جامعة سيدي محمد بن عبد الله بفاس
UNIVERSITE SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES
كلية العلوم ظهر المهراز فاس
FACULTE DES SCIENCES DHAR EL MAHRAZ FES

N° d'Ordre : 40 **/2019**

Formation Doctorale : Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable-RNE2D

Discipline : Environnement

Spécialité : Chimie-Physique appliquée

Laboratoire d'Ingénierie d'Electrochimie, de Modélisation et d'Environnement- LIEME

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

LAHLOU Kenza

VALORISATION DES BOUES DE LA STATION D'EPURATION DES EAUX USEES PAR CO-COMPOSTAGE : CAS DE LA STEP DE FES

Soutenue le 28 / 09 / 2019 devant le jury composé de :

Pr. ElAchqar Abdelrhani	***FSDM-Fès***	***Président***
Pr. ABRIAK Nor-Edine	***IMT- Lille Douai***	***Rapporteur***
Pr. ELHALOUANI Hassan	***FS-Oujda***	***Rapporteur***
Pr. SFAIRA Mouhcine	***FSDM –Fès***	***Rapporteur***
Pr. CHEMLAL Souad	***FSDM-Fès***	***Examinateur***
Pr. TALEB Mustapha	***FSDM-Fès***	**Examinateur**
Pr. RAIS Zakia	***FSDM-Fès***	**Directrice de thèse**
Pr. EL HAJI Mounia	***ENSEM-Casa Blanca***	**Co-Directeur de thèse**
Pr. KINANI Siham	***FSEJ-Fès***	**Invitée**

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS 6
REMERCIEMENTS 7
RÉSUMÉ 9
ABSTRACT 10
ملخص 12
Liste des abréviations : 13
Liste des figures 14
Liste des tableaux 17
Introduction générale 1
INTRODUCTION GÉNÉRALE 1
CHAPITRE I: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE 6
Introduction 7
I. Etat de l'art des déchets au Maroc 8
I.1 Assainissement au Maroc 8
I.2 Situation des stations d'épuration des eaux usées 10
I.3 Aperçu sur la station d'épuration de la ville de Fès 11
II. Boues des stations d'épuration des eaux usées 11
II.1 Genèse des boues 11
II.2 Types de boues produites par les stations d'épuration 12
II.3 Composition des boues 12
II.3.1 Eléments fertilisants et Eléments traces métalliques 13
II.3.2 Polluants organiques 14
II.3.3 Germes et Parasites 14
II.4 Traitement des boues des stations d'épuration des eaux usées 14
II.5 Techniques de valorisation ou élimination des boues 15
II.5.1 Valorisation énergétique 15
II.5.2 Valorisation organique 17
II.5.3 Solutions alternatives 18
II.6 Etat de l'art de valorisation des boues des STEP 20
II.7 Normes et réglementation d'utilisation des boues de STEP 21
III. Procédé de compostage 23
III.1 Application du compost 24
III.1.1 Pour l'amendement 24
III.1.2 Pour la lutte biologique 25
III.2 Normes réglementaires du compost 25
IV. Fertilité d'un sol 26
IV.1 Types des fertilisants 27
IV.1.1 Engrais 27
IV.1.2 Produits phytosanitaires 27
IV.1.3 Amendement 29
IV.2 Formes des éléments assimilables par la plante 30
IV.3 Action des fertilisants sur les propriétés du sol 31
IV.3.1 Propriétés physiques 31
IV.3.2 Propriétés chimiques 31
IV.3.3 Propriétés biologiques 32

V. Outils statistiques 32
V.1. Analyse en composantes principales (ACP) 32
V.2 Analyse de la variance ANOVA 33
V.3 Test de Student 33
VI. Outil spatial : Système d'information géographique (SIG) 33
VII. Outils économiques 34
VII.1 Coût de revient 34
VII.2 Etude de marché 35
Conclusion 36
CHAPITRE II : ELABORATION DU COMPOST À BOUES 37
Introduction 38
I. Compostage des boues de la STEP de Fès 39
II. Approche méthodologique 40
II.1 Substrats à Co-composter 40
II.1.1 Boues 40
II.1.2 Margines 40
II.1.3 Déchets ménagers 40
II.1.4 Fientes de volailles 40
II.2 Méthodes 40
II.2.1 Elaboration des composts 40
II.2.2 Echantillonnage 41
II.2.3 Caractérisation des substrats et suivi du processus de compostage 42
III. Caractérisation des substrats et des mélanges initiaux 49
III.1 Caractérisation des substrats 49
III.2 Caractérisation des mélanges initiaux à t=0 52
IV. Etude de l'évolution du processus de co-compostage 52
IV.1 Paramètres physico-chimiques 53
IV.1.1 Température 53
IV.1.2 pH 56
IV.1.3 Conductivité 58
IV.1.4 Humidité 60
IV.1.5 Matière organique 61
IV.1.6 Carbonne organique 63
IV.1.7 Composés azotés 64
IV.1.8 Rapport C/N 66
IV.1.9 Densité 68
IV.2 Paramètres spectroscopiques 69
IV.2.1 Analyses par spectroscopie infra-rouge 69
IV.2.2 Analyse par spectroscopie ultraviolet-visible 72
IV.2.3 Analyse par diffraction des rayons X (DRX) 73
IV.2.4 Analyse par Microscopie électronique à balayage 74
IV.3 Paramètres biologiques 75
IV.3.1 Test respirométrique 75
IV.3.2 Test de germination 76
IV.3.3 Test de plante 77
IV.4 Evaluation des principaux paramètres de contrôle des composts par ACP 78
V. Qualité et conformité des produits finaux 81
V.1 Description visuelle des composts 81
V.2 Composition physico-chimique des composts 81

Conclusion....83
CHAPITRE III : APPLICATION AGRICOLE DU COMPOST À BOUES....85
Introduction....86
I. Application du compost à boues comme amendement....87
II. Méthodologie d'application des composts....88
II.1 Matériels végétaux....88
II.1.1 Cultures....88
II.1.2 Les amendements....89
II.2 Méthodes....89
II.2.1 Méthodologie de plantation....89
II.2.2 Prélèvement et échantillonnage....90
II.2.3 Localisation....91
II.2.4 Paramètres de caractérisation des matériaux....91
II.2.5 Paramètres de suivi des cultures....92
II.2.6 Etude statistique....94
III. Caractérisation des amendements, des sols et de l'eau d'irrigation....94
III.1 Amendements....94
III.2 Site de l'étude....95
III.2.1 Emplacement spatial des zones d'études....95
III.2.2 Caractérisation des sols....95
III.3 Caractérisation de l'eau d'irrigation....98
IV. Culture du Radis....100
IV.1 Paramètres morphologiques....100
IV.1.1 Longueur des tiges / plante....100
IV.1.2 Nombre de feuilles / plante....102
IV.1.3 Surface foliaire....102
IV.2 Paramètres de production....104
IV.2.1 Calibre du fruit racinaire....104
IV.2.2 Rendement....105
V. Pomme de terre....107
V.1 Paramètres morphologiques....107
V.1.1 Nombre de feuilles / plante....107
V.1.2 Surface foliaire....109
V.1.3 Nombre de tiges par plante....111
V.1.4 Longueur des tiges par plant....111
V.2 Paramètres de production....114
V.2.1 Nombre de plantes germées par parcelle....114
V.2.2 Nombre de tubercules par plant....115
V.2.3 Calibre du tubercule....116
V.2.4 Rendement par plant....118
V.2.5 Rendement total....119
V.3 Qualité nutritive de la pomme de terre cultivée au champ....119
V.4 Caractérisation des sols après culture....121
Conclusion....122
CHAPITRE IV : APPLICATION DU COMPOST À BOUES POUR LA LUTTE BIOLOGIQUE....123
Introduction....124
I. Jus de compost....125
I.1 Utilisation....125

I.2 Techniques de préparation et d'extraction des jus de compost 125
I.3 Pouvoir biologique des jus de compost 126
II. Matériaux et Méthodes 127
II.1 Matériaux 127
II.2 Méthodes 128
II.2.1 Préparation du jus de compost 128
II.2.2 Caractérisation des jus de compost 128
II.2.3 Préparation de l'inoculum 129
II.2.4 Détermination de l'effet antifongique 129
II.2.5 Détermination de l'effet antibactérien 130
III. Evolution des caractéristiques physico-chimiques des jus de compost en fonction du temps 130
IV. Etude de l'effet antifongique des jus de composts C et CB 133
IV.1 Détermination du rapport d'inhibition 133
IV.2 Présentation de l'aspect de l'activité antifongique 134
V. Etude du pouvoir antibactérien des jus des composts 135
V.1 Détermination de l'effet antibactérien 135
V.2 Détermination du type de l'activité antibactérienne 136
Conclusion 137
CHAPITRE V : EVALUATION DU COÛT ET DE LA MISE EN MARCHÉ DU COMPOST À BOUES 139
Introduction 140
I. Marché du compost 141
II. Approche Méthodologique 143
II.1 Coût de revient 143
II.2 Etude transversale du marché de compost 144
II.2.1 Lieux de l'étude 144
II.2.2 Population étudiée 144
II.2.3 Taille de l'échantillon 145
II.2.4 Conception du questionnaire 145
II.2.5 Recueil des données 146
II.2.6 Analyse statistique 146
II.2.7 Analyse de la variance (ANOVA) 147
III. Etude du coût de revient et du marché de concurrence du compost à boues 147
III.1 Estimation du coût de revient du compost élaboré à l'échelle semi industrielle 147
III.2 Evaluation du marché concurrent au Maroc 149
IV. Analyse des résultats de l'étude empirique 152
IV.1 Analyse des hypothèses : cas des consommateurs du compost 152
La mesure de la performance du marketing 155
IV.2 Analyse du questionnaire : Cas des NON consommateurs du compost 158
IV.3 Résultats d'analyse de la variance (ANOVA) 164
Conclusion 167
CONCLUSION GÉNÉRALE 168
Conclusion générale 169
Annexe I : Questionnaire ; Cas des consommateurs 1
Annexe II : Questionnaire ; Cas des non consommateurs 4
Annexe III : Business model 7
Références bibliographiques .....

AVANT-PROPOS

Une partie du présent travail s'inscrit dans le cadre du projet PPR, type B (2015-2017) intitulé: Traitement physicochimique des margines et valorisation des boues dans la filière de compostage. Ce projet est financé par le Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique (CNRST).

La thèse de Melle Lahlou Kenza inscrite en doctorat en 2015-2016 avec un sujet portant sur la valorisation des boues de STEP de la ville de Fès par la filière de co-compostage avec des déchets ménagers et agricole : margines et fientes de volailles sous la direction du Pr. RAIS Zakia et la co-direction du Pr. Mounia EL HAJI.

Une partie du travail a été aussi financé par le ministère délégué de l'Energie, des Mines, de l'eau et de l'Environnement, chargé de l'environnement, vu que l' humidification des composts élaborés a été assurée par les margines dans le cadre du projet VADOC : Valorisation des déchets oléicoles par filière de compostage.

La partie expérimentale de ce travail a été réalisée aux :

- **Laboratoire d'Ingénierie d'Electrochimie, de Modélisation et d'Environnement (LIEME)** de la Faculté des Sciences de Fès – Université Sidi Mohammed Ben Abdallah et à la Station d'Epuration des Eaux Usées de la Ville de Fès sous la direction du professeur TALEB Mustapha et l'encadrement du professeur RAIS Zakia.

-**Laboratoire des Sciences de l'Eau et de l'Environnement de la Faculté Polydisciplinaire de Taza** – Université Sidi Mohammed Ben Abdallah sous l'encadrement du professeur EL HAJI Mounia.

- **L'Unité de Recherche Environnements Côtiers et Urbains, (EPEIS) – Sfax**, Tunisie sous l'encadrement du professeur AMMAR Emna

- **L'institut de l'olivier** de Sfax sous l'encadrement de Mr TRIKI Mohammed Ali.

- Laboratoire de la société Ben Abbou.

–L'élaboration des composts à l'échelle semi-industrielle a été réalisée dans un terrain voisin de la Station d'épuration de la Ville de Fès prêté par la société d'exploitation de la STEP.

-Les tests de la valeur agronomique des composts à boues ont eu lieu à la FSDM et au champ d'un agriculteur à Meknassa avec le soutien de l'Union des Fédérations des Associations des Usagers de l'Eau Agricole.

REMERCIEMENTS

Au nom de ce travail, réalisé au Laboratoire d'Ingénierie d'Electrochimie, de Modélisation et d'Environnement -LIEME, Faculté des Sciences Dhar El Mahraz Fès, sous la direction du Professeur RAIS Zakia et la co-direction du Professeur EL Haji Mounia, conjointement avec l'Unité de Recherche Environnements Côtiers et Urbains, (EPEIS) – Sfax, Tunisie, l'institut de l'olivier de Sfax et le Laboratoire des Sciences de l'Eau et de l'Environnement de la Faculté Polydisciplinaire de Taza, je tiens à remercier tous les professeurs ayant contribué à sa réalisation.

J'exprime mes remerciements au professeur TALEB Mustapha qui a accepté de m'accueillir au sein de son laboratoire. Je suis aussi très sensible à l'honneur que le professeur RAIS Zakia m'a fait en dirigeant mon travail. Je souhaiterais ici lui témoigner ma sincère considération pour tous les conseils et les remarques objectives et ses orientations pour faire avancer ce travail et pour l'autonomie qu'a développée en moi. Je suis aussi reconnaissante pour sa constante disponibilité et son profond dévouement.

Je tiens également à remercier et à exprimer ma sincère gratitude au professeur EL HAJI Mounia ; professeur de l'enseignement supérieure à l'École nationale Supérieure d'Electricité et Mécanique- Casa, pour son encadrement, ses conseils, ses encouragements et aussi pour le temps consacré pour l'avancement de ce travail. Qu'elle trouve ici toute ma reconnaissance.

Mes remerciements s'adressent aussi au professeur AMMAR Emna et au professeur TRIKI Mohammed Ali d'avoir accepté de m'accueillir dans leur Unité de Recherche Environnements Côtiers et Urbains, (EPEIS) et à l'institut de l'olivier à Sfax. Qu'ils trouvent

ici l'expression de mes vifs remerciements notamment pour leur hospitalité et pour leur accueil chaleureux

J'adresse mes remerciements aux professeurs de l'enseignement supérieur MR. ABARIK Nour-Edine, MR. EL HALOUANI Hassan, MR. SFAIRA Mouhcine, de m'avoir honoré par leur présence en acceptant d'être rapporteurs de ce travail et de siéger au jury de cette thèse. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes vifs remerciements.

Mes remerciements s'adressent également au professeur TALEB Mustapha et au professeur CHEMLAL Souad pour l'intérêt qu'ils ont toujours manifesté envers ce travail de recherche et d'avoir accepté de l'examiner. Je les remercie aussi pour leurs qualités humaines dignes d'estime. Qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance.

Je suis aussi reconnaissante aux conseils et à l'aide du professeur KINNANI Siham, professeur à la Faculté des sciences économiques et juridiques de Fès, pour l'intérêt qu'elle a apporté pour l'avancement de ce travail. Je tiens à lui exprimer ma gratitude pour son endurance, sa serviabilité et surtout son aide.

Je tiens à remercier également le Professeur ElAchqar Abdelrhani, vice-Président de l'Université Sidi Mohammed Ben Abdallah, d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse, merci pour votre présence et pour le temps que vous m'avez accordé malgré vos occupations.

J'adresse un remerciement particulier pour toute l'équipe pédagogique et administrative du département chimie de la Faculté des Sciences Fès, ainsi qu'aux Directeurs des Laboratoires du Département de Chimie en particulier le professeur EL YAZIDI et le professeur LACHKAR Mohammed pour leur générosité, leur gentillesse et pour tout l'aide qui nous ont porté tout au long ces 4 années.

Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude au docteur Mr. Ben ABBOU Mohamed, à Mr ANBARI Mohamed président de l'Union des Fédérations des Associations des Usagers de l'Eau Agricole et à Mr AMAHZOUNE Aissam pour toute l'aide qui m'ont apporté pour que ce travail voie le jour.

Je ne pourrai terminer mes remerciements sans y associer mes parents, mon frère, mes deux sœurs, mon fiancé, ma famille, mes amis et aussi mes collègues du laboratoire, merci de m'avoir toujours soutenue et cru en moi.

RÉSUMÉ

Les boues constituent le problème majeur des stations d'épuration d'eaux usées. Leur gestion ou leur mise en décharge sans traitement au préalable engendre de sérieux problèmes sur la santé publique et l'environnement à cause de leur forte charge en métaux lourds et en matières fermentescibles nauséabondes.

Cette étude vise la valorisation des boues par filière de compostage avec les déchets verts et d'autres substrats: fientes de volaille et margines, dans le cadre d'une économie circulaire et d'une agriculture durable. Le processus de compostage s'avère un moyen écologique valorisant les déchets en produisant un amendement pour sol.

Dans ce travail, deux types de composts ont été élaborés ; à l'échelle du laboratoire et à l'échelle semi; en appliquant la méthode des andains aérés pour la production d'un amendement des sols.

Deux types d'andains ont été réalisés ; un avec boues et l'autre sans boues ayant servi de témoin. Une caractérisation physicochimique et/ou spectroscopique de tous les matériaux utilisés a eu lieu avant et après co-compostage. Le processus de co-compostage a été contrôlé par analyses physico-chimiques et spectroscopiques. La maturité des composts produits a été évaluée par les tests de phytotoxicité et à plante sur des graines de cresson et des maïs. L'efficacité agricole a été examinée par leur application comme amendement organique sur la culture des Radis et de la Pomme de Terre et comme agent anti-pathogène du *Fusarium oxysporum et d'Erwinia*. Une estimation du coût de revient et une insertion sur le marché des intrants agricoles a été aussi effectuée par le biais d'une étude du marché et la proposition d'un business model.

La valorisation des boues par la filière de compostage a montré que les composts obtenus sont riches en éléments fertilisants, non toxiques et conformes aux normes françaises relatives aux amendements organiques NF 44-51 des composts urbains et NF U 44-095 des composts à boues.

L'application des composts comme amendement organique a amélioré la production et les paramètres végétatifs des cultures étudiées, et la qualité du sol en matières organiques. Les tests *in vitro* de l'activité antifongique des jus des composts contre le *Fusarium oxysporum* a

révélé une inhibition de la croissance mycélienne du champignon du Fusarium Oxysporum arrivant à 70 % et une présence des halos signifiant un pouvoir antibactérien contre l'Erwina du type intracellulaire.

Le coût de revient estimé du compost à boues est légèrement élevé. Sa production nécessite un vrai engagement de la part de la société, des autorités et des citoyens pour le tri à la source des déchets à composter.

Mots clé : Boues, Valorisation, amendement, Activité antifongique, Activité antibactérienne, coût de revient,

ABSTRACT

Sludge is the major problem of wastewater treatment plants. Their management or dumping without prior treatment causes serious problems for public health and the environment because of their high load of heavy metals and foul-smelling fermentable matter.

This study aims at the valorization of sludge by composting with green waste and other substrates: poultry droppings and margins, within the framework of a circular economy and a sustainable agriculture. The composting process is an ecological way to valorize the waste by producing a soil amendment.

In this work, two types of composts were developed; at the laboratory scale and at the semi; scale by applying the aerated windrow method for the production of a soil amendment.

Two types of windrows were made; one with sludge and the other without sludge used as a control. A physicochemical and/or spectroscopic characterization of all the materials used took place before and after co-composting. The co-composting process was monitored by physicochemical and spectroscopic analyses. The maturity of the produced composts was evaluated by phytotoxicity and plant tests on watercress seeds and corn. The agricultural efficiency was examined by their application as organic amendment on Radish and Potato crops and as anti-pathogenic agent of Fusarium oxysporum and Erwinia. A cost estimate and an insertion in the market of agricultural inputs was also carried out by means of a market study and the proposal of a business model.

The valorization of sludge through the composting process has shown that the composts obtained are rich in fertilizing elements, non-toxic and in conformity with the French standards relating to organic amendments NF 44-51 for urban composts and NF U 44-095 for sludge composts.

The application of composts as an organic amendment improved the production and vegetative parameters of the studied crops, and the organic matter quality of the soil. The in vitro tests of the antifungal activity of the compost juices against Fusarium oxysporum revealed an inhibition of the mycelial growth of the Fusarium Oxysporum fungus reaching 70% and the presence of halos signifying an antibacterial power against Erwina of the intracellular type.

The estimated cost of sludge compost is slightly high. Its production requires a real commitment from society, the authorities and the citizens to sort the waste to be composted at source.

Key words: Sludge, Valorization, amendment, antifungal activity, antibacterial activity, cost price,

ملخص :

تشكل الحمأة مشكلة رئيسية بمحطات معالجة مياه الصرف الصحي إد ان تدويرها أو دفنها دون علاج يتسبب لمديري المحطات في مشاكل خطيرة تضر الصحة العامة والبيئة ودالك بسبب حمولتهم الثقيلة من المعادن والمواد المخمرة التي تصدر روائح كريهة تثير الغثيان.

تهدف هذه الدراسة إلى تثمين الحمأة من خلال عملية التسميد بالموازنات مع مكونات اخرى مثل: النفايات العضوية فضلات الدواجن والمرجان ،و دالك في سياق تدعيم برنامج تثمين النفايات .اد ان عملية التسميد طريقة صديقة للبيئة اد تمكن من اعادة تدوير النفايات منتجتا سمادا يساهم في تعديل وتقوية التربة.

في هذا البحث ، تم عمل عل انتاج نوعين من السماد العضوي ؛ 100 كغ على نطاق و70 طن على النطاق شبه الصناعي بكمية ؛ ودالك بتطبيق طريقة نصب اكوام في الهواء الطلق بهدف انتاج سماد طبيعي معدل للتربة .

و من اجل دلك، تم إجراء توصيف فيزيائي كيميائي أو طيفي لجميع المواد المستخدمة قبل وبعد عملية التسميد. تم التحكم في عملية التسميد وتتبعها عن طريق تحليل المعلمات الفيزيائية والكيميائية (درجة الحرارة، درجة الحموضة، CE، نسبة C / N، MO،...)، التحليل الطيفي (UV- المرئ ، FTIR، DRX). تم تقييم نضج السماد العضوي بواسطة اختبار السمية النباتية (مؤشر الإنبات) واختبار النبات على بذور الجرجير والذرة. و تم فحص ال كفاءته الزراعية من خلال تجربته

كسماد عضوي على زراعات الفجل والبطاطس و كمبيد ضد الفيوزاريوم و الإيروينية و في الوقت نفسه، تم القيام بدراسة اقتصادية عن طريق تقيم سعر تكلفته و اشكالية طرحه في سوق المنتجات الزراعية عن طريق دراسة السوق المنتوجات الزراعية واقتراح نموذج لتسويقه

أظهر تدوير الحمأة من قبل صناعة السماد أن السماد المتحصل عليه يتميزبنسبة C / N= 12 ، ونسبة المادة العضوية تصل الى45 ٪ ومؤشر الإنبات يساوي 80 ٪ مما يشير إلى نضجها و يشير الى غياب السمية النباتية. كما كشفت التحليلات الطيفية تطور المواد العضوية وقد أكدت تحاليل المعادن الثقيلة أن الاسمدة المحصل عليها غنية بالمواد المعدنية غير سامة وتتوافق مع المعايير الفرنسية للأسمدة العضوية NF 44-51 من السماد الحضري وسماد الحمأة NF U 44-095.

أدى استخدام السماد العضوي كمقوي التربة إلى تحسين الإنتاج والمحاصيل اضافة الى تحسين التربة. بينما كشفت تجارب عصير السماد كمضاد لفطري الفيوزاريوم أوكسيسبورام عن انه يوقف نمو هدا الفطر بنسبة 70 ٪اما عن استعماله كمضاد ضد اروينية فقد اثبت التجارب عن ووجود هالات تدل على قوة عصير السماد ضد هده الاخيرة.

وقد اثبتت الدراسة الاقتصادية لتقيم تكلفة إنتاج السماد الحمأة أن الانتقال بتجربة من المختبر إلى الصناعة مكلف و معقد و يتطلب التزامًا حقيقيًا من جانب الاطراف المعنية، السلطات والمواطنين لنجاحه.

كلمات البحث : الحمأة، تدوير النفايات، السماد، مضاد للفطريات، مضاد للجراثيم، تكلفة الانتاج، دراسة السوق

Liste des abréviations :

PND : Plan National des Déchets Ménagers

PNGDD : Plan National de Gestion des Déchets Dangereux

EPGE : Programme de Protection et de Gestion de l'Environnement

PNE : Plan National de l'Eau

PNAL : Plan National d'Assainissement Liquide

SNRVD : Stratégie Nationale de Réduction et de Valorisation des Déchets

STEP : Station d'épuration des eaux usées

RADEEF : Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité de la ville de Fès

PNVD : Programme National de Valorisation des Déchets

FSDM : Faculté des Sciences Dhar El Mahrez Fès

HAPs : Hydrocarbures aromatiques polycycliques

ISDND : Installations de Stockage des Déchets Non Dangereux

CCME : Le Conseil canadien des ministres de l'environnement

SCC : Sous-Comité du compostage

GTGDS groupe de travail sur la gestion des déchets solides

ONCA : Office National du Conseil Agricole

ONSSA : Office National de Sécurité Sanitaire des produits Alimentaires

U.S.E.P.A : United States Environnemental Protection Agency

DH : Dirham marocain

Liste des figures

Figure 1: Evolution de la température des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps..... 54
Figure 2: Evolution de la température des composts C_{SI} et CB_{SI}..... 55
Figure 3: Evolution du pH des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps 57
Figure 4: Evolution du pH des mélanges C_{SI} et CB_{SI} en fonction du temps 57
Figure 5: Evolution de la conductivité des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps..... 59
Figure 6: Evolution de la conductivité des C_{SI} et CB_{SI} en fonction du temps..... 59
Figure 7: Evolution de l'humidité des mélanges CL et CBL en fonction du temps 60
Figure 8: Evolution de l'humidité des composts C_{SI} et CB_{SI} 61
Figure 9: Evolution de la matière organique des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps.. 62
Figure 10: Evolution de la matière organique des mélanges C_{SI} et CB_{SI} 62
Figure 11: Taux du Carbonne organique des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps 64
Figure 12:Taux du Carbonne organique des mélanges C_{SI} et CB_{SI} en fonction du temps..... 64
Figure 13: Evolution de la teneur en azote total des mélanges C_{SI} et CB_{SI} en fonction du temps 66
Figure 14: Evolution du rapport C/N des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps 67
Figure 15: Evolution du rapport C/N des mélanges CB_{SI} et C_{SI} en fonction du temps..... 68
Figure 16: Evolution de la densité des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps 69
Figure 17: Spectre D'IFR du mélange CB_L à différents stades du co-compostage 69
Figure 18: Spectres d'IFR des deux composts C_{SI} et CB_{SI} à la phase de maturation..... 71
Figure 19: Evolution du rapport E_4/E_6 des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps 72
Figure 20: Diagrammes DRX des composts matures 73
Figure 21: Composts matures observés au microscope électronique à balayage (MEB) 74
Figure 22: Evolution de la respiration au sein des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps 75

Figure 23: Indice de germination des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps 76
Figure 24: Diagramme d'analyse des composantes principales (ACP) des paramètres physico-chimiques des mélanges sans boues 80
Figure 25: Diagramme d'analyse des composantes principales (ACP) des paramètres physico-chimiques des mélanges avec boues. 80
Figure 26: Localisation du champ cultivé 95
Figure 27: Longueur de la tige du radis en fonction du temps 101
Figure 28: Effet comparatif de la longueur de la tige du radis en fonction du type d'amendement 101
Figure 29: Effet comparatif du nombre des feuilles par plante du radis en fonction du type d'amendement 102
Figure 30: Surface foliaire des feuilles du radis en fonction du temps 103
Figure 31: Effet comparatif de la surface foliaire des feuilles du radis en fonction du type d'amendement 104
Figure 32: Les radis récoltés 104
Figure 33: Effet comparatif du calibre (longueur et diamètre) du fruit racinaire du radis en fonction du type d'amendement 105
Figure 34: Effet comparatif du rendement total de la culture du radis en fonction du type d'amendement 106
Figure 35: Effet du type et du taux d'amendement de la culture sur le rendement du radis .. 106
Figure 36: Nombre de feuilles/ plate de la pomme de terre en fonction du temps : Essai à la parcelle 108
Figure 37: Effet comparatif du nombre de feuilles par plante de la pomme de terre en fonction de type d'amendement. Essai à la parcelle 109
Figure 38: Evolution de la surface foliaire des feuilles de la pomme de terre en fonction du temps : Essai à la parcelle 110
Figure 39: Effet comparatif de la surface foliaire des feuilles de la pomme de terre en fonction du type d'amendements 110
Figure 40: Effet comparatif du nombre de tiges de la pomme de terre par plante en fonction du type d'amendement 111
Figure 41: Longueur de tiges de la pomme de terre en fonction du temps : Essai à la parcelle 112
Figure 42: Longueur de tige de la pomme de terre en fonction du temps: Essai au champ ... 113
Figure 43: Longueurs des tiges de la pomme de terre en fonction du type d'amendement au champ et la parcelle 114
Figure 44:Pommes de terre récoltées 114
Figure 45: Effet comparatif du nombre de plants germés par parcelle de la pomme de terre en fonction du type d'amendement 115

Figure 46: Effet comparatif du nombre des tubercules par plante de la pomme de terre en fonction du type d'amendement 116
Figure 47: Effet comparatif de la longueur et du diamètre des tubercules de la pomme de terre en fonction du type d'amendements : Essai de la parcelle 117
Figure 48: Effet comparatif de la longueur et du diamètre des tubercules de la pomme en fonction de type d'amendement; Essai au champ 117
Figure 49: Effet comparatif du rendement par plante de la pomme de terre en fonction du type d'amendement 118
Figure 50: Effet comparatif du rendement total de la pomme de terre en fonction du type d'amendement 119
Figure 51: Technique des puits 130
Figure 52: Paramètres physico-chimiques des jus des composts C et CB en fonction du temps de leur fermentation 131
Figure 53: Activité Antifongique des Jus de Compost contre le Fusarium oxysporum 134
Figure 54: Les meilleures inhibitions du Fusarium Oxysporum des jus de composts C et CB 135
Figure 55: Effets des différents jus du compost sur l'Erwinia 136
Figure 56: Activité antibactérienne des jus des composts C et CB sur l'*Erwinia* par la technique de confrontation 137

