque l’absence de la phase de refroidissement ainsi que celle de maturation des composts. Cet état de fait pourrait s’expliquer par l’insuffisance de la durée de processus.

2.1.2 Evolution mensuelle du pourcentage d'humidité (%H) :

Les moyennes des pourcentages de l'humidité obtenu sont **[23.30±14.6], [69.82±10.42]**

Et **[37.55±19.03]** respectivement dans C1, C2, et C3.

La figure suivante montre l'évolution du pourcentage d'humidité des trois milieux étudiés durant les trois mois de l'essai.

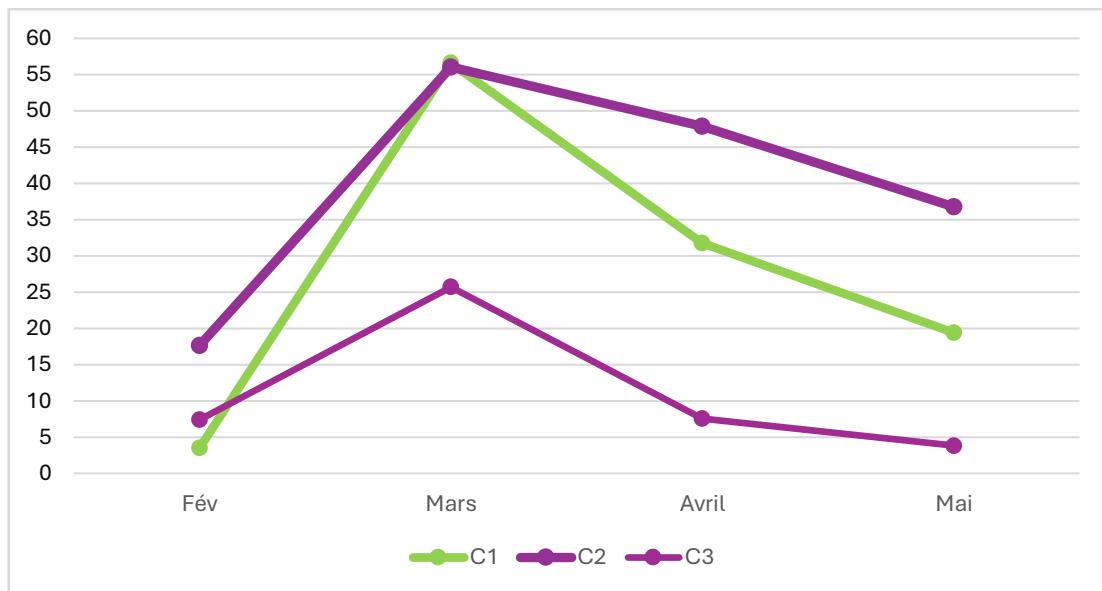


Figure 21 : Evolution mensuelle du pourcentage d'humidité (%H)

Les données portées sur la figure 21 montrent que l'humidité des trois composts C1, C2 et C3 a connu une augmentation notable entre février et mars, atteignant un pic de 56,59 % pour C1, 56,04 % pour C2 et 25,69 % pour C3. Ensuite, l'humidité a diminué progressivement en avril et mai, avec une baisse plus marquée pour le compost C3 qui est descendue jusqu'à 3,83 % en mai. Cette variabilité en fonction de la composition du milieu est confirmée par l'analyse de la variance à un facteur qui a révélé un effet milieu significatif ($p<0.0001$) et un effet temps significatif ($p<0.0001$), tandis que l'effet milieu*temps non significatif.

Ce comportement est typique du processus de compostage, où l'humidité augmente dans les premières étapes avant de diminuer avec l'avancement de la décomposition de la matière organique. Selon Misra et al. (2005), cette évolution est courante dans les composts, car l'activité microbienne intense au début du processus favorise la libération d'eau, puis l'humidité diminue progressivement sous l'effet de l'évaporation et de la consommation de l'eau par les micro-organismes. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Chennaoui et al. (2016) lors du compostage en cuve de déchets ménagers, où l'humidité initiale d'environ 70 %

a diminué progressivement jusqu'à atteindre 10 % après 60 jours de maturation, soulignant le même schéma de perte d'eau au cours du processus.

Dans notre étude, la baisse rapide de l'humidité, notamment pour le compost C3 (riche en coquilles d'œufs), s'explique par la faible capacité de rétention d'eau des coquilles. En effet, la coquille d'œuf contient seulement 1,6 % d'eau et est composée à environ 95 % de carbonate de calcium, ce qui limite considérablement son pouvoir hygroscopique (Gómez Morales et al., 2016).

2.1.3 Evolution mensuelle du potentiel hydrogène (pH) :

Les moyennes des pH relevées, sont de [8.01±0,22], [7,75±0,34] et [8.25±0.2] respectivement dans C1, C2, et C3.

La figure suivante montre l'évolution du potentiel hydrogène des trois milieux étudiés durant les trois mois de l'essai.

