

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ DE BLIDA 1
Faculté de Technologie
Département de Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Spécialité : Gestion Durable des déchets et Procédés de Traitements

Intitulé du mémoire

**Conception et test du système de compostage
intelligent contrôlé par capteurs**

Présenté par :

- MAMECHE Mustapha

Encadré par :

- Dr. SAKRI

Année universitaire 2022/2023

REMERCIEMENTS

*J'exprime tout d'abord ma reconnaissance envers **Allah**, le Tout-Puissant, pour m'avoir guidé tout au long de nombreuses années d'études et pour m'avoir accordé la volonté, la patience et le courage nécessaires pour mener ce travail à terme.*

*Tout d'abord, mes remerciements vont à mon directeur de mémoire, Madame **A. Sakri**, pour sa guidance, son soutien et ses précieux conseils tout au long de ce projet. Votre expertise et votre engagement ont été essentiels pour mener à bien cette recherche.*

*Je souhaite également remercier sincèrement les membres de mon jury d'évaluation, Mme **K. BOUTEMAK** et Mr **K. CHANANE**, pour leur temps, leur attention et leurs commentaires constructifs. Leurs remarques et suggestions ont grandement enrichi ce travail et m'ont poussé à aller plus loin dans ma réflexion.*

Enfin, je souhaite remercier ma famille pour leur amour, leur soutien indéfectible et leur compréhension pendant cette période de recherche intense. Votre présence et vos encouragements ont été une source d'inspiration constante

Mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire. Votre aide précieuse restera à jamais gravée dans ma mémoire.

ملخص

يعتبر تحويل النفايات المنزلية إلى سماد وما شابهها طريقة لاستعادة الجزء العضوي على أساس التخمير الهوائي في وجود الأكسجين والكائنات الحية الدقيقة التي ستحلل وتخصب هذا الجزء لإنتاج السماد. خضعت هذه العملية لتطور واسع مع مرور الوقت، ونظرًا لأنها تستغرق وقتًا طويلاً، فقد ولدت الفكرة العامة لتحسين وتسريع نشاط الكائنات الحية الدقيقة، وتتكون من صندوق سماد مزود بلوحة تطوير Arduino التي تقرأ وتتحكم في العناصر المختلفة من المعدات المثبتة في الحاوية لتوفير بيئة مواتية لنشاط الكائنات الحية الدقيقة (السماد الذكي). الهدف من هذه الدراسة وتحقيقها هو تحسين عملية تدهور النفايات واستغلال البيئة المثلى للكائنات الحية الدقيقة.

الكلمات المفتاحية : الكائنات الحية الدقيقة، الانتعاش، التخمير الهوائي، التسميد، البيئة الملائمة، السماد الذكي.

RESUME

Le compostage des déchets ménagers et assimilés est une méthode de valorisation de la fraction organique basée sur la fermentation aérobie en présence de l'oxygène et des microorganismes qui vont dégrader et fertiliser cette fraction pour avoir un composte, Cette opération a connu un vaste développement au cours du temps et vue que cette dernière occupe un large intervalle de temps l'idée général est née dans le but d'améliorer et accélérer l'activité des microorganismes. Il s'agit d'un casier de compostage équipé par une carte de développement Arduino qui va lire et commander les différents équipements installés au sein du casier pour fournir le milieu favorable de l'activité des microorganismes (composteur intelligent). Cette étude et réalisation ont pour but d'optimiser le processus de la dégradation des déchets et exploiter le milieu optimale des microorganismes

Mots clés : Microorganismes, valorisation, fermentation aérobie, compostage, milieu favorable, composteur intelligent.

ABSTRACT

Composting household and similar waste are a method of recovering the organic fraction based on aerobic fermentation in the presence of oxygen and microorganisms that will degrade and fertilize this fraction to produce compost. This operation has undergone extensive development over time, and given that it takes long period, the general idea was born to improve and accelerate the activity of microorganisms, it consists of a composting bin equipped with an Arduino development board which reads and controls the various items of equipment installed in the bin to provide a favorable environment for microorganism activity (intelligent composter). The aim of this study and realization is to optimize the waste degradation process and exploit the optimal environment for microorganisms.

Key words: Microorganisms, recovery, aerobic fermentation, composting, favorable environment, smart composter.

TABLES DES MATIERES

LISTES DES FIGURES.....	I
LISTES DES TABLEAUX.....	II
LISTE DES ABREVIATIONS	III
INTRODUCTION GENERALE	1

CHAPITRE I ETUDE DE L'ETAT DE L'ART

ETUDE DE L'ETAT DE L'ART	I
I.1 Notion générale de déchets	4
I.2 Définition de déchet organique	4
I.3 Composition des déchets organique.....	4
I.4 Caractérisation des déchets en Algérie	5
I.4.1 Classification des déchets	6
I.4.2 Source de déchets.....	6
I.5 Méthodes de traitement de déchets organique	8
I.6 Le Processus de Compostage	9
I.6.1 La phase mésophile.....	10
I.6.2 La phase Thermophile.....	10
I.6.3 La phase de refroidissement	11
I.6.4 La phase de Maturation	11
I.7 Facteurs affectant le processus de compostage.....	12
I.7.1 Température.....	12
I.7.2 Potentiel hydrogène pH.....	13
I.7.3 Aération.....	13
I.7.4 Taux d'Humidité.....	14
I.7.5 Rapport C/N.....	14
I.8 Etude de Cas de compostage intelligent	15
I.8.1 Introduction	15

CHAPITRE II MATERIELS ET METHODES

MATERIELS ET METHODES	II
Introduction.....	24
II.1 Système de compostage intelligent	25
II.2 Conception du composteur :	25
II.3 Pierre réfractaire.....	27
II.4 Les différents composants électroniques du composteur	28

II.4.1 Arduino Uno	28
II.4.2 Capteur de température DS18B20 :	28
II.4.3 Capteur de l'humidité :	29
II.4.4 Micro Pompe.....	30
II.4.5 Resistance grill 1500W	30
II.4.6 Moteur rôtissoire	31
II.4.7 Afficheur LCD i2C	31
III.1 Essai de dispositif	32
III.1.1 Les types de déchets compostable.....	32
III.1.2 La composition des déchets.....	33
III.2 Les paramètres de suivi	36
III.2.1 La Température :	36
III.2.2 Taux d'Humidité.....	37
III.2.3 pH	38
III.2.4 La matière organique MO et la Proportion COT	38

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS

RESULTATS ET DISCUSSIONS	III
IV.1 Composteur	40
IV.1.1 Assemblage et fonctionnement du dispositif.....	40
IV.2 Compostage	42
IV.2.1 Perspective physique de compost	42
IV.2.2 La variation du volume	43
IV.3 Variation des paramètres physicochimiques	43
IV.3.1 Température.....	43
IV.3.2 Evolution de Taux d'Humidité.....	45
IV.3.3 La variation pH	46
IV.3.4 Matière organique et Carbone organique total.....	47
CONCLUSION GENERALE	49
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	50

LISTES DES FIGURES

Figure I-1 : Composition moyenne des DMA- 4 saisons Algérie- 2018/2019.....	5
Figure I-2 : Composition Moyenne Nationale (DMA) 2018.....	6
Figure I-3 : Les différents phases du compostage	9
Figure I-4 : La variation de température des organismes	11
Figure I-5 : Page principale - sélection / création de pieux	17
Figure I-6 : Informations sur les andains.....	17
Figure I-7 : Différentes visualisations des données stockées	17
Figure I-8 : Système de control de la Machine de compostage.....	19
Figure I-9 : Le dispositif de compostage.....	19
Figure I-10 : Communication série entre Arduino et l'unité MCU.....	21
Figure I-11 : Schéma du système de compostage.....	21
Figure II-1 : Composteur au cours de fabrication	25
Figure II-2 : Fonctionnement du dispositif	26
Figure II-3 : Pierre réfractaire	27
Figure II-4 : Capteur de Température DS18B20	28
Figure II-5 : Arduini uno	28
Figure II-6 : Capteur d'Humidité du sol.....	29
Figure II-7 : Micro Pompe 5V.....	30
Figure II-8 : Resistance 1500w	30
Figure II-9 : Moteur rôtissoire.....	31
Figure II-10 : Afficheur LCD i2c.....	31
Figure II-11 : Fumier de cheval.....	34
Figure II-12 : Déchets vert	34
Figure II-13 : Echantillon au cours de procédé	35
Figure II-14 : Afficheur de Température	36
Figure II-15 : Afficheur de l'Humidité	37
Figure III-1 : Vue de face du dispositif.....	40
Figure III-2 : Vue droite du dispositif	41
Figure III-3 : Vue 3d du dispositif.....	41
Figure III-4 : Compost	42
Figure III-5 : Refus	42
Figure III-6 : Variation de la Température au cours de procédés	44
Figure III-7 : Variation de l'Humidité au cours de procédés	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Sources et natures des déchets (Julien, 2005).....	7
Tableau II-1 : Teneur en azote et C/N de divers déchets (Golueke, 1977)	33
Tableau III-1 : Variation de la masse du déchet.....	43
Tableau III-2 : Variation du pH.....	46
Tableau III-3 : Variation de la MO et COT.....	47

LISTE DES ABREVIATIONS

ATP : Adénosine-Triphosphate

CO₂ : dioxyde de carbone

C/N : Rapport Carbone Azote

COT: Carbone organique total

DMA : Déchet ménagers assimilés

GPRS : General Packet Radio Service

GSM : Global System for Mobile Communication

Hab : Habitant

HTTPS : HyperText Transfer Protocol

IdO : L'internet des objets

MO : Matière organique

Rpm : Revolutions per minute

Tpm : Tour par minute

%H : Taux d'humidité

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Ces dernières années, les pratiques durables et respectueuses de l'environnement ont suscité un intérêt croissant, en particulier dans le domaine de la gestion des déchets.

Le compostage est l'une de ces pratiques qui a gagné en popularité en tant que moyen de réduire la quantité de déchets qui finissent dans les décharges et de contribuer à la création d'un sol sain pour la croissance des plantes. Toutefois, les méthodes traditionnelles de compostage peuvent prendre du temps et d'espace et de main-d'œuvre, ce qui peut être un défi pour les zones urbaines disposant de ressources limitées.

Les technologies de compostage intelligent, telles que les systèmes basés sur des capteurs, sont apparues comme une solution prometteuse pour relever ces défis et promouvoir des pratiques durables de gestion des déchets. [1]

Le compostage intelligent est une approche relativement nouvelle qui vise à optimiser le processus de compostage en utilisant la technologie pour surveiller et contrôler divers facteurs tels que la température, les niveaux d'humidité et l'aération.

L'objectif de ce mémoire est d'explorer l'efficacité du compostage intelligent en tant que méthode viable de gestion des déchets et d'explorer le potentiel des technologies de compostage intelligent pour les zones urbaines et d'évaluer leur efficacité en matière de réduction des déchets, d'amélioration de la qualité des sols et de promotion de l'agriculture durable.

Cette étude se concentrera sur la conception et la mise en œuvre d'un système de compostage intelligent qui utilise des capteurs et des analyses de données pour surveiller le processus de compostage et optimiser les conditions de compostage.

La première partie du manuscrit s'appuyant sur un chapitre présentant l'état de l'art de la thématique abordée, les notions nécessaires à la description du procédé de compostage et une étude de cas de compostage intelligent.

La partie essentielle de ce travail constituant la seconde partie qui regroupe deux chapitres qui sont :

Matériels et Méthodes : représente la conception du dispositif et les équipements utilisés, et le test du composteur ;

Résultats et discussion : représente une description de l'état final de dispositif et le mode de son fonctionnement, et les résultats obtenus au cours du procédés ;

Et enfin une conclusion générale et perspectives.