Liste des tableaux

Tableau 1: Modes de gestion de l'assainissement liquide en milieu urbain (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, 2011). 10
Tableau 2: Composition des boues (FNDAE, n° 09) 12
Tableau 3: Caractéristiques principales moyennes des boues de diverses stations d'épuration (El Fels, 2014) 13
Tableau 4: Normes d'utilisation agricole des boues dans les pays européens 23
Tableau 5: Valeurs limites de classement des composts, classe A (sans risque à l'utilisation)26
Tableau 6: Limites normatives en métaux lourds (mg/Kg Ms) dans les composts 26
Tableau 7: Produits phytosanitaires 28
Tableau 8: Pertes engendrées au niveau des cultures avec ou sans protection phytopharmaceutique (Batsch, 2011) 29
Tableau 9: Principaux amendements minéraux (Cordier, 2013) 30
Tableau 10: Proportions initiales des déchets compostés 41
Tableau 11: Caractéristiques des substrats à composter pour l'essai de laboratoire 50
Tableau 12: Composition des substrats à composter pour l'essai semi industriel 50
Tableau 13: Caractérisation des margines en matière polluantes 51
Tableau 14: Charge métallique des boues de STEP 51
Tableau 15: Caractérisation physico-chimique des mélanges initiaux (t = 0) 52
Tableau 16: Evolution des composés azotés dans les composts CL et CBL en fonction du temps 65
Tableau 17: Valeur moyenne d'indice de germination des composts C_{SI} et CB_{SI} 77
Tableau 18: Suivi du poids des graines de mais au cours du processus de compostage pour les composts C_L et CB_L 78
Tableau 19: Description visuelle des composts élaborés 81
Tableau 20: Composition des composts matures 82
Tableau 21: Traitement des mailles par les amendements 89
Tableau 22: Caractérisation des amendements étudiés (CB, C et F) 94
Tableau 23 : Caractérisation des sols de la FSDM avant la plantation 96
Tableau 24: Analyse du sol du champ 97
Tableau 25: Ferti plan pour les pommes de terre 97
Tableau 26: Analyse de l'eau d'irrigation de la faculté 98
Tableau 27: Analyse de l'eau d'irrigation du champ 99
Tableau 28: Qualité nutritionnelle des pommes de terre cultivées 120
Tableau 29: Valeurs énergétiques des pommes de terre cultivées 120
Tableau 30 : Caractérisation des sols après la plantation 121
Tableau 31:Méthodes standardisées d'analyses 129
Tableau 32: Codage et composition des jus étudiés 133

Tableau 33: Marchés de volume et de valeur pour le compos *(Recyc-Québec;2006)* 142
Tableau 34: Evaluation du coût de revient 148
Tableau 35: Analyse de la concurrence du marché de compost 150
Tableau 36: Résultats de l'enquête réalisée sur les consomateurs du compost 153
Tableau 37: Résultats de l'enquête réalisée sur les non consommateurs du compost 159
Tableau 38: Analyse de la variance ANOVA des différentes hypothèses (Cas des consommateurs) en fonction du prix du compost 165
Tableau 39: Analyse de la variance ANOVA des hypothèses suposées (Cas des non consommateurs) en fonction du prix du compost 166

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

La croissance démographique, l'urbanisation, la modernisation, le changement de mode de vie, de production et de consommation, le développement des activités socio-économiques s'accompagnent annuellement d'un accroissement de plus en plus important de la demande en eau et de la production des déchets. En effet, le volume d'eaux usées déversées au Maroc est près de 550 Mm^3 par an (Loudni, 2017). Elles sont d'origine domestique, industrielle et agricole. Seuls 21 % des eaux usées générées sont traitées, tandis que 79 % sont rejetées à l'état brut dans le milieu naturel : 54 % dans l'Atlantique, 41,5 % dans les oueds et rivières et 4,5 % dans la Méditerranée (CFCIM, 2015). Quant au volume des déchets solides produits, il a plus que doublé depuis l'année 1970 et est estimé à environ 7 M de tonnes en 2017 et pourrait atteindre 12 M de tonnes en 2021. 5,2 M tonnes de ces déchets parviennent des ménages, 975 000 tonnes de déchets industriels (dont 12,3 % de déchets dangereux) et 12000 tonnes de déchets médicaux. Seuls 10 % des déchets ménagers et 23 % des déchets industriels produits sont recyclés. 73 % de ces derniers sont évacués dans des centres d'enfouissement technique et 4 % sont incinérés dans des fours à ciment (Viatour, 2019).

Conscient de ces enjeux, le Maroc s'est engagé à renforcer et à structurer les secteurs de gestion des déchets et de traitement des eaux usées et à mettre en œuvre une politique nationale visant un développement durable et une meilleure gestion des ressources naturelles afin de promouvoir une industrie propre à forte valeur ajoutée. Plusieurs programmes spécifiques visent à améliorer cet état critique par la gestion des déchets, ainsi que le traitement et la réutilisation des eaux usées d'une manière directe ou indirecte de la totalité du potentiel en eau utilisable d'ici 2030, soit 325 millions de m^3/an (Haut Commissariat au plan, 2006). Parmi eux, le Plan National des Déchets Ménagers (PNDM) (SEEE, 2015), le Plan National de Gestion des Déchets Dangereux (PNGDD) (Décret n° 2-14-85, 2015), le Programme de Protection et de Gestion de l'Environnement (EPGE) (Cesana, 2015), le Plan National de l'Eau (PNE) et le Plan National d'Assainissement Liquide (PNAL) (Haut Commissariat du Paln, 2006), ayant pour objectif principal le traitement de 60 % des eaux usées collectées et un taux de raccordement de 80 % au réseau sanitaire en zones urbaines, etc. Actuellement, 45% d'eaux usées sont traitées grâce à 117 stations d'épuration (Loudni, 2017).

En dépit de ces efforts, la gestion des déchets demeure jusqu'à présent limitée et confrontée à des problèmes en matière d'évacuation, de traitement, de recyclage et de valorisation vue

l'absence de certaines lois face à la diversité et la quantité des déchets produits, notamment ceux générés par les stations d'épuration des eaux usées, sous forme de boues après leur cogénération et stabilisation ou non par la chaux. Pour une population de l'ordre de 32 millions d'habitants (Viatour, 2019), la production annuelle de boues des 117 STEP, au Maroc, est près de 435 600 tonnes/an (AFILAL, 2015), l'équivalent de 30 à 40 grammes de matière sèche (MS) par habitant et par jour. La mise en décharge s'avère une technique très polluante, impacte le sol et la qualité du biogaz produit et est légalement interdite dans de nombreux pays (directive 1999/31/CE). Par ailleurs, l'incinération de boues a un coût prohibitif et présente un risque, lié au dégagement des dioxines et autres gaz très toxiques, sur l'environnement. La recherche d'une méthode de valorisation intégrale de ces boues est très souhaitable et contribuera à la réalisation des objectifs de la Stratégie Nationale de Réduction et de Valorisation des Déchets (SNRVD) établie par le ministère de l'Environnement qui souhaite faire du traitement des déchets un pôle de développement économique. Cette stratégie repose sur 8 axes, parmi lesquels, le développement d'une économie circulaire favorable à la création d'emplois et le renforcement du cadre législatif et réglementaire relatif à la réduction-valorisation des déchets (Diouf, 2019).

De nombreuses techniques de traitement physique, physico-chimique, et biologique ont été développées pour diminuer la teneur en eaux des boues, leur charge polluante et fermentescible afin de les préparer à une ultime étape de valorisation ou d'élimination.

Les techniques de valorisation ou d'élimination les plus répandues sont, d'une part, **la valorisation énergétique** dont fait partie **l'incinération** (Elouazzani et al., 2012), **la Co-incinération** (H. ILIN et M. Xiaoqian, 2012)**, la bio-méthanisation** (Mellak et al., 2019), l**e stockage en installation des déchets non dangereux** (Amorce, 2012). D'autre part, la **valorisation organique** à savoir : L'épandage (Pilli, 2015), et le compostage (Amir, 2005 ; Albrecht, 2007 ; EL Fels, 2014). D'autres solutions alternatives sont en voie de développement telles que l'oxydation par voie humide (Lendormi, 2000), leur incorporation dans la fabrication des matériaux de construction (Naamane, 2014), le pyrolyse ou le thermolyse, la technique mycélienne, la gazéification et la plastification (Amorce, 2012).

Certains de ces procédés semblent efficaces mais leur application dépend surtout des contraintes socio-économiques. Cependant, la valorisation agricole par épandage directe est la plus adoptée pour l'élimination de ce déchet dans plusieurs pays. Plusieurs travaux ont montré

que l'épandage direct des boues présente un danger sur le sol à long terme (Pisson, 2000; Muller, 2016).

Ainsi, la ville de Fès est dotée d'une station d'épuration des eaux usées (STEP), d'une capacité de traitement de 1,2 million Équivalent Habitant soit la pollution journalière correspondant à 1,2 million de personnes. Elle est conçue pour traiter jusqu'à 155.000 m³ d'eaux usées par jour avant rejet dans l'Oued Sebou. Actuellement, elle traite tous types d'eaux usées (Domestique, agricole, industrielle) avec un débit de l'ordre de 130.000 m^3/j (El Allaoui, 2018). A la sortie de cette station, l'eau épurée est rejetée dans Oued Sebou et les boues, estimées à 140 000 tonnes/jour sont épaissies ou traitées par flottation puis l'ensemble est digéré pour produire du biogaz qui est ensuite transformé en énergie. Les boues récupérées après digestion (Environ 78 tonnes par jour) (Ait Ayane, 2009) subissent un traitement par chaulage pour éviter leur fermentation pendant leur stockage et étaient destinées jusqu'à la fin de l'année 2016 à la décharge contrôlée de Fès. Soucieux de la problématique générée par le stockage de ces déchets la Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité de la ville de Fès (RADEEF) s'est investi dans des travaux de recherche en collaboration avec le Laboratoire d'Ingénierie d'électrochimie, de Modélisation et d'Environnement (LIEME) de la Faculté des Sciences Dhar El Mahrez Fès (FSDM) pour la réduction de la siccité des boues de 70 % à 30 % (El Madani, 2015) et leur épandage dans des terrains au voisinage de la STEP avec des épaisseurs bien étudiées. La solution proposée a été appliquée jusqu'à l'année en cours. Cependant, elle s'est avérée peu efficace, non durable et engendre aussi les mêmes problèmes lors de leur mise en décharge, comme elle risque de nuire au sol et par conséquent à la nappe phréatique de la région.

Par ailleurs, la richesse des boues en matières organiques et le besoin en matières organiques stables des sols au Maroc a poussé plusieurs chercheurs à s'orienter vers le développement de leur valorisation agricole, notamment par filière de compostage. Leur apport contribue à une agriculture durable et une réduction du taux d'appauvrissement des sols. A cet effet, la valorisation agricole des boues, considérées comme des déchets industriels, est une des techniques vertes permettant de les transformer en un produit de valeur minimisant, ainsi, la pollution et rentrant notamment dans le cadre de la stratégie du Programme National de Valorisation des Déchets (PNVD). Ce programme a fixé le recyclage de 20 % et la valorisation d'au moins 30 % des déchets générés à l'horizon 2020 (Innovant Magazine, 2017).

Récemment, le co-compostage des boues avec des déchets organiques constitue une solution écologique qui est en voie de développement pour réduire leurs problèmes environnementaux, tout en aboutissant à un amendement caractérisé par une matière organique stable et riche en nutriments (Abid, 2018).

Ce travail s'est focalisé sur la valorisation des boues de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Fès par le procédé de co-compostage en utilisant d'autres déchets de la région à savoir : Les déchets ménagers organiques, les fientes de volailles, issues de l'élevage des poules pondeuses, et les margines pour l'humidification.

Dans ce contexte, nous avons subdivisé le travail en cinq chapitres :

- **Le premier chapitre** est consacré à une synthèse bibliographique, rappelant la problématique des rejets liquides et solides, en particulier, des boues des stations d'épuration en mettant l'accent sur les solutions actuelles du traitement des boues au Maroc et ses différents modes de valorisation et d'élimination. Cette revue bibliographique est aussi un rappel des états des réseaux d'assainissement, des stations d'épuration des eaux usées et des sols au Maroc et une description des méthodes employées dans ce travail.
- **Le deuxième chapitre** présente l'élaboration des composts avec la caractérisation des substrats à composter et la qualité des composts finaux produits aux échelles du laboratoire et semi-industrielle; ainsi que les résultats de l'analyse des composantes principales effectuée sur l'influence des principaux paramètres physico-chimiques et biologiques des mélanges, au cours de leur transformation sur la qualité des composts élaborés à partir des boues d'épuration.
- **Le troisième chapitre** est dédié à l'application agricole des composts élaborés comme amendement pour la culture des radis et de la pomme de terre, dans deux types de terrains, l'un est situé à la faculté des sciences et le deuxième au champ d'un agriculteur.
- **Le quatrième chapitre** est réservé à l'application des composts produits pour la lutte biologique contre le *Fusarium oxysporum* et contre l'*Erwinia amylovora.*
- **Le cinquième chapitre** porte sur une étude économique du compost, élaboré à partir des boues d'épuration, son coût de revient, son marché de concurrence et son insertion dans le marché des produits agricoles. Finalement une présentation de son propre business model sera réalisée afin de populariser les produits élaborés.

CHAPITRE I: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

Les boues des stations d'épuration des eaux usées présentent une source de contamination et de pollution de l'air, de l'eau et du sol. Ces boues sont de couleur brune, se caractérisent par une odeur désagréable et une forte charge polluante (El Fels, 2014) due principalement à leur richesse en métaux lourds, en germes et en parasites. Ce sont classées parmi les déchets dangereux car, il est toujours difficile de définir la nature, le volume et les caractéristiques chimiques des divers produits chimiques qu'elles contiennent et dont elles sont imprégnées (Ghezri, 2013).

Ce chapitre a pour principal objectif de présenter l'état de l'art des points liés à ce sujet : l'assainissement, les stations d'épurations des eaux usées (STEP), les techniques de traitement des eaux usées et les boues (Types, leurs origines et leurs méthodes de traitement et de valorisation) et il s'articule autour de quatre axes :

- Le premier décrit l'état de l'art d'assainissement liquide à l'échelle nationale et régionale, la situation des stations d'épurations au Maroc et les procédés adoptés pour le traitement des eaux usées.
- Le deuxième révèle la problématique des boues, leur devenir, les méthodes de leur traitement, d'élimination et de valorisation en particulier la filière de compostage.
- Le troisième axe dresse l'état des lieux des sols marocains pauvres en matières organiques et les maladies phytopathogènes qui détruisent les champs.
- Le dernier axe est dédié à une synthèse sur les méthodes statistiques et économiques générales exploitées dans ce travail.

I. Etat de l'art des déchets au Maroc

L'urbanisation croissante des territoires reste un phénomène majeur dans les pays en voie de développement, notamment le Maroc, surtout qu'elle est accompagnée d'une éclosion des déchets solides et liquides néfastes pour la santé publique et l'environnement. Actuellement, la production nationale annuelle des déchets s'est élevée à environ 7 millions de tonnes/an soit une production de 18 000 t/jour de déchets ménagers et donc environ 250 kg/hab/an (CFCIM, 2015).

Ces déchets renferment aujourd'hui une gamme très hétérogène de produits (Déchets verts, alimentaires, d'élevages et industriels : papiers, emballages plastiques et métalliques et boues,…). Les boues, à elles seules, représentent le 1/5 des déchets produits. Leur gestion dépend à la fois de la croissance démographique et d'urbanisation conjugué à un exode rural massif, de l'amélioration des conditions de vie des populations et du type d'assainissement.

I.1 Assainissement au Maroc

Au début des années 2000, l'analyse de la situation d'assainissement au Maroc fait apparaître d'importants retards. Pour cela, le Maroc a entrepris récemment une politique de gestion volontariste en matière de Développement Durable et de Protection de l'Environnement incitant à la création d'un département gouvernemental responsable de l'environnement, qui depuis sa création a programmé plusieurs axes comprenant des services professionnels de collecte, nettoyage et stockage des déchets ménagers et amélioration des raccordements des eaux usées produites.

Le secteur des déchets solides au Maroc a bénéficié de l'aide de la Banque Mondiale; ce qui a permis l'amélioration de la gestion de ce secteur (ANGed, 2014), en termes :

- De collecte professionnelle par des compagnies privées dans environ 80 municipalités, l'équivalent de 50% de la population urbaine au Maroc ;
- De l'augmentation du taux des déchets solides municipaux enfouis dans des décharges contrôlées de 10% avant 2008, 28% en 2010 et 33% en 2011 et jusqu'à 35% pour l'année en cours;
- De la mise en place de 14 décharges sanitaires, dont 11 sont opérationnelles (Fès, Oujda, El Jadida, Essaouira, Rabat, Berkane, Figuig, Guelmim, Al Hocima, Agadir,

Mohammedia-Benslmane, Nador, Dakhla et Laayoune) comparées aux 6 décharges avant 2008, 10 décharges en 2010, et 13 en 2011 ;

- La prévention de 5 décharges contrôlées sont en cours de constructions (Ifrane, Khouribga, Casablanca, Safi, et Tata) ;

D'initiatives incluant les ramasseurs de déchets pour une considération systématique des préoccupations sociales à chaque niveau du système de gestion des déchets solides.

Pendant les trois dernières années et par le biais de la Coopération Allemande, le secteur des déchets industriels dangereux a été nettement amélioré par l'établissement d'un Plan National de Déchets Dangereux (PNDD) et la création d'un Centre National de Traitement de Déchets Dangereux (CNTDD). Des efforts considérables ont été requis pour structurer ce secteur comprenant les flux de déchets suivants : industriels, médicaux, électriques et électroniques, déchets de construction et de démolition, d'emballages, de pneumatiques, et de carburants et lubrifiants (Mouline, 2012).

Pour le secteur d'assainissement liquide, le linéaire total du réseau d'assainissement n'assurait qu'une couverture partielle des zones urbaines, et l'épuration des eaux usées comptaient juste un nombre très modeste de stations. Ce retard considérable porte un préjudice grave à la préservation des ressources en eaux et à l'environnement de manière générale.

Pour se rattraper, sur le plan juridique, la Loi 10-95 sur l'Eau modifiée par la loi 36- 15 a été promulguée pour combler le vide existant. Cette loi a fixé parmi ses objectifs la protection et la conservation quantitative et qualitative du domaine public hydraulique. A cet effet, le Département de l'Environnement et le Ministère de l'Intérieur Marocain ont établi le Programme National d'Assainissement Liquide et d'Epuration des Eaux Usées (PNA) lancé en 2005. Ce consistait en la réhabilitation, l'extension, le branchement, le renforcement du réseau pluvial et la réalisation des stations d'épuration pour équiper 330 villes et centres urbains (Kopitopoulos, 2005) afin de :

- répondre aux objectifs du millénaire du sommet de Johannesburg
- atteindre un taux de raccordement global au réseau d'assainissement de plus de 75% en 2016, de 80% en 2020 en milieu urbain.
- rabattre la pollution de 60 à 80 % au moins.
- traiter jusqu'au niveau tertiaire les eaux usées et les réutiliser à 50 % en 2020.
- réduire la dégradation environnementale et améliorer la qualité de l'eau des systèmes aquatiques.

- maîtriser les risques sanitaires liés à la qualité de l'eau.
- créer des conditions favorables pour la réutilisation des eaux usées épurées.

I.2 Situation des stations d'épuration des eaux usées

Les stations d'épuration sont spécialisées dans le traitement des eaux usées et ont pour rôle leur purification et leur dépollution avant leurs rejets dans la nature. En effet, le taux d'épuration des eaux usées est passé de 6 % en 2005 à 28 % à la fin de 2012 et à plus de 71 % à la fin de 2016 grâce à 113 stations d'épuration des eaux usées (STEP) fonctionnelles. Le tableau 1 regroupe les modes de gestion de l'assainissement liquide actuel en milieu urbain au Maroc.

Tableau 1: Modes de gestion de l'assainissement liquide en milieu urbain (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, 2011)**.**

Organisme	Municipalité ou Commune	Régies	ONEP	Sociétés privées	Totale
Nombre de centres	261	16	17	17	311

Les différentes régies publiques ont aussi réalisé quatorze stations dont chacune a environ une capacité de traitement de 130 000 m^3/j et qui sont situées à M'zar, El Jadida, Oualidia, Meknès, Fès, Marrakech, Oujda, Settat, Soualem, Deroua, Sidi Rahal, Ras El Aïn, Ouled Saïd, et Sidi El Aïdi…. Onze parmi elles, sont dotées d'un système de traitement tertiaire tel que le recommande l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (Martin, 2013).

Pour les années à venir, les régies autonomes ont prévu de réaliser 18 nouvelles STEP, entre autres à Aourir, Béni-Mellal, Azemmour, Taza, Tlet Louled et Larache, et l'extension de 3 autres à Marrakech, Oujda et Settat.

Malgré que la construction des stations d'épuration des eaux usées ait débuté au Maroc depuis les années cinquante, le secteur d'assainissement connait encore une défaillance structurelle importante. En effet, l'épuration des eaux usées, reste la composante qui connaît le plus de retard. Les problèmes rencontrés actuellement par ces dernières sont de deux natures :

- d'ordre technique : Une inadaptation de la filière de traitement aux moyens et aux besoins locaux ou encore par le défaut de conception des ouvrages.

– d'ordre institutionnel : Du fait que l'institution chargée de gérer l'assainissement se trouve confrontée à une absence de budget, un manque d'information des élus locaux et à une absence de planification à court et à long terme (Kopitopoulos, 2005).

I.3 Aperçu sur la station d'épuration de la ville de Fès

La ville de Fès, avec une capacité démographique de 1.3 million d'habitants, déverse un volume d'eau usées de 38 millions m³ (Waterleau, 2015) dont 155 400 m^3/j sont traitées dans une station d'épuration (STEP) à boues activées représentant ainsi 1,2 million d'équivalent habitant et une dépollution de 64 t/j en charge organique biodégradable. Avec ce volume très important d'eaux non traitées la ville de Fès serait responsable à hauteur de 40% de la pollution d'Oued Sebou. Actuellement, cet Oued est classé parmi les Oueds les plus pollués à l'échelle nationale, et ceci a des effets néfastes sur la santé, les capacités d'irrigation et la potabilisation de l'eau.

La STEP de Fès comporte : Une filière de traitement d'eau constituée de plusieurs unités : Le pompage, le prétraitement, la décantation primaire, le traitement biologique avec l'aération de surface et deux autre filières : Le traitement des boues et la production du biogaz dont le but d'obtention de la chaleur et de l'électricité couvrant ainsi plus de 50% des besoins propres de la STEP. Ceci a contribué à l'amélioration de la qualité de l'environnement à travers l'épuration des eaux usées, l'élimination des nuisances olfactives, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la protection des ressources en eau contre la pollution (Ait Ayane et Dounia, 2009; Idrissi, 2018). Néanmoins, après cogénération des boues, on se retrouve avec de grands volumes de boues épuisées qu'il faut gérer. Actuellement, elles sont épandues sur les terrains de la STEP (EL MADANI, 2015). En effet, La station d'épuration des eaux usées de la ville de Fès, à elle seule, produit 120 tonnes des boues par jour (EL Madani, 2015) ; des résidus qui contiennent des composés toxiques en relation avec la nature des activités raccordées au réseau d'assainissement, industrielles ou domestiques.

II. Boues des stations d'épuration des eaux usées

II.1 Genèse des boues

Les boues des stations d'épuration désignent l'ensemble des résidus de l'activité biologique des micro-organismes vivants dans les stations d'épuration, qui transforment les matières transportées par les eaux usées pour qu'elles puissent en être extraites. Elles sont constituées essentiellement d'eau, de sels minéraux, de matières organiques, des éléments fertilisants, des

éléments traces métalliques et d'agents pathogènes (Microorganismes pathogènes, parasites,..) (Meftah, 2017), etc.

II.2 Types de boues produites par les stations d'épuration

Les boues primaires sont récupérées par simple décantation des eaux usées n'ayant pas subi de traitement. Elles sont très hétérogènes, riches en matières minérales (Micro- sables, terres) et contiennent de 65 % à 70 % de matières organiques putrescibles et susceptibles d'évolutions. Elles sont riches en eau, entre 90 à 95 %, et présentent une odeur fétide (Meftah, 2017).

Les boues secondaires: Ce sont les boues, issues des clarificateurs ou décanteurs après traitement biologique que ce soit en culture libre (Boues activées) ou en culture fixées (Lits bactéries disque biologiques). Elles sont constituées essentiellement de corps bactériens et de leurs secrétions, de couleur sombre, très organiques (75 %) plus homogènes que les boues primaires et ont moins d'odeur que les précédentes (Ramdani, 2007).

Les boues physico-chimiques sont obtenues par adjonction de réactifs (Sels de fer, d'aluminium) visant à coaguler la fraction colloïdale des matières contenues dans les eaux usées. Ce type de boues nécessite une stabilisation et pose des problèmes spécifiques de destination finale du fait des ajouts de réactifs, et plus particulièrement de sels métalliques (Ramdani, 2007).

Les boues mixtes sont composées du mélange des boues secondaires avec les boues primaires. Les boues mixtes, sont celles qui sont issues de la quasi-totalité des filières de traitement complètes. Ces boues nécessitent des traitements visant à réduire leur volume et à les stabiliser pour éviter tous risques sanitaires et environnementaux.

II.3 Composition des boues

Selon plusieurs auteurs (Jardé, 2005 ; Slim, 2008 ; Léonard, 2018), la composition des boues résiduaires est en fonction de nombreux paramètres à savoir : L'origine des eaux usées, la période de l'année, le type de traitement adopté, et le conditionnement de stockage pratiqué au sein de la station d'épuration. Après épaississement, une boue se présente généralement avec une composition moyenne indiquée dans le Tableau 2.

Tableau 2: Composition des boues (FNDAE, n° 09)

	Eau (g/L)	Sels dissous (g/L)	Phase liquide (%)	Phase solide (%)
Boues	950	1 à 2	95 à 98	2 à 5

Comme elle peut se caractériser en fonction du procédé d'épuration (Tableau 3)

Tableau 3: Caractéristiques principales moyennes des boues de diverses stations d'épuration (El Fels, 2014)

Procédé	Matière sèche (g / L)	Matière organique (%)
Boues activées en aération prolongée	20 à 50	60 à 70
Lit bactérien	40 à 70	50 à 60
Lagunage aéré	40 à 60	40 à 70
Lagunage naturel	50 à 100	30 à 60
Décanteur digesteur	70	40 à 60

Pour chacun des procédés, les principaux facteurs de variations sont :

- Le réseau unitaire : Augmente la teneur en matière minérale de la phase solide de 5 à 10% par rapport à un réseau séparatif.
- La déphosphoration : Augmente la teneur en phosphore de la phase solide jusqu'à 8-10% on le retrouve en grande partie redissous dans la phase liquide des boues (Roy-Dumesnil, 2016).

II.3.1 Eléments fertilisants et Eléments traces métalliques

D'importantes quantités en composés inorganiques usuels se trouvent dans les boues à savoir : N, P, K, Ca et Mg. L'apport de ces composés au sol peut couvrir, en partie ou en totalité les besoins des cultures en azote, en phosphore, en magnésie, calcium et en soufre. Cet apport peut aussi corriger des carences du sol (Hodomihou et al., 2016). Pour les éléments traces métalliques, des études concrètes (Amir, 2005; EL Idrissi, 2009) ont montré que la nature et la concentration des boues en ces éléments sont très dépendantes des activités raccordées au réseau des eaux usées et que l'essentiel des contaminations chimiques vient des rejets industriels et domestiques (Solvants, déchets de bricolage, peinture,...). Du fait de la décantation lors du traitement, ces contaminants chimiques se retrouvent dans les boues à de très grandes concentrations. La présence des éléments traces métalliques (Al, As, Cd, Co, Cu, Hg, Mn, Pb et Se…) est variable. Elle dépend de leur concentration et de leur forme chimique ou degré d'oxydation.

Généralement, ces composés sont toxiques à fortes doses, et sont non seulement non biodégradables et accumulatifs. EL Idrissi, 2009 a confirmé que le Cd, le Pb, et le Cr sont des toxiques potentiels. Plusieurs auteurs ont montré que la détermination de la teneur totale des

métaux lourds ne fournit pas d'informations utiles sur les risques de la biodisponibilité, ainsi qu'à la capacité de leur remobilisation et leur comportement dans l'environnement (Qasim, 2016). Il reste à signaler que ces éléments en traces tels que le cuivre et le zinc présents dans les boues sont aussi indispensables au développement des communautés du sol. Cependant, il faut juste bien contrôler leurs doses et leurs formes.

II.3.2 Polluants organiques

La matière fécale, les déchets ménagers, ainsi que les effluents industriels constituent la matière d'origine des boues, telle que les protéines, les acides aminés, les sucres et les graisses, d'origine animale ou végétale et qui restent non toxiques. Une multitude d'autres polluants organiques peuvent être contenus dans les boues ; notamment les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs), composés aliphatiques halogènes, chlorobenzènes, composés organiques volatiles (COV), phénols, dioxines…, (Lachassagne, 2015).

Les boues sont aussi le lieu de convergence de plusieurs autres types de polluants organiques tels que les colorants, les pesticides, les solvants, et les résidus de médicaments (Ngaram, 2015). Selon les données bibliographiques de Maroga Mboula (2012), un nombre important de ces produits sont utilisés dans la vie et aussi dans l'industrie et l'agriculture.

La présence de ces composés émergents à des concentrations de l'ordre de µg/L ou ng/L dans les milieux aquatiques et les sols est considérée comme une menace potentielle pour les écosystèmes environnementaux (Lapworth et al., 2012).