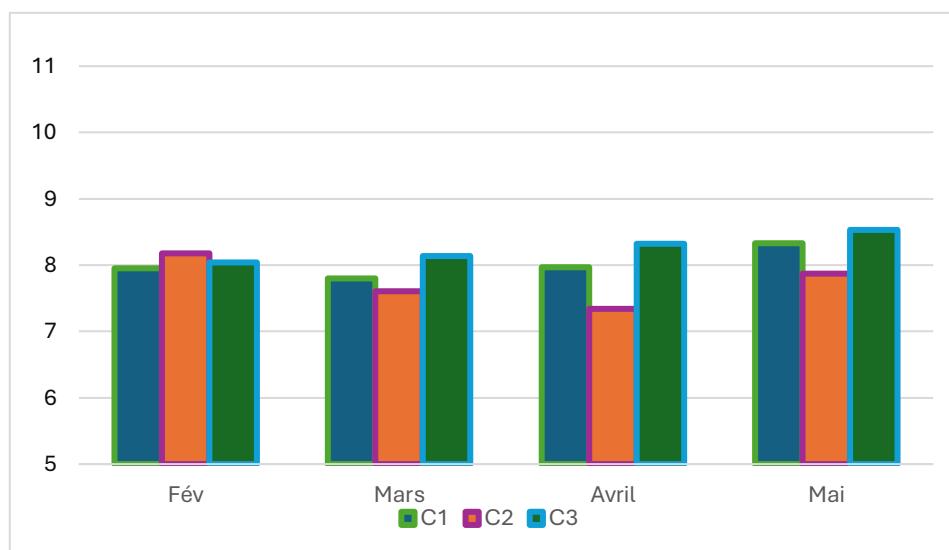


Figure 22 : Evolution mensuelle du potentiel hydrogène (pH)

Pendant l'expérience, nous avons observé que le pH des trois composts a augmenté progressivement avec le temps, ce qui montre que le compost devient plus mûr.

Le suivi du pH pendant le processus de compostage durant 90 jours des substrats organiques a révélé que la matière première avait un pH légèrement basique 8.18 pour le C2 et 8.04 pour C3 mais celui-ci augmentait graduellement avec le temps pour atteindre une valeur de 8.33 pour le C1 et 8.53 pour le C3 à la fin de compostage (Figure 22). En revanche, pour le C2 le

pH a diminué de 8.18 à 7.87. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Mamane Abdou et al. (2024), pH entre 8,6 et 8,7, typique d'un compost stable. L'analyse de la variance à un facteur qui a révélé un effet milieu significatif ($p<0.0001$) Aussi il n'y a pas eu de différence significative entre les pH des trois mois ni un effet milieu*temps significatif ($p>0.0001$).

2.1.4 Evolution mensuelle de la conductivité électrique (CE) :

Les moyennes de la conductivité électrique relevées, sont de [849±112.83], [957.12±217.51] et [600±68.03] respectivement dans C1, C2, et C3.

La figure suivante montre l'évolution de la conductivité électrique des trois milieux étudiés durant les trois mois de l'essai.

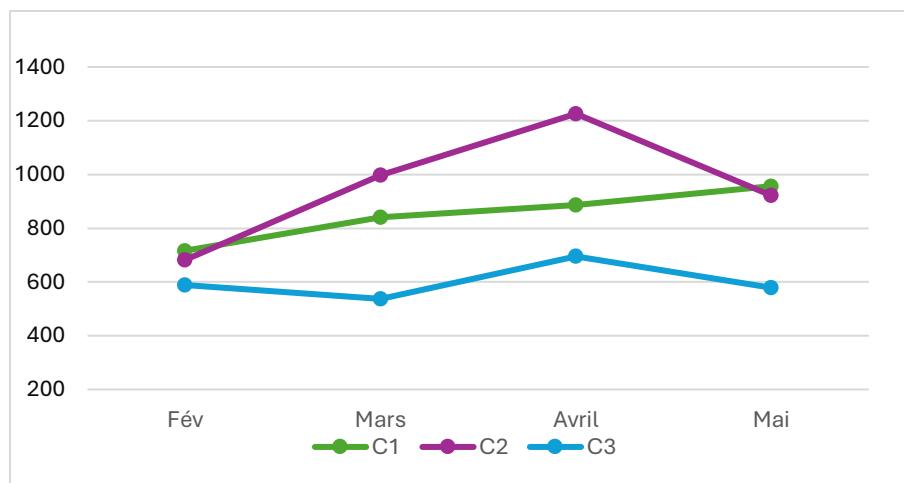


Figure 23 : Evolution mensuelle de la conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique traduit le degré de salinité et la phytotoxicité du compost produit. Une forte teneur pouvait inhiber la germination des plantes. L'effet de la minéralisation de la matière organique pendant le compostage conduisait à la libéralisation des sels comme les phosphates et les ions ammonium dans le milieu (Larbi, 2006 ; Gómez-Brandón et al., 2008). Au cours de notre expérience, nous avons observé une augmentation progressive de la conductivité électrique (CE) dans les composts C1 et C2, surtout entre février et avril. Les valeurs sont passées de 716,5 à 956,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour C1 et de 682 à 1226 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour C2 (Fig23), cette hausse est le résultat de la dégradation de la matière organique par les micro-organismes qui libère des éléments solubles comme les nitrates, les phosphates et les ions potassium (Boudjabi et al., 2014). Le pic observé en avril, en particulier pour le compost C2, suggère une activité microbienne intense, probablement liée à la forte proportion de marc de café, connu pour être riche en azote et en minéraux facilement assimilables (Yagüe et al., 2022).

La diminution de la CE en mai ($922,5 \mu\text{S}/\text{cm}$ pour C2) pourrait s'expliquer par la volatilisation de l'ammoniac et la précipitation des sels minéraux (Wong et al., 1995). Nos résultats issus de cette étude sont comparables à ceux de Francou (2003).