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I
ETUDE DE L'ETAT DE L'ART

CHAPITRE I

ETUDE DE L'ETAT DE L'ART

I.1 Notion générale de déchets

Les déchets sont jetés, rejetés ou ne sont plus des substances ou des matériaux utiles qui doivent être éliminés ou recyclés. Les déchets peuvent être divisés en différentes catégories telles que les déchets municipaux, les déchets industriels, les déchets dangereux et les déchets électroniques, en fonction de leur source, de leur composition et de leur impact potentiel sur l'environnement et la santé humaine. [2]

I.2 Définition de déchet organique

Les déchets municipaux, également appelés déchets solides urbains, sont les déchets produits par les ménages, les activités commerciales et les institutions situés dans une zone géographique spécifique, telle qu'une ville. Ils comprennent un large éventail de matériaux, tels que les déchets alimentaires, le papier, le plastique, le verre, le métal et d'autres types de déchets. Les déchets municipaux peuvent également contenir des matières dangereuses ou toxiques, telles que des produits chimiques, des piles ou des appareils électroniques, qui nécessitent une manipulation et une élimination particulières.[3]

I.3 Composition des déchets organique

Les déchets organiques sont une vaste catégorie de déchets qui comprend un large éventail de matières biodégradables, telles que les déchets alimentaires, les déchets de jardin et les déchets agricoles. La composition des déchets organiques peut varier en fonction de la source et du degré de contamination, mais elle comprend généralement de grandes quantités de carbone et d'azote, ainsi que d'autres nutriments et composés organiques. [4]

Voici une ventilation de la composition des déchets organiques selon une étude publiée dans la revue Waste Management :

- Déchets alimentaires : 70-90% d'humidité, 10-30% de solides (y compris les hydrates de carbone, les protéines, les lipides et d'autres composés organiques)
- Déchets de jardin : 50-70 % d'humidité, 30-50 % de matières solides (y compris la cellulose, l'hémicellulose, la lignine et d'autres composés organiques).
- Déchets agricoles : varient en fonction de la culture et de la méthode de récolte,

mais comprennent généralement des résidus végétaux, du fumier animal et d'autres matières organiques.[5]

I.4 Caractérisation des déchets en Algérie

En Algérie, la fraction de déchets ménagers et assimilés (DMA) représente la plus grande partie des déchets solides produits, avec une quantité estimée à plus de 13,1 millions de tonnes en 2018, sur la base d'une population estimée à 42,2 millions d'habitants et d'un taux moyen de production de déchets de 0,8 kg/hab/jour.

111Au cours de la dernière décennie, la quantité et la qualité des DMA ont augmenté, ce qui a accru les risques pour l'environnement et la santé publique. Cette situation est particulièrement préoccupante étant donné que le taux de traitement et de valorisation des déchets est relativement faible.[6]

Pendant les deux dernières décennies, l'Algérie a connu une croissance démographique et un développement urbain incontrôlés, ce qui a créé un important écart entre les capacités des infrastructures existantes et la production des déchets urbains, malgré les efforts déployés par les autorités. En 2018, la production de déchets ménagers et assimilés (DMA) a été estimée à 13,1 millions de tonnes. [6]

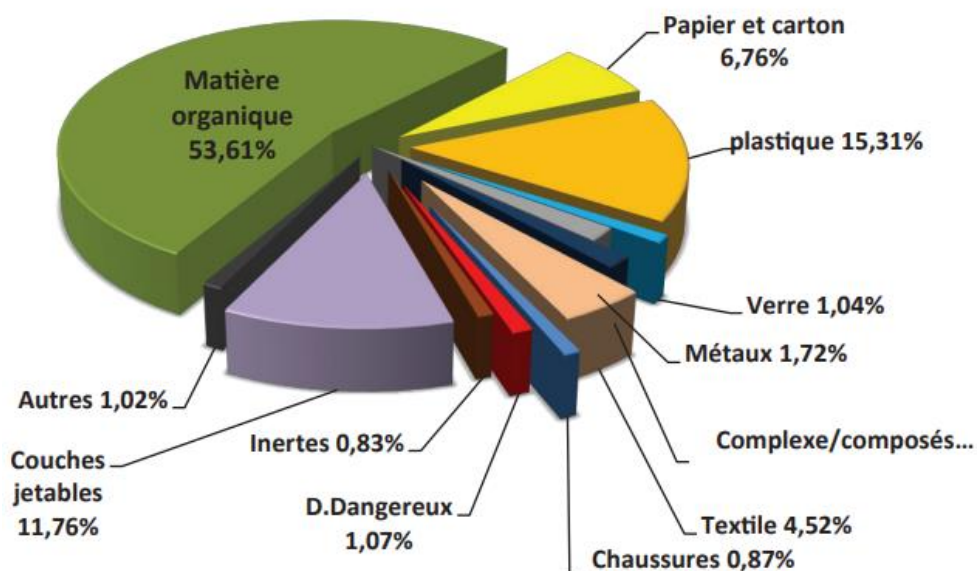


Figure I-1 : Composition moyenne des DMA- 4 saisons Algérie- 2018/2019(AND)

I.4.1 Classification des déchets

La matière résiduelle peut être classée selon divers critères tels que leur état physique (solide, liquide ou gazeux), leur caractère dangereux ou non dangereux, leur origine, leur composition, ainsi que leurs propriétés physiques et chimiques.

De plus, ils peuvent être catégorisés selon l'activité à l'origine du déchet, la nature du déchet, ou encore le mode (filiale) d'élimination du déchet. En fonction de la méthode de traitement et d'élimination, on peut distinguer différents types de déchets. [7]

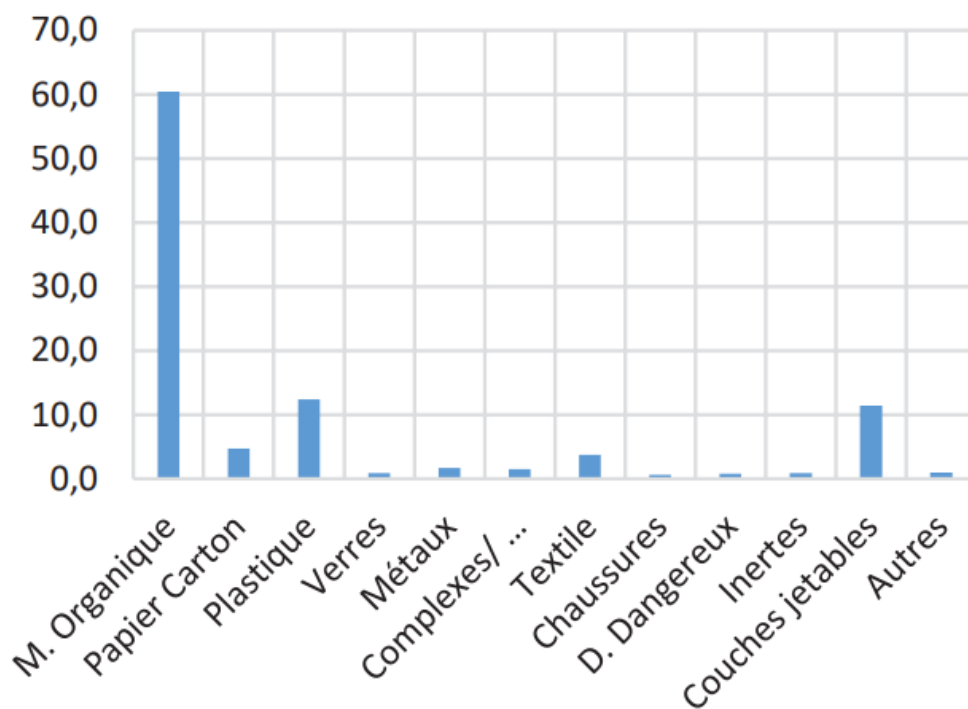


Figure I-2 : Composition Moyenne Nationale (DMA) 2018 (AND)

I.4.2 Source de déchets

Les sources de déchets en Algérie sont multiples et diverses. Selon une étude menée par le Ministère de l'Environnement algérien en 2018, les principales sources de déchets dans le pays sont :

- **Les ménages** : les déchets ménagers et assimilés (DMA) représentent la fraction la plus importante des déchets solides générés en Algérie, avec une quantité estimée à plus de 13,1 millions de tonnes pour l'année 2018, selon cette même étude.
- **Les activités économiques** : les déchets produits par les entreprises, les industries, les commerces et les administrations représentent également une part importante des déchets générés en Algérie.

- **Les travaux publics et les chantiers de construction** : les déchets issus des travaux publics et des chantiers de construction sont également une source importante de déchets en Algérie.
- **Les activités agricoles** : les déchets produits par les activités agricoles, tels que les résidus de récolte et les emballages agricoles, constituent également une source de déchets non négligeable.[8]

Tableau I-1 : Sources et natures des déchets (Julien, 2005).

SOURCES	NATURE	FREQUENCE DE COLLECTE
Ménages	Déchets biodégradable (forte proportion), plastique, verre, textile, papier, carton,	Journalière
Marchés	Semblable à ceux des ménages mais en plus faible quantité	Journalière
Magasins/boutiques	Les matières plastiques, les papiers et cartons sont en forte proportion	Journalière sauf les jours nonouvrables
Restaurants	Déchets biodégradables (forte proportion), plastiques, carton etc.	Journalière
Ecoles	Les papiers, les cartons et les matières plastiques sont en forte proportion	5 jours/7
Bureaux administratifs	Les papiers, cartons sont en forte proportion	5 jours/7
La pêche	Les déchets biodégradables rencontrés sur les côtes sont en forte proportion.	Journalière
Hôtels	Les déchets biodégradables sont en forte proportion	Journalière

I.5 Méthodes de traitement de déchets organique

Le choix de la méthode de gestion des déchets organiques dépend de plusieurs facteurs, notamment la quantité et la qualité des déchets, la disponibilité des infrastructures et des ressources, ainsi que les réglementations et politiques locales. [9]

- **Compostage** : Il s'agit du processus de décomposition des déchets organiques en substances stables et riches en nutriments qui peuvent être utilisées comme amendements du sol ou engrais. Le compostage peut être effectué à petite échelle (comme le compostage domestique) ou à grande échelle (comme une installation de compostage commerciale).
- **Digestion anaérobie** : Il s'agit d'un processus qui utilise des micro-organismes pour décomposer les déchets organiques en l'absence d'oxygène, produisant du biogaz (un mélange de méthane et de dioxyde de carbone) et des substances riches en nutriments pouvant être utilisées comme engrais.
- **Vermicompostage** : Il s'agit d'une méthode de compostage qui utilise des vers de terre pour décomposer les déchets organiques en un matériau riche en nutriments appelé vermicompost.
- **Épandage** du sol : Il s'agit d'appliquer les déchets organiques directement sur les champs agricoles comme amendement du sol ou engrais.
- **Incinération** : Il s'agit du processus de combustion des déchets organiques à haute température, produisant de la chaleur et de l'énergie pouvant être utilisée pour produire de l'électricité.

Il convient de noter que dans la hiérarchie des déchets, la réduction à la source et la réutilisation sont considérées comme les méthodes de gestion des déchets les plus privilégiées, suivies de la récupération et du recyclage, puis de l'élimination. Par conséquent, des efforts doivent d'abord être faits pour réduire la production de déchets organiques et trouver des moyens de réutilisation et de recyclage avant de recourir à des méthodes d'élimination.[10]

I.6 Le Processus de Compostage

Le compostage, qui est une biodégradation d'un mélange de substrats organiques réalisée par une communauté microbienne dans des conditions aérobies et à l'état solide. Le processus est exothermique et produit de l'énergie sous forme de chaleur, ce qui se traduit par une augmentation de la température dans la masse.[11]

L'augmentation de la température dans la masse. Un processus spontané passe donc par une phase thermophile, précédée et suivie de deux phases mésophiles [Fig 3]

Il y a une libération temporaire de phytotoxines au début du processus, mais en fin de processus, la phytotoxicité est totalement éliminée et le produit final, le compost, est bénéfique pour la croissance des plantes.

Le compost est produit principalement pour surmonter la phytotoxicité de la matière organique fraîche, réduire la présence d'agents pathogènes et produire un engrais organique ou un sol à partir de la matière organique non stabilisée. En fin de processus, le produit final est principalement constitué de dioxyde de carbone, d'eau, de minéraux et de matière organique stabilisée (compost).[12]

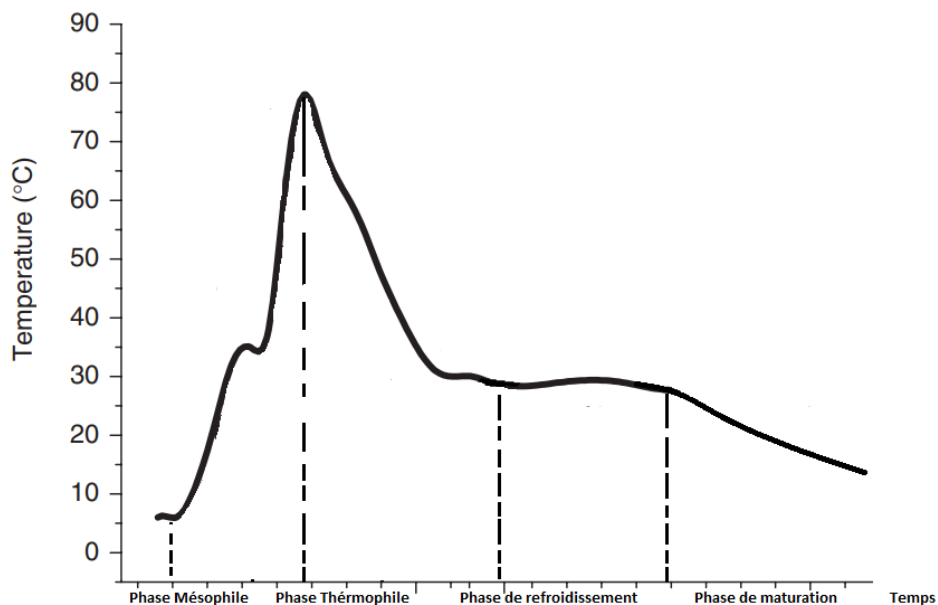


Figure I-3 : Les différents phases du compostage (Compost science and technology)

I.6.1 La phase mésophile

Pendant la phase mésophile, qui se déroule entre 25 et 40 degrés Celsius, les sucres et les protéines facilement dégradables qui sont riches en énergie sont abondants et sont dégradés par des champignons, des actinobactéries et des bactéries, également connus sous le nom de décomposeurs primaires.[13]

Si les influences mécaniques sont faibles, des animaux tels que des vers de compost, des acariens, des mille-pattes et d'autres espèces de la mésofaune se développent et agissent en tant que catalyseurs.