II.3.3 Germes et Parasites

D'après la littérature, les boues des STEP sont connues par leur pouvoir de concentrer une très grande diversité d'organismes pathogènes (Bactéries, virus, parasites…) (Dimane et al., 2016). Les différentes catégories de microorganismes pathogènes isolées des boues d'épuration sont généralement des bactéries, des virus, des Helminthes, des protozoaires, des champignons et les levures.

Cette grande diversité de germes et parasites ayant un potentiel pathogène élevé, rend leur quantification et leur détection difficiles (Bagge, et al., 2006) et par la suite leur réutilisation sans traitement au préalable serait quasiment impossible.

II.4 Traitement des boues des stations d'épuration des eaux usées

À la sortie des filières de traitement des eaux usées, les boues contiennent environ 95-99% d'eau qui se présente sous deux formes:

- Eau libre: Faiblement absorbée, pourrait être éliminée par déshydratation mécanique,

- Eau liée : Attachée à des bactéries ou d'autres particules, pourrait être éliminée par séchage thermique (> 105°C).

Afin d'en réduire leur volume, les stabiliser pour en améliorer leurs caractéristiques physiques et arrêter leur biodégradation, les boues des stations d'épuration subissent un traitement de quatre étapes :

- **L'épaississement** : réduit le volume et augmente la concentration des boues issues des traitements primaires des effluents urbains. Il consiste à laisser s'écouler les boues par gravitation à travers un silo placé au-dessus d'une table d'égouttage ou d'une toile semi-perméable. Le temps de séjour des boues doit être court afin de limiter les fermentations, il est de 24 à 48 heures au maximum. En sortie, les boues sont encore liquides avec une siccité de 4 à 6 %.
- **La déshydratation** : diminue la teneur en eau des boues, et réduit la siccité jusqu'à 40%, qui est variable selon la filière de traitement des eaux, la nature des boues et la technique de déshydratation utilisée : *Mécanique ou par géomembranes.*
- **Le séchage :** c'est une déshydratation quasi-totale des boues par évaporation de l'eau qu'elles contiennent. Il repose sur deux méthodes : Le séchage thermique ou des lits de séchage.
- **La stabilisation de la matière organique :** consiste à diminuer le caractère fermentescible des boues et de supprimer les mauvaises odeurs. Elle s'applique aux boues mixtes fraîches ou uniquement aux boues de traitement secondaire des eaux usées. Elle est de nature biologique, chimique ou thermique. Le choix du type de la stabilisation ou la méthode repose sur la nature des boues et la dimension de la station.

A l'issue des différentes étapes de traitement des boues, les teneurs en eaux et les charges polluantes fermentescibles seraient réduites, ce qui les préconise à des éventuels traitements par élimination ou valorisation.

II.5 Techniques de valorisation ou élimination des boues

II.5.1 Valorisation énergétique

II.5.1.1 Incinération

Les boues déshydratées sont des déchets difficiles à brûler en raison de leur hétérogénéité de leur texture compacte, de leur humidité importante (55-70%) et de leur faible pouvoir calorifique. Les fours traditionnels à grille sont mal adaptés pour leur incinération. Il est

avantageux de déshydrater préalablement et partiellement les boues afin d'augmenter leur pouvoir calorifique et de réduire les volumes à traiter. En général, pour des raisons techniques, la siccité des boues traitées dans un four doit être comprise entre 25 et 45 %.

Par ailleurs, l'incinération des boues de STEP permet la destruction de la matière organique des déchets par combustion à haute température (+ de 500 °C) produisant ainsi des fumées et des matières minérales résiduelles nommées cendres. Cette chaleur produite pourrait être récupérée sous forme de vapeur ou d'électricité pour le fonctionnement du four lui-même, pour le chauffage urbain ou industriel (Leonard, 2015).

II.5.1.2 Co-incinération

Dite aussi la co-combustion ou co-traitement thermique; elle consiste à valoriser thermiquement les boues en utilisant les équipements d'une installation de traitement thermique pour transformer les boues en cendre, avec une réduction de volume d'environ 90%. Ce procédé est assez performant, mais il est surtout simple et économique. D'un point de vue technique, la capacité de traitement, les proportions du mélange, la composition des déchets ménagers et la composition des boues sont les principaux paramètres dont il faudra tenir compte. De plus, la combustion des boues offre une possibilité de leur valorisation énergétique, surtout dans les fours de capacité importante tels les fours des cimenteries.

II.5.1.3 Stockage dans des Installations de Stockage des Déchets Non Dangereux (ISDND) ou décharge

L'intérêt de cette voie d'élimination réside dans la valorisation éventuelle du biogaz produit par la fermentation anaérobie des boues dans l'ISDND. Cette option reste une voie d'élimination peu onéreuse malgré la nécessité d'une déshydratation au préalable à 30 % et une réglementation plus stricte de l'enfouissement. Le coût d'évacuation pourrait néanmoins augmenter fortement lorsqu'il s'agira de stabiliser totalement les boues pour pouvoir, d'une part, les stocker ; et d'autre part, de parcourir la distance entre la station d'épuration et l'ISDND.

On note que cette voie doit être considérée comme une solution légitime mais de dernier recours d'élimination. La Directive Européenne 91/271 Interdit la mise en décharge des déchets n'étant pas considérés comme des déchets ultimes ou contenant plus de 70 % d'eau et plus de 10 à 20 % de matières organiques étant donné que ses risques peuvent influer sur la gestion de l'ISDND et sur la santé des employés et la population avoisinant ces installations.

II.5.2 Valorisation organique

II.5.2.1 Epandage

L'épandage agricole des boues de STEP est sans doute une solution envisageable vu leurs richesses en composés fertilisants tels que le carbone, l'azote, le phosphore et le potassium qui pourraient être ainsi recyclés et valorisés par la végétation en place (Depres et al., 2011). Néanmoins, l'épandage direct des boues non traitées fait l'objet des réticences auprès des agriculteurs, en raison des risques liés à la présence des agents pathogènes, des odeurs nauséabondes en plus des doses non maîtrisées, ce qui pourrait présenter un risque pour le voisinage et pour les cultures.

Plusieurs pays, dont la France a réglementé l'épandage des boues des STEP, l'arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages des boues sur les sols agricoles, (Pris en application du décret n°97-1133). Cet arrêté impose :

- Des distances minimales d'épandage vis à vis des berges, des sources, des puits, des habitations en évitant une percolation rapide vers les eaux superficielles ou souterraines ou tout ruissellement.
- L'isolement d'au moins 3 mètres vis-à-vis des routes et fossés. Il interdit l'épandage sur des sols gelés, de forte pente pendant les périodes de forte pluviosité et doit être en dehors des terres régulièrement travaillées (Maraîchages).

Par ailleurs, d'un point de vue hygiénisation, la capacité d'épuration des sols est limitée dans certaines conditions. Ainsi, l'utilisation des boues sans hygiénisation préalable constitue des inconvénients non négligeables de cette technique (Rafolisy et al., 2015).

Au Maroc, en absence d'une loi qui réglemente l'usage des boues et en absence d'une règlementation relative aux boues traitées, il serait plus judicieux d'être prudent et n'autoriser l'épandage de boues traitées au préalable qu'après leur stabilisation, hygiénisation ou maturation.

II.5.2.2 Valorisation sous forme de compost

Le compostage s'avère une voie naturelle de valorisation des déchets organiques comportant de nombreux avantages à savoir :

- la réduction du volume des boues et de leur teneur en eau
- la réduction des odeurs
- la stabilisation et hygiénisation naturelles sans additifs chimiques

- la production d'un compost, riche en substances humiques, valorisable comme amendement organique des sols (Misonga et al., 2016).

Le compostage des boues nécessite leur mélange avec des déchets verts afin d'améliorer leur rapport carbone/azote (C/N) très faible et permettre une meilleure structuration du produit final. L'utilisation du compost fournit aux végétaux un support aéré, un réservoir d'eau et de nutriments , un enracinement important favorisant ainsi leur productivité et une diminution des risques d'érosion (AFGANE, 2016).

II.5.3 Solutions alternatives

Ce sont des techniques de valorisation ou d'éliminations qui n'ont pas été concrétisées, elles sont toujours soit des théories ou des études en cours.

II.5.3.1 Oxydation par voie humide (OVH)

L'oxydation par voie humide consiste à traiter thermiquement des boues en s'affranchissant des étapes de déshydratation et de séchage. Il s'agit de chauffer les boues à 200-250°C, sous pression (Jusqu'à 50 bars) et en présence d'oxygène pur, pour éviter une évaporation de l'eau. Le temps de séjour varie entre 30 et 60 minutes. La réaction détruit jusqu'à 95% de la matière organique en la transformant principalement en dioxyde de carbone et en ammoniac. On obtient ainsi :

- Une solution aqueuse, renvoyée en tête de station pour être recyclée,
- Des gaz de combustion traités ultérieurement dans un réacteur catalytique,
- Un résidu solide minéral à 50% de siccité contenant moins de 5% de MO.

Cette technique permet de traiter des boues sortant directement de l'épaississeur (Siccité inférieure à 10 %).

Elle présente également les avantages :

- De simplifier le traitement de l'air par rapport à l'incinération (Diminution de la moitié des émissions de CO_2 et de fumées dépourvues de poussières, de métaux lourds et de dioxines),
- D'être bien adaptée aux stations de capacité moyenne (50 000 à 150 000 EH).

II.5.3.2 Co-combustion en cimenterie

Encore au stade expérimental, cette technique offre une possibilité d'élimination des boues d'épuration déshydratées ou séchées. En effet, les boues de siccité supérieure à 90% ont un pouvoir calorifique important (de 10 à 12 MJ/kg). Elles pourraient donc être utilisées comme

combustibles et remplacer une partie de la consommation en énergie fossile. De plus, la chaleur produite par le processus pourrait être utilisée pour le séchage des boues. Cependant, pour pouvoir profiter de cette chaleur, la station d'épuration doit être à proximité de la cimenterie. En outre, la teneur en phosphore des boues peut être un élément limitant de cette technique ; une teneur supérieure à 0,5 % de phosphore peut entrainer une diminution de la résistance mécanique et augmenter le temps de prise des ciments (Naamane et al., 2014 ; Naamane et al., 2016).

II.5.3.3 Pyrolyse ou thermolyse

Ce procédé correspond à une dégradation des boues séchées en l'absence d'air (O_2 < 2 %) et à une température comprise entre 400 et 700 °C. A la fin de ce procédé, un gaz combustible et un composé solide (Cendres), aussi appelé « Coke », sont obtenus.

Le gaz récupéré peut être réutilisé comme une source d'énergie, mais il nécessite une structure supplémentaire pour exploiter le potentiel énergétique des gaz formés. Le problème de cette technique c'est qu'on va se retrouver avec un nouveau déchet qui est les cendres ou la coke.

II.5.3.4 Technique mycélienne

Consiste à utiliser un cocktail de certaines souches mycéliennes (Moisissures), pour une réduction naturelle du volume des boues. La matière réduite est transformée sous forme d'eau et d'élément gazeux, sans générer de pollution. Le mélange mycélien est adapté à l'installation et élaboré in situ dans un bioréacteur. Ce dernier alimente automatiquement les cuves de traitement aérobie et permet l'auto-entretien des espèces ainsi que leur bio-augmentation. Le temps de séjour dans la cuve est d'environ 5 à 10 jours minimum avec 1 à 3 mg d'oxygène dissous par litre.

II.5.3.5 Gazéification

La gazéification consiste à convertir à forte température (900-1100°C) une énergie contenue dans un matériau solide en un résidu inerte et un gaz calorifique valorisable sous forme de chaleur ou d'électricité, avec des rendements énergétiques et un bilan environnemental favorables. Cependant, cette technique nécessite des boues préalablement

II.5.3.6 Plastification

Cette méthode consiste à transformer la charge organique non biodégradable des boues évaluées par la Demande Chimique en Oxygène (DCO), en Polyhydroxyalcanoate (PHA), molécule de plastique biodégradable, en cas d'absence de nutriments. En effet, un kilogramme de DCO produit 0,15 kg de PHA. Une tentative a eu lieu par Veolia dans le cadre d'un programme de recherche sur la fabrication du plastique biodégradable à partir des boues des STEP (Amorce, 2012 ; Laperche, 2012).

II.6 Etat de l'art de valorisation des boues des STEP

Comme déjà cité, la production des boues est en augmentation continue. Malgré leur traitement, on se retrouve toujours avec un déchet encombrant sous forme des boues digérées qui nécessitent d'être valorisées ou éliminées.

En Europe la valorisation agricole était la principale voie d'élimination des boues des STEP. Environ 47 % du tonnage annuel national directement épandus et 26% compostées. Il s'agit de la solution la moins onéreuse mais également la plus fragile en raison des difficultés liées à l'acceptation par le monde agricole de ces « Déchets » devenus « Produits » (Amorce, 2012).

Au Maroc en absence de filières de traitement des boues, celles-ci se retrouvent en décharge publique non contrôlées, ou stockées sur les lieux de leur production ou encore déversées sauvagement ou épandues dans les terrains avoisinants. Ceci présente des risques de pollution environnementale réels. Cependant, des programmes de gestion des déchets dangereux (PNDD) ont été établis. Parmi, ces programmes le Plan National d'Assainissement Liquide (PNA) ayant recommandé de développer les recherches en matière de traitement et de valorisation de ces boues.

Dans ce cadre, des initiatives de valorisation des boues de STEP de la ville de Marrakech associées aux déchets de palmiers par filière de compostage (El Fels, 2014) ou dans le domaine agricole ou énergétique après déshydration (AIT Ayane et Soufiya, 2009; Khellali et Ouahar, 2015). A Chichawa, un projet de recherche en cours de sa réalisation vise à mettre en place des expériences pilotes de co-compostage des boues de la STEP de Chichawa avec les déchets verts de la région. A la ville de Fès, 3 types de travaux de recherche ont été menés depuis l'année 2012 sur la valorisation des boues de STEP ; à savoir : leur incorporation dans la fabrication du ciment et du béton (Naamane et al., 2016), l'optimisation des conditions de leur séchage (Epaisseur, durée, densité,….) afin d'augmenter leur siccité pour une éventuelle valorisation (EL Madani, 2015) et dans l'élaboration d'un amendement organique par leur compostage avec les déchets organiques ménagers (Lahlou et al., 2017). Quel que soit le

domaine de valorisation, les résultats obtenus de l'utilisation des boues de STEP sont très utiles aussi bien dans les matériaux de construction que dans le compostage des déchets organiques et incitent les autorités locales à prendre des décisions pour d'abord établir des lois pour leur application puis leur valorisation à l'échelle nationale.

Dans la même voie, le Département de l'Environnement a réalisé 3 projets (Phenixa, 2013) :

- L'étude des possibilités de valorisation / élimination écologique des boues des STEP de la zone industrielle de Berrechid – 2013.
- L'élaboration de la stratégie de gestion des boues pour identifier, sur la base d'un benchmark national et international, les actions à entreprendre pour la valorisation et/ou l'élimination des boues urbaines et industrielles.
- L'étude complémentaire de la réutilisation des eaux usées épurées et valorisation des boues de la ville d'Agadir 2013.

A l'échelle régionale, le seul sort de ces boues, jusqu'à la fin de l'année 2015, était la décharge contrôlée pendant près de 2 ans : La RADEEF était chargée du transport des boues digérées à la décharge qui les recevait avec une moyenne de 78 tonnes par jour.

Cependant, cette méthode d'enfouissement des boues avec les déchets ménagers ou assimilés a eu un impact négatif sur la qualité du biogaz produit, sur le fonctionnement des engins à cause de leurs glissements lors du tassement des déchets, la qualité de l'air par le dégagement surtout du sulfure d'hydrogène. De ce fait, la décharge ne réceptionnait plus les boues ; elles sont actuellement étalées sur les terrains avoisinant de la STEP avec une épaisseur bien étudiée pour faciliter leur séchage par évaporation naturelle.

II.7 Normes et réglementation d'utilisation des boues de STEP

Pour le Maroc qui, il n'existe aucune loi jusqu'à maintenant qui encadre directement les boues des STEP et leur épandage agricole direct et/ou après traitement ou compostage. Ces boues du point de vue législatif, prennent maintenant le statut de « Déchets solides industriels» dans la mesure où elles sont générées par l'industrie de traitement des eaux. Le ministère de l'Équipement est chargé de ce type de déchet et représente l'autorité compétente en matière des ressources en eau, et s'occupe principalement de la coordination, de la collecte des données, des études, de l'élaboration des lois, de la réglementation, des normes et directives ayant trait à l'environnement et ont rajouté un article dans la loi 36-15 relative à l'eau modifiant et complétant la loi 10-95 sur le traitement des boues de STEP.

La Loi 10-95 sur l'eau du Bulletin officiel n° 4325 s'intéresse d'une manière générale à la réglementation des dépôts. Elle interdit de déposer ou d'enfouir des déchets solides dans le domaine public hydraulique.

Tandis dit que la Loi 36-15, Dahir n°1-16-113, dans le chapitre V portant sur la Valorisation et utilisation des eaux non conventionnelles, la Section première sur la : Réutilisation des eaux usées et des boues d'épuration incite, dans l'Article 70, au traitement boues d'épuration des eaux usées. A cet effet, quelques ont été lancés notamment le renforcement du cadre juridique relatif à la gestion des déchets, la mise en œuvre des programmes et projets visant aussi l'accès à l'information, la transparence dans la fourniture de service et le suivi/évaluation. Ceci étant via le Plan National des Déchets Ménagers (PNDM) (Hasnaoui, 2017), la Loi 28-00, du Dahir n° 1-06-153 du 30 Chaoual 1427 et 22 novembre 2006, qui a pour objet de prévenir et de protéger la santé de l'homme, la faune, la flore, les eaux, l'air, le sol, les écosystèmes, les sites et paysages et l'environnement en général contre les effets nocifs des déchets. Cette loi stipule:

- La prévention de la nocivité des déchets et la réduction de leur production.
- L'organisation de la collecte, du transport, du stockage, du traitement des déchets et de leur élimination de façon écologiquement rationnelle.
- La valorisation des déchets par le réemploi, le recyclage ou toute autre opération visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie.
- La planification nationale, régionale et locale en matière de gestion et d'élimination des déchets.

Malgré ces efforts, le cadre juridique marocain relatif aux déchets reste très vétuste, fragmenté et non spécifique, et par conséquent ne répond pas aux contraintes actuelles d'optimisation de la gestion des boues. Cependant la majorité des communautés scientifiques et les producteurs des boues se sont dirigés vers des études de valorisation des boues par la filière de compostage.

Au niveau de l'Union Européenne**,** l'épandage est la solution apparaissant comme privilégiée. En Europe, le rejet des boues en mer est interdit depuis l'année 1998. Les Directives européennes sur l'eau et les déchets et leurs transpositions en droit français, ont fixé des objectifs de qualité qui induisent à la fois une augmentation des quantités de boues produites (Traitements plus élaborés) et un renforcement de la réglementation concernant leur élimination et/ou leur valorisation. Tout cela a pour but de protéger l'environnement, éviter leurs impacts sanitaires tout en encourageant leur utilisation correcte (Epuration, Periquet, &

Lecerf, 2011). Une autre directive 86/278 relative à la protection de l'environnement (Et notamment à celle des sols) édicte les lois pour l'utilisation des boues d'épuration comme engrais (AMF: Association des Maires de Farance, 2015) :

- L'interdiction de l'utilisation des boues non traitées ou chargées en métaux lourds, les herbages moins de trois semaines avant le pâturage ou la récolte des cultures fourragères
- L'obligation de leur contrôle et analyses selon les normes décrites par la même directives.
- Et le respect des règles destinées aux producteurs et/ou utilisateurs.

Tableau 4: Normes d'utilisation agricole des boues dans les pays européens

Métaux / Pays	Cd	Cu	Hg	Pb
CEE	20 à 40	1000 à 1750	15 à 25	750 à 1200
France	40	2000	20	1600
Allemagne	5-10 (1)	800	8	900
Danemark	0,8 (2) - 200 (3)	1000 (2)	0,8 (2) – 200 (3)	60 (2,6)-120(2,6)
Espagne	20 (4) - 40 (5)	1000 (4)- 1750 (5)	16 (4) – 25 (5)	750 (4)-1200 (5)
Grèce	20 à 40	1000 à 1750	16 à 25	750 à 1200
Irlande	20	1000	16	750
Italie	20	1000	10	750
Royaume-Uni	-	-	-	1200 (7)
Suisse	5	600	5	500

(1) Valeur abaissée à 5mg/kg si l'épandage est sur un sol sableux et 5 < pH < 6, sinon 10 mg/kg ; (2) Valeur exprimée par rapport à la MS ; (3) Valeur exprimée par rapport à la teneur en phosphore ; (4) pH du sol < 7 ; (5) pH du sol > 7 ; (6) Valeur abaissée pour l'usage en jardinage domestique; (7) La réglementation anglaise n'a pas prévu de valeurs limites ni de guide de bonnes pratiques pour les boues, sauf pour le plomb et le fluor quand les boues sont épandues sur les herbages.

III. Procédé de compostage

Biologiquement, le compostage est défini comme : « Un processus contrôlé de dégradation des constituants organiques d'origines végétale et animale, par une succession de communautés microbiennes évoluant en conditions aérobies, entraînant une montée en température, et conduisant à l'élaboration d'une matière organique humifiée et stabilisée. Le produit ainsi obtenu est appelé compost ». Il est similaire à celui de l'humification naturelle des résidus organiques en substances humiques dans les sols (Chenni et Maghlouche, 2013).

Dans les phases biologiques, différentes enzymes permettent la biodégradation de macromolécules facilement décomposables par des réactions de dégradation et d'oxydations.

Les phases finales font surtout appel à des phénomènes de polymérisation et de polycondensation des molécules néoformées (Ramdani, 2015). Ainsi, l'obtention d'un produit mature riche en substances humiques très polymérisées sans risque de générer une fermentation accidentelle une fois dans le sol (Albrecht, 2007).

Au cours du processus de compostage, on distingue trois phases caractérisées par des populations microbiennes différentes.

- La phase mésophile dominée par la population mésophile et caractérisée par une faible biodégradation de la matière organique qui dégage une chaleur favorisant la sélection de la population thermophile.
- La phase thermophile où les réactions d'oxydation de la matière organique accentuent le dégagement de la chaleur (pouvant atteindre 70 °C).
- La phase de maturation durant laquelle on assiste à une diminution de la température des substrats compostés. Pendant cette même période, les composés humiques se stabilisent. La synthèse des acides carboniques, suite au dégagement de CO_2, ainsi que les acides organiques provoquent l'acidification du milieu.

Ce processus d'humification est conditionné par le suivi des paramètres physico-chimiques tels que la température, l'humidité, l'oxygénation et le pH (Faverial, 2016). Ces derniers doivent être optimisés pour évaluer la bonne conduite du processus de compostage et l'obtention d'un produit final de valeur ajoutée. L'évaluation de la qualité et la stabilité de ce produit sont contrôlées par des tests physico-chimiques ou parfois biologiques et spectroscopiques en plus de son aspect, son odeur sa couleur et sa texture.

III.1 Application du compost

III.1.1 Pour l'amendement

L'utilisation du compost pour l'amendement du sol augmente son contenu en matières organiques, favorise la séquestration du carbone, améliore sa structure et permet la formation d'agrégats ou humus (Rigane et al., 2015). De nombreuses études ont montré le rôle bénéfique du compost sur les qualités physique et chimique des sols amendés, comme l'amélioration des propriétés physiques, l'augmentation de la conductivité hydrique et la diminution de la densité des sols (Martínez-Blancoet al., 2011) avec une meilleure qualité des récoltes (Jouraiphy, 2007; Kammoun et Medhioub, 2011; Goswami et al.; 2017). Ces agrégats améliorent l'infiltration et la capacité de rétention d'eau ; ce qui réduit le ruissellement et l'érosion des sols par la formation d'une croûte étanche à sa surface (Crohn, 2011).

D'autres études ont montré que le compost peut augmenter la stabilité structurale du sol ou de l'agrégat entre 29 et 63 % et réduire de 5 et 36 % la perte de sol. En outre, la capacité de rétention de l'eau peut être augmentée de 50 % (Martínez-Blanco, et al., 2011).

L'amendement du sol par le compost présente aussi d'autres avantages potentiels comme l'amélioration de son activité biologique, la biodiversité des sols, le soutien de la chaîne trophique du sol et la suppression des maladies, en plus de son apport de nutriments aux plantes. En effet, plusieurs travaux ont signalé l'amélioration des rendements du sol suite à l'application de compost, avec une meilleure qualité des récoltes.

III.1.2 Pour la lutte biologique

Les composts contiennent généralement une flore microbienne dense composée de champignons et de bactéries antagonistes. Ils renferment aussi des substances susceptibles de stimuler le système immunitaire de la plante (Carvalhais et al., 2013) et peuvent être utilisés comme pesticides. Plusieurs études ont porté sur la lutte contre les organismes pathogènes en utilisant les composts et les jus de compost (Mehta et al., 2014) . D'autres études comme celle de Lin ont noté que le compost a un effet sur la plante et sur son pouvoir suppressif de l'action des microorganismes phytopathogènes (Lin et al., 2014) et celle de Van (Van der Wurff et al., 2016) indiquant que le compost est efficace pour la suppression des maladies phytopathogènes dans plus de 50 % des études. Recemment, plusieurs applications du compost ont permis d'augmenter la suppression des maladies telles que le Pythium (Amortissement et pourriture des racines), le Phytophthora (Pourriture de la couronne et des racines), le Verticillium (Flétrissement) (Van der Wurff et al., 2016), V. dahliae (Abid, 2018).

III.2 Normes réglementaires du compost

Jusqu'à maintenant, la qualité des composts urbains ou à boues des stations d'épuration est régie respectivement par les normes Françaises NF U 44-051 (2006), NF U 44-095. Ainsi on les a classé, en trois types de qualité, par ordre décroissant : AA, A et B.

- Les composts AA et A sont de très bons composts. Les composts B, en raison de leur teneur en éléments traces, des paramètres préconisés par la réglementation, doivent être accompagnés d'instructions appropriées lors de la vente ou de leur distribution.

Les Tableaux 5 et 6 regroupent les teneurs en éléments métalliques contenus dans les composts de différentes réglementations selon le Conseil Canadien des Ministres de

l'Environnement (CCME) pour différents pays (SCC et GTGDS, 1996; CCME, 2005 ; El Fels, 2014).

Tableau 5: Valeurs limites de classement des composts, classe A (sans risque à l'utilisation)

Métal	Valeurs limites classe A mg/Kg poids sec	Valeurs limites classe B mg/Kg poids sec
Zn	500	1850
Cu	100	757
Pb	150	500
Ni	62	180
Cd	3	20

Tableau 6: Limites normatives en métaux lourds (mg/Kg Ms) dans les composts

Pays	Législatif	Classe	As	Cd	Cr_{tot}	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Allemagne	Biowaste ordinance I		/	1	70	70	0,7	35	100	300
Australie	ARMCANZ*	Biowaste	20	3	400	200	1	60	200	250
Autriche	Compost ordinance	Class A*		0,7	70	70	0,4	25	45	200
		Class A		1	70	150	0,7	60	120	500
		Classe B		3	250	500	3	100	200	1800
Canada	BNQ**	AA, A	13	3	210	100	0,8	62	150	500

La filière de compostage semble la mieux adaptée à la réalité marocaine, c'est une technique qui pourrait économiser de l'énergie et viser le recyclage agricole, par rapport aux autres filières de valorisation qui se sont révélées très coûteuses et polluantes (Incinération, mise en décharge...). De plus, cette alternative pourrait servir les sols marocains les plus pauvres en matières organiques.

IV. Fertilité d'un sol

Le Maroc a consenti des investissements considérables en matière de mise en valeur agricole en vue de moderniser son agriculture et assurer en conséquence son autosuffisance alimentaire. De nombreuses zones agricoles ont été, en effet, développées à l'échelle régionale dont la mise en valeur s'est nécessairement accompagnée par un emploi intensif des engrais des produits phytosanitaires.

De plus, durant les dernières décennies, les sols marocains sont soumis à des changements climatiques sévères ; ce qui a rendu le sol excessivement dégradé et appauvri en matières organiques. Pour lutter contre l'appauvrissement du sol, son amélioration nécessite des

connaissances précises sur le matériel organique stocké et sur les mécanismes qui contribuent à son enrichissement.

IV.1 Types des fertilisants

Les fertilisants du sol regroupent les intrants agricoles « Les engrais, les produits phytosanitaires » et les amendements pour améliorer son rendement ou sa structure.

IV.1.1 Engrais

L'engrais apporte des éléments minéraux utiles notamment pour favoriser ou accélérer la poussée des végétaux, améliorer leur floraison et la qualité des cultures–pour la plupart des variétés de plantes (Keita, 2016). On distingue trois types- d'engrais : Organiques, minéraux et organo-minéraux.

- **Engrais Organiques** : Fertilisants issus de matières vivantes, animales comme le fumier, ou végétales comme la valorisation des déchets organiques par compostage (Cordier et al., 2013). Dans ces derniers, les éléments nutritifs sont retenus à l'intérieur d'une molécule organique qui les libère sous l'action des microorganismes du sol. Ce sont des engrais de fond, pour lesquels la libération de ces éléments est lente.
- **Engrais Minéraux** : Engrais simples, facilement dissociables dans l'eau, constitués uniquement d'un seul de ces éléments primaires (Azote N, phosphore P ou potassium K). L'application d'engrais minéraux permet de répondre rapidement à une carence constatée ou à un blocage de certains éléments dans le sol.
- **Engrais Organo-minéraux** : Mélange d'engrais minéraux et organiques. Les matières organiques azotées représentent généralement 25 à 50 % des produits finis. Les autres constituants du fertilisant ; sels simples et minéraux, apportant N. P. K., sous des formes appropriées, sont dilués dans les matières organiques (Baldi et al., 2019).