Le compost C3, quant à lui, a montré une évolution plus modérée, avec des valeurs comprises entre 537 et $695 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig23). L'analyse de la variance à un facteur a révélé un effet milieu significatif ($p<0.05$) et un effet temps non significatif. La conductivité plus faible du compost C3 peut s'expliquer par la faible contribution minérale des coquilles d'œufs, composées principalement de carbonate de calcium (Gómez Morales et al., 2016), un élément peu soluble dans l'eau. L'effet interaction milieu*temps est non significatif.

Nos résultats issus de cette étude sont comparables à ceux de M'Sadak et Ben M'Barek (2015), qui ont observé des valeurs de conductivité comprises entre 805 et $1387 \mu\text{S}/\text{cm}$ selon les mélanges testés, avec une influence directe de la composition du substrat sur la salinité.

2.1.5 Evolution mensuelle du taux de carbone (%C) :

Les moyennes des pourcentages du taux de carbone obtenu sont [24.75 ± 9.34], [34.91 ± 0.31] et [18.77 ± 5.25] respectivement dans C1, C2, et C3.

La figure suivante montre l'évolution du taux de carbone des trois milieux étudiés durant les trois mois de l'essai

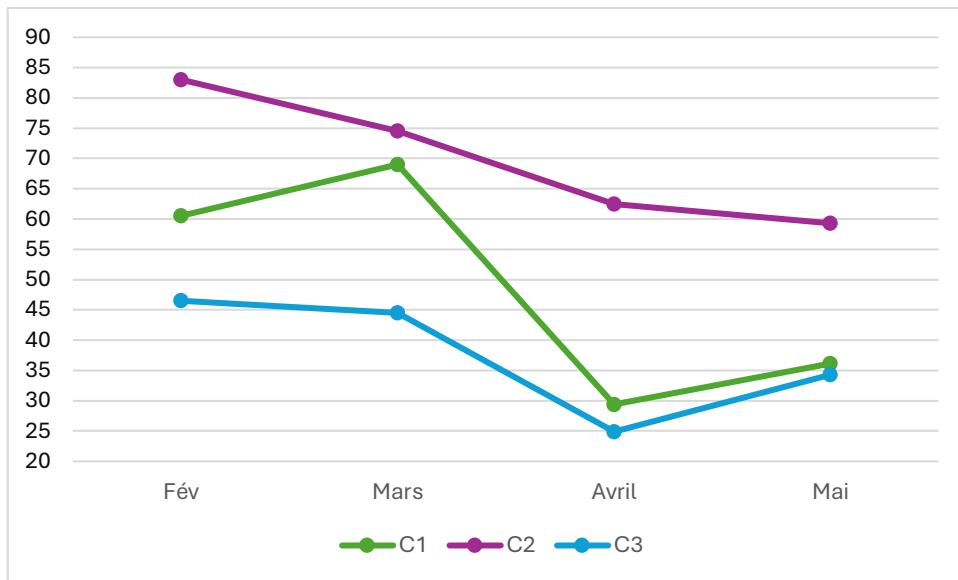


Figure 24 : Evolution mensuelle du taux de carbone (%C)

Pour évaluer la maturité des composts, nous allons utiliser la méthode de Francou (2003, cité par Annabi, 2005), présenté sur le tableau 8 qui classe les composts selon le pourcentage de carbone organique minéralisé après trois mois de compostage.

Le suivi des moyennes des C % a révélé qu'en mois de mai, le C % est de 18,05 et 17,15 respectivement pour C1 et C3 (Fig24), nous pouvant les classer dans la catégorie des composts moyennement stables. Cela signifie qu'ils sont en bonne voie de maturation, mais qu'ils ont encore besoin d'un peu plus de temps pour devenir complètement stables.

Par contre, le compost C2 a montré un pourcentage plus élevé (29,65 %) (Fig24), ce qui indique qu'il est encore instable. Cela peut être due à la grande quantité de marc de café dans ce mélange, car cette matière est très riche en azote [4] et se dégrade rapidement, ce qui peut prolonger l'activité microbienne.

Ainsi, l'analyse de la variance à un facteur a révélé un effet milieu significatif ($p<0.0001$) et un effet temps non significatif. L'effet interaction milieu*temps est non significatif.

Tableau 9 : maturité des composts à partir de la production du carbone organique total après trois mois de compostage (Francou, 2003)

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

2.1.6 Evolution mensuelle du poids frais (g) du substrat :

Les moyennes du poids frais relevées, sont [927.33±157,39], [994±198,86] et [916.37±103.77] respectivement dans C1, C2, et C3.

La figure suivante montre l'évolution du poids frais (g) des trois milieux étudiés durant les trois mois de l'essai.