Leur contribution varie selon la méthode de compostage, mais dans le cas du lombricompostage, elle est considérable. Le nombre d'organismes mésophiles dans le substrat d'origine est beaucoup plus élevé que le nombre d'organismes thermophiles, mais l'activité des décomposeurs primaires entraîne une augmentation de la température. Cette phase est également appelée phase de démarrage. [14]

I.6.2 La phase Thermophile

Au cours du compostage, les organismes thermophiles remplacent progressivement la flore mésophile, bénéficiant ainsi d'un avantage concurrentiel.

Les organismes mésophiles meurent et sont finalement dégradés par les organismes thermophiles qui leur succèdent, en même temps que le substrat restant facilement dégradable. [15]

Le processus de décomposition s'accélère jusqu'à atteindre une température d'environ 62°C, qui est la température maximale de croissance des champignons thermophiles.

Les bactéries et actinobactéries tolérant des températures élevées restent actives et leurs enzymes thermotolérantes peuvent provoquer une augmentation de la température au-delà de 65°C, entraînant la destruction de la plupart des micro-organismes.

Quatre zones principales peuvent être identifiées dans un tas de compost, chacune avec des températures et des niveaux d'oxygène différents.[16]

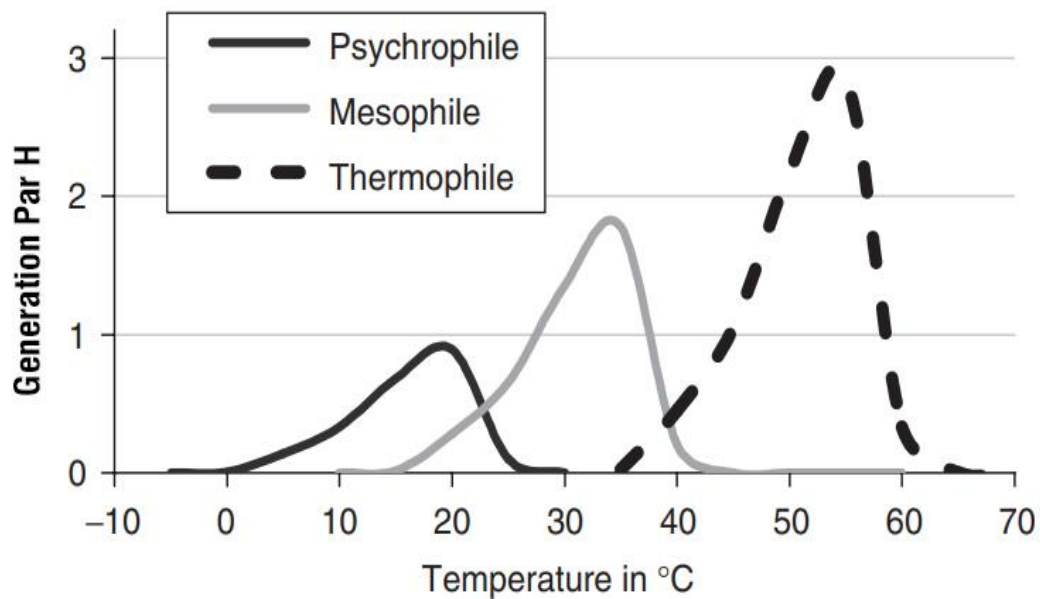


Figure I-4 : La variation de température des organismes (Compost science and technology)

I.6.3 La phase de refroidissement

Après l'épuisement des substrats, l'activité des organismes thermophiles ralentit et la température commence à décroître. À ce stade, les organismes mésophiles ont l'opportunité de recoloniser le substrat en utilisant différentes méthodes, telles que la germination de spores survivantes, la propagation à partir de microniches protégées ou l'inoculation externe. [17]

I.6.4 La phase de Maturation

Au cours de la phase de maturation, la qualité du substrat se détériore progressivement, conduisant à des changements successifs dans la composition de la communauté microbienne. En règle générale, les champignons deviennent plus abondants tandis que les bactéries diminuent en nombre. Des composés insolubles, tels que les complexes lignine-humus, commencent à s'accumuler et à prédominer dans le substrat, car ils ne sont pas dégradables par les microorganismes. [18]

I.7 Facteurs affectant le processus de compostage

Le compostage étant un processus biologique, il est fondamentalement affecté par l'ensemble des facteurs environnementaux qui déterminent le cours de l'action dans tous les systèmes biologiques.

De facteurs environnementaux qui déterminent le cours de l'action dans tous les systèmes biologiques.

Les principaux facteurs environnementaux d'intérêt pour le compostage sont la température, le pH, l'aération, l'humidité.[19]

I.7.1 Température

Le compostage est un processus biologique qui implique la dégradation microbienne bio-oxydante de la matière organique mélangée.

Ce processus génère une quantité considérable d'énergie, mais seulement 40 à 50% de cette énergie peut être utilisée par les micro-organismes pour synthétiser de l'ATP. Le reste de l'énergie est dissipé sous forme de chaleur dans la masse, provoquant une augmentation de la température pouvant atteindre 70-90°C.

Cette élévation de température peut ralentir le processus de compostage en inhibant la croissance microbienne, sauf pour certaines espèces de bactéries thermophiles qui présentent une activité métabolique supérieure à 70°C.

Pour obtenir un taux de biodégradation optimal et une diversité microbienne maximale, il est recommandé de maintenir la température entre 30 et 45°C.

Il est également important de maintenir la phase thermophile au début du processus de compostage pour éliminer les agents pathogènes, mais sans éliminer complètement cette phase.

Dans les systèmes d'aération forcée, l'élimination de la chaleur est principalement effectuée par refroidissement par évaporation, tandis que la contribution de la conduction à l'élimination de la chaleur peut être faible.

Enfin, une régulation de la température par rétroaction peut être utilisée pour minimiser le temps de rétention du processus de compostage. [20]

I.7.2 Potentiel hydrogène pH

En général, les matières organiques ayant une large gamme de pH (de 3 à 11) peuvent être compostées (de Bertoldi et al., 1985). Cependant, la plage optimale se situe entre 5,5 et 8,0. Alors que les bactéries préfèrent un pH presque neutre, les champignons se développent mieux dans un environnement assez acide.

Dans la pratique, le niveau de pH dans une masse de compostage ne peut pas être modifié facilement.

Le pH commence à baisser au début du processus (c'est-à-dire jusqu'à 5,0) en raison de l'activité des bactéries acidifiantes qui décomposent les matières carbonées complexes en acides organiques comme produits intermédiaires.

Lorsque cette phase d'acidification est terminée et que les métabolites intermédiaires sont complètement minéralisés, le pH a tendance à augmenter et, à la fin du processus, il se situe autour de 8,0-8,5. [21]

I.7.3 Aération

La technologie du compostage peut avoir un impact significatif sur la quantité d'oxygène disponible dans la masse de compostage, qui est un facteur critique pour le maintien de conditions aérobies.

Comme les micro-organismes consomment de l'oxygène au cours du processus de compostage, le niveau d'oxygène à l'intérieur de la masse de compostage diminue tandis que les niveaux de dioxyde de carbone augmentent.

Si la teneur en oxygène est trop faible, les micro-organismes anaérobies commenceront à dominer et à produire des sous-produits de fermentation et de respiration anaérobie, ce qui compromettra la qualité du compost final.

Il est donc essentiel d'assurer un apport constant d'oxygène pour maintenir des conditions aérobies.

La ventilation est la méthode la plus courante pour fournir de l'oxygène à la masse de compostage. [22]

Une bonne ventilation permet également de contrôler la température et l'humidité. En règle générale, un tas de compostage à 60°C nécessite un rapport air/fonction de 9:1 pour renouveler l'oxygène et contrôler la température.

La quantité d'air nécessaire augmente à des températures plus basses. Pour maintenir des conditions aérobies, il est important de ventiler la masse à un taux

spécifique, tel que 0,15 m³ d'air par tonne métrique humide de masse par minute, afin d'éviter l'épuisement de l'oxygène. Le contrôle de la température par réaction rétroactive peut également aider à réguler la température et l'apport d'oxygène. [23]

I.7.4 Taux d'Humidité

L'eau est essentielle à toute activité microbienne et doit être présente en quantités appropriées tout au long du cycle de compostage. La teneur en eau optimale du matériau de départ varie et dépend essentiellement de l'état physique et de la taille des particules ainsi que du système de compostage utilisé.

Normalement, un taux d'humidité de 60 % dans le matériau de départ devrait être satisfaisante. Comme les matériaux ont des capacités de rétention d'eau différentes, il n'est pas possible de faire une généralisation exacte de la teneur en eau optimale du matériau de départ. Il n'est pas possible de généraliser exactement les niveaux d'humidité optimaux au départ ou au cours du temps.

Un taux d'humidité trop faible entraîne une déshydratation précoce de la masse, ce qui interrompt le processus biologique, ce qui donne un compost physiquement stable mais biologiquement instable. Un excès d'eau a tendance à boucher les pores et à entraver les échanges gazeux.

Cependant, il convient de maintenir un bon équilibre entre les besoins en eau disponible et les échanges gazeux. Un excès d'humidité dans le matériau de départ peut favoriser les processus anaérobies, ce qui se traduit par un processus plus lent et un produit final de mauvaise qualité. [24]

I.7.5 Rapport C/N

Le rapport entre le carbone organique et l'azote total (C/N) est un élément clé du bilan nutritif global. En général, un rapport C/N d'environ 25-30 est considéré comme optimal pour la plupart des déchets.

Les micro-organismes vivants ont besoin d'environ 30 parties de carbone pour chaque partie d'azote dans leur métabolisme. Dans ce processus, environ 20 parties de carbone sont converties en CO₂, produisant de l'ATP, tandis que les 10 autres parties sont utilisées pour synthétiser le protoplasme. Le rapport moyen entre le carbone et l'azote chez de nombreuses bactéries est d'environ 9-10. [25]

I.8 Etude de Cas de compostage intelligent

I.8.1 Introduction

La technologie du compostage intelligent fait référence à l'utilisation de technologies modernes telles que les capteurs, l'automatisation et l'analyse de données pour optimiser et rationaliser le processus de compostage.

Elle permet un contrôle plus précis et plus efficace des facteurs environnementaux qui influent sur le processus de compostage, ce qui se traduit par des durées de compostage plus courtes et un compost de meilleure qualité.

- **Essai en Grèce**

Ce cas présente les avantages du compostage, un processus de biodégradation qui permet de transformer les déchets organiques en un produit stable et utile. Le compost peut être utilisé comme engrais ou comme conditionneur de sol, ce qui en fait une excellente option pour la gestion des déchets solides.

Le processus de compostage est contrôlé en surveillant la température, l'humidité et la teneur en oxygène. Ces facteurs influencent l'activité des micro-organismes impliqués dans le processus. Il est donc essentiel de surveiller ces paramètres pour maintenir des conditions optimales et éviter les écarts.

Bien qu'il existe peu d'études sur les applications de surveillance en réseau des paramètres de compostage, la présente étude est une solution de surveillance complète qui utilise des capteurs pour mesurer divers paramètres et transmet les données à un serveur par l'intermédiaire d'un système GPRS.

Une application web est utilisée pour visualiser et gérer les piles de compostage, ce qui rend l'ensemble du système polyvalent, fiable et rentable. Dans l'ensemble, ce système de surveillance constitue une approche innovante pour garantir la qualité et l'efficacité du processus de compostage.

Le composant central et l'aspect le plus crucial du système est le dispositif de surveillance, qui est chargé de prendre des mesures telles que la température, l'humidité de l'air, l'humidité du sol et le méthane.

Des études antérieures ont utilisé des dispositifs autonomes placés à différentes profondeurs dans le sol pour obtenir des résultats plus précis. En revanche, la présente étude a opté pour une approche plus conventionnelle en utilisant des sondes équipées de capteurs appropriés. Ces capteurs sont fixés sur la sonde, qui est utilisée pour pénétrer dans le tas de compost à différents niveaux afin de recueillir des mesures multi-niveaux.