IV.1.2 Produits phytosanitaires

Un certain nombre d'organismes comme les insectes pollinisateurs, les auxiliaires de lutte (Organismes vivants régulant naturellement les populations de ravageurs des cultures), les organismes et microorganismes qui participent au fonctionnement du sol (Humification, minéralisation, cycle du carbone et de l'azote,…) sont par ailleurs utiles, voir indispensables à l'agriculture (Alix et al., 2013). Cependant, lorsque leur population dépasse un certain seuil,

un petit nombre d'espèces devient nuisible, engendrant plusieurs types de dommages causés aux cultures :

- Pondéral (Perte de rendement)
- Commercial (Altération de la présentation notamment pour les fruits et légumes)
- Organoleptique (Modification du goût des aliments)
- Toxicologique (Production de mycotoxines par certains champignons)
- Indirects (Mauvaises herbes pouvant constituer des réservoirs à insectes ou maladies susceptibles d'être à l'origine d'une invasion sur les cultures voisines)
- Mécaniques (Difficultés et ralentissement de la récolte mécanisée)

Le seul remède actuel et le plus adapté à cette problématique est les produits phytosanitaires dites aussi les pesticides; toute substance ou association de substances qui est destinée à repousser, détruire ou combattre les ravageurs et les espèces indésirables de plantes ou d'animaux causant des dommages ou se montrant autrement nuisibles durant la production, la transformation, le stockage, le transport ou la commercialisation des denrées alimentaires, des produits agricoles (Batsch, 2011).

Les pesticides regroupent les herbicides, les fongicides et les insecticides. Ils peuvent être désignés selon leur mode d'action pour les organismes indésirables (Tableau 7).

Leur utilisation réduit les pertes qui pourraient avoir lieu. Le Tableau 8 donne des exemples sur des cultures avec et sans protection

Tableau 7: Produits phytosanitaires

Herbicide	
De contact	Agit sur les parties de la plante avec lesquelles il entre en contact
Systémique	Absorbé par la plante, se déplace à l'intérieur de celle-ci
Sélectif	Ne contrôle que certaines plantes parmi celles qui sont traitées
De pré-levée	Action sur la graine pour empêcher sa germination
De post-levée	Action sur la plante émergée
Non-sélectif	Contrôle toutes les plantes traitées
Résiduaire	Se dégrade lentement et contrôle les plantes pour une longue
Non-résiduaire	Est rapidement inactif après son application et ne contrôle les plantes que sur une courte période
Fongicide	
Préventif	Protège la plante en empêchant que la maladie se développe
Curatif	Réprime une maladie qui est déjà développée

Insecticide	
De contact	Agit lorsque l'insecte entre en contact avec le produit
D'inhalation	Agit lorsque l'insecte respire le produit
D'ingestion	Agit lorsque l'insecte se nourrit du produit

Tableau 8: Pertes engendrées au niveau des cultures avec ou sans protection phytopharmaceutique (Batsch, 2011)

Cultures	*Pertes totales avec protection (%)*	*Pertes sans protection des plantes (%)*
Blé	34	52
Orge	29	47
Soja	32	59
Coton	38	84
Maïs	38	60
Pomme de terre	41	74
Riz	52	82

IV.1.3 Amendement

L'amendement améliore ou rééquilibre la structure du sol et l'enrichit par des éléments nutritifs absorbés par les plantes. Leur diffusion est lente mais régulière et constante. Les amendements favorisent le maintien d'une bonne structure. Ils sont incorporés à la plantation lors du travail du sol annuel, et sont parfois appelés « Engrais de fond ».

Les principaux amendements organiques sont les fumiers d'animaux d'élevage, la paille, les écorces, les composts de déchets verts, les terreaux du commerce,…. Ils constituent:

- **l'amendement Calcique (**Appelé aussi amendement minéral basique): Les amendements organiques ont une origine végétale. Ils allègent les terres lourdes, donnent du corps aux terres légères et reconstituent le stock de matière organique et de l'humus du sol par apport ou calcium ($CaCO_3$), principal constituant du calcaire, et aussi du magnésium ($MgCO_3$). Le calcium améliore la structure et la capacité d'échange cationique (C.E.C) ainsi que l'activité biologique du sol (Auclerc, 2012).

  Par leur minéralisation progressive, ils permettent de nourrir durablement les végétaux, sans risque de lessivage, tout en assurant une meilleure circulation de l'air et de l'eau. En fait, ils "nourrissent" le sol avant de nourrir la plante une fois la matière organique décomposée en substances minérales assimilables.

- **l'amendement Organique :** Améliore la structure du sol et les propriétés physico-chimiques, limite le phénomène d'érosion, augmente la C.E.C ainsi que la disponibilité des éléments fertilisants. Il favorise la fabrication d'humus stable après une double

transformation (phase de minéralisation suivie d'une phase d'humification) par les êtres vivants présents dans le sol (Cordier, 2013)

Les principaux amendements minéraux sont répertoriés dans le Tableau 9 :

Tableau 9: Principaux amendements minéraux (Cordier, 2013)

Produit	Action	Période d'utilisation
Chaux	augmente le pH d'un sol trop acide (A éviter en sol calcaire) Allège les sols lourds et fertilise le sol	Août à Octobre
Gypse	Assouplit les sols lourds Neutralise les excès de sodium	Août à Octobre
Cendres de bois	Elève le pH d'un sol trop acide (A éviter en terre de bruyère) Enrichit le sol en éléments minéraux	Au printemps avec modération
Soufre	Acidifie le sol (Baisse le pH). A éviter en terre de bruyère	Au printemps et à l'automne
Sulfate de fer	Action rapide pour acidifier un sol (Baisse le pH). Lors de l'application de sulfate de fer : Ce produit tâche les dallages. A éviter l'application sur et auprès des surfaces minérales.	Au printemps et à l'automne
Sable	Elève le pH d'un sol trop acide (A éviter en sol calcaire) Allège les sols lourds et fertilise le sol	Allège les sols lourds

IV.2 Formes des éléments assimilables par la plante

Pour assurer sa croissance et son développement, la plante sélectionne et prélève les éléments dont elle a besoin dans le milieu environnant. Les principaux éléments intervenant dans les plantes végétales sont :

- ***Le carbone(C)*** absorbé par les plantes sous forme de CO_2.
- ***L'hydrogène (H)*** absorbé sous forme de H_2O.
- ***L'oxygène(O)*** disponible dans le sol O_2, H_2O et CO_2.
- ***L'Azote (N)*** présent dans le sol soit sous forme organique (Humus : Résidus de récoltes, engrais organiques) ou minérale assimilable par les plantes (NH_4^+, NO_3^-) (Ameziane El Hassani, 2015) .

Le cycle d'azote commence par la transformation de la matière organique jusqu'à la formation des nitrates selon le processus suivant :

(1) (2) (3) (4)

$$MO <=> NH_3 <=> NH_4^+ <=> NO_2^- <=> NO_3^-$$

(1) : Les décomposeurs transforment la MO en NH_3, CO_2 et H_2O.

(2) : L'ammoniac au contact de l'eau se transforme en ammonium.

(3) : L'ammonium se transforme en nitrite.

(4) : Les nitrites se transforment en nitrate.

La plante a aussi besoin de certains éléments tels que le soufre, le calcium, le cuivre, et le zinc dont chacun a un rôle précis aussi bien pour la plante que le sol avec des doses bien étudiées. Une carence ou un excès en ces éléments pourrait causer des problèmes de qualité et de rendement des cultures et impacter le sol.

IV.3 Action des fertilisants sur les propriétés du sol

L'utilisation des produits fertilisants demeure indispensable pour une meilleure productivité agricole des sols. Koulibaly et *al.*, 2009 ont indiqué qu'il y a une amélioration des rendements en coton graine et en maïs grain suite à une utilisation conjointe de deux fumures organique et minérale comparativement à l'utilisation exclusive de fumure minérale. La fertilisation joue un rôle important dans l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

IV.3.1 Propriétés physiques

La fertilité permet une amélioration de la structure et de la stabilité des sols, basée sur l'augmentation de la porosité et de la rétention en eau. La matière organique, associée à la composante argile ; complexe argilo-humique en est responsable. En effet, l'action protectrice des végétaux se réalise soit, par les parties aériennes en réduisant le ruissellement et l'agressivité des pluies grâce à la litière de feuilles mortes, soit par les racines par une action mécanique de fixation des particules qui accroît la cohésion du sol. Cependant, elle permet une réduction de l'érosion, lorsqu'elle occupe les horizons superficiels du sol. Les matières organiques permettent de fortifier les propriétés physiques du sol tout en créant des micro-agrégats résistants au lessivage et aux effets néfastes de l'érosion avec ses particules minérales.

IV.3.2 Propriétés chimiques

La fertilisation améliore la qualité du sol par la fourniture d'éléments minéraux à travers le processus de minéralisation grâce à leur force minéralisatrice. De plus, elle contribue à une solubilisation des minéraux insolubles comme les phosphates naturels par la production d'acide au cours de la minéralisation et permet d'augmenter la capacité d'échange du sol et de corriger son acidité par leur effet tampon. Selon Zoghlami et al., 2016, la minéralisation du

sol atteint 40 à 50% avec l'utilisation des fertilisants en moins de 20 ans. Comme elle améliore l'efficacité des engrais minéraux (Sierra et Desfontaines, 2018).

IV.3.3 Propriétés biologiques

Les fertilisants constituent une source importante de micro-organismes, activateurs et améliorateurs des activités biologiques du composant sol. L'activité microbienne permet un meilleur développement racinaire (mycorhizes plus actifs) tout en permettant à la plante la possibilité de mieux exploiter à la fois les réserves du sol et les apports d'engrais. L'amélioration des propriétés physiques et chimiques crée une ambiance favorable aux activités biologiques des microorganismes et de la faune du sol.

Les fertilisants et surtout les amendements et les engrais servent de supports et d'aliments à la faune et à la microflore lorsqu'elle entre en fermentation aérobie dans les horizons supérieurs du sol. Vallerie précise qu'en plus de ces fonctions agricoles, ils exercent un rôle de premier plan dans la formation et l'évolution des sols (M. Vallerie, 2011).

L'application excessive des engrais sans maitrise des doses, ni de composition pourrait avoir des impacts sur la santé humaine notamment des agriculteurs et sur l'environnement. Leur utilisation est réglementée par l'application des normes de l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture.

Lors de cette étude, nous avons fait appel à quelques outils statistiques pour la comparaison des résultats analytiques ou le traitement des données collectées et la validation l'étude économique.

V. Outils statistiques

V.1. Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est une analyse statistique descriptive multivariée qu'on applique à un ensemble de variables initiales qu'on veut réduire en quelques facteurs ou composantes constituant ainsi de nouvelles variables.

Pour notre cas, elle a été utilisée pour l'étude de l'efficience des principaux paramètres de contrôle de la transformation des mélanges de substrats sur la qualité des composts élaborés à base des boues dont les résultats ont été comparés par le test de Student.

V.2 Analyse de la variance ANOVA

Cette analyse a été faite pour traiter les résultats des enquêtes réalisées, avoir des renseignements sur les lacunes en matière des données et évaluer la valeur du compost dans le marché et son exploitation par les agriculteurs.

V.3 Test de Student

C'est un test statistique différentiel. Il consiste en la comparaison d'un échantillon à une constante ou de deux échantillons indépendants ou appariés. Il ne se contente pas de décrire des observations, mais extrapole les constations faites à un ensemble plus vaste et permet de tester des hypothèses qu'il faut définir sur cet ensemble afin de prendre une décision. Soient H_0 et H_1 deux hypothèses (H_0 : l'hypothèse nulle, H_1 : l'hypothèse alternative) dont une est une seule qui est vraie. La décision consiste à retenir H_0 ou H_1.

- Pour un test bilatéral, les hypothèses suivantes sont émises:
  - Hypothèse nulle H_0 : $P_A=P_B$
  - Hypothèse alternative, H_A : $P_A \neq P_B$
- Pour un test unilatéral, les hypothèses deviennent
  - Hypothèse nulle, H_0 : $P_A=P_B$
  - Hypothèse alternative, H_1 : $P_A>P_B$ ou $P_A<P_B$

Selon l'ordre de grandeur de la probabilité critique, le test sera qualifié de significatif, très significatif et hautement significatif.

- 1% <5 % Test significatif, symbolisé par*
- 0.1% < a <1%Test très significatif, symbolisé par**
- 0.01% < a < 0.1% : Test hautement significatif, symbolisé par *** (Boukhouhza et al., 2008).

Les tests d'efficacités des composts que nous avons élaborés ont eu lieu sur deux cultures et dans deux champs différents. La localisation des champs et l'établissement des cartes correspondantes ont été effectués par un outil spatial : Système d'information géographique (SIG)

VI. Outil spatial : Système d'information géographique (SIG)

Le système d'information géographique (SIG) est une technique utilisée pour identifier des données spatiales et géographiques (Cartes thématiques), les analyser, les interpréter, les stocker, les traiter, les gérer et les présenter (Borges, dos Santos, Caldas, & Lapa, 2014).
Plusieurs fonctions peuvent être attribuées à ce système.

La première est la création et la collecte de données géo-référencées, issues de sources multiples et de formats très divers (Par exemple la numérisation de fonds de cartes ou de photographies aériennes, la digitalisation de données de terrain, l'harmonisation spatiale, temporelle et structurelle des données).

La deuxième fonction est le stockage, l'organisation et la spatialisation de ces informations grâce à un système de gestion de bases de données (SGBD).

De manière bien plus spécifique, les fonctions d'affichage et de superposition de différentes couches d'information géographique sous forme de cartographies permettent une visualisation spatialisée des phénomènes terrestres (Goria et al., 2011). La cartographie peut représenter le livrable final d'une étude SIG ; la carte est un outil adapté de synthèse et de communication de résultats issus d'analyses spatiales. La carte géostatistique représentant la variabilité continue d'une information quantitative à travers un espace défini, est le format le plus utilisé en étude environnementale (Occelli al.; 2014). Tel est le cas de Borges et al. qui ont utilisé le logiciel de système d'information géographique (SIG) pour élaborer des cartes thématiques et évaluer les données obtenues (Borges et al., 2014).

Etant donné que les boues de la STEP de Fès sont testées pour leur valorisation par la filière de compostage aux échelles de laboratoire et semi industrielle, une étude économique de son prix de revient et son marché s'avère judicieuse.

VII. Outils économiques

La réussite de la majorité des produits est essentiellement liée à son économie : Prix et présence sur le marché. Plusieurs études ont confirmé que la clé de nombreux projets, idées et produits sont le prix et l'étude préliminaire du marché et de la concurrence (Baudry, 2010)

VII.1 Coût de revient

Un coût de revient regroupe, selon la nature de l'activité toutes les charges engagées pour la vente de marchandises dans une entreprise commerciale, la fabrication et la vente de produits dans une entreprise industrielle, la production de services dans une entreprise prestataire.

L'étude de marché est définie comme un travail de collecte et d'analyse d'informations ayant pour but d'identifier les caractéristiques d'un marché et peut s'effectuer pour valider le potentiel d'un nouveau point de vente (Bathelot, 2017). Élaborer une étude de marché nécessite de s'appuyer sur une démarche rigoureuse et se fait selon des étapes précises.

VII.2 Etude de marché

L'étude de marché est un travail d'exploration marketing destiné à analyser, mesurer et comprendre le fonctionnement réel des forces d'un marché. C'est une activité mise en œuvre dans le cadre de la démarche du marketing management et reposant sur :

- L'observation : L'étude des comportements, des appréciations, des besoins et des attentes des demandeurs et offreurs présents sur ce marché, ainsi que celles des conditions selon lesquelles ceux-ci agissent (ou non) pour réaliser les échanges correspondants à la satisfaction de leurs buts et intérêts.
- L'étude quantitative : L'utilisation des sondages, des panels, des entretiens individualisés et des réunions de groupes. Les informations de ce dernier peuvent être recueillies soit directement auprès des personnes qui peuvent être consultées par l'intermédiaire d'enquêteurs (Interviews en face à face à domicile ou en salle, téléphone, dans la rue…) ou de façon auto administrée (Soumission d'un questionnaire papier ou d'un questionnaire-formulaire par Internet) où par recherches documentaires, compilation et analyse de toutes informations émanant de sources existantes et pertinentes (Sources primaires, publications légales ou financières, résultats de processus de veille ou d'intelligence économique, travaux académiques, etc.).
- L'analyse : Le traitement et la vérification des hypothèses proposées

La réalisation d'une étude de marché implique une progression par étapes :

1. Formuler le problème de marketing : Contexte, objectifs, alternatives.
2. Formuler le problème d'étude : Ce sont les problèmes d'étude des informations et méthodes de recherches
3. Choisir le projet d'étude : Déterminer le compromis délais et coût, cadrer le contexte général de la recherche, rappeler la définition précise de l'objectif de la recherche,
4. Analyser les concurrents : Etablir une base de données conséquente, regroupant les principales informations sur les sociétés concourantes tels que : Le nom du concurrent, l'année d'expérience, les lieux et type de l'exhibition (Exhibition annuelle, bimensuelle…), les liens, dont le but de répertorier tous les concurrents les plus importants qu'elle. Le résultat de toutes ces informations servira par la suite pour se situer sur le marché.
5. Suivre et contrôler la réalisation de l'étude.

6. Analyser, interpréter et utiliser les résultats.

Conclusion

A la lumière de cette synthèse bibliographique, il ressort que le secteur d'assainissement au Maroc a subi un sursaut suite à la stratégie du plan national d'assainissement liquide et aux fondements de la charte nationale sur l'environnement. Le choix d'un système de traitement doit être tributaire des spécificités géographiques des communes et de leurs moyens financiers.

En parallèle, le traitement des eaux usées génère une production de boues très importante. Les prévisions de cette production de boues à l'horizon 2025 sont estimées à 300 000 tonnes/an. La station de la ville de Fès, à elle seule, produit actuellement 43 000 tonnes/an à raison de 120 tonnes/jour.

La gestion des boues après leur cogénération n'a pas été prise en considération lors de la construction des stations d'épuration, ce qui pose actuellement un problème pour leur élimination. A l'état actuel, celles-ci se retrouvent en décharges contrôlées, ou stockées sur les lieux de leur production, ce qui présente des risques sur l'environnement et la santé humaine.

Par ailleurs, les boues de nature organo-minérale peuvent contenir des teneurs importantes en éléments fertilisants (Azote et phosphore) susceptibles d'être valorisées en agriculture. Ce qui rend la filière de compostage la mieux adaptée à leur valorisation, sachant qu'à l'heure actuelle aucune norme n'est définie

CHAPITRE II : ELABORATION DU COMPOST À BOUES

Introduction

La valorisation des boues de la station d'épuration de la ville de Fès est d'une importance cruciale afin d'assurer la protection de l'environnement et répondre aux exigences du développement durable et d'économie circulaire de la région.

Dans ce cadre, le but de la présente étude est d'étudier la possibilité de Co-composter la boue produite par la station d'épuration de la ville de Fès, estimée à 120 tonnes/ jours, avec d'autres substrats. Ceci pourrait être une alternative efficace pour une gestion intégrée de ce type de déchet.

Pour ce faire, nous avons élaboré deux types composts à l'échelle du laboratoire et à l'échelle semi industrielle à base des déchets organiques ménagers, des boues de la station d'Epuration de Fès (STEP), des fientes de volailles et des margines. Le premier avec boues et le deuxième sans boues. Ce dernier, nous a servi de témoin en vue d'évaluer la valeur ajoutée des boues de la STEP-Fès par rapport au compost conventionnel.

Ce chapitre relate les résultats de la caractérisation des substrats initiaux, des mélanges à composter et des composts en fonction du temps de leurs transformations après avoir présenté les approches méthodologiques appliquées. Il rapporte aussi les résultats de l'effet de certains paramètres physico-chimiques des composts au cours de leur transformation et finalement leur qualité.

I. Compostage des boues de la STEP de Fès

L'épuration des eaux usées génère d'importantes quantités de boues qui posent un grand problème tant sur le plan environnemental qu'économique (Yu Liu, 2001). Ces boues sont riches en éléments nutritifs fertilisants qui peuvent couvrir en partie ou en totalité les besoins des sols et des cultures (Sikuzani et al., 2013). En effet, elles constituent une source majeure de carbone organique et d'azote (Scheiner, 2005). Cependant, l'utilisation directe des boues brutes n'est pas sans risques, compte tenu de leur pouvoir fermentescible, des nuisances olfactives et des dangers sanitaires liés à la présence d'agents pathogènes et d'éléments toxiques. Ces boues doivent ainsi être stabilisées avant toute utilisation agricole.

Le compostage est une des techniques pouvant assurer cette stabilisation et permettra la valorisation de ce déchet pour être commercialiser et utilisé comme amendement organique.
Une enquête a été réalisée par le Critt Bio-Industries de Midi-Pyrénées afin d'établir un état des lieux sur le compostage des boues des stations d'épuration en France. Cette enquête a montré que le compostage des boues de station d'épuration est une technique qui a fait les preuves de son bon fonctionnement. Actuellement, plus que 16 plateformes de compostage des boues sont opérationnelles en France. Les différentes méthodes de compostage utilisées (Bioréacteur, tas, andin) assurent toutes un bon fonctionnement de la plate-forme et produisent un compost de bonne qualité.

Au Maroc, cette filière est encore récente et en voie de développement afin de suivre l'augmentation du volume et de la quantité de ce déchet et répondre à la stratégie que le Maroc a menée dans le Programme national d'assainissement liquide et d'épuration des eaux usées (PNA) sur la période 2006-2020.
Jusqu'à présent, une seule plateforme de compostage des boues de station d'épuration a vu le jour. Elle a été retenue pour y développer la filière de co-compostage des boues de la STEP de Marrakech afin de se rapprocher des conditions réelles du compostage et de produire un produit stable, hygiénique et à grande valeur agricole, qui répond aux normes recommandées dans le domaine de l'agriculture. Le produit obtenu est baptisé «Biocompotsol» (Le Matin, 2016). Comme il existe aussi d'autres essais à petite échelle avec les boues de station d'épuration d'une industrie agro-alimentaire de Mohammedia (Zaim et al., 2007), les boues de station d'épuration d'El Jadida (Salama ; 2008) et les boues de station d'épuration de la ville de Nador (Zraibi et al., 2015).

II. Approche méthodologique

II.1 Substrats à Co-composter

Les déchets utilisés pour l'élaboration des deux composts comprennent : les boues, les déchets ménagers organiques et verts, les fientes de volailles et les margines pour l'humidification. Les déchets choisis sont tous des déchets locaux.

II.1.1 Boues

Les boues proviennent de la station d'Epuration des Eaux Usées de la ville de Fès. Ces boues se présentent comme un résidu solide ce couleur marron noirâtre ; produit final de traitement des eaux usées de la ville après leur cogénération.

II.1.2 Margines

Les margines sont procurées des bassins de stockage, réalisés par la Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité de Fès (RADEEF) et se trouvent à 77 km de la ville de Fès. Elles se présentent sous forme d'un rejet liquide correspondant à la trituration des olives de couleur verdâtre à noir.

II.1.3 Déchets ménagers

Les déchets ménagers ou/et verts proviennent du restaurant de la cité universitaire de la ville de Fès ou du marché de gros Bensouda. Ils sont composés principalement des légumes, des épluchures de fruits ou encore leurs résidus. Ces déchets ont nécessité un tri au préalable pour ne garder que la matière organique et enlever tout ce qui ne pourrait pas être biodégradé naturellement.

II.1.4 Fientes de volailles

Les fientes de volailles ont été apportées des fermes de la région Ain Chgag de Fès. Ce sont les résidus des poules et leurs pailles, riches en azote, contiennent du phosphore, du potassium et du calcium. Le fumier de poule est aussi un excellent engrais azoté; il est très rapidement minéralisé dans le sol et son azote est presque aussitôt disponible pour les plantes.

II.2 Méthodes

II.2.1 Elaboration des composts

L'élaboration des composts a eu lieu à deux échelles

- **Echelle de laboratoire à raison de 100 kg/ type de compost**
- **Echelle industrielle à raison de 70 tonnes/ type de compost**

Les essais de laboratoire ont été réalisés sur un petit terrain de la faculté des sciences Dhar El Mahraz et ceux à l'échelle semi industrielle dans un terrain appartenant à la Régie Automne d'Eau et d'Electricité (RADEEF) près de la station d'épuration des eaux usées.

Les essais de co-compostage ont été aménagés sous forme d'andains en forme trapézoïdale et ont été ajustés de telle façon à avoir la composition optimale pour le démarrage d'un processus de compostage. Les proportions des déchets à composter ont été calculées selon la méthode de Proietti Soudi (Proietti et al., 2016) dont le calcul dépend de la composition de chaque substrat en C, N et en humidité. Les andains diffèrent par leur composition initiale et la présence ou l'absence des boues (Tableau 10). Nous notons qu'une tonne de margines correspond à environ 800 litres.

Tableau 10: Proportions initiales des déchets compostés

	Echelle semi industrielle		Echelle de laboratoire	
	Compost Témoin: C_L	Compost à boues : CB_L	Compost Témoin: C_{SI}	Compost à boues : CB_{SI}
Boues	0	30 tonnes	0	35 Kg
Fientes de volailles	12 tonnes	12 tonnes	30	20 Kg
Déchets organiques ménagers et vers	45 tonnes	30 tonnes	55	30 Kg
Margines (Pour l'humidification)	12 tonnes	12 tonnes	15 Kg	15 Kg

Après homogénéisation des substrats et une humidification voisine de 60% (Valeur optimale du compostage). L'arrosage de ces derniers a été assuré par les margines, et le brassage a été effectué manuellement C_L, C_{BL} ou à l'aide d'un trax C_{SI}, C_{BI}. L'humidité est contrôlée après chaque brassage. En cas de desséchement des mélanges, un arrosage est effectué. Les andains ont été retournés une fois tous les 3 jours au début du processus, puis tous les 7 jours et/ou tous les 15 jours respectivement pour les périodes correspondant aux phases thermophile et de maturation des composts.

II.2.2 Echantillonnage

L'échantillonnage conditionne la représentativité de l'analyse vis-à-vis de la masse à caractériser (Wiart & Schwartzbrod, 1997). Les études bibliographiques sur les méthodes d'échantillonnages montrent que le choix de la méthode doit être adapté à la situation sur le terrain

(Alaoui & Laaribya, 2017). Pour notre cas, nous avons appliqué la méthode composite vu que c'est la mieux adaptée à la nature du travail et à la forme d'andain. Et pour une meilleure homogénéité des échantillons, nous avons opté pour la méthode de quartage.

Durant le processus du compostage et pour la caractérisation des substrats initiaux, le prélèvement des échantillons de la matière mise à composter a été réalisé en balayant tout l'andain ou le tas des déchets procurés. L'échantillon prélevé représente le mélange de cinq sous prélèvements de 0,5kg; chacun prélevé à des distances égales et à une profondeur de 0,3m à 0, 5m. L'échantillon global formé subit 4 quartages successifs pour récupérer un échantillon représentatif final d'environ 1kg. Enfin, l'échantillon en question est emballé dans un sac en plastique, identifié, numéroté et conservé à -20°C jusqu'à son analyse.

II.2.3 Caractérisation des substrats et suivi du processus de compostage

Les substrats initiaux ont été caractérisés par mesure : du pH, de la conductivité électrique, de la matière organique, du carbone organique, de la matière grasse, de l'humidité et de la siccité (pour les boues). Les même paramètres ont été mesurés pour le suivi et le contrôle du processus de compostage en plus des paramètres spectroscopiques à savoir : La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), la diffraction des rayons X (DRX), la microscopie électronique à balayage (MEB), la spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif (ICP) pour la mesure des éléments traces métalliques et des oligo-éléments par (ICP) ainsi que la spectrométrie d'adsorption moléculaire, l'analyse des tests de respiration, de germination et à plants.

II.2.3.1 Paramètres physico-chimiques

II.2.3.1.1 Température

La mesure de la température constitue un critère d'évaluation indirecte de la biodégradation. L'importance du flux de la chaleur est en fonction de la nature du substrat, de la masse et de la forme de l'andain ainsi que des conditions climatiques environnantes.

La température est mesurée un jour sur deux à différents niveaux de l'andain par un Multi-paramètre TYPE CONSORT- Modèle C535 introduit directement dans l'andain. Les résultats s'affichent automatiquement sur le petit écran de l'appareil.

II.2.3.1.2 pH

Le pH est mesuré d'une façon hebdomadaire à partir d'une solution de compost selon la norme internationale ISO 10390 (1994). Il s'agit de préparer une suspension de compost en agitant 10g d'échantillon dans cinq fois son volume (10 g/50 mL), pendant 30 min, puis on la laisse se décanter

pendant au moins deux heures. Le pH est ensuite mesuré à l'aide d'un pH-mètre de type Mettler Toledo MP 225 préalablement étalonné par des solutions tampons (A pH= 7 puis pH= 4).

II.2.3.1.3 Conductivité (CE)

La détermination de la conductivité a été réalisée à l'aide d'un conductimètre modèle WTW LF 30/SET, selon la norme ISO 11265 dans une suspension diluée au 1/5 préparée à partir de l'échantillon du compost. L'échantillon préparé subi une agitation pendant 30 minutes puis une filtration. La conductivité électrique est mesurée à partir du filtrat et corrigée à la température standard de 25 °C.

II.2.3.1.4 Taux d'humidité (%H)

Le taux d'humidité est déterminé sur un échantillon de 100 g, après séchage dans une étuve à 105°C pendant 48 heures (AFNOR, 2000), selon la relation suivante :

$$\text{Taux d'humidité (\%)} = 100 \times \frac{(P_f - P_s)}{P_f}$$

Sachant que: P_f = Poids frais et P_s = Poids sec

L'eau, fortement retenue par la matière, peut être sous-estimée, alors qu'un traitement par excès peut engendrer la perte d'une partie des substances organiques. L'évaporation d'eau jusqu'au poids constant est influencée par les conditions de séchage, qui dépendent du système d'évacuation d'air de l'étuve, l'humidité de l'air et la qualité de conservation au dessiccateur avant les mesures (balance sensible à 0,1 mg).

II.2.3.1.5 Détermination de la densité (d)

La densité d'un échantillon est le rapport de la masse d'un volume précis à la masse du même volume d'eau distillée.