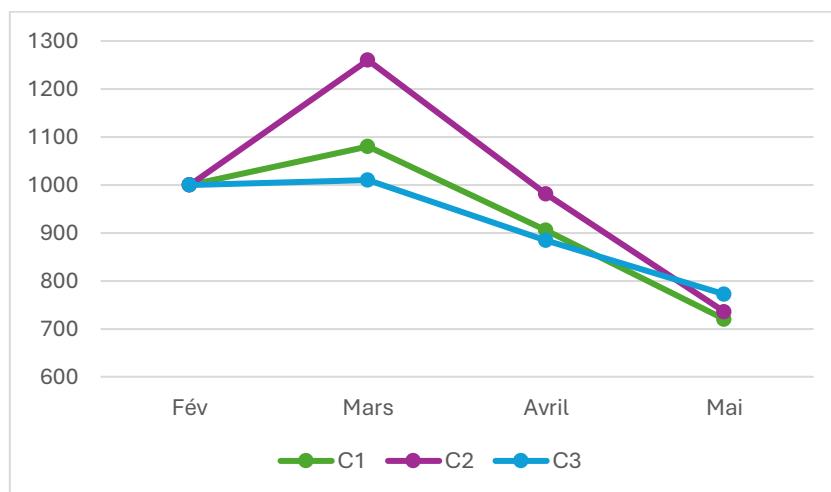


Figure 25 : Evolution mensuelle du poids frais (g) du substrat

Selon la figure 25 au début de l'expérience, les trois composts (C1, C2, C3) présentaient un poids frais identique de 1000 g. En mars, une augmentation du poids a été observée, particulièrement marquée pour le compost C2, qui a atteint 1260 g, contre 1080 g pour C1 et 1010 g pour C3. Cette hausse peut être liée à une absorption d'eau par les substrats, en particulier ceux riches en matière organique, capables de retenir l'humidité et de favoriser l'activité microbienne.

À partir d'avril, on observe une diminution progressive du poids frais dans les trois composts. En mai, le poids est tombé à 720 g pour C1, 735,5 g pour C2, et 772 g pour C3. Cette baisse reflète à la fois la perte d'humidité par évaporation, et la dégradation de la matière organique (Misra et al., 2005). Ce phénomène est typique des composts en maturation, où la respiration microbienne libère de l'eau sous forme de vapeur et réduit progressivement la masse du mélange.

C'est le compost C1 qui a subi la plus forte réduction entre avril et mai (-185,5 g), tandis que le C3 a connu une baisse plus modérée. Cela peut s'expliquer par la présence importante de coquilles d'œufs dans C3, qui sont plus résistantes à la décomposition et retiennent moins d'eau que les matières riches en azote [4].

Par ailleurs, l'analyse de la variance à un facteur a révélé un effet milieu non significatif et un effet temps non significatif. L'effet interaction milieu*temps est non significatif.

2.2 Résultats et discussion du test de germination « compartiment végétal » :

Afin de connaître la qualité du bio-engrais (C1, C2 et C3) obtenu avec les déchets de marcs du café et coquilles d'œufs nous avons effectué un test de germination avec les graines de l'orge (qui a duré 15 jours. Puis, nous avons calculé le pourcentage de germination.

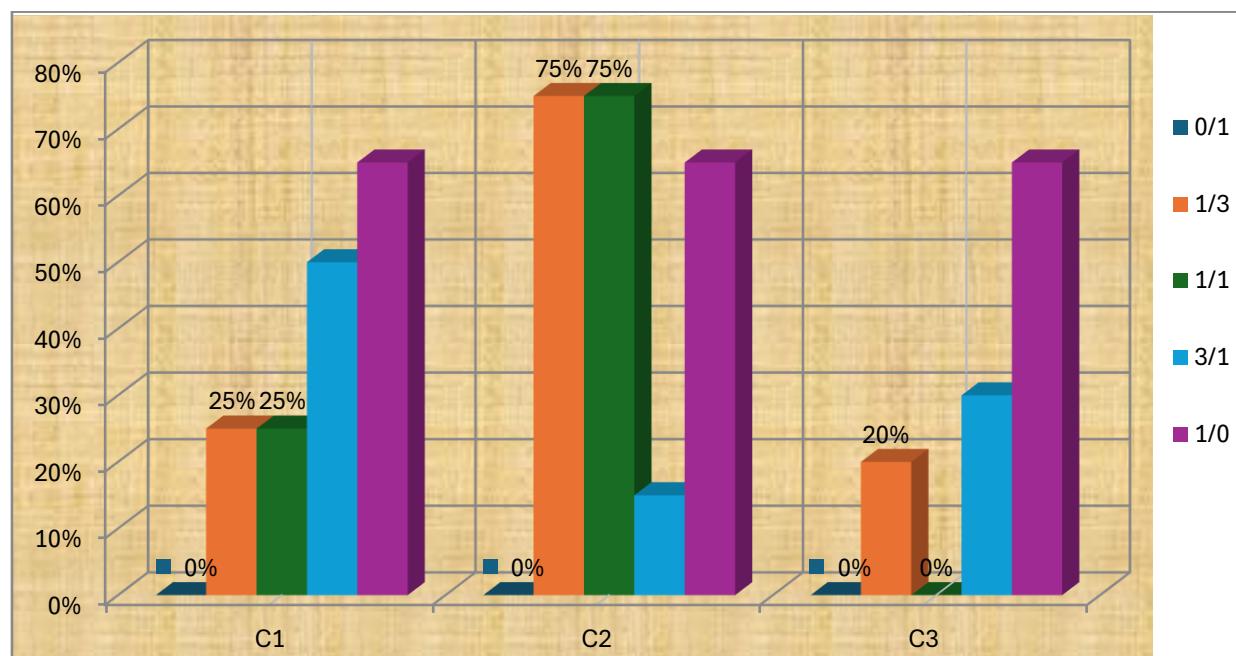


Figure 26 : Evolution du taux de germination (%) dans les différentes compostières

La maturité du compost est une importante caractéristique à considérer pour l'évaluation de sa qualité (Compaore et al., 2010). Il existe plusieurs méthodes d'évaluation pour tester la maturité des composts, parmi eux, les tests de germination, ces derniers sont réalisé sur des végétaux divers et les doses de compost varient généralement de 0 à 100% (Francou, 2003).