Les données analogiques collectées par les capteurs sont ensuite traitées par un microcontrôleur, qui permet la transmission agile des données à l'aide d'un module GSM doté d'une carte SIM. Le module est connecté au microcontrôleur et transmet les données à un serveur de base de données via le protocole HTTP.

L'étude a fait appel à des technologies libres, en utilisant un microcontrôleur Arduino Mega avec un Arduino GSM Shield V1 pour la communication. Les capteurs utilisés comprenaient trois capteurs de température de modèle DS18B20 de Maxim Integrated, le capteur d'humidité/température DHT11 pour l'air, un capteur d'humidité/température pour l'eau et un capteur d'humidité/température pour l'air.

Le système présenté présente l'avantage majeur de permettre une visualisation et une interaction en temps réel avec les données. L'application web est très dynamique et offre une variété de fonctionnalités, telles que l'initialisation et la fin des piles de compost, la surveillance et l'interaction avec les piles. Contrairement à d'autres interfaces web décrites dans des recherches antérieures (Lopez et al., 2014).

L'application web présentée permet non seulement de surveiller l'état des andains, mais aussi de contrôler et de gérer les piles de compost de manière globale. Cette application polyvalente offre une meilleure visualisation du champ de compost et peut s'étendre pour inclure des capteurs et des sites supplémentaires, créant ainsi une solution complète pour la gestion et la supervision des unités de compostage. La figure 1 montre une capture d'écran de la page principale, où chaque andain est représenté par une couleur spécifique en fonction de son état d'avancement : Frais (bleu), Mésophile (orange), Thermophile (rouge), Maturation (vert) et Stable (brun). Cette fonctionnalité facilite l'observation directe de l'évolution des andains.

L'application web comporte également un système d'authentification qui permet aux utilisateurs de s'enregistrer en tant qu'utilisateur ou en tant qu'administrateur (responsable du compostage). Les administrateurs peuvent créer, modifier ou supprimer des tas, attacher ou détacher des capteurs à des tas spécifiques et gérer les utilisateurs de l'application. Ils ont également accès à tous les types de présentation de données et peuvent télécharger des données spécifiques sur les piles. En revanche, les utilisateurs ne peuvent consulter que les présentations de données et les informations relatives aux piles et aux capteurs. [26]



Figure I-5 : Page principale - sélection / création de pieux

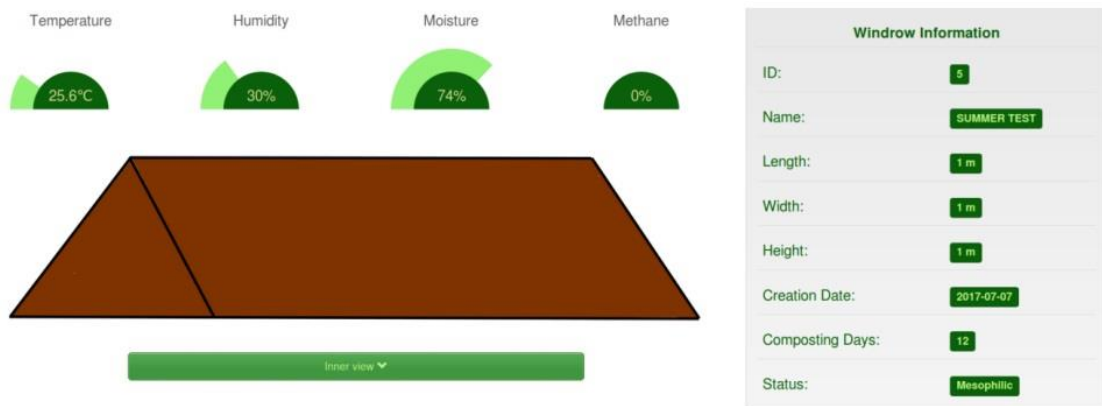


Figure I-6 : Informations sur les andains



Figure I-7 : Différentes visualisations des données stockées

La cohérence est un problème majeur pour les applications de ce type. Pour garantir la robustesse du système, des tests de cohérence ont été nécessaires. La consommation d'énergie est également une préoccupation lorsqu'il s'agit de dispositifs de surveillance à distance. Cependant, il n'a pas été possible d'activer/désactiver le module GSM à intervalles réguliers en raison de problèmes complexes. En guise de solution de rechange, un deuxième microcontrôleur a été utilisé pour alimenter le module GSM en cas de besoin, ce qui a amélioré la cohérence mais sacrifié la consommation d'énergie et la compacité.

Le système prend des mesures automatiquement toutes les heures, ce qui est un intervalle suffisant pour surveiller les processus de compostage selon des recherches antérieures. La précision des capteurs a été testée à l'aide d'équipements de laboratoire certifiés, et tout problème a été résolu en remplaçant ou en ajustant les capteurs.

Pour améliorer le segment de l'alimentation électrique et rendre l'appareil totalement autonome, les futures versions pourraient utiliser des panneaux solaires en combinaison avec des batteries Li-Po ou Li-Ion.

Un système de surveillance du compostage de deuxième génération est en cours de développement. Il utilisera une station centrale similaire au "Pile-hub" (Lopez et al., 2014 ; Casas et al., 2014), utilisant à la fois les technologies Wi-Fi et GSM. [19]

- **Essai Maroc**

Au Maroc, comme dans de nombreux pays en développement, les décharges ont été la principale méthode d'élimination des déchets en raison de leur simplicité et de leur faible coût par rapport à d'autres méthodes. Cependant, cette approche a produit une quantité importante de déchets, dont plus de 75 % sont organiques.

Si cette fraction organique n'est pas traitée en temps voulu, elle se décomposera naturellement dans les décharges et produira du biogaz, principalement composé de dioxyde de carbone et de méthane, qui contribue de manière significative au réchauffement de la planète. En outre, les lixiviats de ces décharges contaminent les nappes phréatiques. Le compostage est une méthode naturelle et traditionnelle de traitement des déchets qui offre de nombreux avantages, tels que l'hygiénisation, la rentabilité et la transformation des déchets en produits à valeur ajoutée.

Le prototype de compostage urbain est conçu comme un conteneur fermé d'une capacité de 0,930 m³. Le système utilise un processus de compostage à tambour rotatif pour traiter les résidus alimentaires, les résidus agricoles et tout effluent organique en utilisant un processus de fermentation aérobie.

Le tambour est constitué de feuilles d'acier inoxydable soudées à l'intérieur et est équipé d'un système d'aspiration active pour une introduction homogène de l'air dans le tambour. Le tambour rotatif est soutenu par un cadre constitué de tubes rectangulaires en acier noir mesurant 60 x 40 mm.

Deux portes situées sur la partie longitudinale du tambour (500, 450 mm) sont utilisées pour le chargement et le déchargement des déchets organiques solides. Un joint en caoutchouc est fixé sur la face intérieure de chaque porte pour assurer l'étanchéité et prévenir les fuites. Un ventilateur centrifuge aspirant à débit variable et à trous perforés sur la partie latérale du côté droit du tambour est utilisé pour aérer le tambour. Le tuyau de sortie d'air est situé sur le côté gauche du tambour.

Le tambour est guidé en rotation par deux paliers et tourne à une vitesse de 4 tr/min grâce à un moteur électrique et un réducteur avec un train d'engrenages à dents hélicoïdales et un système de poulies à courroie. La température, l'humidité, la teneur en NH₃, le niveau de PH et le niveau d'oxygène sont contrôlés par des capteurs installés sur le tube rond fixé sur le tube et soutenu par un palier lisse. Les données sont enregistrées à l'aide d'un automate programmable avec module de télégestion installé dans une armoire de commande.



Figure I-8 : Le dispositif de compostage



Figure I-9 : Système de contrôle de la Machine de compostage

L'équipe du laboratoire "LIMII", en collaboration avec Biodome, a conçu et réalisé une étude mécanique pour la machine de compostage. L'accent a été mis sur la télégestion des paramètres de compostage, avec des informations en temps réel transmises à un smartphone et à un ordinateur via 4G et Wifi.

Les informations reçues comprennent l'humidité, la température, le flux d'air et la rotation ou l'arrêt du tambour. Le système permet de contrôler à distance les fonctions marche/arrêt, la rotation du tambour, le temps de rotation, le temps d'attente, les injecteurs d'eau, le soufflage et l'aspiration de l'air, et l'activation du chauffage

Les actions manuelles se limitent à l'alimentation du composteur en déchets carbonés et azotés. Le système de télégestion peut être contrôlé à l'aide d'une application pour smartphone. [27]

- **Essai Inde**

Le compostage est un processus méticuleux qui décompose les déchets organiques pour produire un fumier riche en nutriments. Il nécessite une expertise et une attention constante. Toutefois, en raison de la nature du matériau et de facteurs opérationnels, les machines de compostage doivent être situées loin des zones résidentielles, ce qui rend la surveillance difficile.

Bien que les systèmes de compostage intelligents offrent des fonctionnalités avancées, ils ne peuvent pas remplacer entièrement la supervision humaine. Cet essai présente une solution basée sur le cloud qui intègre des machines de compostage avancées basées sur l'IdO.

Le système utilise des capteurs et un système de pompe pour effectuer les tâches, les données étant analysées en temps réel par le service en nuage. Le compostage intelligent sans surveillance a montré des résultats jusqu'à 30 % plus rapides que les méthodes traditionnelles. L'utilisation de cette technologie est plus pratique et permet d'utiliser les déchets de différentes manières.

L'internet des objets (IdO) connecte des objets physiques pour le partage de données sur l'internet. Il facilite les services intelligents avancés et réduit la nécessité d'une intervention humaine. La communication entre les objets de l'IdO et l'internet se fait sans fil ou par le biais de connexions câblées.

La cohérence et la consommation d'énergie sont des défis importants dans cette application. Des tests de cohérence ont été effectués pour améliorer la robustesse du système. En raison de problèmes avec le module Bluetooth, un second microcontrôleur a été utilisé pour l'alimenter selon les besoins, entraînant une légère augmentation de la consommation d'énergie et une réduction de la compacité.

Les mesures sont prises automatiquement toutes les heures, un intervalle jugé suffisant par d'autres chercheurs. Des tests de cohérence ont été réalisés en allumant et éteignant le système à différents moments. Les expériences ont été menées en intérieur et en extérieur dans des conditions contrôlées. Les capteurs ont été remplacés ou ajustés en cas de problèmes, et leur précision a été vérifiée en utilisant des équipements de mesure certifiés en laboratoire.

L'objectif de cet essai est de développer un système de compostage intelligent basé sur l'IdO pour contrôler à distance plusieurs composteurs. Arduino, qui s'interface facilement avec les modules Bluetooth et permet la connexion de différents dispositifs, est utilisé dans ce contexte. [28]

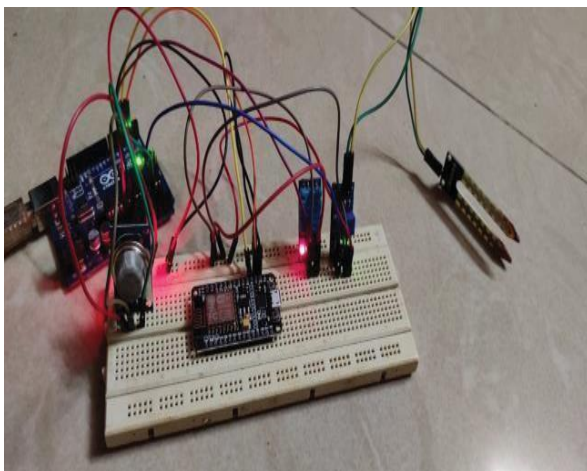


Figure I-10 : Communication série entre Arduino et l'unité MCU

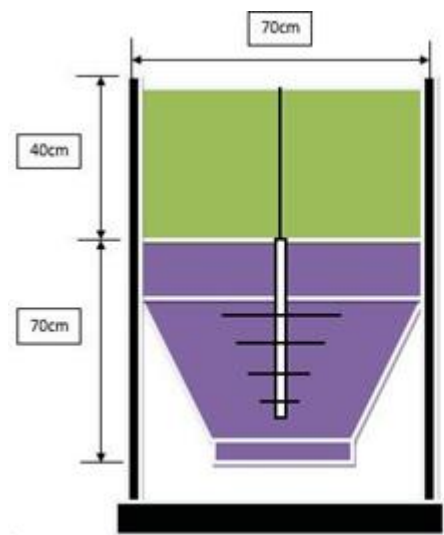


Figure I-11 : Schéma du système de compostage

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE II
MATERIELS ET METHODES

Introduction

L'une des principales caractéristiques de la technologie du compostage intelligent est l'utilisation de capteurs pour surveiller des paramètres clés tels que la température, l'humidité, le pH et les niveaux d'oxygène dans le tas ou le bac de compostage.