La densité est calculée à chaque étape du procédé afin de déterminer l'évolution de la dégradation. Une éprouvette de 50 mL est remplie par l'échantillon. Les pesées sont effectuées avec une balance de précision. La densité (d) est calculée selon la relation:

$$d = M / M'$$

avec M : Masse d'un volume l'échantillon (g)

M': Masse du même volume d'eau (g)

II.2.3.1.6 Dosage des matières azotées

a) Azote total Kjeldahl (NTK)

Dans un compost, l'azote se trouve sous forme minérale et organique (Protéines, phosphoamino- lipides...). Pour doser la totalité de l'azote, l'échantillon doit être minéralisé en totalité afin de permettre la transformation de l'azote organique en azote minéral.

- **Minéralisation**

Dans un matras, nous avons mélangé 0,5g d'échantillon préalablement séché et broyé, en présence de 0,5g du catalyseur Kjeldahl (Sulfate de potassium K_2SO_4 : 50g, sulfate de cuivre $CuSO_4$: 5g et sélénium Se: 0,5 g) qui permet de convertir les différentes formes d'azote en sulfate d'ammonium, et 10 mL d'acide sulfurique H_2SO_4 concentré (36 N). Puis on place les matras dans un minéralisateur à une température de 400°C jusqu'à l'obtention d'un minéralisât blanchâtre (03 heures au minimum).

- **Distillation et dosage**

Après refroidissement, le minéralisât est distillé en milieu alcalin (Excès de soude) (NaOH 50 mL, 10 N) en présence d'un indicateur coloré la phénolphtaléine. L'ammoniac est récupéré par l'acide borique (H_3BO_3) (10 mL, 1 N). Pour le dosage, nous avons neutralisé l'ammoniac par une solution H_2SO_4 (0,02N) en présence d'un indicateur coloré : L'indicateur de Tashiro (Rouge de méthyle 0,1 g, Vert de bromo-crésol 0,5 g, Ethanol à 95 % : 500 mL).

La teneur en azote minérale, est déterminée selon l'expression suivante :

$$N\ (\%) = \frac{N' (Ve - Vt)}{P} \quad x\ 1,4$$

N : Azote NTK.

Ve : Volume de titre de l'échantillon (mL).

Vt : Volume de titre de témoin (mL).

N' : Normalité de l'acide sulfurique du dosage.

P : Poids en gramme de la prise d'essai (mg).

b) Azote ammoniacal ($N\text{-}NH_4^+$)

L'ammonium est dosé directement à partir d'un échantillon frais (2g) par distillation en milieu alcalin, 10 mL de soude (10 N). L'ammonium se transforme en ammoniaque puis il est récupéré dans 10 mL de l'acide borique (1N) et est dosé par l'acide sulfurique (0,02N) en présence d'indicateur d'azote Tashiro.

$$N\ (\%) = \frac{N' (Ve - Vt)}{P} \quad x\ 1,8$$

Ve : Volume de titre de l'échantillon (mL).

Vt : Volume de titre de témoin (mL).

C) Azote nitrique ($N\text{-}NO_3^-$)

2g d'échantillon frais, additionnés de 10 mL de soude (NaOH 10 N), de 10 mL d'eau distillée et quelques mg d'alliage de DEVARDA. Après distillation, le mélange est titré avec l'acide sulfurique (0,02 N).

N.B: L'ammoniac au contact d'acide borique, alcalinise le milieu qui vire au vert, la solution étalonnée d'acide fort est versée ensuite pour ramener l'indicateur à sa teinte sensible.

d) Azote organique

L'azote organique correspond à la différence entre l'azote total Kjeldahl et l'azote minéral (somme de l'azote nitrique et ammoniacal).

II.2.3.1.7 Détermination de la matière organique

a) Matière organique (MO%)

Le taux de matière organique est déterminé après calcination de l'échantillon au four pendant 6 heures à 600 °C, l'augmentation de la température se fait par paliers thermiques, pour éviter la perte de l'échantillon par projection suite à sa brusque combustion.

Après la calcination, la combustion de la matière organique est totale, ce qui facilite la détermination de sa teneur par simple différence entre le poids avant et après calcination, selon l'expression suivante :

$$MO(\%) = 100\times \frac{(Ps - Pc)}{Ps}$$

% MO : Taux de la matière organique

Ps : Poids de l'échantillon sec et Pc : Poids de l'échantillon après calcination

b) Carbone organique

Le pourcentage du CO (Carbone organique) est déterminé à partir du taux de la MO en appliquant la relation suivante:

$$CO(\%) = \frac{MO\,(\%)}{1{,}8}$$

Le calcul est basé sur le fait que la MO est constitué de presque 55,5% de carbone

II.2.3.1.8 Détermination de la matière grasse

Il s'agit de la détermination du poids des substances organiques extraites dans l'hexane après acidification de l'échantillon à pH = 4 et après évaporation du solvant de l'extraction à 80 °C. L'échantillon de compost a été séché à 105 °C, puis broyé finement. Une masse (m) de 5 g a été traitée avec 75 mL d'hexane trois fois consécutives, tout en agitant la suspension pendant 24 h. La suspension est conservée pendant 48 h. L'extrait est ensuite filtré, porté à 80% s'évapore. La masse M obtenue après évaporation correspond à la fraction huileuse de l'échantillon. Le résultat est exprimé par rapport à la matière sèche.

$$\text{Matière grasse (\%)} = (M/m) \times 100$$

M : La masse de matière grasse;

m : La masse de l'échantillon initial.

II.2.3.1.9 Dosage des éléments traces métalliques totaux (ETM)

Avant toute analyse d'éléments traces métalliques, des oligo-éléments ou d'une composition minérale, une minéralisation d'échantillon est faite au préalable. Il s'agit d'une attaque acide de l'échantillon solide par un acide tel que l'acide nitrique concentré à raison de 25 mL/50 mg d'échantillon en poids sec. La détermination des métaux étudiés, des oligo-éléments ou de la composition minérale (Phosphore, calcium, magnésium, potassium et sodium) a été réalisée par spectromètre de masse de type NF-11885 couplé à un plasma inductif de type Ultima2- Jobin Yvon.

II.2.3.2 Paramètres spectroscopiques

II.2.3.2.1 Analyse par spectroscopie d'absorption infrarouge (FTIR)

La spectroscopie d'infra-rouge permet de déterminer la présence des groupements fonctionnels dans les molécules organiques, et les structures dans certaines molécules simples.

Dans les molécules, les liaisons vibrent à une fréquence bien déterminée qui dépend des atomes de la liaison mais aussi de l'environnement de la liaison. Pour une fréquence donnée, ces liaisons rentrent en résonance : l'énergie apportée est alors consommée : les molécules absorbent et la transmission diminue. Si on représente sur un graphe l'évolution de la transmission en fonction de la fréquence, ou plus généralement, on observe des variations.

Pour notre cas, la spectroscopie infra-rouge a été utilisée sur des échantillons de co-compostage préalablement séchés à 105°C en mélange avec le bromure de potassium (KBr) avec un ratio de (2/200 ; échantillon/KBr). Le mélange a été ensuite pressé sous forme de pastilles. Les analyses

ont été réalisées à l'aide d'un spectromètre infrarouge de type transformée de fourrier à la Cité de l'innovation et de transfert technologique de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah.

II.2.3.2.2 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

Les échantillons solides préalablement séchés à 105°C ont été broyés et analysés par la technique de diffraction sur poudre désorientée à l'aide d'un diffractomètre Philips X'PERT, utilisant une anticathode de cuivre de longueur d'onde $\lambda = 1.54060$ Å opérant à 30 mA et 40 kV. L'acquisition des données est effectuée par une unité de contrôle pour des angles de 2 théta (2θ). Le traitement des diffractogrammes s'effectue à l'aide du logiciel X'Petrt High Score. L'indexation des phases est basée sur la comparaison des DRX de la base de données des fiches ASTM (American Society for Testing and Materials) faisant la comparaison des distances inter-réticulaires dues aux angles 2θ.

II.2.3.2.3 Analyse par Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

La granulométrie et la texture des composts finaux ont été analysées par microscopie électronique à balayage (MEB) modèle Quanta 200, couplé à la spectroscopie à dispersion d'énergie EDS, fonctionnant à 25 kV à la Cité de l'innovation et de transfert technologique de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah.

II.2.3.2.4 Absorbances spécifiques en UV

C'est une méthode qui fait appel à la propriété d'un corps ou d'une solution à absorber la lumière à différentes fréquences ou longueurs d'onde.

Le rapport de l'absorption lumineuse (Domaine du visible) d'une solution d'acide humique à des longueurs d'onde $\lambda_1 = 472$ et $\lambda_2 = 664$ permet de déterminer le ratio appelé E4/E6 : Paramètre indicateur de la maturité des composts. Ce paramètre est lié au degré d'humification, un rapport inférieur à 5 indique la présence des acides humiques (Bhat et al., 2017) et une valeur supérieure à 5, témoigne de la prédominance des acides fulviques (Sellami et al., 2008) et donc un compost non mature. Ce rapport est influencé généralement par la granulométrie, la distribution moléculaire, le pH de l'environnement, les teneurs en oxygène, en carbone et en groupes carboxyliques et aussi l'origine et l'âge du matériau humique (Francesco Rigobello ; Giulia Mansutti ; M. Saeed Khan; Rigobello et al., 2017).

II.2.3.3 Paramètres biologiques

II.2.3.3.1 Mesure de la respiration du compost ou test réspirométrique

Le but de ce test est d'estimer la quantité de dioxyde de carbone dégagée par une masse de compost. Durant le processus de compostage, la respiration des microorganismes a été mesurée selon Ouattara et al., 2010), Yu et al., 2011); Abid 2018), avec quelques modifications apportées. Un échantillon de 50 g de compost a été introduit dans un flacon à col large de 1 litre où un tube contenant 10 mL de NaOH (0,1 N) a été placé. Le flacon a été incubé pendant 24 h à la même température de l'andain. La microflore qui respire, dégage du CO_2 qui est piégé par l'hydroxyde de sodium (NaOH 0,1 N). Le titrage de la solution de soude avec de l'acide chlorhydrique (HCl 0,1 N), en présence de la phénolphtaléine comme indicateur coloré, permet de quantifier le CO_2 dégagé. La respiration est exprimée selon l'expression suivante en mg de CO_2/g/ jour.

$$CO_2\text{-C (mg/100 g de compost)} = (V_{HCl\ Témoin} - V_{HCl\ échantillon}) \times 2{,}2$$

Avec : $V_{HCl\ Témoin}$ (mL) : le volume de HCl utilisé pour le titrage de NaOH dans le témoin.

$V_{HCl\ échantillon}$: le volume de HCl utilisé pour le titrage de NaOH dans l'échantillon.

II.2.3.3.2 Test de germination

Dans le but d'évaluer le risque phytotoxique du compost produit, un test de germination a été effectué sur 10 graines de cresson de variété ***Lepidium Sativum L***, et sur les maïs dans des boites de pétri avec du papier filtre imbibé avec des extraits hydrosolubles de composts (100 g/1000 mL). Les essais sont conduits à l'obscurité et à température ambiante (25°C), durant 72h (Alvarenga et al., 2015). Le témoin a été réalisé de la même manière, avec l'eau distillée à la place du jus de compost.

L'indice de germination (IG) est déterminé par rapport à l'émergence et la croissance radiculaire dans l'extrait hydrosoluble de chaque stade du co-compostage et dans l'eau distillée selon la relation suivante :

$$IG\% = \frac{NG \times L\ racines}{NG\ témoin \times L\ racines\ témoin} \times 100$$

Avec : NG : Nombre des graines germées dans l'extrait hydrosoluble dans l'eau plus compost.

$NG_{témoin}$: Nombre des graines germées dans l'eau distillée

$L_{racines}$: Longueur des radicules dans l'extrait hydrosoluble eau plus compost.

$L_{racines\ témoin}$: Longueur des radicules dans l'eau distillée.

II.2.3.3.3 Test à plants

Le test Plante a été effectué sur les maïs ou le cresson avec du compost dans des plateaux. Dix graines de maïs ou cresson ont été épandues à la surface et couvertes par une plaque de verre. Un suivi journalier a été effectué jusqu'au cinquième jour durant le temps de germination puis les graines germées sont coupées et pesées (Sánchez-Monedero et al., 2001).

III. Caractérisation des substrats et des mélanges initiaux

III.1 Caractérisation des substrats

Les résultats de la caractérisation physico-chimique des substrats à composter pour les deux essais montrent que :

- Les boues de la STEP de la ville de Fès ont un pH presque neutre, optimal pour l'activité de la plupart des bactéries, et sont riches en matière organique et en azote avec une siccité de 24% ;
- Les fientes de volailles sont faiblement basiques et présentent des teneurs moyennes en azote, en carbone organique et en matière organique et une conductivité électrique importante signifiant une teneur élevée en sels.
- Les margines organiques sont légèrement acides, riches en matière organique mais possèdent une charge faible en azote.
- Les déchets ménagers sont humides, riches en azote, en matière organique et en carbone.

La teneur en matière organique (MO) est l'un des premiers critères sur lequel on se base pour préconiser un produit donné au compostage (Salma, 2015). D'après les Tableaux 10 à 12, les déchets solides présentent des teneurs élevées en matière organique. Ceci valide leur utilisation pour l'élaboration des composts par voie aérobie. En fait, le développement de la flore microbienne s'effectue par des compositions adéquates des mélanges des substrats à composter en rapport carbone/azote et en humidité qui doivent être respectivement de 10 à 20 et 50-60%.

Pour notre cas, l'ajustement de ces paramètres a eu lieu par l'ajout des margines qui se caractérisent par un taux d'humidité élevé et de faibles pourcentages en carbone et en azote. Pour ces dernières, nous avons analysé, également, leur charge en matières organiques non biodégradables et en polyphénols qui dépasse les limites de rejet d'un effluent dans les cours d'eau (Tableau 11).

Tableau 11: Caractéristiques des substrats à composter pour l'essai de laboratoire

Substrats / Paramètres	Boues	Déchets ménagers	Fientes de volailles	Margines
pH	6,74	5,9	8,5	4,67
CE (mS.Cm^{-1})	4,56	2,05	8,48	7,61
H %	**56,09**	**67,72**	**43,59**	**91,56**
MO %	58,92	80,12	**50,65**	76,70
COT %	28,93	47,83	16,11	7,64
NTK %	1,08	1,45	**1,57**	0,21
NH_4^+ mg/L	0,41	0,09	**0,18**	5mg/L
NO_3^-(%)	0,002	0,008	**0,02**	0,003
N $_{org}$ mg/L	0,78	0,76	**1,42**	13
Matière grasse (%)	4,095	1,46	1,38	ND
Siccité %	24	-	-	-

Tableau 12: Composition des substrats à composter pour l'essai semi industriel

Substrats / Paramètres	Boues	Déchets ménagers	Fientes de volailles	Margines
pH	6,63	6,1	8,2	4,91
CE (mS.Cm-1)	4,81	1,65	8,02	7,76
H %	71,55	51,47	73,71	88,13
MO %	51,37	76,78	26,05	77,87
COT %	29,8	44,54	15,11	7,04
NTK %	1,12	1,47	1,55	0,14
NH_4^+ mg/L	0,47	0,11	**0,16**	5,7
NO_3^-(%)	0,007	0,009	**0,007**	0,004
N $_{org}$ mg/L	0,82	0,78	**1,39**	13
Matière grasse (%)	4,013	1,47	1,40	ND
Siccité %	25	-	-	-

Tableau 13: Caractérisation des margines en matière polluantes

Paramètres / Margines	DCO (g O_2/L)	DBO_5 (g d'O_2/L)	Polyphénols (g/L)
Margines pour l'essai de laboratoire	83,050	4,720	3,55
Margines pour l'essai industriel	96,07	2,567	
Valeurs limite de rejet d'effluent dans le milieu récepteur	100	-	-

De même pour les boues, leur application doit être conforme à la norme française relative aux boues admissibles pour traitement par compostage [Norme : NFU 44-095]. Le Tableau 14 relate les résultats de la caractérisation des boues en éléments traces métalliques. Les résultats obtenus attestent que les boues exploitées sont conformes à la norme NFU 44-095 à l'exception de l'élément du chrome qui dépasse légèrement la limite à cause de la charge des eaux usées traitées en cet élément qui provient essentiellement des rejets artisanaux.

Néanmoins, la présence du chrome dans un amendement organique pourrait jouer un rôle majeur dans le métabolisme et la croissance des cultures de certains aliments riches en ce dernier à savoir : Brocoli, Gruyère, Haricot vert, Champignon, Asperge, Prune, Noix, blé, Cresson et Pomme de terre.

Par ailleurs, le Co et le Ni pourraient aussi être des agents qui donnent la couleur rosée aux nodules sur les racines de légumineuses et qui catalyse l'enzyme qui permet l'hydrolyse de l'urée en ammoniac dans les végétaux. L'activation de cette enzyme évite l'accumulation d'urée qui peut se produire avec un risque de toxicité dans les feuilles.

Tableau 14: Charge métallique des boues de STEP

Teneur des ETM en (mg/kg)	**Cu**	**Cr**	**Pb**	**Zn**	**Co**	**Ni**	**Cd**
Boues $_L$	213	1229, 5	156, 275	42, 3	6, 27	81, 5	00
Boues $_{SI}$	221	1135, 5	168, 15	39, 9	5, 34	93, 2	00
Valeurs limites (Préconisées par les normes NFU 44-095)	1000	1000	800	3000	14,625	200	20

La comparaison des résultats de la caractérisation des déchets initiaux nécessaire à l'élaboration des composts aux deux échelles montre une certaine ressemblance exceptée pour le paramètre d'humidité des boues. Ceci semble être dû à la méthode de leur conditionnement. Les boues utilisées pour l'essai de laboratoire ont été préalablement séchées à l'air libre.

III.2 Caractérisation des mélanges initiaux à t=0

La caractérisation physico-chimique des mélanges initiaux (Tableau 15) à t = 0 dénote que les mélanges C_L et CB_L sont moyennement basiques avec un pH de 7,9 pour le mélange C_L et 7,7 pour le mélange CB_L. Le mélange C_L est pauvre en azote et en matière organique avec un C/N égale à 28,78 légèrement supérieur à celui du CB_L qui est de 27,24. Alors que les mélanges C_{SI} et $CB_{SI,}$ sont légèrement plus basiques que les mélanges C_L et CB_L. Le mélange C_{SI} est plus riche en azote et en matière organique, avec presque pas de différence, pour les rapports C/N, en comparaison avec les mélanges réalisés à l'échelle du laboratoire.

Nous notons que les 4 mélanges dédiés au compostage respectent les conditions citées dans la littérature sur le démarrage d'un compost. La légère différence entre la composition des mélanges élaborés aux deux échelles pourrait être probablement due à la nature des déchets organiques ménagers.

Tableau 15: Caractérisation physico-chimique des mélanges initiaux (t = 0)

Paramètres / Mélanges	pH	CE (mS.Cm^{-1})	H%	MO %	COT %	NTK %	C/N	Densité	Matière grasse
Essai du laboratoire									
C_L	7,2	2,7	60,46	59,31	50,531	1,7	28,78	0, 33	0,61
CB_L	7,7	2,53	63,13	71,25	53,43	1,75	27,24	0,34	0,76
Essai semi industriel									
CB_{SI}	8,60	2,26	60,13	74,425	43,170	1,49	28,97	0, 35	0,60
C_{SI}	8,09	2,85	62,06	78,125	45,316	1,54	29,4	0,31	0,75
Conditions optimales	7-8	-	≥ 60	-	-	-	25-30	-	-

IV. Etude de l'évolution du processus de co-compostage

Le suivi du processus d'évolution de la boue co-compostée avec les autres substrats, par digestion aérobie à l'échelle de laboratoire, a été réalisé par des analyses physico-chimiques et spectroscopiques. Tandis que pour celui effectué à l'échelle semi-industrielle, nous nous sommes

contentés de la mesure des paramètres les plus déterminant dans la qualité d'un compost à savoir : La température, l'humidité, le pH, la conductivité, la matière organique, le rapport C/N et l'indice de gémination.

IV.1 Paramètres physico-chimiques

IV.1.1 Température

Le suivi de la température des mélanges pendant le processus du compostage reflète la compostabilité des substrats. La Figure 1 montre que la température des composts C_L et CB_L augmente dès la première semaine du compostage jusqu'à la 7ième semaine pour CB_L et la 6ième semaine pour C_L. Cette augmentation est un signe de libération de la chaleur au cours de la décomposition du substrat organique selon la réaction :

$$CnH_{2n}O_n + xO_2 \longrightarrow YH_2O + ZCO_2 + \text{énergie (Chaleur).}$$

Le dépouillement des courbes de la figure 1 enregistre la présence de 3 phases différentes : Mésophile, thermophile et de maturation.

La phase mésophile, caractérisée par une montée progressive de la température jusqu'à 27°C pour le CB_L et 37°C pour le C_L, signifie le développement des micro-organismes mésophiles qui entrent en action pour détruire, par digestion, les parois cellulaires des tissus tendres, tout en consommant beaucoup d'oxygène et transformant l'énergie présente dans la matière organique en chaleur. Cette phase a duré pour les 2 mélanges presque 12 jours.

La phase thermophile a duré respectivement 5 semaines et demi et 6 semaines et 2 jours pour les composts C_L et CB_L où les températures ont atteint 62°C et 55°C. Ceci s'explique par une digestion plus rapide traduite par la réduction du volume perceptible due à la perte de la structure de la matière initiale de la vaporisation de l'eau, de la décomposition des matières ligneuses et la transformation de la matière organique en gaz carbonique CO_2 volatil.

La phase de maturation s'est manifestée par une diminution progressive de la température due à la colonisation de la matière par des champignons, jusqu'à environ 25°C pour les deux composts. A cette température, les micro-organismes restent actifs avec l'accompagnement des macro-organismes : des vers de compost, des acariens, des coléoptères, des collemboles,…En fait, au cours de la transformation des déchets par les micro-organismes grâce aux excrétions de leurs propres enzymes, les micro-organismes décomposent ces déchets par leurs tubes digestifs. De ce fait, la matière perd son aspect d'origine et reste reconnaissable. Elle se dégrade en petites

particules qui lui confèrent une surface totale beaucoup plus développée que la surface initiale sur laquelle, il y a une apparition d'autres microorganismes qui transforment cette matière organique en minérale et en humus qui se forme au fur et à mesure. Au-delà de la 5 et 4ième semaine de dégradation pour respectivement les mélanges C_L et CB_L, nous assistons à une minéralisation complète de la matière organique en éléments nourriciers, eau et oxygène grâce au vers des composts formés. Les substances minérales ainsi formées serviront de nutriment pour les plantes.

Pour la phase thermophile, nous signalons que la présence des boues retarde la croissance des microorganismes thermophiles d'au moins une semaine. Ceci pourrait être attribué à la forte charge de la boue en polluants organiques non biodégradables. Nonobstant, cette boue a joué un rôle important dans la phase de maturation en accélérant le processus de minéralisation d'une semaine.

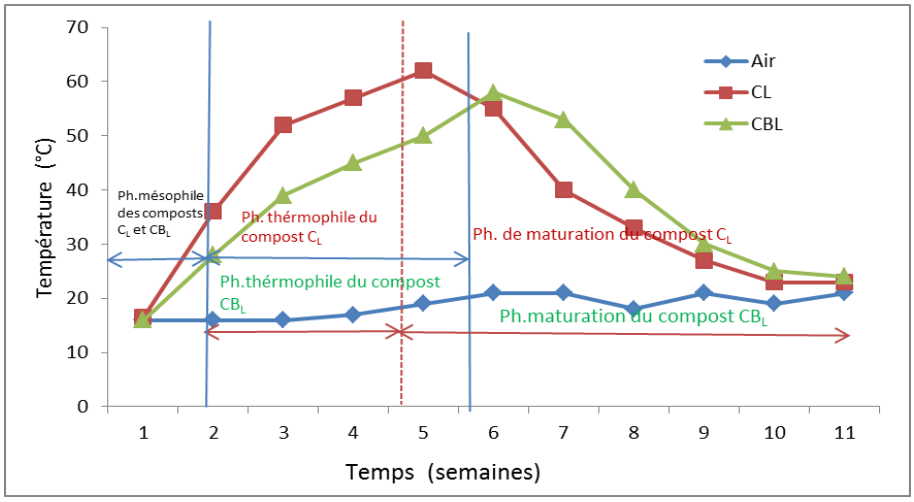


Figure 1: Evolution de la température des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps

Dans le cas de l'essai semi industriel, les courbes de température ont une allure classique du compostage, caractérisée aussi par trois phases importantes : Mésophile, thermophile et de maturation.

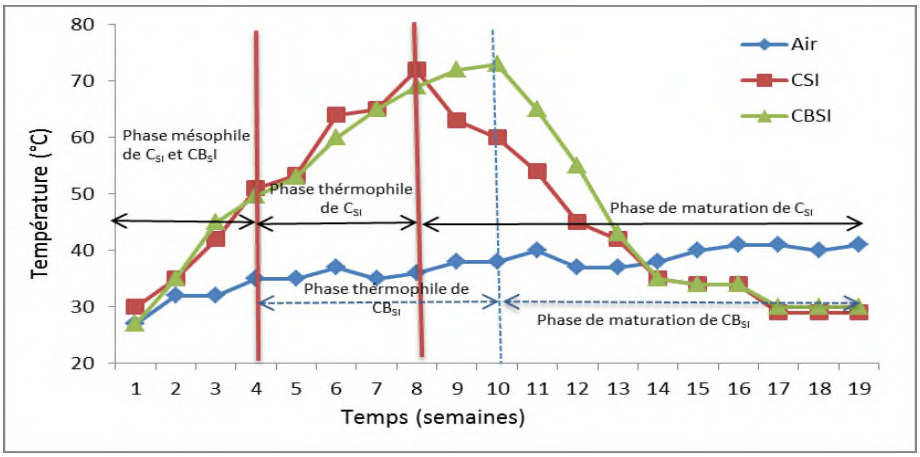


Figure 2: Evolution de la température des composts C_{SI} et CB_{SI}

- La phase mésophile est la phase initiale du compostage où les matières premières sont envahies par les micro-organismes mésophiles (Bactéries et champignons), absorbant les molécules simples (Sucres simples, acides aminés, alcools...) et transformant une partie des polymères (Protéines, acides nucléiques, amidon, pectines, hémicellulose, cellulose...). Leur activité a engendré une montée de température de 30 °C à 40°C pour le premier tas C_{SI}, et de 33°C_{SI} à 45°C pour le deuxième tas CB_{SI}.
- La phase thermophile est caractérisée par une élévation de la température jusqu'à 75°C et 73°C respectivement pour CB_{SI} et C_{SI} et a duré environ 5 semaines pour C_{SI} et 7 semaines pour CB_{SI}. En effet, l'augmentation de la température est le résultat d'une part, d'une intense activité microbienne qui résulte de la dégradation des molécules simples présentes dans les substrats (Aadraoui et al. ; 2017); et d'autre part, de l'inertie de la masse du compost qui lui confère une capacité auto-isolante et qui maintient une température élevée à l'intérieur de l'andain.
- La phase de maturation se distingue par une baisse de température jusqu'à l'ambiante dans les deux andains où la flore microbienne est dominée par les organismes mésophiles. Cette baisse de température est due à l'épuisement du milieu en composés organiques facilement métabolisables ; et persistance des composées résistants à la dégradation (Lignine, cellulose…) (Echab; 2002). Elle est dominée par les réactions d'humification qui consistent à la minéralisation des composés organiques vers des composés plus stables appelés « Humus » (Knicke et al.; 2014). La durée de maturation du compost C_{SI} est de 7 semaines contre 5 semaines pour le compost CB_{SI}. La maturation du compost témoin C_{SI} a débuté à la 9ième semaine et a duré 6 semaines. Alors que celle du compost à boues CB_{SI} n'as débuté qu'à la 11ième semaine et n'as duré que 5 semaines. Donc la présence des boues dans l'élaboration du

compost a prolongé la phase thermophile de 2 semaines et a accéléré la période de maturation en la réduisant à 5 semaines au lieu de 7 semaines en comparaison avec le compost témoin.

Ce résultat confirme ce qui a été trouvé à l'échelle du laboratoire, en termes du rôle de la boue dans les phases mésophile et thermophile, en retardant l'augmentation de la température à son maximum, et de maturation, en accélérant la stabilisation des nutriments formés.

Cependant, nous signalons que la température maximale atteinte durant la phase mésophile pour les mélanges élaborés à l'échelle du laboratoire est inférieure de 20°C à celle des mélanges effectués à l'échelle semi industrielle. Ceci pourrait être expliqué par la période du compostage, les composts ont été élaborés au cours de la période hivernale, où la température ambiante était entre 13 et 22°C. De plus, les andains à l'échelle du laboratoire sont de petites dimensions, donc il y a un échange et perte de chaleur rapide avec le milieu extérieur. Afin d'assurer un processus de compostage de qualité, nous recommandons de cibler les saisons printanières et estivales et prévoir une tonne au minimum, comme quantité de déchets à composter.

IV.1.2 pH

Le pH est un paramètre qui intervient essentiellement par son rôle sélectif pour la microflore responsable de la décomposition des déchets initiaux. Au cours du compostage, le pH peut subir des modifications, soit une acidification par formation de certains acides organiques liés à la dégradation des sucres simples et la production de CO_2 en début du processus du compostage, soit une alcalinisation par une production du gaz ammoniac.