La figure 26, montrent que le taux de germination varie entre 0 et 75 %, ce dernier (75%) est enregistré dans le milieu C2 et pour les rapports sol/bio-engrais correspond à 1/3 et 1/1 et l'ajout du compost améliore la germination dans ce milieu alors que ce n'était pas le cas pour les milieux C1 et C3.

Ainsi, nous avons observé que l'utilisation de 100 % de compost comme substrat de germination conduit à un taux de germination nul, ce qui suggère que le compost obtenu n'est peut-être pas encore arrivé à maturité et pourrait être non viable.



Figure 27 : Evolution de la germination de l'orge dans différents substrats de compost

CONCLUSION

ET PERSPECTIVES

Notre étude s'inscrit dans une démarche de valorisation de déchets organiques par l'utilisation d'un procédé biologique qui est le compostage du marc de café et des coquilles d'œufs, dans le but de produire un bioengrais naturel, accessible et durable. L'expérimentation a été menée sur trois mélanges (C1, C2, C3) dans des compostières à l'air libre, ces dernières sont composées de proportions variées de ces deux résidus, l'expérimentation a duré 90 jours.

Au cours de cette expérimentation des paramètres physicochimiques ont été mesurés et à la fin un test de germination sur graines d'orge a eu lieu pour évaluer la qualité du bio engrais obtenu.

Ainsi, l'analyse de la variance ANOVA des paramètres physico-chimiques a révélé que le pH et la conductivité électrique CE, varient significativement en fonction du temps, cependant le pH, % H la conductivité électrique CE et le carbone (%C) varient par rapport au milieu.

Pour la Température nous avons enregistré des résultats allant de 15°C et 28°C, sans atteindre la phase thermophile ($>50^{\circ}\text{C}$), en raison du faible volume de compost.

En ce qui concerne le paramètre de % l'H les résultats obtenus varient de 25% à 56 %, une forte baisse surtout dans C3 (riche en coquilles), à cause de leur faible capacité de rétention d'eau. Tandis que le milieu C2 a mieux conservé l'humidité en atteignant un pic de 84 %.

Évolution du pH dans les trois milieux est globalement basique dans tous les composts, avec un maximum de 8.55 dans C3.

La conductivité électrique (CE) est un paramètre important à suivre pendant le compostage, en effet, nous avons remarqué une augmentation significative dans C1 et C2, jusqu'à 1226 $\mu\text{S}/\text{cm}$, traduisant une forte activité microbienne et libération de sels. La CE plus faible dans C3, en lien avec la faible solubilité minérale des coquilles.

Le taux de Carbone (%C) le plus élevé (29.65 %) est enregistré pour le milieu C2 indiquant une instabilité. En revanche, pour les milieux C1 et C3 affichent des taux entre 17 et 18 %, suggérant une maturité moyenne selon l'échelle de Francou (2003).

Une diminution progressive du poids frais dans tous les composts après un pic en mars. La plus forte perte observée dans C1, traduisant une décomposition plus avancée

Le test de germination a mis en évidence une meilleure performance du compost C2 (75 % marc de café / 25 % coquille), avec un taux de germination atteignant 75 % pour les rapports 1/3 et 1/1 (sol/compost). En revanche, l'utilisation du compost pur (100 %) s'est traduite par une absence de germination, signalant une maturité encore incomplète. Ce résultat montre que le compost doit être mélangé au sol pour une efficacité optimale.

A travers cette étude, on recommande :

- D'adopter une durée de compostage plus longue, afin de favoriser une décomposition complète de la matière organique et d'assurer une meilleure maturité du compost.
- D'augmenter le volume des compostières, ce qui favorisera l'apparition de la phase thermophile.
- De mettre en place un système de compostage plus développé, intégrant :
 - ❖ Un dispositif de contrôle de l'humidité par capteurs et arrosage automatique,
 - ❖ Une aération contrôlée (par ventilation ou retournement mécanique),
 - ❖ Ainsi qu'une surveillance numérique des paramètres clés (température, pH, humidité, CE), permettant une régulation en temps réel à l'aide d'un microcontrôleur ou d'un système intelligent.
- D'élargir les analyses physico-chimiques à des paramètres non étudiés dans ce travail, notamment :
 - ❖ L'azote total (N), pour évaluer le potentiel fertilisant,
 - ❖ Le phosphore assimilable (P), essentiel à la nutrition des plantes,
 - ❖ Le rapport C/N, indicateur clé de la maturité et de l'équilibre du compost.
- D'intégrer d'autres déchets organiques dans les mélanges testés (résidus de légumes, carton, fumier...), afin d'optimiser les propriétés physiques et biologiques du substrat.
- De diversifier les espèces testées lors des essais de germination, en ciblant différentes cultures d'intérêt agronomique.
- Évaluer les aspects microbiologiques et phytotoxiques afin de mieux caractériser la qualité du compost en fin de processus.