Ces données sont ensuite analysées en temps réel afin d'ajuster les conditions de compostage en fonction des besoins. Par exemple, si la température du tas de compost tombe en dessous de la plage optimale, le système peut automatiquement ajouter plus de matière organique ou ajuster le flux d'air pour maintenir des conditions optimales pour les micro-organismes.

La technologie de compostage intelligent peut également utiliser l'automatisation pour aider à gérer le processus de compostage. Par exemple, des mélangeurs automatisés peuvent être utilisés pour retourner le tas de compost, ce qui permet d'aérer le compost et d'assurer une décomposition homogène.

De même, des systèmes automatisés peuvent être utilisés pour ajouter de l'eau ou d'autres additifs au tas de compost en fonction des besoins.

Dans l'ensemble, la technologie du compostage intelligent peut améliorer considérablement l'efficacité et l'efficience du compostage, tout en réduisant la main-d'œuvre nécessaire à la surveillance et à la gestion manuelles.

Cette technologie peut être appliquée dans divers contextes, qu'il s'agisse de systèmes de compostage domestique à petite échelle ou de grandes installations de compostage industriel, contribuant ainsi à la réduction des déchets et à la promotion de l'agriculture durable.

CHAPITRE II

MATERIELS ET METHODES

II.1 Système de compostage intelligent

Un dispositif ou système de compostage intelligent est une solution technologique conçue pour optimiser et automatiser le processus de compostage.

Il comprend généralement des capteurs, des systèmes d'automatisation et d'analyse des données qui fonctionnent ensemble pour surveiller et gérer le tas ou le bac de compostage.

Dans l'ensemble, les dispositifs de compostage intelligents offrent un moyen plus efficace de composter les déchets organiques, en réduisant les besoins en main-d'œuvre et en améliorant la qualité du compost obtenu.

Ils peuvent être utilisés dans divers contextes, des systèmes de compostage domestique aux grandes installations de compostage industriel, et constituent un outil important pour promouvoir des pratiques durables de gestion des déchets.

II.2 Conception du composteur :

La conception d'un composteur intelligent implique l'intégration de la technologie, de l'ingénierie et des principes de conception durable afin de créer une solution efficace et écologique pour la gestion des déchets organiques.

Le concept repose sur l'idée d'utiliser des capteurs, l'automatisation et l'analyse de données pour optimiser et rationaliser le processus de compostage, réduire les déchets et promouvoir l'agriculture durable.

Le prototype réalisé pour ce mémoire est un casier fabriqué en bois multiplié avec quatre parois inclinées, deux parois verticales, une base inférieure et supérieure avec un volume total de 0.14 m³



Figure II-1 : Composteur au cours de fabrication

Il s'agit d'un casier de compostage équipé par une carte de développement Arduino, cette carte de développement va lire et commander les différents équipements installés au sein du casier pour fournir le milieu favorable de l'activité des microorganismes, Les Différents composant dans le composteur sont :

- Une carte de développement Arduino Uno
- Capteur de Température
- Capteur de l'Humidité
- Afficheur LCD
- Une micro Pompe de 5v
- Une résistance de 1500W
- Un régulateur de tension
- Moteur rôtissoire 2rpm/min
- Pierre réfractaire

Le composteur intelligent a pour fournir le milieu favorable des microorganismes pour améliorer leurs rendements de la biodégradation de la matière résiduelle organique.

Le procédé du compostage nécessite une variété de paramètres comme la température et le taux d'humidité et le rapport C/N qui doivent être bien déterminer avant et durant le process du compostage.

Le composteur est programmé pour atteindre les valeurs souhaitées au cours de du procédés, Le système automatique commande les différents composants par exemple, si la température capté et inférieur de 60 °c, l'Arduino va commander la résistance pour qu'elle soit allumé jusqu'à la température est souhaité

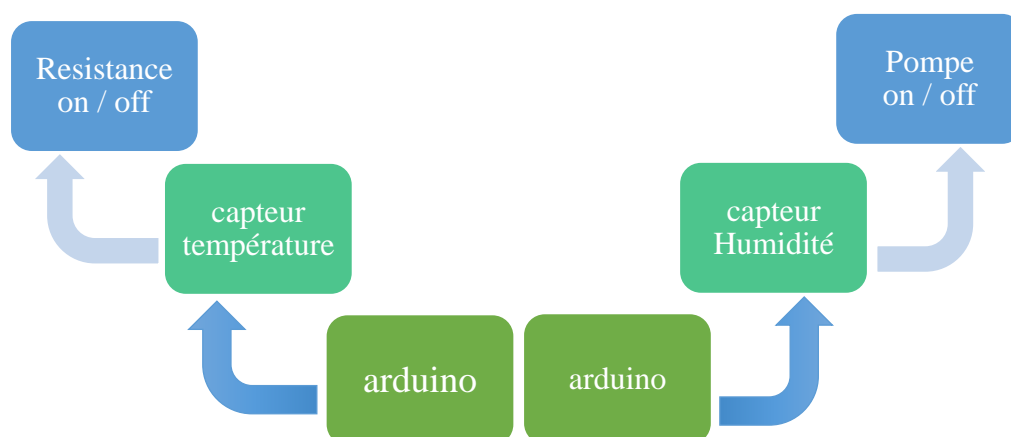


Figure II-2 : Fonctionnement du dispositif

II.3 Pierre réfractaire

La pierre réfractaire est un matériau solide et résistant à la chaleur qui peut être utilisé dans des environnements à haute température, tels que les fours, les poêles, les cheminées et les barbecues.

Ces pierres sont fabriquées à partir de matériaux céramiques spéciaux qui ont une capacité élevée à résister aux hautes températures sans se dégrader.

Les pierres réfractaires peuvent être utilisées pour créer des revêtements de four, des murs, des sols, des dalles ou des briques réfractaires pour les cheminées et les poêles à bois. Elles sont également utilisées dans l'industrie sidérurgique, les fonderies, les verreries, les cimenteries et d'autres applications nécessitant une forte résistance thermique.

Les pierres réfractaires peuvent être fabriquées à partir d'un large éventail de matériaux, tels que la brique réfractaire, la chamotte, l'argile réfractaire, la zircone, la magnésie et d'autres matériaux céramiques spéciaux. Elles sont disponibles dans une variété de tailles, de formes et d'épaisseurs pour répondre à différents besoins d'application, la pierre utilisée dans le composteur intelligent réalise pour ce mémoire est de dimension de 23x11x3 cm.



Figure II-3 : Pierre réfractaire

II.4 Les différents composants électroniques du composteur

II.4.1 Arduino Uno

L'Arduino Uno est une carte de développement électronique basée sur un microcontrôleur ATmega328P. Elle est équipée d'entrées/sorties numériques et analogiques qui permettent aux utilisateurs de contrôler des composants électroniques tels que des LED, des moteurs et des capteurs.

L'Arduino Uno peut être programmée à l'aide de l'IDE (environnement de développement intégré) Arduino, qui est un logiciel open-source disponible gratuitement. Cette carte est populaire pour les projets électroniques impliquant l'automatisation, la robotique, la domotique, la surveillance et bien plus encore.

En résumé, l'Arduino Uno est un outil puissant et flexible pour les amateurs et les professionnels de l'électronique qui cherchent à créer des projets interactifs et programmables.

II.4.2 Capteur de température DS18B20 :

Le capteur de température DS18B20 est un capteur de température numérique étanche, fabriqué par Dallas Semiconductor, Il utilise une interface de bus série 1-Wire pour communiquer avec d'autres dispositifs électroniques, tels que des microcontrôleurs ou des ordinateurs.

Le DS18B20 peut mesurer des températures allant de -55°C à 125°C avec une précision de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ dans la plage de température allant de -10°C à 85°C . Il est également capable de mesurer la température ambiante et de rapporter cette valeur en plus de la température de l'objet mesuré, Le DS18B20 est facile à utiliser et à intégrer dans des projets électroniques. Il dispose d'une fonction de conversion de température en continu, ce qui signifie qu'il peut mesurer la température et rapporter la valeur sans avoir besoin d'une intervention continue de la part du microcontrôleur ou de l'ordinateur.



Figure II-4 : Capteur de Température DS18B20



Figure II-5 : Arduini uno

II.4.3 Capteur de l'humidité :

Un capteur d'humidité de sol est un type spécifique de capteur conçu pour mesurer l'humidité du sol.

Ces capteurs utilisent généralement des électrodes pour mesurer la résistance électrique du sol, qui varie en fonction de la quantité d'eau contenue dans le sol.

Les capteurs d'humidité de sol peuvent être utilisés dans une variété d'applications, notamment pour surveiller l'humidité du sol dans les cultures agricoles, les jardins et les serres. Ils peuvent également être utilisés dans les systèmes d'irrigation pour contrôler la quantité d'eau fournie aux plantes en fonction de l'humidité du sol.

Pour lire les valeurs de l'humidité du sol à partir d'un capteur d'humidité du sol, il est souvent utilisé une méthode dite de "lecture analogique" (analog read) à l'aide d'un microcontrôleur.

Les capteurs d'humidité de sol analogiques ont généralement deux broches de sortie : une pour la tension d'alimentation et l'autre pour la lecture de l'humidité. Pour lire la valeur d'humidité, la broche de sortie du capteur doit être connectée à une broche d'entrée analogique du microcontrôleur.

Le microcontrôleur peut alors lire la valeur de l'humidité à partir du capteur



Figure II-6 : Capteur d'Humidité du sol

En utilisant une fonction appelée "analogRead ", qui convertit la tension lue sur la broche d'entrée analogique en une valeur numérique.

Cette valeur numérique est ensuite convertie en une valeur d'humidité en utilisant une formule de conversion spécifique fournie par le fabricant du capteur.

Il est important de noter que la lecture analogique peut être sensible aux interférences électromagnétiques, aux bruits et aux perturbations, ce qui peut entraîner des lectures inexacts ou instables.

Pour minimiser ces problèmes, il est recommandé d'utiliser un câble de connexion court et de bien isoler les circuits électroniques pour éviter les interférences électromagnétiques.

II.4.4 Micro Pompe

Une micro pompe de 5V pour Arduino est un dispositif électronique miniature qui utilise une tension de 5V pour fonctionner et qui est compatible avec les cartes Arduino. Elle est généralement utilisée pour faire circuler des fluides ou pour créer des effets sonores dans les projets électroniques et robotiques. Les micro pompes peuvent être commandées à distance via des signaux électriques émis par les cartes Arduino et sont souvent utilisées dans les projets nécessitant un débit de fluide précis et une consommation d'énergie minimale.

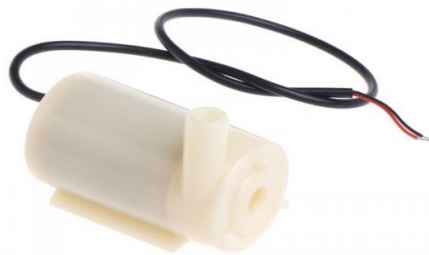


Figure II-7 : Micro Pompe 5V

II.4.5 Resistance grill 1500W

Une résistance grill de 220V avec 1500W est un élément chauffant utilisé pour la cuisson des aliments. Elle est généralement composée d'un fil résistif en alliage de nickel-chrome qui est chauffé par un courant électrique lorsqu'il traverse la résistance. La résistance grill est conçue pour supporter des températures élevées et une forte puissance électrique pour permettre une cuisson rapide et uniforme des aliments. Elle est souvent utilisée dans les fours électriques, la résistance utilisée dans le prototype est de longueur de 2m 7cm.



Figure II-8 : Resistance 1500w

II.4.6 Moteur rôtissoire

Un moteur de rôtissoire est un moteur électrique conçu pour faire tourner une broche de rôtisserie. La vitesse de rotation de ce moteur est exprimée en tours par minute (tpm), et dans ce cas particulier, il est spécifié que la vitesse de rotation est de 2 tpm.

Le moteur fonctionne avec une tension électrique de 220V, ce qui signifie qu'il doit être alimenté avec une source d'alimentation électrique qui fournit une tension de 220 volts pour fonctionner correctement.



Figure II-9 : Moteur rôtissoire

II.4.7 Afficheur LCD i2C

Un Afficheur LCD i2c est un type de module d'affichage qui utilise un écran à cristaux liquides (LCD) et communique à l'aide du protocole i2c (Inter-Integrated Circuit). Cette interface permet une communication bidirectionnelle entre le microcontrôleur et l'écran LCD en utilisant seulement deux fils, ce qui réduit le nombre de broches nécessaires et simplifie le processus de connexion.