Sur les Figures 3 et 4, nous remarquons qu'au début du processus du compostage les courbes relatives à l'évolution du pH des mélanges C_L, CB_L (Figure 3) et C_{SI}, CB_{SI} (Figure 4) connaissent une diminution jusqu'à la valeur du pH égale à 6. Cette acidité pourrait avoir plusieurs originees, la production d'acides organiques à partir des glucides, des lipides ou d'autres substances, selon la réaction ci-dessous :

$$\text{Substrat organique} \longrightarrow R\text{-}COOH \longrightarrow R\text{-}COO^- + H^+$$

Ou bien, elle peut provenir de la production de CO_2 lors de la dégradation aérobie, ce qui génère l'acide carbonique selon la réaction suivante :

$$CO_2 + H_2O \xrightarrow{H^+} HCO_3^-$$

Au bout des semaines 2 et 4 respectivement pour les essais du laboratoire et semi industriel, le pH a augmenté jusqu'à 9 et 8 respectivement pour les 4 mélanges marquant le début de la phase thermophile du processus de dégradation. Ceci pourrait s'expliquer par un processus

d'ammonification et la production ammoniacale à partir de la dégradation des amines (protéines, bases azotés…) selon la réaction suivante :

$$R\text{-}NH_2 \longrightarrow NH_4^+ + OH^- \longrightarrow NH_3 + H_2O$$

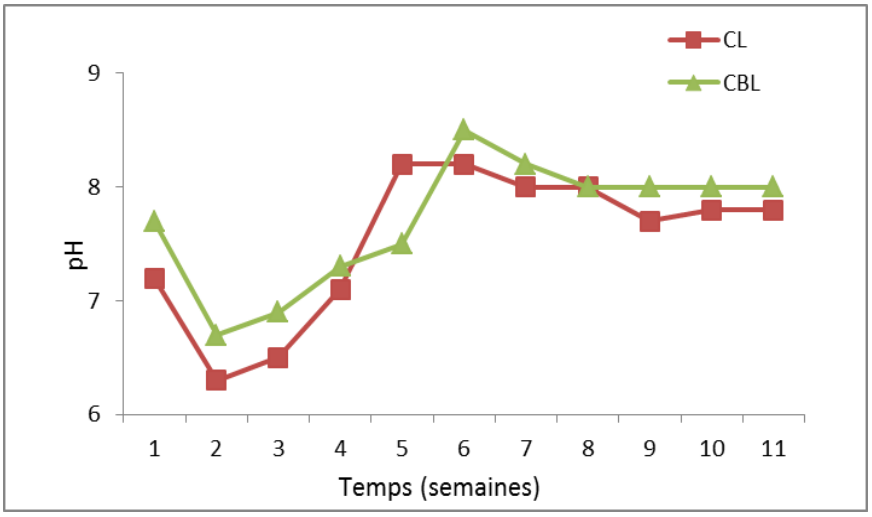


Figure 3: Evolution du pH des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps

Les pics les plus élevés ont été atteints à partir de la 5ième semaine ou la septième semaine respectivement pour les essais du laboratoire et semi industriel, il y'a transformation totale des ions NH_4^+ en NH_3 ce qui prouve une dégradation de la matière organique avancée. Ensuite, il y'a diminution du pH jusqu'à stabilisation, prouvant le début de la maturation des composts. Selon Avnimelech et al. (1996), les pH acides sont caractéristiques des produits organiques immatures. Alors que les composts matures ont des pH compris entre 7,3 et 8,3. La stabilisation des deux composts a été atteinte à partir de la semaine 11 lors de l'essai semi industriel et la semaine 9 pour celui du laboratoire.

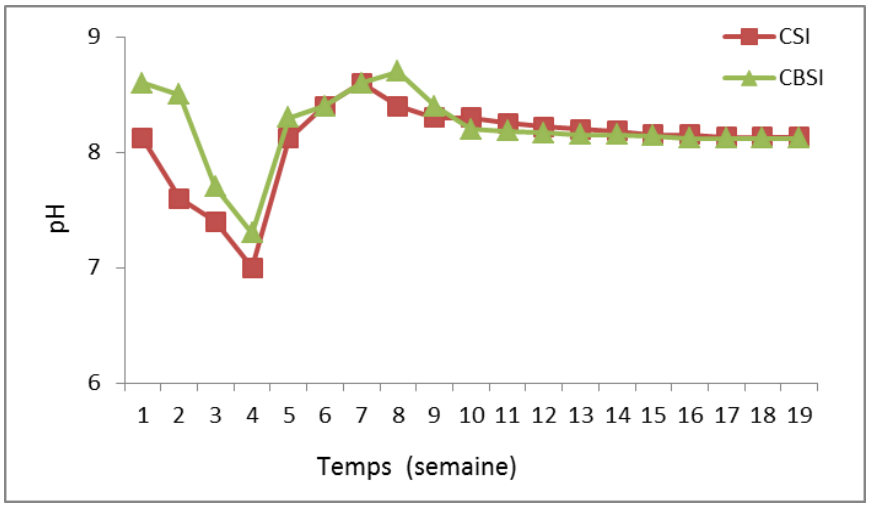


Figure 4: Evolution du pH des mélanges C_{SI} et CB_{SI} en fonction du temps

Les mêmes actions de l'incorporation de la boue dans les mélanges à composter ont été constatées pour l'évolution du pH en termes du temps de transformation et réactions entre les matières compostées. En effet, les boues ralentissent le fonctionnement des microorganismes thermophiles pour la dégradation des amines. Enfin, la stabilisation du pH autour de 8 pour les composts prouve le pouvoir tampon de l'humus au cours de la maturation. En général, le pH reste stable durant la phase de maturation, avec une valeur optimale comprise entre 6 et 8 (Zenjari et al., 2006 et Abdelhadi et al., 2013).

IV.1.3 Conductivité

La conductivité électrique n'est que rarement mentionnée dans la littérature sur le compost. Dans notre cas, elle a été suivie en raison de sa liaison directe à la salinité et au potentiel de phytotoxicité. L'évolution de la conductivité définie aussi l'évolution de la concentration en sels et en composés minéraux.

Sur les courbes de l'évolution de la conductivité des mélanges en fonction du temps (Figures 5 et 6), nous remarquons la même tendance d'évolution pour les 4 mélanges, avec le même effet de la boue sur le temps des différentes étapes de transformation, et une augmentation au cours des premières semaines pour l'ensemble des mélanges. Cette dernière pourrait résulter de la minéralisation de la matière organique lors du compostage et entraîne une augmentation de la concentration en sels et donc l'augmentation de la conductivité. Il est à noter aussi une baisse de cette conductivité à partir de la 4ième et la 6ième semaine respectivement pour CB_L et C_L (Figure 5) et à partir de la 9ième semaine pour C_{SI} et la 11ième semaine pour CB_{SI} (Figure 6). Ceci pourrait être dû à la libération des éléments majeurs comme P, Ca^{2+}, Na^{+}, K^{+} qui accompagnent la dégradation de la matière organique.

Tandis qu'à la fin du processus du compostage, nous assignons la tendance de stabilisation de la conductivité des quatre composts. Cette stabilité a été notée à partir de la 7ième et 8ième semaine respectivement pour C_L et CB_L (Figure 5) et à partir de la 13ième et 14ième semaine pour les composts industriels C_{SI} et CB_{SI}. Cette stabilisation semble être due à l'action de la rétention des éléments minéraux par les acides humiques synthétisés (Avnimelech al. 1996, Dignac et al.; 2005). Les valeurs finales des conductivités des composts du laboratoire sont entre 3,5 et 4 $mS.cm^{-1}$ témoignant ainsi leur maturité et leur bonne aération.

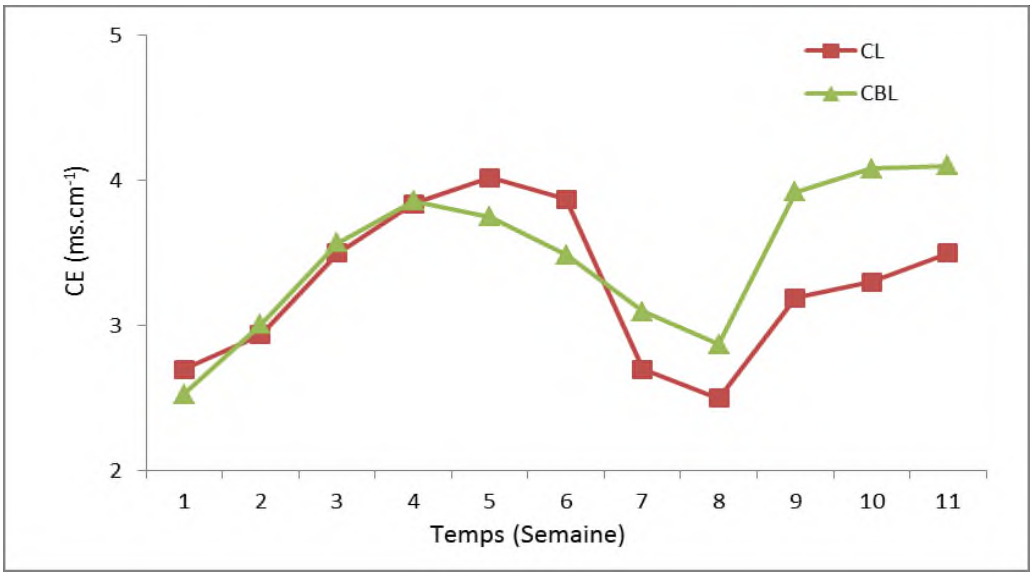


Figure 5: Evolution de la conductivité des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps

Pour les composts C_{SI} et CB_{SI} (Figure 6), la conductivité s'est stabilisée à une valeur de 2,55 $mS.Cm^{-1}$, inférieure à la valeur initiale du mélange de 56%, et à une valeur de 4,01 $mS.Cm^{-1}$, valeur supérieure à celle du mélange initial de presque 46%.

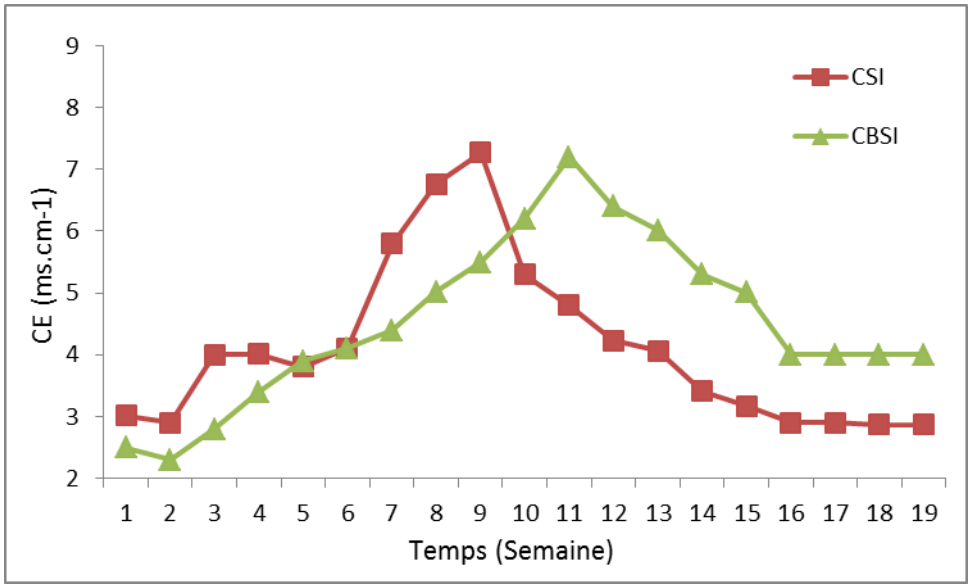


Figure 6: Evolution de la conductivité des C_{SI} et CB_{SI} en fonction du temps

Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que le mélange témoin est riche en éléments fermentescibles qui dégagent davantage la chaleur par unité de masse et inhibe légèrement l'activité des micro-organismes à cause de la diminution de l'espace lacunaire dans le compost quoique les valeurs des conductivités obtenues à la fin du processus du compostage ont été réduites à moitié de la phase thermophile à la stabilisation. D'après la théorie d'Avnimelech et al.,

ceci est imputé à la bonne aération du compost ce qui va diminuer la concentration en sels et donc de la conductivité (Cédric, 2004).

IV.1.4 Humidité

L'humidité est un facteur déterminant dans la décomposition des substrats, si la teneur en eau est en dessous de 20%, la décomposition sera inhibée. En revanche, si elle dépasse 70%, l'eau commence à remplir les espaces lacunaires des déchets et empêche les échanges d'oxygène, provoquant des conditions favorables à l'anaérobiose.

Dans notre cas, les courbes de l'humidité dans les quatre mélanges ont la même allure et leur niveau d'humidité au début se situe à environ 60%. Par la suite, le taux d'humidité diminue linéairement en fonction du temps jusqu'à une stabilisation de sa valeur aux environs de 23% pour les deux essais.

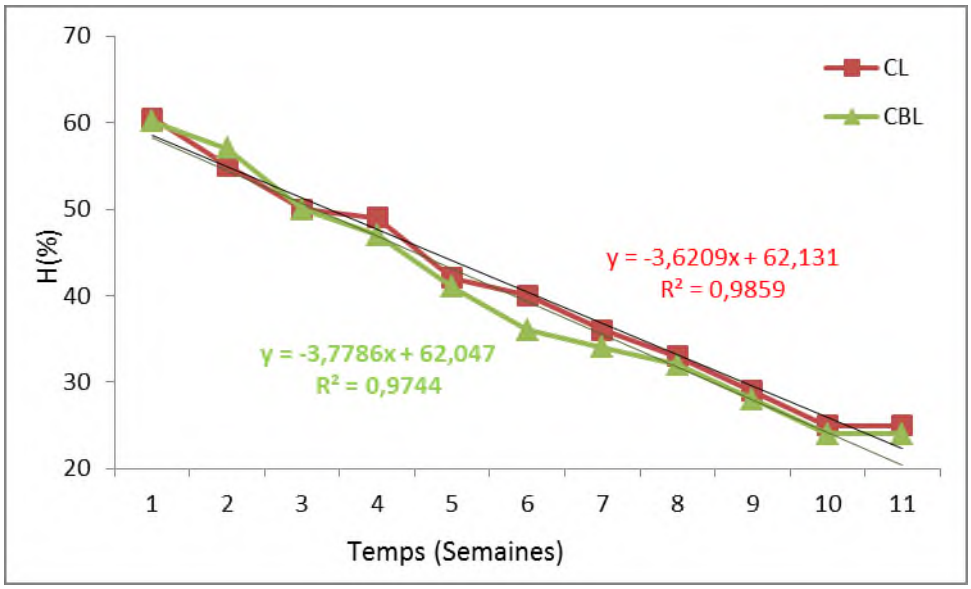


Figure 7: Evolution de l'humidité des mélanges CL et CBL en fonction du temps

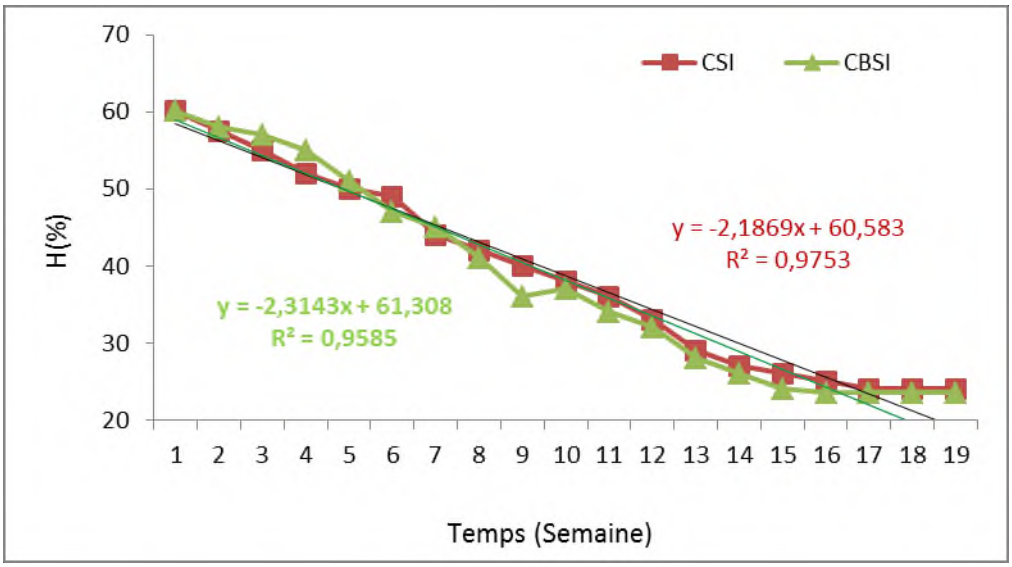


Figure 8: Evolution de l'humidité des composts C_{SI} et CB_{SI}

Cette diminution pourrait s'expliquer, d'une part, par la dégradation rapide de la matière organique grâce à la présence des microorganismes ; qui par leur respiration épuisent l'oxygène de la masse en dégradation et rend le milieu anaérobie (Compaoré et al, 2010) ; et d'autre part, par l'hétérogénéité et la qualité des substrats initiaux. Rajoutons à cela que le taux d'humidité diminue aussi sous l'action conjuguée de la montée de la température et de l'aération favorisée par le retournement qui entraîne des pertes d'eau sous forme de vapeur. Cette diminution est suivie d'un léger redressement de la droite pour s'approcher d'une allure asymptotique aux environs de 25% d'humidité à partir de la 8ième semaine pour l'essai du laboratoire et à partir de la 12ième semaine pour l'essai semi industriel.

IV.1.5 Matière organique

Les Figures 9 et 10, relatent les teneurs des quatre mélanges en matières organiques en fonction du temps. L'analyse des courbes exhibe une teneur élevée au début du processus du compostage à cause de la présence des margines et des déchets ménagers riches en ces matières.

Au cours du processus de compostage, cette matière organique diminue rapidement jusqu'à la 4ième ou 5ième semaine respectivement pour les mélanges sans boues et avec boues. Ensuite, pour les essais du laboratoire, cette matière diminue progressivement en fonction du temps jusqu' au début de leur stabilisation vers la 9ième semaine avec un taux de MO voisin de 34%. Quant aux essais à l'échelle semi industrielle, la diminution de la MO se fait par palier à cause des volumes énormes des mélanges compostés. La stabilisation a eu lieu à 32% et 42% respectivement à la 12ième et à la 16ième pour les composts sans boues et avec boues.

Cette décomposition est le fruit d'une série de réactions chimiques qui aboutissent à la transformation des composés organiques complexes en composés minéraux simples; produits riches en nutriments essentiels aux plantes.

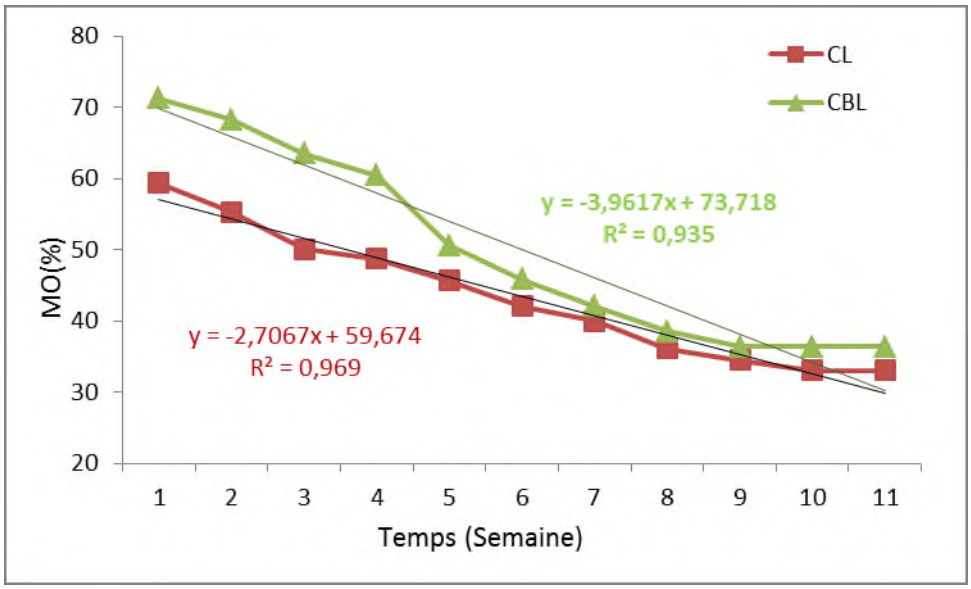


Figure 9: Evolution de la matière organique des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps

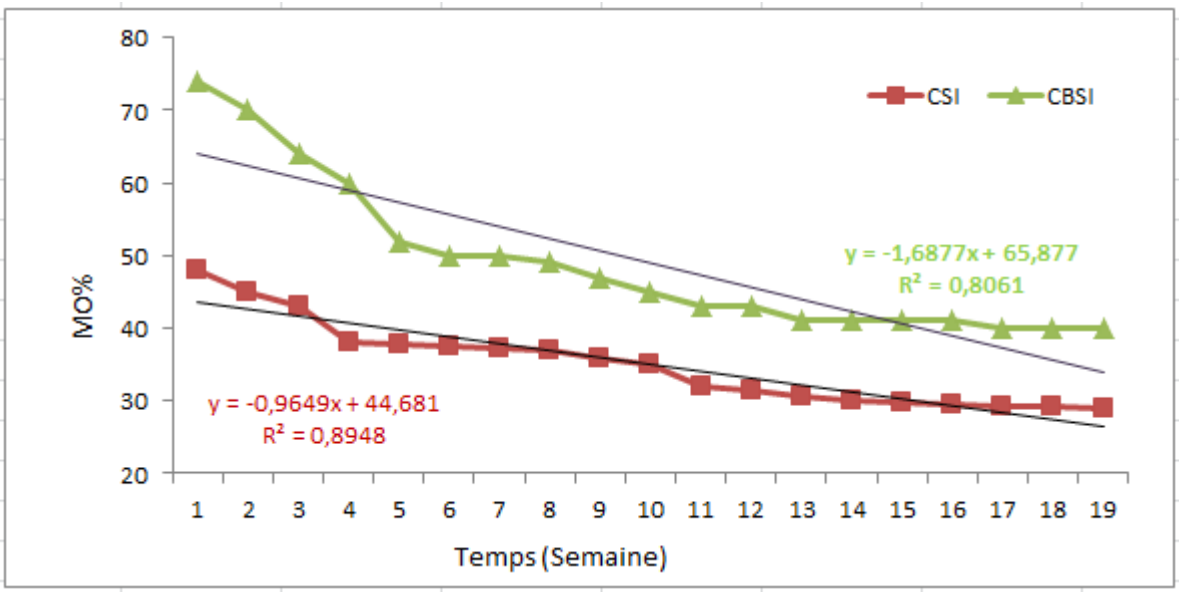


Figure 10: Evolution de la matière organique des mélanges C_{SI} et CB_{SI}

La vitesse de dégradation dépend de la nature des matières organiques enfouies, mais également de la disponibilité en azote. Les microorganismes ont, en effet, besoin d'azote pour dégrader le carbone : lorsque les résidus à décomposer ont un rapport C/N faible, les microorganismes ne prélèvent pas d'azote du milieu. Par contre, lorsque le rapport C/N est élevé, il constitue le résidu, ils prélèvent l'azote du sol pour leur propre métabolisme, pouvant, dans certaines conditions,

devenir concurrents du peuplement végétal cultivé pour l'azote (« Faim d'azote »). Cela explique la différence de période de dégradation entre les deux essais. Pour l'essai du laboratoire, nous avons noté une stabilisation entre 40 et 30 % à la 7ième semaine (Figure 9), tandis que pour l'essai semi industriel la stabilisation n'a eu lieu qu'à la 11ième semaine (Figure 10). Cette stabilisation de la matière organique est définie comme l'augmentation de la résistance à la biodégradation de la matière organique et elle est le résultat du ralentissement de l'activité microbienne ; plus la matière organique est stable, plus l'activité microbienne est faible.

Nous signalons aussi que les composts à boues CB_L et CB_{SI} sont plus riches en matières organiques à la fin du processus du compostage que les composts témoins. Alors que la différence entre les deux mélanges C_L et C_{SI} témoins, pourrait être due à la nature des déchets ménagers dans chaque essai.

IV.1.6 Carbonne organique

Le carbone organique est l'un des principaux constituants des déchets organiques compostés. Les Figures 11 et 12, illustrant le suivi du carbone organique des mélanges compostés en fonction du temps, enregistrent que les mélanges sont initialement riches en carbone qui diminue fortement jusqu'à la 7ième semaine. Cette diminution est linéaire avec des coefficients de régressions dans les environs de 1 pour les deux essais, et a eu lieu essentiellement pendant la phase de fermentation. Cette baisse pourrait s'expliquer par l'utilisation de l'oxygène par les micro-organismes qui transforment en continu ces substances organiques en gaz carbonique et en substances minérales. Ceci se traduit par l'appauvrissement du milieu en composés facilement dégradable et la dominance des précurseurs des substances humiques ; ce qui conduit à une composition finale des composts matures en carbone organique réduite de plus que 50 % de leurs valeurs initiales.

Il est à signaler que pour le compost témoin élaboré à l'échelle semi industriel, nous avons assisté à une légère augmentation du CO, à partir de la 17ième semaine, qui semble être due à une redistribution du carbone, comme résultat des mécanismes de l'humification, et une formation des substances complexes caractérisées par un très grand poids moléculaire et une condensation des lipides (Said-Pullicino et al., 2007).

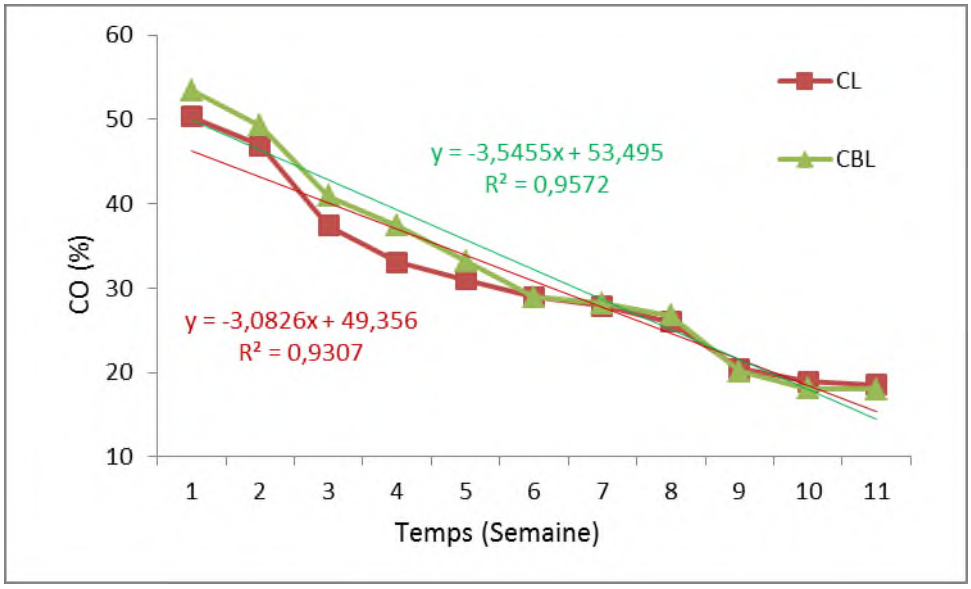


Figure 11: Taux du Carbonne organique des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps

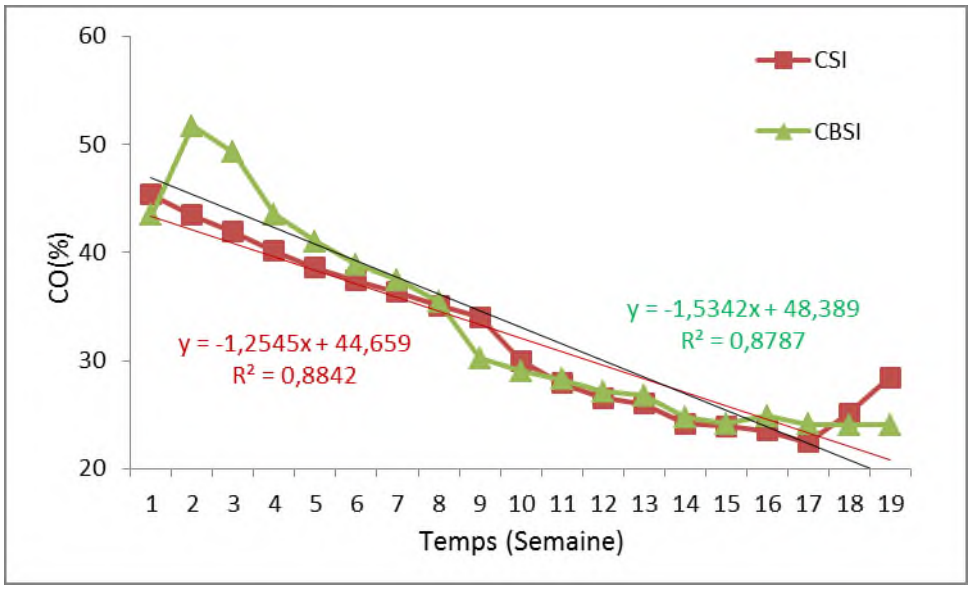


Figure 12:Taux du Carbonne organique des mélanges C_{SI} et CB_{SI} en fonction du temps

IV.1.7 Composés azotés

Le Tableau 16 regroupe les résultats relatifs aux caractérisations des mélanges C_L et CB_L composés azotés (NH_4^+, NO_3^-, N_{org}, NTK) et leurs transformations en fonction du temps.

L'examen de ces résultats prouve la bonne évolution du processus de dégradation qui se manifeste par une augmentation progressive des ions ammonium NH_4^+ pendant la première semaine du compostage suivie d'une diminution. Ceci pourrait être dû à l'activité des bactéries protéolytiques suite à la dégradation de l'azote organique en conduisant à la formation de NH_4^+. Quant aux ions nitrates, elles présentent la même tendance d'évolution que celle des ions NH_4^+ marquant ainsi une

augmentation jusqu'à la 2ième semaine de compostage puis une diminution. Cependant, il est possible de discerner une relation entre les concentrations en NH_4^+ et NO_3^- qui pourrait être expliquée par les conditions favorables au développement des micro-organismes responsables de la nitrification et de la dénitrification. En effet, la nitrification consiste à oxyder l'azote organique sous forme d'ammonium (NH_4^+), en nitrites (NO_2^-) puis en nitrates (NO_3^-) par l'intermédiaire des microorganismes autotrophes comme les *Nitrosomonas* et les *Nitrobacter*. Alors que, la dénitrification est un processus dans lequel certaines bactéries réduisent l'azote nitrique en un état plus faible d'oxydation (Anoxie).