En conclusion, notre étude démontre que le compostage du marc de café enrichi en coquilles d'œufs constitue une voie de valorisation prometteuse, à condition d'optimiser les paramètres de maturation et d'application.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anonyme. (2000). *Amendement et support de culture – Norme NF EN 13039*. Association Française de Normalisation (AFNOR), 59 pages.
- Askri, A. (2015). *Valorisation des digestats de méthanisation : effets sur les cycles biogéochimiques du carbone et de l'azote*. Thèse de doctorat, Université de Paris-Saclay.
- Bernal, M.P., Alburquerque, J.A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. *Bioresource Technology*, 100, 5444–5453.
- Boudjabi, S., Chenchouni, H., & Madi, A. (2014). Effets des composts sur les propriétés physico-chimiques des sols. *European Scientific Journal*, 10(5), 342–357.
- Bravo, J., Monente, C., Juániz, I., De Peña, M. P., & Cid, C. (2013). Influence of extraction process on antioxidant capacity of spent coffee. *Food Research International*, 50(2), 610–616.
- Carassou, F. (2015). *Une récupération spécifique du marc de café aurait-elle une plus-value pour la communauté ?* Université de Sherbrooke.
- Chauvin, M. (2004). La réglementation française sur la valorisation agronomique des déchets organiques. ADEME Bretagne.
- Chennaoui, M., Salama, Y., Makan, A., & Mountadar, M. (2016). Compostage en cuve des déchets ménagers. *Algerian Journal of Arid Environment*, 6(2), 53–66.
- Commission Européenne. (2018). *Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy*.
- COMPAORE, E., & NANEMA, S. (2010). Compostage et qualité du compost des déchets solides urbains. *Revue TROPICULTURA*, 28(4), 232–237.
- Cruz, M.V. et al. (2014). Production of polyhydroxyalkanoates from spent coffee grounds oil. *Food Research International*, 157, 360–363.
- De Angelis, G.D., Medeghini, L., Conte, A.M., & Mignardi, S. (2017). Recycling of Eggshell Waste. *Journal of Cleaner Production*, 164, 1497–1506.
- Diaz, L.F. et al. (1993). *Composting and Recycling Municipal Solid Waste*. Lewis Publishers.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Francou, C. (2003). *Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains*. Thèse, INA Paris-Grignon.
- Gandhi, V., & Shah, K. (2021). *Advances in Wastewater Treatment I*. Materials Research Forum LLC.
- Gomez-de la Cruz, J. et al. (2015). *Fuel Processing Technology*, 130, 188–196.
- Gómez Morales, J. (2010). *Structure, propriétés et minéralisation de la coquille de l'œuf*. INRAE Productions Animales.
- Gouilliard, S., & Legendre, A. (2003). *Déchets ménagers*. Paris : Édition Economica.
- Hieronymus, Y. (2001). *Émission d'effluents gazeux lors du compostage*. Thèse, Université de Rennes 1.
- Jeguirim, M., Limousy, L., & Dutournie, P. (2014). *Chemical Engineering Research and Design*, 92, 1876–1882.
- Kaboré, W.T. (2015). *Amélioration de la valorisation agricole des déchets urbains après compostage*. Thèse, Université de Ouagadougou.
- Kinayturk, N.K. et al. (2021). Eggshell as a Biomaterial. *Royal Society Open Science*, 8(6), 1–14.
- Koledzi, K.E. (2012). *Dynamique d'activité des composts*. *European Journal of Scientific Research*, 81(1), 69–77.
- Kondamudi, N. et al. (2008). Spent Coffee Grounds as Green Energy Source. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 56, 11757.
- Leifa, F. et al. (2001). Production of Flammulina velutipes on Coffee Husk. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 44, 201–212.
- Lee, H.K. et al. (2015). Green nanocomposites from coffee waste. *Journal of Applied Polymer Science*, 132.
- Limousy, L. et al. (2013). Gaseous Products from Coffee Pellets. *Fuel*, 107, 323–329.
- Liu, K., & Price, G.W. (2011). Evaluation of composting systems for coffee grounds. *Bioresource Technology*, 102, 7966–7074.

- Low, J.H. et al. (2015). Structural elucidation of tannins from spent coffee. *Industrial Crops and Products*, 69, 456–461.
- Mamane Abdou, I. et al. (2024). Caractéristiques physico-chimiques d'un compost innovant. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 18(3), 1166–1179.
- Mansour-Benamar, M. (2016). *Valorisation des résidus agricoles par la culture de champignons*. Thèse, Université de Tlemcen.
- McKeague, J.A. (1978). *Manual on Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science.
- McLean, E.O. (1982). Soil pH and lime requirement. In *Methods of Soil Analysis*, Part 2. Agronomy, vol. 9.
- Misra, R.V. & Roy, R.N. (2005). *Méthode de compostage au niveau de l'exploitation agricole*. FAO.
- Mignardi, S. et al. (2020). Eggshell Biowaste for Environmental Remediation. *Scientific Reports*, 10(1), 1–10.
- Morel, J.L. et al. (1985). Évaluation de la maturité du compost. In *Compostage de déchets agricoles*.
- Murthy, P.S. & Naidu, M.M. (2012). Management of coffee by-products. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 45.
- Mussatto, S.I. et al. (2011). Extraction from coffee grounds. *Carbohydrate Polymers*, 83(2), 368–374.
- Owuamanam, S., & Cree, D. (2020). Progress on Eggshell Fillers. *Journal of Composites Science*, 4(2), 70–92.
- Oudart, D. et al. (2013). Organic Matter Stabilization. *Environmental Technology*, 33(19), 2235–2243.
- Ovuoaye, P.E. et al. (2021). Coag-flocculation with Eggshells. *Research Square*, 1–29.
- Petrick, S. et al. (2014). Bioconversion of coffee grounds. *Biochemical Engineering Journal*, 90, 307–315.