L'écran LCD lui-même se compose d'un certain nombre de segments ou de pixels

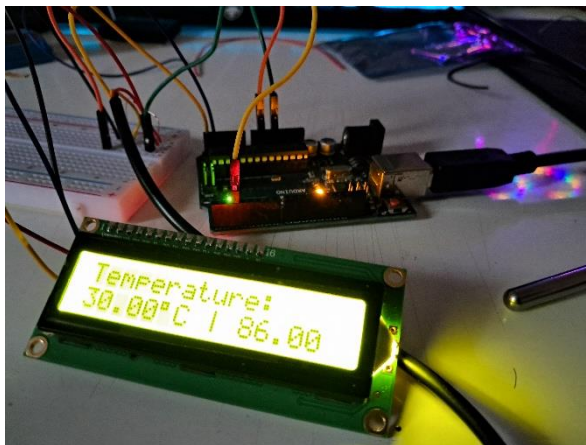


Figure II-10 : Afficheur LCD i2c

disposés en lignes et en colonnes, qui peuvent afficher des caractères alphanumériques, des symboles et des graphiques. Le module d'interface i2c comprend généralement un petit circuit intégré (CI) qui contrôle l'affichage et assure la conversion des signaux nécessaires entre le protocole i2c et le contrôleur LCD.

L'un des avantages de l'utilisation d'une interface i2c pour un écran LCD est qu'elle libère d'autres broches du microcontrôleur pour d'autres usages. Un autre avantage est de simplifier le logiciel nécessaire pour contrôler l'écran, puisque le protocole de communication est géré par le module d'interface i2c. Cela peut faciliter et accélérer le développement d'applications nécessitant un écran LCD.

III.1 Essai de dispositif

L'essai d'un composteur intelligent ouvre de nouvelles perspectives passionnantes dans la gestion des déchets organiques. Ce dispositif révolutionnaire utilise des capteurs et une technologie avancée pour optimiser le processus de compostage.

En surveillant en temps réel les niveaux d'humidité, de température et d'oxygène, le composteur intelligent ajuste automatiquement les conditions idéales pour favoriser la décomposition des déchets et produire un compost de haute qualité.

Avec cet essai prometteur, le composteur intelligent pourrait bien révolutionner notre approche de la gestion des déchets organiques en offrant une solution pratique, écologique et économique.

III.1.1 Les types de déchets compostable

Les types de déchets qui se prêtent au compostage peuvent varier, mais voici quelques exemples couramment acceptés :

Les déchets verts :

- Déchets de fruits et de légumes
- Marc de café et feuilles de thé
- Tontes de gazon
- Taille des plantes
- Déchets de jardin

Les déchets bruns :

- Feuilles sèches
- Paille et foin
- Papier et carton déchiquetés
- Copeaux de bois
- Sciure (de bois non traité)
- Brindilles et petites branches

Il est important de noter que le processus de compostage repose sur un équilibre entre les matières riches en azote (vertes) et les matières riches en carbone (brunes). Cet équilibre assure une bonne décomposition et le développement d'un compost riche en nutriments.

Tableau II-1 : Teneur en azote et C/N de divers déchets (Golueke, 1977)

Matériau	Azote	C/N
Boues activées	5	6
Réservoir d'animaux	–	4.1
Sang	10–14	3.0
Fumier de vache	1.7	18
Boues d'épuration digérées	2–4	–
Tontes de gazon	3–6	12–15
Fumier de cheval	2.3	25
Graminées mélangées	214	19
Huile de nuit	5.5–6.5	6–10
Déchets de légumes non légumineux	2.5–4	11–12
Fumier de porc	3.8	20
Fanes de pommes de terre	1.5	25
Fumier de volaille	6.3	15
Boues d'épuration brutes	4–7	11
Sciure	0.1	200–500
Fumier de mouton	3.8	–
Paille, avoine	1.1	48
Paille, blé	0.3–0.5	128–150
Urine	15–18	0.8

III.1.2 La composition des déchets

Le choix des types de déchets pour le compostage est crucial pour obtenir un compost équilibré et de qualité, Idéalement, il est préférable d'utiliser une combinaison de déchets organiques d'origine végétale et animale.

Les déchets verts tels que les résidus de cuisine (épluchures de fruits et légumes, marc de café), les déchets de jardin (feuilles, tontes de gazon) et les résidus de plantes sont des éléments couramment utilisés dans le compostage. Ils apportent des nutriments essentiels et aident à maintenir un bon équilibre entre les matières azotées et carbonées.

Pour le cas de cette étude, on a préparé un échantillon de déchet vert avec le fumier de cheval pour avoir un compost de bonne qualité, le rapport C/N a été bien déterminé avant l'injection de l'échantillon, Une quantité de déchet vert et fumier cheval doivent être passer par un prétraitement.

Le prétraitement s'agit de mettre le déchet en plein air pour l'aération et la réduction de des odeurs, et aussi pour réduire la teneur en eau du déchet, cette partie du prétraitement a été exécuter pendant 24h

Une fois que le taux d'humidité est réduit, on a passé vers le broyage du déchet vert pour faciliter la dégradation de la matière organique, plus que le déchet est de taille fine plus que l'activité microbienne est plus rapide.



Figure II-11 : Fumier de cheval



Figure II-12 : Déchets vert

La détermination des masses a été effectuée à partir de la formule suivante :

$$\frac{m_1 \times r_1 + m_2 \times r_2}{m_1 + m_2} = 30\%$$

- Avec
- R1 = 40 (rapport C/N des déchets verts)
- R2 = 25 (rapport C/N du fumier de cheval)

On obtient :

- M1 (déchets verts) \approx 333 g
- M2 (fumier de cheval) \approx 667 g
- C/N = 29,99%



Figure II-13 : Echantillon au cours de procédé

III.2 Les paramètres de suivi

III.2.1 La Température :

Le suivi précis de la température pendant les procédés de compostage peut être réalisé avec succès en utilisant un capteur DS18B20, et les informations collectées peuvent être enregistrées dans un fichier Excel sur une période de 72 heures. Grâce à ce capteur fiable, il est possible de mesurer et d'enregistrer les variations de température tout au long du compostage. En connectant le capteur au composteur, les relevés de température peuvent être automatiquement enregistrés dans un fichier Excel dédié.

Cette durée de 72 heures permet de suivre de près l'évolution de la température pendant une période significative du processus de compostage.

L'enregistrement des données dans un fichier Excel offre l'avantage d'une organisation et d'une analyse aisée des informations. Il devient ainsi possible d'identifier les fluctuations de température, de détecter les anomalies ou les tendances spécifiques à chaque phase du compostage. De plus, les données enregistrées sur une période prolongée peuvent servir de référence précieuse pour évaluer l'efficacité du compostage, ajuster les paramètres et prendre des décisions éclairées pour optimiser le processus.

En somme, l'utilisation du capteur DS18B20 et de l'enregistrement des informations dans un fichier Excel sur une période de 72 heures permet un suivi minutieux de la température et une gestion précise du compostage.



Figure II-14 : Afficheur de Température

III.2.2 Taux d'Humidité

Le suivi du taux d'humidité pendant les procédés de compostage peut être réalisé de manière efficace en utilisant un capteur d'humidité de sol, et les données collectées peuvent être enregistrées dans un fichier Excel sur une période de 72 heures. Le capteur d'humidité de sol est spécialement conçu pour mesurer l'humidité relative du compost.

En l'intégrant dans le composteur, il est possible de collecter régulièrement les données d'humidité et de les enregistrer automatiquement dans un fichier Excel dédié.

La période de 72 heures permet de suivre l'évolution du taux d'humidité sur une durée significative du processus de compostage. L'enregistrement dans un fichier Excel offre un moyen pratique d'organiser et d'analyser les informations collectées. Il permet de détecter les fluctuations d'humidité, d'identifier les niveaux optimaux pour le compostage et de prendre les mesures nécessaires pour ajuster l'humidité en conséquence.



Figure II-15 : Afficheur de l'Humidité

Le taux d'Humidité initial est aussi mesuré suivant le protocole expérimental selon la norme NF M 03-002, On place un échantillon de 100g de déchets organiques dans une étuve fonctionnant à 105°C, après un temps de 24h l'échantillon doit être séché complètement, le taux d'humidité est donc déterminé par la formule suivante :

$$\%H = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100$$

Avec :

m_i = la masse initiale de l'échantillon

m_f = la masse finale de l'échantillon

$\%H$ = Taux d'Humidité

III.2.3 pH

Détermination du pH de suspensions aqueuses selon la norme AFNOR NO ISO 10-390, novembre 1994. Mélanger 5 g d'échantillon de matière sèche avec 25 ml d'eau distillée et agiter pendant 10 à 15 min pour faire une pause d'homogénéisation. La suspension a ensuite été laissée au repos pendant 2 heures. Les mesures de pH ont été effectuées à température ambiante à l'aide d'un pH-mètre équipé d'une électrode combinée.

III.2.4 La matière organique MO et la Proportion COT

La matière organique déchets est parmi les paramètre important à suivre au cours du procédés de compostage et pour cela, un suivi de la MO est effectué pour l'échantillon étudier au début et à la fin du procédé

Pour mesurer la MO, On prend une quantité de 25g de la matière organique sèche broyer et la mettre dans un tas en céramique dans le four de calcination, on sélectionne la température de 550°C en pendant 2h, la MO et COT sont finalement déterminées par les formules suivantes :

$$\%MO = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100$$

m_i = la masse initiale de l'échantillon avant calcination

m_f = la masse finale de l'échantillon après calcination

$\%MO$ = Matière organique

$$\%COT = \%MO / 2$$

$\%COT$ = Carbone Organique Total

CHAPITRE III
RESULTAT ET DISCUSSIONS

IV.1 Composteur

IV.1.1 Assemblage et fonctionnement du dispositif

Le composteur intelligent présenté dans la figure est un casier fabriqué en bois multiplié avec une forme octogonale de $0.14m^3$ de volume totale, ces trois inférieurs parois sont recouvert de pierre réfractaire (4) pour protéger le bois et pour avoir une distribution de chaleur cumuler dans le composteur et pour éviter la perte de chaleur obtenu par la résistance (5) posé sur la pierre réfractaire qui sera allumer automatiquement tant que la température de l'échantillon est inférieur de $60^{\circ}C$, l'échantillon de la matière résiduel est donc stocké dans un tambour statique (2) de volume $28cm^3$,

L'échantillon est contrôlé par un capteur de température (6) et un capteur d'humidité (3), ces capteurs vont lire et transmettre les valeurs analogiques captés vers l'Arduino (7) et si le taux de l'humidité est inférieur à 40%, l'Arduino va commander le relai 2 pour alimenter la micro pompe (8), le compost sera arrosé par des gouttelettes d'eau transporter avec des tuyaux de drainage en plastique (9) de longueur de 1m fixé au paroi supérieur, et pour avoir de l'aération pendant le procédés, un mélangeur (1) horizontal est installer dans le centre de tambour qui va être allumer manuellement au cours du procédés.