L'azote organique diminue jusqu'à la 6ième et 4ième semaine respectivement pour les composés C_L et CB_L ; au-delà, il augmente. Cet effet est probablement dû à sa transformation en ions ammonium puis en azote minéral.

Tableau 16: Evolution des composés azotés dans les composts CL et CBL en fonction du temps

Temps de compostage (jour)	C_L					CB_L				
	NTK (%)	N_{min} (%)			N_{org} (%)	NTK (%)	N_{min}			N_{org} (%)
		NH_4^+(%)	NO_3^- (%)	$N_{min(T)}$(%)			NH_4^+(%)	NO_3^- (%)	$N_{min(T)}$ (%)	
1	1,69	0,11	0,002	0,112	1,578	1,75	0,1522	0,0022	0,1544	1,5956
15	1,33	0,132	0,027	0,159	1,171	1,42	0,198	0,028	0,226	1,194
30	1,18	0,101	0,01	0,111	1,069	1,16	0,13	0,01	0,14	1,02
45	1,12	0,097	0,0076	0,1046	1,0154	1,24	0,125	0,0078	0,1328	1,1072
60	1,56	0,084	0,0092	0,0932	1,4668	1,61	0,1078	0,0095	0,1173	1,4927
75	1,36	0,079	0,0081	0,0871	1,2729	1,78	0,1184	0,0084	0,1268	1,6532

Parallèlement, l'azote total a subi le même sens d'évolution que l'azote organique pour les même raisons. Les résultats ainsi obtenus ont permis de se contenter uniquement du suivi de l'évolution de l'azote total pour les mélanges élaborés à l'échelle semi industrielle (Figure 13).

Les résultats enregistrés prouvent l'efficacité de la boue dans l'évolution de l'azote. En effet, ce paramètre a augmenté rapidement durant les deux premières semaines. Il s'est stabilisé, après pendant une semaine puis a diminué progressivement en marquant de légers paliers jusqu'à la 12ième semaine. Ensuite, il a augmenté de nouveau jusqu'à atteindre la valeur initiale qui a eu lieu à partir de de la 17ième semaine (4 mois et quelques jours). Quant au mélange témoin, il n'y a qu'une légère transformation d'azote à partir de la 4ième semaine. A la 9ième semaine, le processus

s'est accéléré jusqu'à la 13ième semaine où l'augmentation de l'azote total s'est accentuée jusqu'à la 17ème semaine durant laquelle le taux d'azote a augmenté de 37,5% par rapport à la valeur initiale.

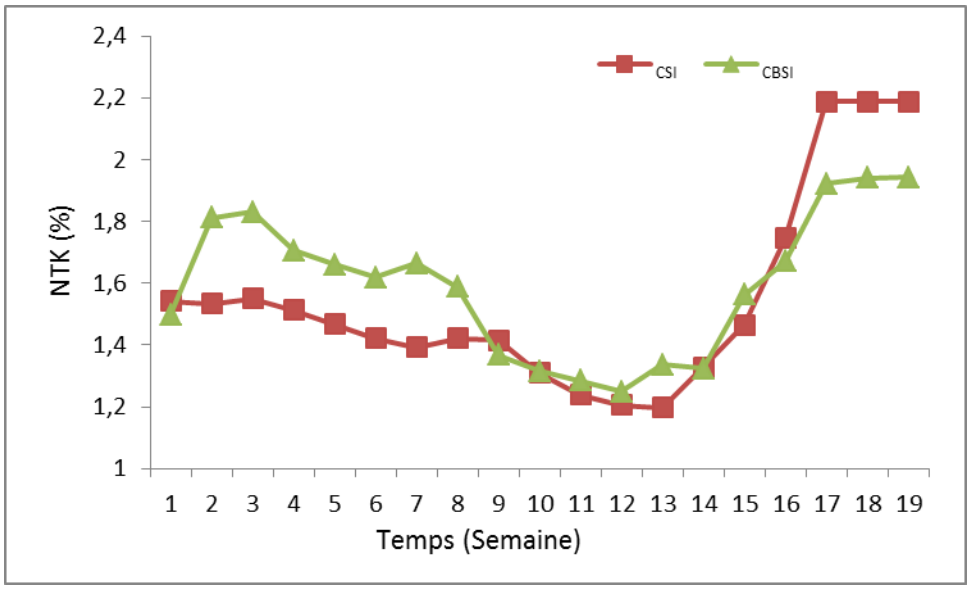


Figure 13: Evolution de la teneur en azote total des mélanges C_{SI} et CB_{SI} en fonction du temps

Cette augmentation résulte de la dégradation des protéines, des matériaux de départ, sous l'effet de la chaleur et de l'action des microorganismes. Nous pourrons aussi supposer qu'une partie de l'augmentation de l'azote est le produit des résidus des microorganismes qui se sont multipliés notamment pendant la phase thermophile et mésophile. Alors que sa diminution est le fruit de l'azote minéral disproportionné par rapport aux besoins des microorganismes (pour la fabrication des enzymes et autres protéines). Ce qui pourrait conduire à de fortes pertes d'azote par volatilisation.

IV.1.8 Rapport C/N

Le rapport C/N est contrôlé généralement pour assurer l'équilibre trophique des mélanges. Huang *et al.* (2006) ont rapporté que les modifications du rapport C/N reflètent la décomposition et la stabilisation des matières organiques. Toutefois, Godden (1995) a mentionné que l'optimum du rapport C/N initial se situe entre 25 et 30. Alors que d'autres études plus récentes (El Fels, 2014; Alvarenga et al., 2015) ont noté que ce rapport peut varier de 30 à 35.

Dans les deux cas, nos quatre mélanges ont respecté largement la moyenne optimale à t = 0 (Figures 14 et 15) du lancement (Tableau 14). L'analyse des courbes dénote une diminution progressive du rapport C/N avec le temps jusqu'à la 11ième semaine où il s'est réduit de 33% par rapport à sa valeur initiale dans les mélanges d'essais au laboratoire. Une très lente évolution a été

constatée lors des quatre premières semaines pour le mélange à boues, le rapport C/N était au voisinage de 25-30, Entre la 5ème semaine et la 6ième semaine, ce paramètre reste presque constant aux environs de 22, pour décroitre très rapidement à partir de la 7ième semaine et atteindre des valeurs de 11,68 et 10,39 respectivement pour C_L et CB_L à la 10ième semaine ou il se stabilise.

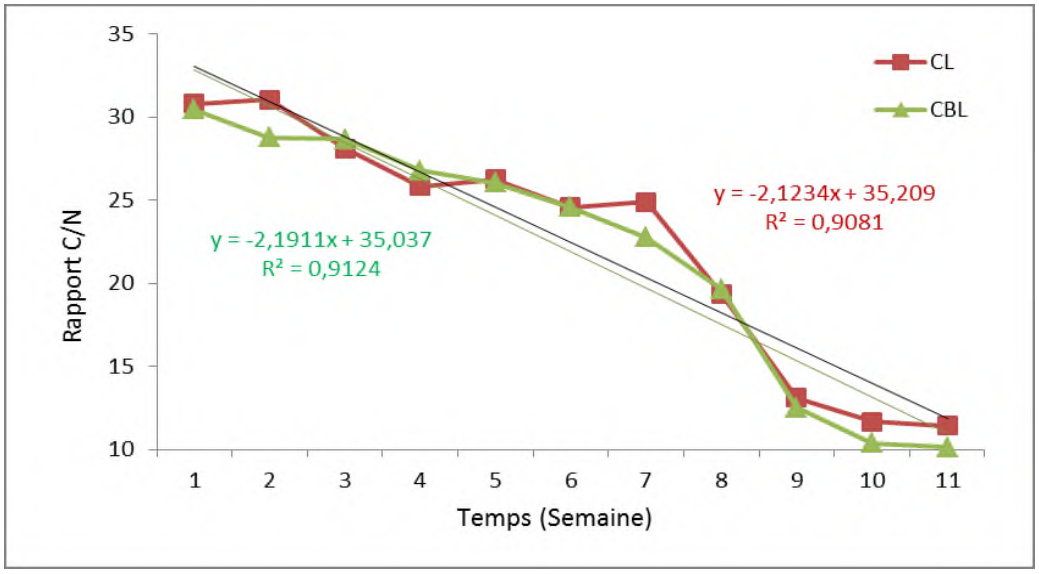


Figure 14: Evolution du rapport C/N des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps

A propos des essais à l'échelle semi-industrielle, les mélanges ont subi une évolution rapide du rapport C/N en marquant deux paliers de stabilisation pour le mélange témoin dont chacun a duré entre 3 à 4 semaines. Alors que pour le mélange à boues, nous constatons 2 fortes diminutions du C/N séparées par un palier qui s'est stabilisé à la valeur 22 pendant 6 semaines. La stabilisation finale de ce rapport a été à une valeur voisine de 12 représentant une réduction d'environ 50% au regard de sa valeur initiale, signifiant ainsi la maturité des mélanges et la transformation des composts riches en humus. En outre, l'ajout des boues aux mélanges a accru l'activité des microorganismes durant tout le stade de leur transformation.

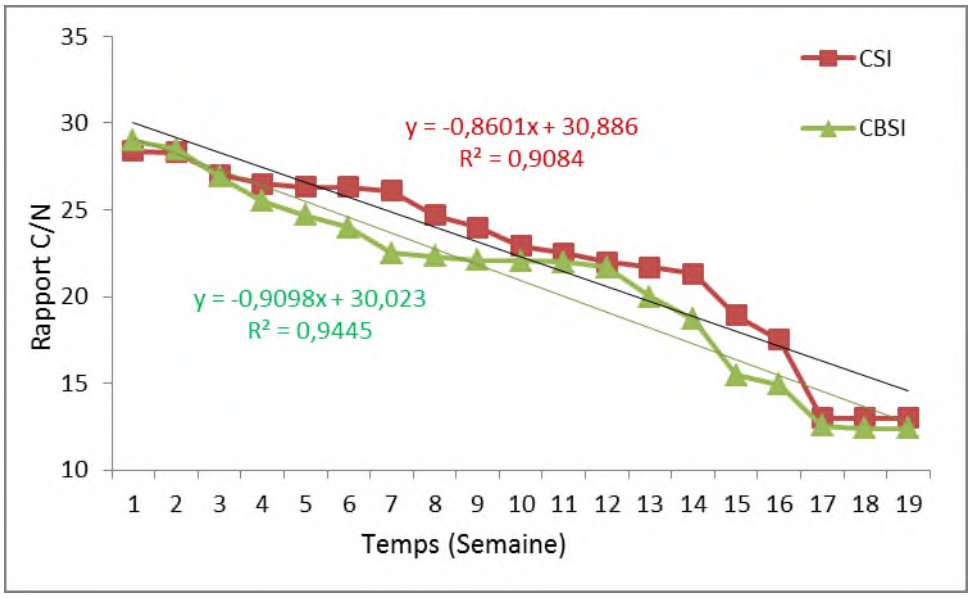


Figure 15: Evolution du rapport C/N des mélanges CB_{SI} et C_{SI} en fonction du temps

Il est à noter que le rapport C/N est un paramètre déterminant de la qualité d'un compost. C'est un indicateur essentiel de sa maturité. Sa stabilisation pour les différents mélanges, aux deux échelles, est très liée à la variation de la température et du pH au cours du processus de compostage. La maturation des composts de laboratoire a demeuré à peu près de deux mois et celle des essais semi-industriels a nécessité plus de temps, (4 mois) à cause des grandes volumes des mélanges compostés.

IV.1.9 Densité

La densité a été mesurée pour les mélanges préparés au laboratoire (Figure 16). Au début de l'évolution des matières organiques, la densité des 2 mélanges reste constante jusqu'à la 3ième semaine à partir de laquelle diminue progressivement puis se stabilise pendant presque 4 semaines.

Cette diminution de la densité pourrait s'expliquer par la prise de volume de la fiente de volaille et les autres substrats suite à leur décomposition par les microorganismes. A la 7ième semaine, la densité augmente rapidement pour le reste du temps jusqu'à ce qu'elle atteint son maximum de 0,55 comme valeur qui s'est élevée de 36%, de sa valeur initiale. Cette augmentation de la densité est obtenue ainsi suite à la perte du volume par libération du carbone des composés organiques sous forme de CO_2. Il est à noter que plus l'andain est riche en carbone, plus il perd de son volume lors du processus du compostage (Ibrahim El Akram ZNAÏDI, 2002).

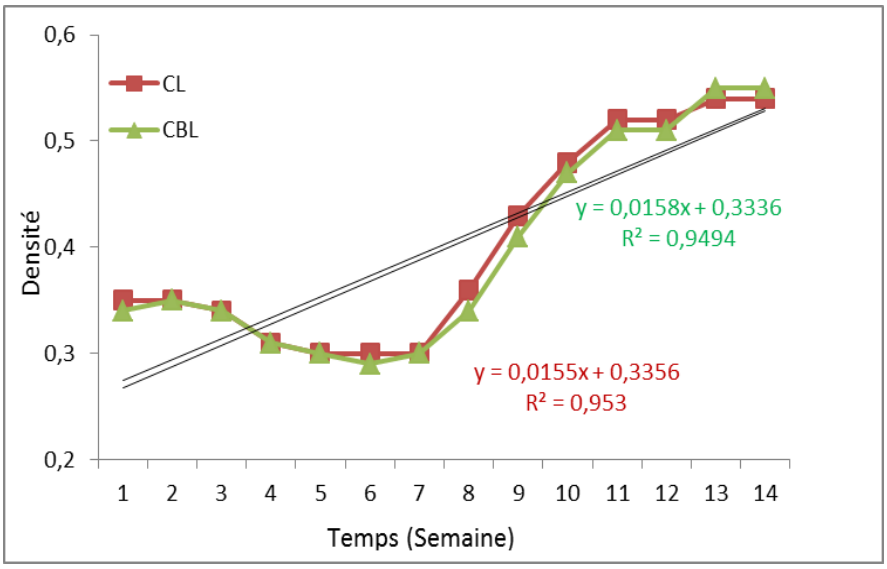


Figure 16: Evolution de la densité des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps

IV.2 Paramètres spectroscopiques

IV.2.1 Analyses par spectroscopie infra-rouge

La spectroscopie FTIR est largement utilisée comme méthode de base pour la caractérisation des substances organiques issues de l'humification des boues d'épuration (Simkovic et al., 2008) et des composts à boues d'épuration (Polak et al., 2007).

Le spectre FTIR présentés dans les figures 17 relative au mélange CB_L à la fin de chaque stade de sa transformation sont au nombre de 3 : Mésophile (S_1), thermophile (S_2) et de maturation (S_3).

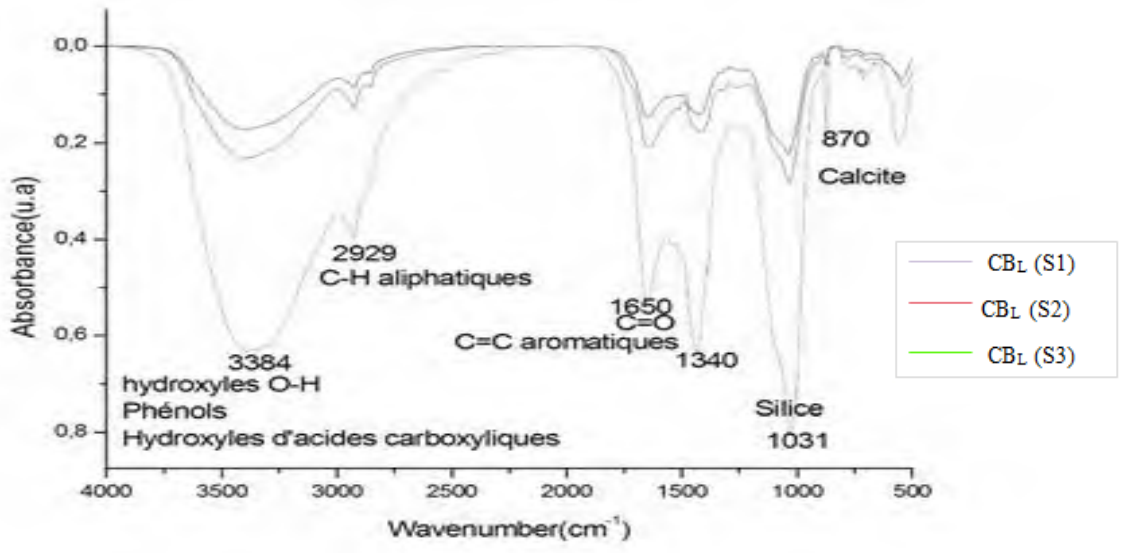


Figure 17: Spectre D'IFR du mélange CB_L à différents stades du co-compostage

Sur le spectre du compost CB_L, nous apercevons une bande située à 3384 cm^{-1} qui pourrait être attribuée à des vibrations d'élongation des groupements hydroxyles O-H. Son large profil et la valeur des nombres d'onde inférieure à celle des OH libres laissent penser que les hydroxyles sont en interaction par des liaisons hydrogène. Dans les sols riches en matière organique, cette bande a été attribuée respectivement à des phénols et à des hydroxyles d'acides carboxyliques (Ait Baddi et al., 2004); à des hydroxyles de phénols et des élongations N-H (Madari et al., 2006).

Nos spectres sont en accord avec ces hypothèses ; la dissymétrie de la bande permet de pointer deux bandes situées à 3384 cm^{-1} et à 2929 cm^{-1} que nous affectons respectivement à des groupements OH et N-H et aux phénols puisque nos mélanges ont été humidifiés par les margines. Dans la région 3000-2800 cm^{-1}, la diminution des absorbances relatives à des bandes situées à 2929 cm^{-1} reportées à ν_{C-H} aliphatiques des groupe méthyle et méthylène. La diminution des intensités des bandes des chaines aliphatiques ν_{C-H} et $\nu_{CH2/CH3}$ à 1340 cm^{-1} en fonction du temps et l'augmentation des intensités des fonctions C=C ne peuvent être que le résultat d'une dynamique du processus du compostage conduisant à la formation d'édifices insaturés et aromatiques. Toutefois, l'attribution des bandes d'absorption dans la région (4000-2000 cm^{-1}) du spectre FTIR reste assez précise dans le cas de l'étude des substances humiques extraites des sols, des boues, des composts et des sédiments des réservoirs. Alors que l'attribution des bandes d'absorption du spectre FTIR dans la région (1800-1600 cm^{-1}) devient compliquée suite aux chevauchements des bandes de vibration, rattachées à la boue et aux déchets verts.

Dans notre cas, les bandes apparaissant vers 1650 cm^{-1} renseignent sur la nature et sur la quantité des fonctions C=O contenues dans la matière organique (Kaiser et Ellerbrock, 2005). Dans des études de caractérisation d'acides humiques, Gonzalez-Pérez et al. (2004) ont attribué la bande située à 1650 cm^{-1} aux vibrations νC=C des structures aromatiques et de la vibration antisymétrique ν_a des COO^-. Les bandes attribuées à ν_a COO^- sont situées entre 1680–1630 cm^{-1}(Pajaczkowska et al., 2003). Une bande qui apparaît aussi vers 1650 cm^{-1} a été appropriée à la fonction C=O de la forme ionisée du groupement COO- des acides carboxyliques. Par ailleurs, l'analyse profonde des références bibliographiques révèle que dans la région 1650-1600 cm^{-1}, la bande de vibration est attribuée au groupe C=O. Cette dernière varie de plusieurs dizaines de cm^{-1} d'une référence bibliographique à une autre, et elle est attribuée avec précaution à un groupe fonctionnel spécifique (Aldéhyde, cétone, ester, acide) (González-Pérez et al., 2007). Et cela dépend de la composition des matières premières de départ, de leur comportement, avant, durant et à la fin du processus, et des conditions d'humification. Dans le cas de nos composts, il serait plus

logique, d'attribuer les bandes qui apparaissent vers 1650 cm^{-1} à $\nu_{C=O}$ de la fonction carboxyle ionisée (COO^-).

Pour la région 1340 cm^{-1}, nous avons relevé l'apparition d'une bande qui évolue sensiblement en intensité et en structure (Passage d'une bande large à une bande fine en fin du co-compostage). L'évolution du profil de cette bande peut être expliquée par la formation continue d'une forme bien structurée que nous l'attribuons à une vibration de déformation δOH comme dans les alcools aromatiques (Senesi et al., 2003).

Les résultats des analyses de la spectroscopie infra-rouge du compost CB_{SI} (réalisés à l'échelle semi-industrielle, Figure 18) est pareils à celle du compost CB_L dans la phase finale avec un léger élargissement des bandes O-H et un épaulement dans la bande C=C. Le spectre à la même allure que ceux du mélange CB_{LS3}; ceci dit que les composts ont la même composition après maturité et les mêmes bandes qui les caractérisent.

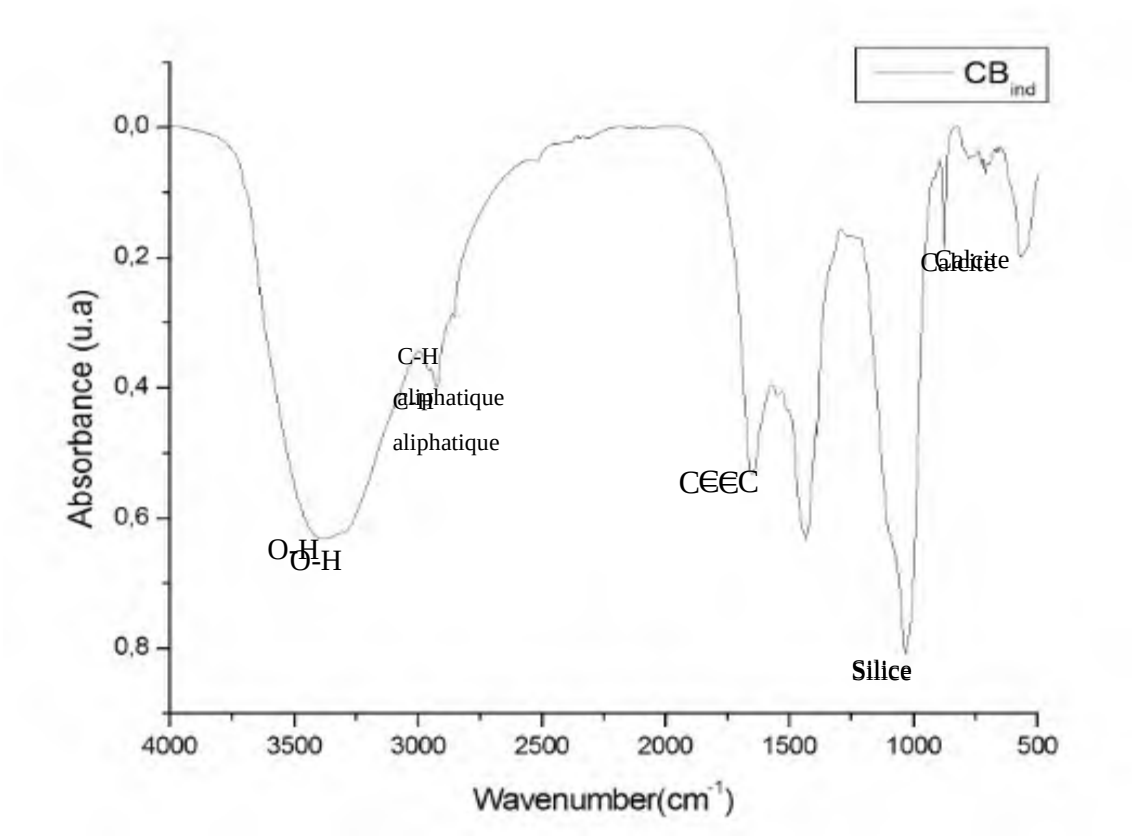


Figure 18: Spectres d'IFR des deux composts C_{SI} et CB_{SI} à la phase de maturation

IV.2.2 Analyse par spectroscopie ultraviolet-visible

L'analyse des composts par spectroscopie ultraviolet-visible permet de détecter la présence de différents composés comme les substances humiques et fulviques, ou le taux d'humification en fonction du rapport d'absorbance obtenu à 465 et 665 nm (E465/E665) (Barje, 2010).

Les courbes de la Figure 19, représentant l'évolution des rapports E_4/E_6 des 2 mélanges C_L et C_{BL} au cours du processus du compostage, montrent que les composts C_L et CB_L avaient initialement un rapport E4/E6 égale 2,8 qui a augmenté au cours des quatre premières semaines à cause de l'activité des micro-organismes caractérisant cette phase.

A la 3ième semaine, ce rapport diminue pour se stabiliser à partir de la 8ième semaine à des valeurs au voisinage de 1,5 à 2 ; valeurs qui demeurent inférieures à 5 pour les deux mélanges. Ce qui indique la présence d'acide humique et une décomposition avancée de la matière organique. En effet, des valeurs faibles du rapport E4/E6 expliquent que les produits organiques sont matures et les particules d'humus sont grosses et complexes, riches en matières fertilisantes (N, P, K). Ces résultats concordent avec ceux de la bibliographie qui mentionne que lorsque la valeur du rapport E4/E6 est réduite, le compost est mature et les substances humiques formées sont complexes (Sellami et al., 2008).

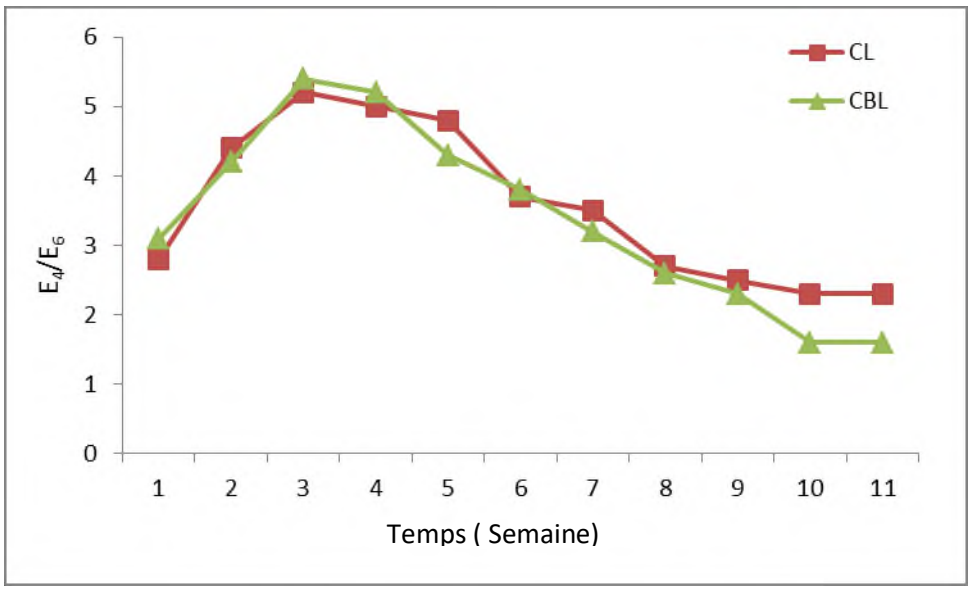


Figure 19: Evolution du rapport E_4/E_6 des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps

Plus récemment, Haddad et al. (2015) ont considéré ce ratio comme indicateur de l'intensité de l'humification et il a été utilisé comme un paramètre déterminant de la présence des acides humiques ou acides fulviques. Ce qui nous a mené aussi à l'effectuer à la fin du processus du

compostage pour l'essai semi industriel dans le but de vérifier la maturité des mélanges compostés.

Les résultats enregistrent des rapports de 3,2 et 2,9 respectivement pour les composts CB_{SI} et C_{SI}. Les deux valeurs sont inférieures à 5; ce qui relate la présence d'acide humique, des molécules organiques à haut poids moléculaire et des structures aromatiques confirmant la stabilité du compost. Donc une décomposition avancée confirmant la maturité des composts.

IV.2.3 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

Cette analyse a été effectuée pour les composts matures (Cas des deux essais). Le résultat montre que dans les deux cas, les diffractogrammes ont quelques pics semblables notamment à $2\theta \leq 32$.

Les analyses DRX des échantillons séchés à 105°C (Figure 20) montrent la présence des phases amorphes ou mal cristallisées. Néanmoins, nous avons noté des pics dans la zone ($2\theta = 20 - 30$) qui caractérisent les fibres de cellulose. Ce polymère linéaire de chaine de glucose qui en s'associant par des liaisons hydrogène, donne une forme de cellulose cristallisée. La structure cristalline est caractérisée par une bande large et diffuse dans la zone ($2\theta = 21{,}3\text{-}22{,}6$) correspondant à la diffraction du plan 002 dans cette zone. Les pics résiduels, indexés par rapport à la composition donnée par fluorescence X, montrent que les phases présentes sont la silice et le calcium qui se présentent sous forme de carbonate d'hydrophilite ($CaCl_2$). Pour les CBL et CBSI, il y a apparition des pics de faibles intensités dans la zone

$2\theta = 39 - 50$ expliquant ainsi la présence des oxydes métallique présents dans la boue.

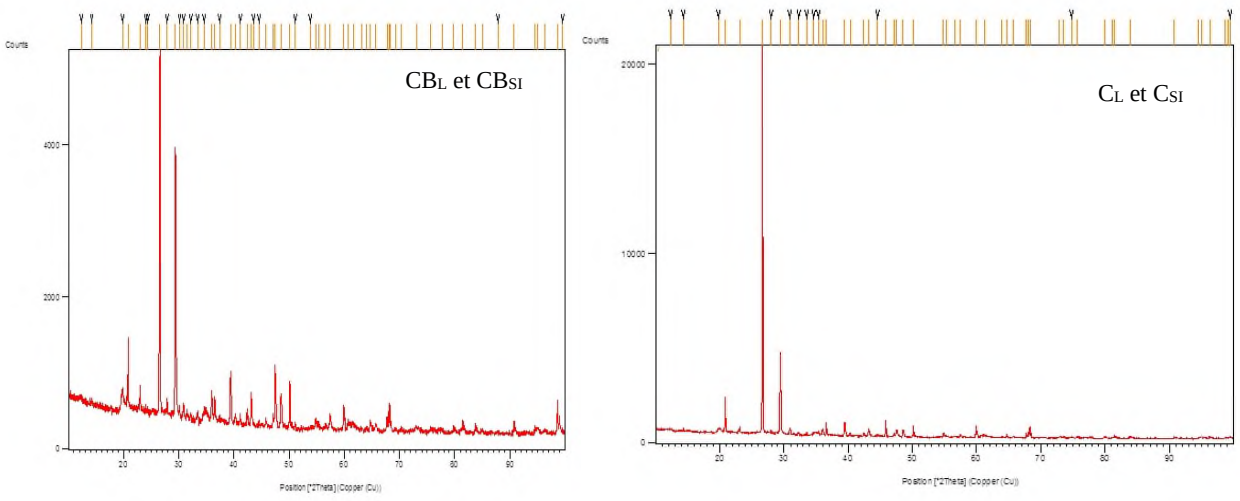


Figure 20: Diagrammes DRX des composts matures

IV.2.4 Analyse par Microscopie électronique à balayage

La Figure 21 représente les résultats de l'analyse par microscopie électronique à balayage des composts témoins et à boues élaborés aux échelles de laboratoire et semi-industrielle. Pour les quatre composts, cette analyse a été effectuée en phase finale du compostage afin de connaitre l'aspect des composts élaborés et la microstructure de leur surface.