- Quina, M.J. et al. (2017). Applications of Industrial Eggshell. *Resources, Conservation & Recycling*, 123, 176–186.
- Rabouhi, A. (2010). *Effet du taux de farine de bois d'olivier sur le PVC*. Mémoire de Magister, Université A. Mira de Bejaia.
- Ramdani, N. (2015). *Transformation de la matière organique par co-compostage*. Thèse, Université d'Oran.
- Ray, S. et al. (2017). Eggshell Powder as Calcium Source. *The Pharma Innovation*, 6(9), 01–04.
- Render, D. et al. (2016). Calcium Carbonate Nanoparticles. *Journal of Nanomaterials*, 1–8.
- Richards, L.A. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. USDA Handbook 60.
- Saldanha, R.B. et al. (2021). Eggshell Lime for Soil Stabilization. *Construction & Building Materials*, 123648.
- Tahraoui Douma, N. (2013). *Valorisation par compostage des résidus solides urbains*. Thèse, Université de Limoges.
- The Old Farmer's Almanac. (2024, 15 février). *Are Eggshells, Coffee, and Banana Peels Good for the Garden?* Almanac.com.
- Toumela, M. et al. (2000). Biodegradation of lignin in compost. *Bioresource Technology*, 72, 169–183.
- Walekhwa, P., Mugisha, J., & Drake, L. (2009). Biogas energy in Uganda. *Energy Policy*, 37, 2754–2762.
- Yagüe, M.R. et al. (2022). Coffee grounds in compost. *Compost Science & Utilization*, 30(2), 123–131.
- Zamora, A.J. et al. (2015). Revalorization of coffee by-products. *LWT – Food Science and Technology*, 61, 12–18.
- Zhang, X. et al. (2019). Waste eggshell nanocomposites. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(18), 15762–15771.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Statista. (2009). *Consommation mondiale de café*. Consulté le 21 juin 2025. <https://fr.statista.com/statistiques/573377/> [1]
- Arome Caféine. (s.d.). *Le marc de café : allié ou menace pour vos plantes et légumes*. Consulté le 18 mars 2025. <https://aromecafeine.com/blog/quelles-plantes-aiment-pas-marc-cafe/> [2]
- The Old Farmer's Almanac. (2024, 15 Février). Are Eggshells, Coffee, and Banana Peels Good for the Garden? [Vidéo]. Almanac.com. Consulté le 18 mars 2025 à 14 h 29. <https://www.almanac.com/video/are-eggshells-coffee-grinds-and-bananas-good-garden>. [3]
- Arnela. (2024, 14 mai). *Recycler le marc du café*. Cafés Trottet. <https://cafes.trottet.ch/blog/2024/05/14/recycler-le-marc-du-cafe/> [4]

ANNEXES

Les paramètres météorologiques

Février			
	Les facteurs météorologiques		
La date	T° air	H% air	v de vent
17	16°/4°	76%	11Km/h
18	17°/4°	73%	10Km/h
19	19°/2°	75%	6Km/h
20	15°/6°	73%	2Km/h
21	18°/6°	72%	3Km/h
22	17°/5°	69%	3Km/h
23	16°/5°	65%	3Km/h
24	15°/5°	80%	5Km/h
25	13°/3°	75%	8Km/h
26	11°/1°	86%	11Km/h
27	16°/6°	58%	8Km/h
28	19°/6°	56%	11Km/h

Mars			
	Les facteurs météorologiques		
La date	T° air	H% air	v de vent
1	19°/8°	59%	8Km/h
2	15°/7°	80%	14Km/h
3	17°/6°	74%	8Km/h
4	17°/6°	74%	8Km/h
5	17°/6°	70%	10Km/h
6	18°/6°	69%	19Km/h
7	17°/4°	75%	8Km/h
8	19°/7°	65%	10Km/h
9	20°/11°	56%	18Km/h
10	21°/7°	42%	16Km/h
11	21°/11°	56%	19Km/h
12	18°/9°	64%	18Km/h
13	22°/13°	49%	19Km/h
14	22°/7°	58%	13Km/h
15	19°/6°	63%	13Km/h
16	16°/6°	67%	11Km/h
17	18°/6°	70%	10Km/h
18	18°/6°	60%	10Km/h
19	21°/7°	53%	13Km/h
20	22°/7°	58%	13Km/h
21	21°/7°	53%	12Km/h
22	18°/6°	60%	10Km/h
23	19°/6°	63%	13Km/h
24	17°/6°	74%	8Km/h
25	16°/6°	68%	10Km/h
26	15°/6°	73%	6Km/h
27	14°/4°	76%	3Km/h
28	12°/5°	73%	6Km/h
29	11°/2°	83%	3Km/h
30	13°/3°	70%	6Km/h
31	15°/6°	68%	10Km/h