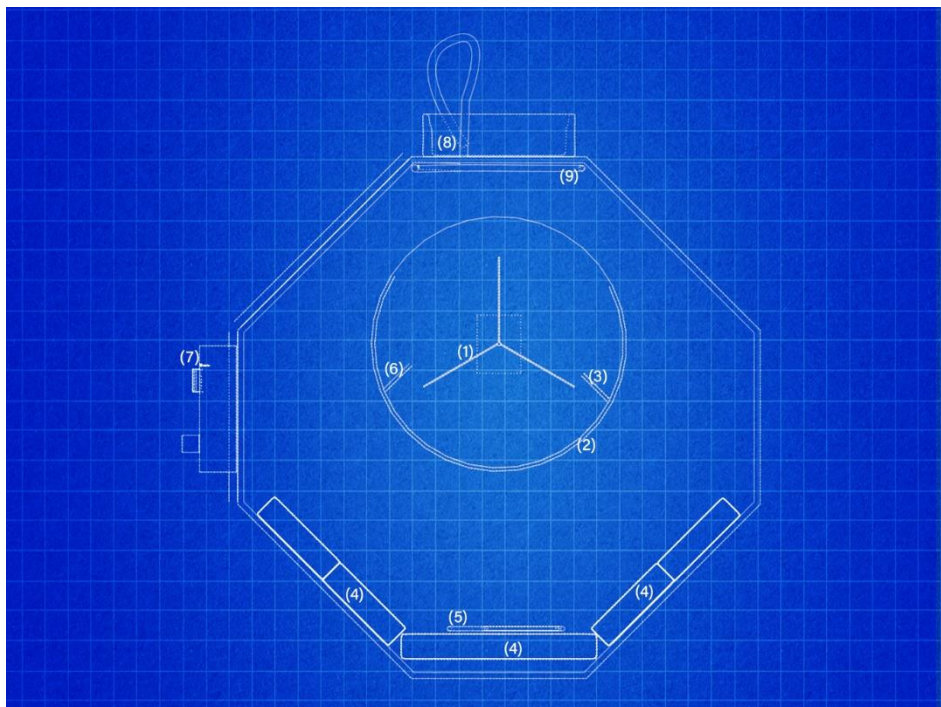


Figure III-1 : Vue de face du dispositif

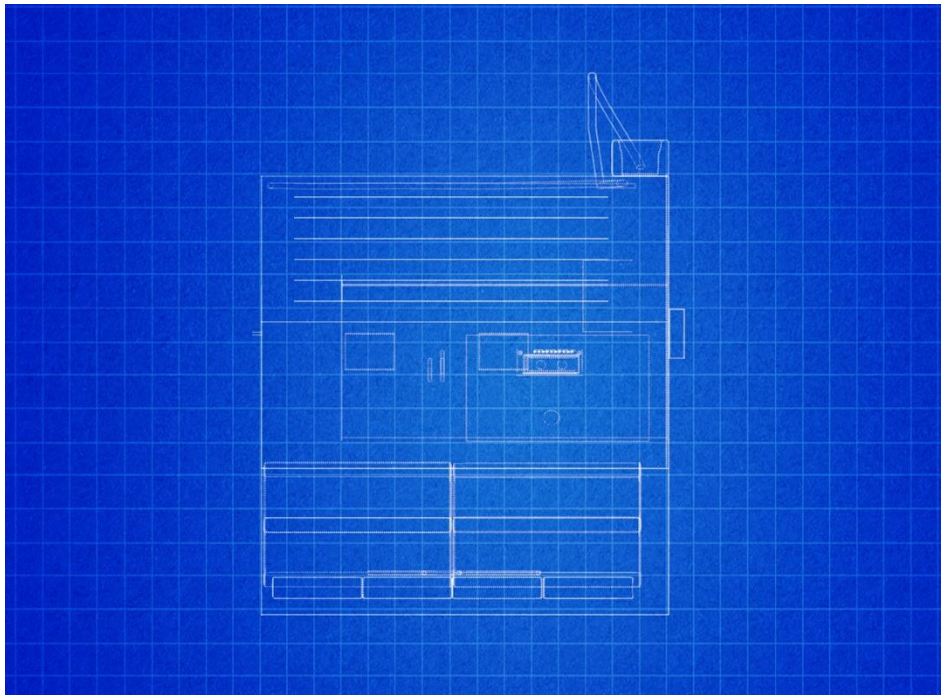


Figure III-2 : Vue droite du dispositif

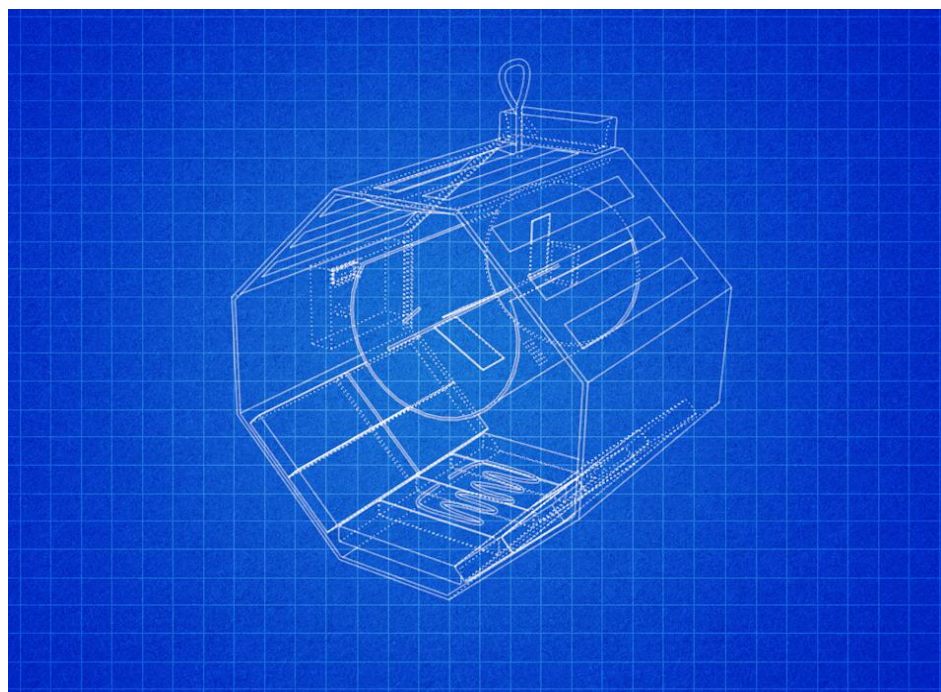


Figure III-3 : Vue 3d du dispositif

IV.2 Compostage

IV.2.1 Perspective physique de compost

Après 72 heures de processus de compostage, l'aspect physique du compost peut varier en fonction des conditions spécifiques du compostage et des matériaux utilisés, pour le cas étudié, l'échantillon a subi au plusieurs variation de température et humidité pour offrir le milieu optimale des microorganismes, au cours du procédés la matière organique sera dégrader et pour cela le compost obtenu se caractérise par :

- Une couleur brun-noir : Les matériaux bruns et verts se mélangent de manière optimale, ce qui donne une couleur brun foncé ou noire caractéristique du compost bien décomposé.
- Texture et structure : une texture fine et uniforme
- Une odeur terreuse agréable, avec absence d'odeur de fermentation.



Figure III-4 : Compost



Figure III-5 : Refus

IV.2.2 La variation du volume

Réduction de volume : Comme pour tout processus de compostage, le volume du compost est diminué après 72 heures. Les matériaux organiques se décomposeront et se tasseront, ce qui entraînera une réduction de la taille totale du compost, le tableau suivant présente les résultats obtenus.

Tableau III-1 : Variation de la masse du déchet

Compost	Masse totale en g	Masse finale en g	Masse de Refus en g
C	1000	284	163
C %	100 %	28,4%	16,3%

Généralement le processus de compostage réduit le volume total de 70% à 80%, cette réduction de volume est un indice de la dégradation de la matière organique d'une manière correcte, le taux de l'humidité aussi joue un rôle important à la masse initial et finale de l'échantillon, pour le cas étudié en remarque que la masse initiale du déchet est réduites de 71,4%, et le compost mature obtenu est de 28,4%. (**Breitenbeck, G., Schellinger, D., 2004**)

IV.3 Variation des paramètres physicochimiques

IV.3.1 Température

Dans un processus de compostage intelligent de 72 heures avec une augmentation de la température jusqu'à 60°C à l'aide d'une résistance, la gestion précise de la température joue un rôle essentiel pour favoriser une décomposition efficace des matières organiques.

L'utilisation d'une résistance pour augmenter la température du compost permet un contrôle plus précis de l'environnement thermique. Au début du processus de compostage, la résistance est activée pour élever la température du tas de compost jusqu'à la valeur cible de 60°C, Au cours des premières heures, la résistance génère de la chaleur, ce qui entraîne une augmentation rapide de la température du compost. Une fois que la

température atteint le réglage souhaité de 60°C, la résistance peut être ajustée pour maintenir la température dans cette plage cible. Un système de régulation intelligent peut surveiller la température en temps réel et ajuster la puissance de la résistance en fonction des besoins.

Pendant la période de compostage de 72 heures, la température devrait rester relativement stable autour de 60°C, indiquant que les conditions optimales pour la décomposition sont maintenues. Les micro-organismes décomposeurs, y compris les bactéries thermophiles, sont activement engagés dans la dégradation des matières organiques, favorisant une décomposition rapide.

Cependant, il est important de noter que la température peut fluctuer légèrement en fonction de divers facteurs tels que la composition du compost, la densité du tas, l'aération et l'humidité. Le système de compostage intelligent peut surveiller ces variations et ajuster la puissance de la résistance pour maintenir la température dans la plage cible de 60°C.

En fin de processus, lorsque la décomposition des matières organiques est presque terminée, la température peut commencer à diminuer légèrement. Cela peut être dû à une diminution de l'activité microbienne et à l'épuisement des matières organiques facilement dégradables, la figure ci-dessous représente la variation de la température en fonction du temps au cours du procédé.

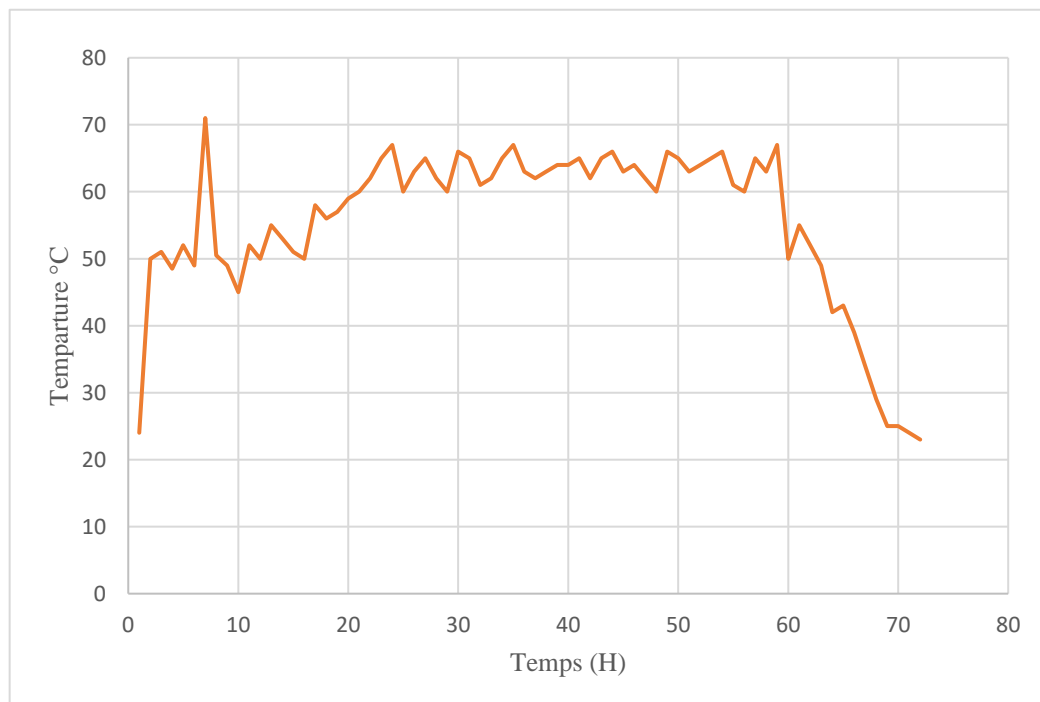


Figure III-6 : Variation de la Température au cours de procédés

IV.3.2 Evolution de Taux d'Humidité

Au cours de processus de compostage, le taux d'humidité varie relativement avec la variation de la température, les valeurs capter et analyser de l'échantillon au début de compostage est de 78%, cette valeur est plus élevée que la valeur souhaité pour un milieu optimale des microorganismes, pour cela la micro pompe ne sera toujours pas en marche, en parallèle la résistance est allumée pour atteindre la température souhaitée, le taux d'humidité augmente à cause de la transformation de la quantité d'eau contenu dans l'échantillon, après 18 heures de compostage le taux de l'humidité est inférieur de 40%, le compost commence à devenir plus sèche, dans ce cas la micro pompe ajuste automatiquement l'apport d'eau maintenir l'humidité entre 40% et 50%

À la fin du processus de compostage de 72 heures, la micro pompe continue à surveiller l'humidité pour s'assurer que le compost a atteint une teneur en eau appropriée pour la maturation et la stabilisation, la figure suivante représente la variation de l'humidité au cours de procédés.

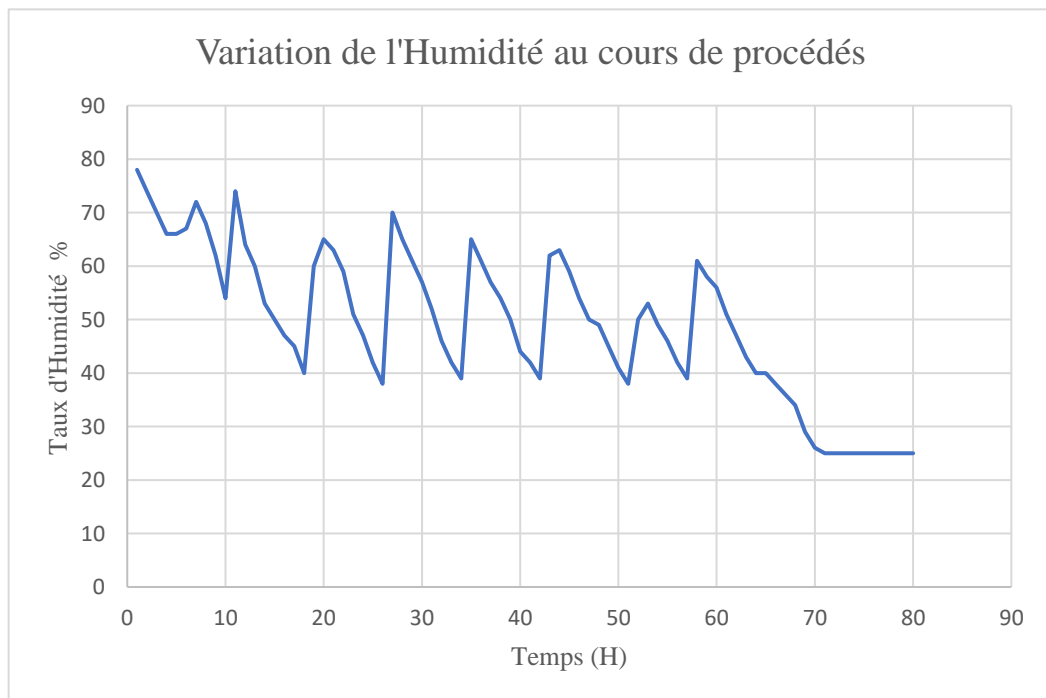


Figure III-7 : Variation de l'Humidité au cours de procédés

IV.3.3 La variation pH

L'augmentation du pH au cours du compostage du fumier de cheval avec des déchets verts, passant d'un pH initial de 7,8 à 8,6, peut être attribuée à divers processus biologiques et chimiques qui se déroulent pendant la décomposition des matières organiques. Lors du compostage, les micro-organismes présents dans le fumier de cheval et les déchets verts décomposent les matières organiques, ce qui entraîne la libération de divers composés. Certains de ces composés peuvent être alcalins, ce qui augmente le pH du mélange de compost.