Avril			
	Les facteurs météorologiques		
La date	T° air	H% air	v de vent
1	15°/6°	70%	13Km/h
2	18°/6°	73%	5Km/h
3	17°/7°	69%	3Km/h
4	18°/6°	63%	10Km/h
5	19°/8°	62%	11Km/h
6	20°/10°	58%	12Km/h
7	18°/6°	72%	14Km/h
8	19°/6°	68%	18Km/h
9	23°/11°	65%	11Km/h
10	21°/10°	71%	14Km/h
11	26°/15°	55%	8Km/h
12	28°/17°	51%	13Km/h
13	28°/16°	42%	21Km/h
14	23°/13°	67%	13Km/h
15	24°/13°	62%	8Km/h
16	17°/10°	74%	8Km/h
17	15°/6°	74%	19Km/h
18	22°/10°	62%	11Km/h
19	24°/10°	65%	10Km/h
20	17°/7°	80%	14Km/h
21	16°/7°	76%	18Km/h
22	20°/9°	69%	8Km/h
23	21°/11°	69%	8Km/h
24	20°/10°	71%	8Km/h
25	21°/9°	72%	6Km/h
26	20°/8°	71%	8Km/h
27	19°/6°	72%	10Km/h
28	15°/6°	73%	16Km/h
29	19°/9°	70%	6Km/h
30	22°/11°	67%	14Km/h

Mai			
	Les facteurs météorologiques		
La date	T° air	H% air	v de vent
1	26°/13°	65%	11Km/h
2	27°/14°	63%	11Km/h
3	27°/16°	59%	13Km/h
4	24°/6°	67%	8Km/h
5	23°/13°	69%	10Km/h
6	23°/12°	71%	8Km/h
7	22°/12°	69%	5Km/h
8	19°/9°	77%	10Km/h
9	20°/10°	74%	8Km/h
10	22°/11°	74%	10Km/h
11	26°/15°	62%	11Km/h
12	23°/14°	76%	12Km/h
13	22°/13°	75%	13Km/h

RESUME

Abstract

The objective of our study is to valorize by composting organic waste, mainly coffee grounds and egg shells, resulting from the high consumption of coffee in Constantine. For this, three different doses underwent a composting process for 90 days. The coupled physicochemical analyses of a statistical study (the analysis of variance ANOVA) reveal that certain parameters are significant as a function of time and others their significance is related to the composition of the environment. Indeed, the results from the germination test for barley seeds show that composting allowed to obtain a quality compost with an agronomic value for the C2 compost composed of 75% coffee grounds and 25% egg shells, presents the best performances in terms of stability, chemical balance. We can note that composting would be an interesting alternative in the valorization of coffee grounds and egg shells and their use in organic agriculture.

Key words: **composting, coffee grounds, egg shells, organic fertilizer, valorization.**

ملخص

الهدف من دراستنا هو تثمين النفايات العضوية الناتجة عن الاستهلاك العالي للقهوة في قسنطينة عن طريق تحويلها إلى سماد، وخاصة تقل القهوة وقشور البيض. ولتحقيق هذه الغاية، خضعت ثلاثة جرعات مختلفة لعملية التسميد لمدة 90 يومًا. بكشف التحليلات الفيزيائية والكيميائية المقترنة للدراسة الإحصائية (تحليل التباين ANOVA) أن بعض المعلومات مهمة كدالة ل الوقت والبعض الآخر ترتبط أهميتها بتكونين البيئة. وبالفعل، أظهرت نتائج اختبار إنبات بذور الشعير أن التسميد يسمح بالحصول على سماد عالي الجودة بقيمة زراعية للسماد C2 المكون من 75% من تقل القهوة و 25% من قشور البيض، ويقدم أفضل أداء من حيث الاستقرار والتوازن الكيميائي. ويمكننا أن نلاحظ أن التسميد قد يكون بدليلاً مثيراً للاهتمام في تثمين تقل القهوة وقشور البيض واستخدامها في الزراعة العضوية.

الكلمات المفتاحية: التسميد، تقل القهوة، قشر البيض، الأسمدة العضوية، التثمين.

Intitulé : Contribution à la valorisation des déchets du marc de café par compostage.

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Ecologie Fondamentale et Appliquée

Résumé

L'objectif de notre étude consiste en la valorisation par compostage des déchets organiques, principalement le marc de café et les coquilles d'œufs, issus de la forte consommation de café à Constantine. Pour cela, trois différentes doses ont subi un processus de compostage pendant 90 jours.

Les analyses physicochimiques couplées d'une étude statistique (l'analyse de la variance ANOVA) révèlent que certains paramètres sont significatifs en fonction du temps et d'autres leur significativité est par rapport à la composition du milieu.

En effet, les résultats issus du test de germination pour les graines de l'orge montrent que le compostage a permis d'obtenir un compost de qualité ayant une valeur agronomique pour le compost C2 composé de 75 % de marc de café et 25 % de coquilles d'œufs, présente les meilleures performances en termes de stabilité, d'équilibre chimique.

Nous pouvant constater que le compostage serait une alternative intéressante dans la valorisation du marc de café et les coquilles d'œufs et leur utilisation en agriculture biologique.

Mots clé : compostage, marc du café, coquilles d'œufs, bio engrais, valorisation.

Laboratoires de recherche : laboratoire Ecologie SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE (U Constantine 1 Frères Mentouri).

Président du jury : Dr Cheriti Oumnya (MAB - U Constantine 1 Frères Mentouri).

Encadrant : Mme Boughaba Rokia (MAB - U Constantine 1 Frères Mentouri).

Examinateuse : Dr Sahli Leila (Professeur - U Constantine 1 Frères Mentouri).