La dégradation des déchets verts riches en azote, tels que les résidus de plantes vertes, peut contribuer à cette augmentation du pH. Les déchets verts contiennent souvent des composés alcalins, tels que les carbonates, qui se décomposent et libèrent des ions hydroxyde (OH⁻) lors du processus de compostage. Ces ions hydroxyde contribuent à l'augmentation du pH du compost.

De plus, l'ammonification est un processus courant qui se produit pendant le compostage, où les micro-organismes convertissent les matières organiques azotées en ammoniac (NH₃) et en ions ammonium (NH₄⁺). L'ammoniac est une base forte qui peut augmenter le pH du compost. (Sunberg, C., 2005)

Le tableau ci-dessous représente le pH initial et le pH final

Tableau III-2 : Variation du pH

Compost	pH initial	pH final
C	7.8	8.6

IV.3.4 Matière organique et Carbone organique total

Lors du processus de compostage, les micro-organismes, tels que les bactéries, décomposent activement les matières organiques présentes dans le fumier de cheval et les déchets verts. Ces micro-organismes se nourrissent des matières organiques, décomposant les composés complexes en substances plus simples.

Au fur et à mesure que la décomposition se poursuit, la matière organique est convertie en différentes formes, telles que du dioxyde de carbone (CO₂), de l'eau et des composés minéraux. Ce processus réduit la quantité de matière organique initiale, entraînant une réduction du pourcentage de matière organique dans le compost.

Une réduction de la matière organique de 86% à 63% indique une décomposition significative des matières organiques et une transformation en compost mature. Ce compost mature est riche en nutriments, en matière organique partiellement décomposée et en micro-organismes bénéfiques,

Le tableau suivant représente la variation de la MO et COT.

Tableau III-3 : Variation de la MO et COT

Compost	MO Initial	MO final
C	86%	63%
Compost	COT initial	COT final
C	43%	31,5%

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Cette étude a démontré l'importance de la conception et du test d'un système de compostage intelligent pour promouvoir une gestion efficace des déchets organiques. Le compostage est une pratique écologique qui permet de réduire les déchets, de produire un engrais naturel et de contribuer à la préservation de l'environnement.

L'objectif de ce mémoire était de concevoir un système de compostage intelligent en utilisant des capteurs et des technologies de pointe pour surveiller et contrôler le processus de compostage. Les résultats obtenus ont démontré que ce système offre de nombreux avantages, tels qu'une surveillance précise des paramètres essentiels tels que la température, l'humidité et le niveau d'oxygène, permettant ainsi d'optimiser les conditions de compostage.

De plus, le système de compostage intelligent propose également une interface conviviale qui facilite l'interaction avec les utilisateurs et fournit des informations en temps réel sur l'état du compost. Cela permet aux utilisateurs de suivre facilement le processus de compostage, d'identifier les éventuels problèmes et d'apporter les ajustements nécessaires.

En termes de durabilité, le système de compostage intelligent contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, à la préservation des ressources naturelles et à la promotion d'une économie circulaire. Il favorise également une meilleure gestion des déchets organiques en les transformant en un produit utile, le compost, qui peut être utilisé comme amendement du sol dans l'agriculture et l'horticulture.

Cependant, malgré les avantages évidents du système de compostage intelligent, il convient de noter certains défis. Parmi ceux-ci, on peut citer le coût initial élevé de mise en place du système, la nécessité d'une formation adéquate pour les utilisateurs et les contraintes techniques liées à l'intégration des capteurs et des dispositifs de contrôle.

En conclusion, la conception et le test d'un système de compostage intelligent offrent de nombreux avantages pour une gestion durable des déchets organiques. Ce système permet d'optimiser les conditions de compostage, de fournir une surveillance en temps réel et de promouvoir une utilisation efficace des ressources naturelles. Il est essentiel de continuer à développer et à améliorer ces systèmes afin de favoriser une transition vers une société plus respectueuse de l'environnement et d'encourager l'adoption généralisée du compostage intelligent comme pratique courante dans la gestion des déchets.

IV.4 Perspectives et Recommandations

En intégrant ces recommandations, on peut améliorer le composteur intelligent en suivant avec précision les paramètres clés du compostage. Cela permettra d'optimiser le processus de décomposition des matières organiques, de prévenir les problèmes potentiels et de produire un compost de haute qualité de manière plus efficace.

- La sélection des capteurs de haute qualité : Utilisation des capteurs fiables et précis pour mesurer la température et l'humidité. Choisir des capteurs spécialement conçus pour les environnements de compostage afin de garantir leur durabilité et leur résistance aux conditions difficiles.
- Positionnement des capteurs de manière stratégique : Placement des capteurs de température et d'humidité à des endroits clés du composteur pour obtenir une lecture représentative de tout le processus de compostage. Il peut être utile de les répartir uniformément dans le tas de compost ou d'utiliser plusieurs capteurs pour une surveillance plus précise.
- Intégration d'autres capteurs pertinents : En plus des capteurs de température et d'humidité, l'ajout d'autres capteurs pour surveiller des paramètres importants tels que le niveau d'oxygène, le pH, la conductivité électrique, voire la quantité de gaz émis (comme le CO₂). Ces capteurs peuvent fournir des informations supplémentaires sur l'état du compost et son évolution.

On peut aussi améliorer le composteur intelligent en utilisant ESP32 pour contrôler à distance les paramètres de température, d'humidité et d'aération via une application mobile en suivant ces recommandations :

Configuration matérielle avec ESP32 : Utilisation de l'ESP32, une plateforme de développement dotée d'un microcontrôleur Wi-Fi intégré, pour contrôler les capteurs de température, d'humidité et d'aération.

- Développement de l'application mobile : une application mobile conviviale pour interagir avec le composteur intelligent. L'application doit permettre de surveiller les paramètres de température, d'humidité et d'aération à distance.
- Intégration du protocole de communication : Utilisation d'un protocole de communication approprié, tel que MQTT (Message Queuing Telemetry Transport),

pour permettre la communication entre l'ESP32 et l'application mobile. Ce protocole permettra la transmission bidirectionnelle des données entre les deux parties de manière efficace et sécurisée.

- Contrôle à distance des paramètres : Mettre en place des fonctionnalités dans l'application mobile qui permettent de régler et de contrôler à distance les paramètres de température, d'humidité et d'aération du composteur intelligent. Par exemple, l'utilisateur peut régler la température souhaitée ou activer/désactiver l'aération à l'aide de l'application.
- Enregistrement des données dans une base de données : une base de données pour stocker les données collectées par les capteurs de l'ESP32.
- Visualisation des données : Développement d'une interface dans l'application mobile qui récupère les données de la base de données et les affiche sous forme de graphiques ou de tableaux pour une visualisation facile. Cela permettra aux utilisateurs de suivre l'évolution des paramètres du composteur intelligent au fil du temps.
- Notifications et alertes : Configuration des notifications ou des alertes dans l'application mobile pour informer l'utilisateur de tout dépassement de seuils critiques. Par exemple, si la température dépasse une valeur prédéfinie, l'application peut envoyer une notification pour alerter l'utilisateur.
- Sécurité des données : mettre en place des mesures de sécurité pour protéger les données sensibles collectées par le composteur intelligent et stockées dans la base de données. Et l'utilisation des mécanismes d'authentification et de chiffrement appropriés pour garantir la confidentialité des données.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Smart Chopper and Monitoring System for Composting Garbage, Vivien Arief Wardhany, Alfin Hidayat, Muhammad Doni Sururin A., Subono, Akhmad Afandi. (2019)
2. United Nations Environment Programme. (2018). International Environmental Law - Gloshttps
3. Source: World Bank. (2018). Municipal Solid Waste. Retrieved from <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/municipal-solid-waste>.
4. United States Environmental Protection Agency. (2021). Organic Materials Management. Retrieved from <https://www.epa.gov/sustainable-management-organic-materials>.
5. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
6. Rapport de caractérisation des déchets 2019-2020 Agence National des déchets
7. Rapport de caractérisation des déchets 2018 Agence National des déchets
8. Rapport de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME)
9. United Nations Environment Programme. (2015). Waste Management - <https://www.unep.org/resources/report/waste-management-brief-introduction>.
10. Basic Guide for Small-Scale Solutions. L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)
11. Miller, F.C. (1996). Composting as a process based on the control of ecologically selective factors. *Soil Microbial Ecology*, pp. 515–544 (ed. Metting, Jr., F.B.), Dekker, New York
12. Suler, D. "Composting Hazardous Industrial Wastes," *Compost Sci.* (July/August 1979).
13. Adler, P.R., Sikora, L.J., 2005. Mesophilic Composting of arctic char manure. *Compost Sci. Util.* 13 (1), 34e42. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2005.10702215>.
14. Rolle, G., & Orsanic, E. (1964). A new method of determining decomposable and resistant organic matter in refuse and refuse compost. International Research Group on Refuse Disposal, Bulletin 21.
15. Strom, P.F. (1985). Effect of temperature on bacterial diversity in thermophilic solid-waste composting. *Appl. Environ. Microbiol.*, 50, 899–905.
16. Degli-Innocenti, F., Goglino, G., Bellia, G., Tosin, M., Monciardini, P., & Cavaletti, L. (2002). Isolation and characterization of thermophilic microorganisms able to grow on cellulose acetate. *Microbiology of Composting*, pp. 273–286 (eds. Insam, H., Riddech, N., & Klammer, S.), Springer-Verlag, Heidelberg

17. Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., & de Bertoldi, M. (1981a). Evaluating toxicity of immature compost. *Biocycle*, 22 (2), 54–57.
18. Zucconi, F., Forte, M., Monaco, A., & de Bertoldi, M. (1981b). Biological evaluation of compost maturity. *Biocycle*, 22 (4), 27–29
19. Isermeyer, H. (1952). Eine einfache methode zur bestimmung der bodenatmung und der carbonate im boden. *Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 56, 26–38.
20. Jaccard, L., Lehmann, P., Civilini, M., & de Bertoldi, M. (1993). Yard waste composting with heat recovery. *Compost Sci. Util.*, 3, 10–14.
21. Bertoldi, M., Vallini, G., & Pera, A. (1985). Technological aspects of composting including modelling and microbiology. *Composting of Agricultural and Other Wastes* (ed. Gasser, J.K.R.), Elsevier Applied Science, London and New York
22. Finstein, M.S., & Hogan, J.A. (1993). Integration of composting process microbiology, facility structure and decision-making. *Science and Engineering of Composting* (eds. Hoitink, H.A.J., & Keener, H.M.), The Ohio State University, USA.
23. MacGregor, S.T., Miller, F.C., Psarianos, K.M., & Finstein, M.S. (1981). Composting process control based on interaction between microbial heat output and temperature. *Appl. Environ. Microbiol.*, 39, 1000–1009.
24. Schulze, K.F. (1964). Relationship between moisture content and activity of finished compost. *Compost Sci.*, 2, 32
25. Golueke, C.G. (1972). *Composting*. Rodale Press, Inc., Emmaus, Pennsylvania, USA
26. Design and Test Of the Smart Composter Controlled by Sensors, Mohamed Taouzari Laboratory LISA, high School of technology Berrechid Hassan 1 University Settat, Morocco
27. Smart Compost Monitoring System using Open Source Technologies, Vrettos G. 1 , Kazamias G. 1 , Lekkas D.F. 2
28. Design and Implementation of Smart Compost System Using IOT, 2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON) Bengaluru, India. Nov 6-8, 2020