Les micrographes montrent que, du point de vue micromorphologie, les quatre composts ont la même allure. Ils révèlent une surface extérieure plus ou moins irrégulière de structure hétérogène justifiée par les vides intercellulaires sous forme de microcavités apparentes sur la surface des composts ; ce qui confère une structure poreuse et témoigne de la dégradation de la matière organique, la modification chimique des matériaux cellulosiques et la maturité des composts.

Du point de vue aspect, les micrographes sont homogènes et enregistrent l'absence d'éléments indésirables et la stabilité de la matière organique ; ce qui témoigne la maturité et la bonne qualité des composts obtenus.

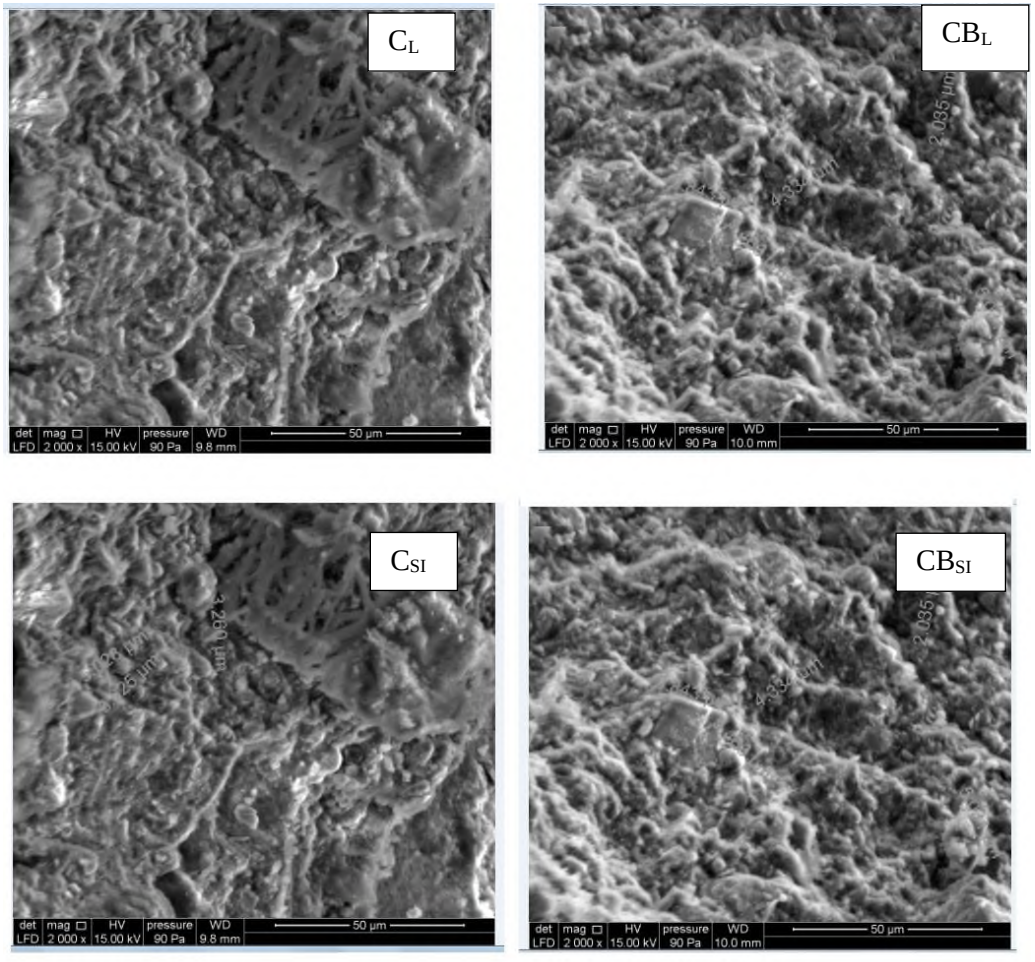


Figure 21: Composts matures observés au microscope électronique à balayage (MEB)

IV.3 Paramètres biologiques

IV.3.1 Test respirométrique

Etant donné que le processus du compostage est biologique et transforme des matières organiques, en présence des quantités appropriées d'air et d'eau, en un produit humifié et pendant lequel l'activité microbienne est essentielle à la minéralisation des composés organiques. La mesure de cette activité, sera une donnée importante pour poursuivre davantage le processus de dégradation par les microorganismes. Ce paramètre a été évalué par la détermination de la qualité de gaz carbonique dégagée que nous avons effectuée par test respirométrique. Ce test indique des informations sur la granulométrie des particules présentes et l'humidité du compost (Steven et Van Ginkel, 2005). En fait, une bonne porosité garantit un processus aérobie, alors qu'une surface de contact maximale (particules fines) permet une attaque microbienne plus complexe (Kulcu et Yaldiz; 2007) ; comme elle est aussi un indice de stabilité des composts (Adani et Ubbiali, 2006).

Les résultats du test de respiration lors du processus du compostage des mélanges C_L et CB_L, (Figure 22), témoignent d'une activité microbienne stable pendant les deux premières semaines. Ensuite, elle augmente de façon intense jusqu'à la 5ème semaine pour le C_L et la 6ème pour le C_{BL}. La grande activité microbienne a eu lieu au début de la phase thermophile (3ème semaine de compostage) au cours de laquelle 67% d'oxygène présents initialement ont été consommés et transformés en CO_2. Au-delà de cette période, cette activité décroit linéairement jusqu'à sa stabilisation durant la phase de maturation. Ceci prouve que les composts sont non seulement matures mais aussi de bonne granulométrie et de bonne qualité. Ils pourraient être exploités sans risque phytosanitaire.

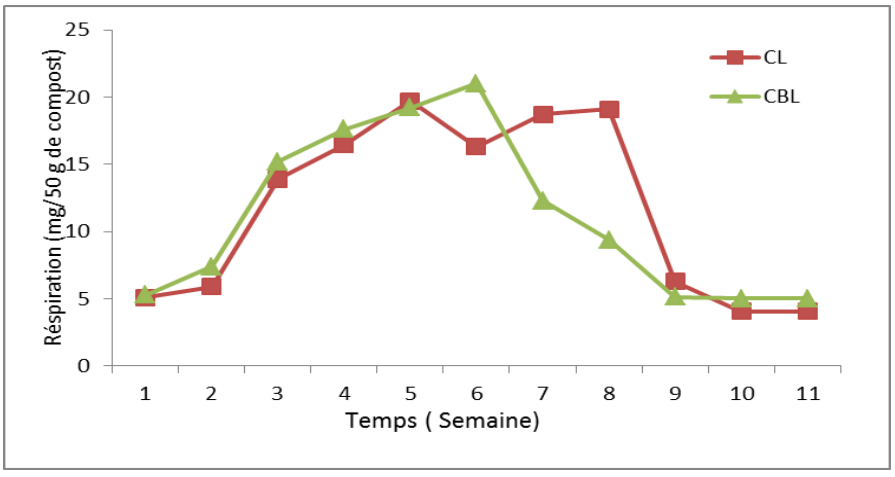


Figure 22: Evolution de la respiration au sein des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps

IV.3.2 Test de germination

Le taux de germination est l'un des paramètres performants pour l'évaluation de la toxicité et la maturité des composts (Chikae *et al.,* 2006). Selon Tiquia (2002), il témoigne de sa phytotoxicité. Les résultats de ce test sont représentés dans la Figure 23. Le dépouillement des histogrammes révèle que les mélanges induisent des indices de germination (IG) faibles entre 13% et 20% dans les 3 premières semaines. Ils augmentent et dépassent 50 % à partir de la 6ième et 7ième semaine respectivement pour C_L et C_{BL} marquant ainsi le début de maturité des composts et de leur in-toxicité.

De la 6ième semaine à la 9ième semaine, ce paramètre est resté constant à cause de la température élevée des composts pendant cette période et le début d'apparition des macro-organismes permettant de transformer, en présence de l'activité des micro-organismes, la matière organique en matière minérale.

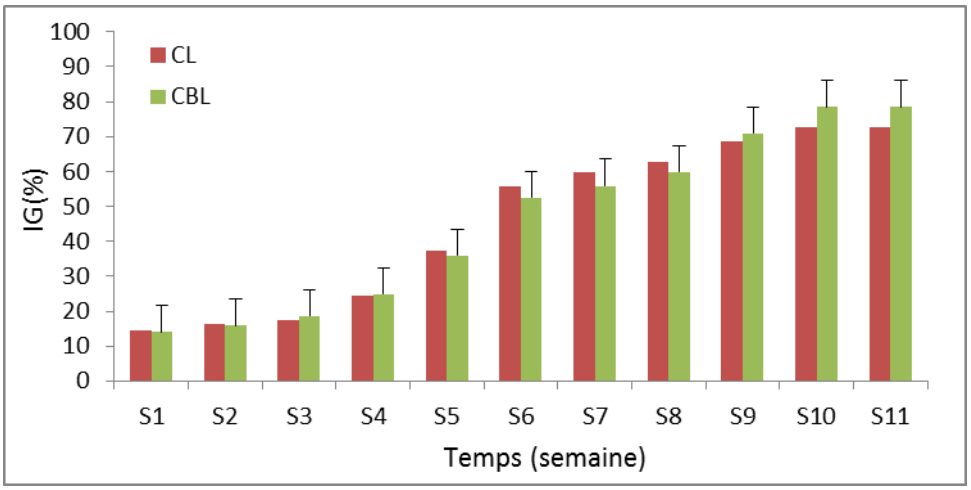


Figure 23: Indice de germination des mélanges C_L et CB_L en fonction du temps

Au-delà de 9ième semaine, les IG des deux composts se stabilisent à environ 75 % ; des indices largement suffisants pour confirmer que les composts obtenus sont matures et pourraient être considérés comme amendement. En effet, la littérature insinue que le compost mature applicable sur les sols doit avoir un indice de germination supérieur ou égale à 50 % (Paredes *et al*., 2002). Selon d'autres travaux, cet indice doit être compris entre 60 et 100 % pour que le compost soit considéré stable et mature (Zorpas *et al*., 2006). Nous signalons que les composts à boues ont la même action sur la germination des graines testées jusqu'à la 4ième semaine. Entre la 5ième et la 8ième semaine, leurs effets sont rétrogradés par rapport au témoin C_L à cause du début de la phase de transformation de la structure des mélanges ainsi que leur aspect (Couleur, granulométrie, densité, composition en sels, …). A partir de la 9ième semaine, l'activité des boues s'est manifestée

par une légère augmentation de l'indice de germination d'environ 8 à 10%, du fait probablement aux éléments cuivre et zinc qui sont initialement présents dans les boues. En effet, ces éléments jouent le rôle de la chlorophylle et la photosynthèse ; en agissant sur le métabolisme de l'auxine, hormone responsable de l'élongation cellulaire. Le zinc joue aussi le rôle de protecteur des plantes des stress oxydants en condition de sécheresse et de forte lumière.

Dans le cas de l'essai semi industriel, le test de maturation a été effectué sur des graines de maïs variété «***Zea mays*** et du cresson variété ***Lepidium Sativum ;*** à la phase finale de leur élaboration, afin de s'assurer de leur phytotoxicité.

L'indice de germination (IG) a été calculé par la relation de Zucconi (2008). Les résultats du test sont répertoriés dans le Tableau 17. Ils confirment la maturité et l'absence de toute toxicité vu que leur IG atteint les 85% pour le compost CB_{SI} et 78% pour C_{SI}.

Tableau 17: Valeur moyenne d'indice de germination des composts C_{SI} et CB_{SI}

Indice de Germination IG(%)	Variété testée	Compost avec boue	Compost sans boue
	Maïs	84 ,56	78,34
	Cresson	88,65	80,2

NB : Il est à noter qu'avant la réalisation du test de germination, la fiabilité de la germination des graines de cresson et maïs a été vérifiée et elle a été de 98% et 96% respectivement pour les cressons et les maïs.

IV.3.3 Test de plante

L'essai a été effectué sur des graines de maïs avec des composts à l'état frais chaque 15 jours. Pour l'essai au laboratoire, le poids des graines germées par le compost CB_L est passé durant la première semaine de 25,3 g à 83, 25 g soit une augmentation d'environ 76 g (80%) et de 21,4g à 75,34g pour C_L soit un accroissement de près de 54 g. Au cours de ces trois mois, le suivi de ce paramètre a connu une augmentation et une amélioration au fur et à mesure du déroulement du compostage (Tableau 18). Les poids finaux sont entre 60 et 100 g, ce qui atteste une absence de toxicité dans les composts, une poussée avancée des graines et une bonne qualité des composts élaborés. Ceci confirme, également, les résultats du test de l'indice de germination.

Tableau 18: Suivi du poids des graines de mais au cours du processus de compostage pour les composts C_L et CB_L

Le poids des graines de maïs en g/15jours							
Temps en semaines	1	3	5	7	9	11	13
C_L	21,4	31,56	40,7	50,81	59,21	69,7	75,34
CB_L	25,35	32,9	43,86	54,73	61,93	75,62	83, 25

Pour l'essai à l'échelle semi industrielle, le test effectué durant la phase de maturité montre que le poids des graines germées est de 84,62 g pour le compost CB_{SI} et 73,7 g pour le compost C_{SI}. Ces résultats prouvent davantage l'efficacité de l'ajout des composts sans risques de phytotoxicité.

En guise de conclusion, l'élaboration des composts à l'échelle du laboratoire a été d'une grande utilité pour évaluer l'effet des boues, d'une part, sur la qualité des produits obtenus et leur efficacité sur la germination. D'autre part, elle a épargné la mesure et le suivi de certains paramètres en fonction du temps pour les composts élaborés à l'échelle industrielle.

Les résultats de tous les tests préconisent la valorisation des boues et des margines par la filière de compostage pour avoir un produit conforme aux normes en vigueur.

IV.4 Evaluation des principaux paramètres de contrôle des composts par ACP

L'ACP est une technique statistique qui transforme l'ensemble d'origine de variable inter-corrélées en un nouvel ensemble avec un petit nombre de variables indépendantes non corrélées ou des composants principaux (PC) qui sont des combinaisons linéaires des variables d'origine et représentent la majeure partie de la variance variables observées (Pettus et al., 2015).

L'analyse de composantes principales a été réalisée pour étudier l'efficience des principaux paramètres de contrôle du processus de co-compostage. L'examen des graphes (Figures 24 et 25), expliquant les corrélations qui pourraient avoir lieu entre les différents paramètres du suivi de la transformation des déchets à composter, montre un effet positif significatif entre la teneur en matière organique (MO), l'humidité (H) et le rapport C/N. En fait, lors du processus du compostage, la biodégradation de la matière organique a engendré les réductions de la teneur en carbone organique, l'humidité ainsi que le rapport C/N. La dégradation de la matière organique libère dans le milieu les acides organiques d'où une corrélation positive et significative entre ces 3 paramètres.

En outre, la température et la respiration sont fortement corrélées positivement, révélant que l'activité des micro-organismes dépend de la température et de la spécificité pour chaque étape du compostage (Mésophile et thermophile). En effet, l'augmentation de la température est accompagné par l'expression de l'activité des micro-organismes au cours du compostage. La corrélation forte et négative observée entre l'indice de germination et la densité peut être expliquée par la disponibilité d'éléments minéraux et la bonne texture des produits obtenus suite à la bonne dégradation de la MO qui stimulent la germination des graines.

La projection sur le plan de ces variables pour les deux mélanges, réalisés pour les deux essais a été identique, et les tracés des composantes a fait ressortir trois domaines corrélés :

- Le premier représente les paramètres (L'indice de gémination (IG) et la densité (d)) qui sont positivement corrélés. En effet plus le compost mature riche en substances humiques et dense, plus il y a une absence des substances phyto-toxiques.
- Le deuxième domaine regroupe les paramètres (La respiration (Resp), la température (T)) et qui s'explique par l'activité des micro-organismes responsables de la dégradation et les phases du processus de compostage.
- Le troisième domaine regroupe (La matière organique (MO), l'humidité (H) et le rapport C/N) qui ont tendance à diminuer vers la fin du co-compostage ; signe de la biodégradation de la matière organique et du taux de carbone associé à une augmentation de la concentration de l'azote total.

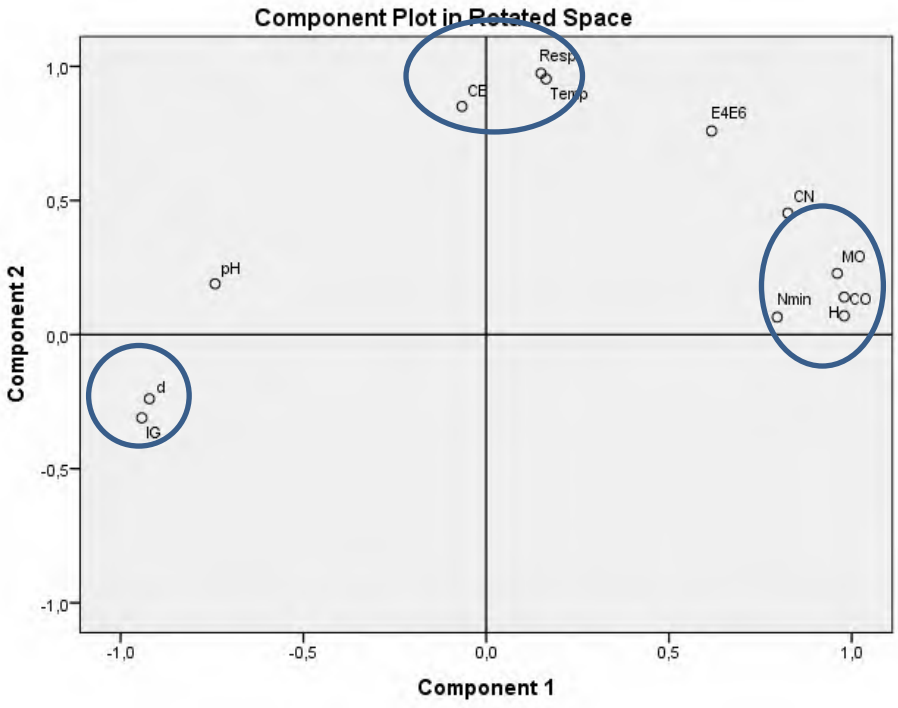


Figure 24: Diagramme d'analyse des composantes principales (ACP) des paramètres physico-chimiques des mélanges sans boues

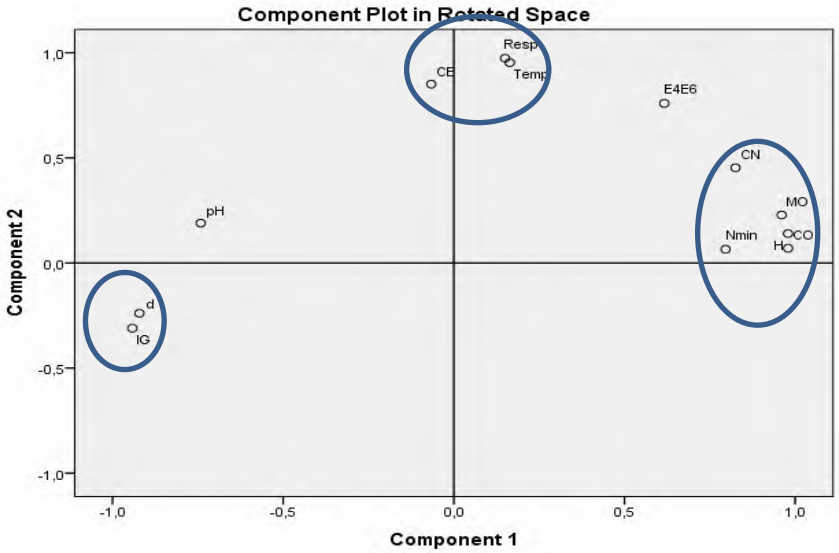


Figure 25: Diagramme d'analyse des composantes principales (ACP) des paramètres physico-chimiques des mélanges avec boues.

Ces résultats expliquent clairement la relation entre les paramètres physico-chimiques et biologiques à contrôler lors du processus du compostage. Comme hypothèse, nous pouvons dire qu'un paramètre de chaque groupe pourrait suffire pour contrôler les mélanges, donner une idée sur les autres paramètres du même groupe et sur le déroulement du processus du compostage. Ce

qui serait un gain à tous les niveaux : Produits chimiques nécessaires pour les analyses, de temps et de budget pour le prix de revient des composts.

V. Qualité et conformité des produits finaux

V.1 Description visuelle des composts

La qualité d'un produit organique pourrait être déterminée par une observation visuelle en se basant sur le changement de ses propriétés physiques et de son aspect. En effet, son aspect permet de donner une idée sur sa qualité, son degré de décomposition et sa maturité. De plus, la couleur du produit élaboré dépend de la qualité et la composition des substrats de départ. Elle change d'un produit à un autre pendant le processus de décomposition.

Tableau 19: Description visuelle des composts élaborés

Paramètres / Produits	Taux de Dégradation (%)	Masse finale	Aspect	Toucher (Destruction de la matière)
C_L	70	30(Kg)	Brun auburn	Facilement destructible
CB_L	67	33(Kg)	Brun cendré	Facilement destructible
C_{SI}	64	25(tonnes)	Brun auburn	Facilement destructible
CB_{SI}	60	28(tonnes)	Brun cendré	Facilement destructible

Les aspects observés des produits matures sont illustrés dans le Tableau 19 et nous ont permis de déduire que les composts C_L, CB_L et C_{SI}, C_{SI} se caractérisent par une odeur de l'humus forestier, une couleur brune pour les composts sans boues et brune cendrée pour les composts avec boues. Ils sont d'une destructibilité facile et rapide et une granulométrie fine. Les quatre composts ont perdu presque le 2/3 de leur poids initial. Nous signalons aussi que les composts à boues se dégradent davantage que le compost sans boues à cause de la richesse des boues en matière organique dégradable.

V.2 Composition physico-chimique des composts

Les propriétés physico-chimiques des composts mâtures sont présentées dans le Tableau 20. Les résultats illustrent que les produits sont riches en matière organique, en carbone et en azote. Leurs pH et leurs humidités ainsi que leurs rapports MO/N et C/N se situent dans la plage optimale d'un compost mature, ce qui indique la maturité des composts C et CB

Tableau 20: Composition des composts matures

Paramètres	C_L	CB_L	C_{SI}	CB_{SI}	Normes NFU 44-095 et NF U 44-051
pH	7 ,8	8,0	8,13	8,15	6.5-8.5
CE ($mS.Cm^{-1}$)	3,5	4,1	2,55	4,03	-
H%	25	24,45	24,67	23,53	30-40
MO %	33,08	36,35	49,85	41,66	≥ 30%
COT %	18,53	18,04	28,91	24,17	-
NTK %	1,62	1,78	2,22	1,95	-
N_{min} %	0,087	0,127	0,076	0,134	-
N_{org} %	1,27	1,653	1,77	0,71	-
Matière grasse	0,41	0,45	0,4	0,39	-
C/N	11,43	10,13	13,02	12,38	10-15
MO/N	20,41	20,42	22,45	21,36	INF à 40
Densité	0,54	0,55	0,51	0,51	-
Eléments minéraux et fertilisants (mg/g MS)					**Compost Suisse**
Al^{+}	0,122	0,176	0,123	0,17	-
Fe^{2+}	0,107	0,36	0,113	0,42	-
Mg^{2+}	4,06	6,406	4,06	6,4	7,4
Na^{+}	0,8	1,09	0,82	1,14	-
K^{+}	39,79	40,01	39,81	40,23	47,5
Ca^{2+}	10,03	11,65	10,03	11,67	-
P	1,805	2,05	1,805	2,14	3, 4
Eléments traces métalliques (mg/Kg)					**Normes NFU 44-095 et NF U 44-051**
Cu	13,4	22,3	13,45	22,2	300
Cr	62,6	113	62,61	113	120
Pb	14,2	114	14,22	114	180
Zn	102,7	218,5	102,67	218,51	600
Co	4,5	12,76	4,56	12,71	-
Ni	11,56	50,5	11,52	50,52	60
Cd	**0,01**	**00**	0,00	00	0

Les composts ainsi élaborés se caractérisent :

d'une part, par une charge en métaux lourds conforme aux normes françaises dédiées à l'utilisation et la commercialisation des composts matures NFU-.44051 et NFU-44095 élaborées respectivement à partir des déchets urbains et des boues des stations d'épuration des eaux usées (Rafolisy, et al., 2015). Rajoutons à cela que la charge initiale de ces dernières en éléments métalliques n'a pas beaucoup influencé le processus de son co-compostage avec les autres déchets. Elle a été réduite de plus que la moitié dans les composts à boues pour presque tous les éléments. Ceci pourrait être expliqué par la solubilisation des ETM prouvée et par la diminution

du pH, de la CEC, et de N_{min} (Amir, 2005). Cette baisse est essentiellement liée à une décomposition de la matière organique au cours de la phase thermophile, ou à l'effet de la fraction minérale du compost. De plus, l'humus formé au cours de la phase de maturation, contribue autant qu'agent chélateur des ETM, ce qui dilue les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Le même phénomène a été démontré pour les HAP par Hafidi et al., 2008 ; et d'autre part, par une richesse en calcium, potassium, magnésium et phosphore. Néanmoins la présence des boues dans le compost a augmenté l'azote stable et le carbone humique et a amélioré les éléments minéraux nécessaires à la croissance des bourgeons et à la fertilité des sols. Les teneurs trouvés sont en accord avec les données des composts suisses à valeurs d'engrais (Chassot et al., 2000).

Finalement, l'expérience de la biotransformation des boues épuisées de la station d'épuration des eaux usées (Fès) mélangées avec les déchets organiques ménagers mélangés avec les déchets verts, les fientes et les margines par la filière de co-compostage, évaluée par différentes analyses physico-chimiques, spectroscopiques et biologiques, a abouti à la production d'un compost stable qui peut être qualifié par un fertilisant et amendement organique pour le sol.

Conclusion

La valorisation des boues de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Fès par filière de co-compostage à deux échelles du laboratoire et semi industrielle a mené aux conclusions suivantes :

- Les boues utilisées après leurs cogénérations sont neutres, riches en carbone organique, en matière organique et en azote avec une charge métallique conforme à la norme française relative aux boues destinés au co-compostage.

- Les substrats de co-compostage sont les déchets organiques mélangés avec les déchets verts (DOV) et les fientes de volailles (FV) et les margines.

- Tous les substrats sont riches en matières organiques et en carbone. Les DOV et les FV de volailles sont légèrement basiques et plus riches en azote que les margines. Ces dernières sont faiblement acides et sont chargées, de plus en plus, en polyphénols et en matière organique non biodégradable.

- Quatre mélanges ont été préparés (2 à l'échelle de Laboratoire C_L et CB_L et 2 à l'échelle semi industriel C_{SI} et CB_{SI} : deux nous ont servi de témoins et les deux autres à boues. Ils se

caractérisent initialement par une composition conforme aux conditions nécessaire à leur compostage.

- La durée de compostage des composts élaborés à l'échelle de laboratoire était de 2 mois et ceux élaborés à l'échelle semi industrielle était de 4 mois.

- Le processus de compostage a été marqué par les 4 phases : mésophile, thermophile, de maturation et de stabilisation pour les 4 mélanges. Cependant, ceux à boues ont accusé un retard d'une semaine dans la phase thermophile et ont accéléré la phase de maturation et de stabilisation.

- La caractérisation analytique et spectroscopique des composts stables a confirmé leurs maturations et leurs propriétés d'amendements organiques qui est conforme aux normes françaises des composts urbains NFU-.44051et à boues NFU-44095.

- Les composts produits sont riches en silice, calcite, quartz et muscovite et ont une composition minérale semblable.

- La présence des boues dans les composts n'a pas influencé sa qualité mais avait un effet sur son aspect en termes de couleur, granulométrie et densité.

- Les tests de maturation des composts ont témoigné l'absence de la phytotoxicité et la présence d'acide humique, des molécules organiques.

- Les composts à boues sont riches en oligoéléments, ce qui les classes parmi les fertilisants et les amendements organiques sans risques d'utilisation.

- L'analyse en composantes principale a permis de définir 3 domaines corrélés : Le premier représente les paramètres (indice de gémination (IG) et la densité (d), le deuxième regroupe les paramètres (respiration (Resp), température (T), et le troisième regroupe (matière organique (MO), humidité (H) et le rapport (C/N). L'analyse de l'un des paramètres dans chaque domaine suffit pour évaluer la qualité d'un compost.

Les tests d'efficacité des composts à boues sur le sol et les cultures feront l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE III : APPLICATION AGRICOLE DU COMPOST À BOUES

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude de la valeur agronomique des composts à boues après avoir été assuré de leur innocuité et leur maturité. Les tests ont été réalisés à deux échelles sur deux cultures : Le radis et la pomme de terre:

- Des parcelles à la Faculté des sciences Dhar El Mahraz dans des conditions contrôlées ; sans engrais et sans pesticides.
- Des parcelles au champ d'un agriculteur à Meknassa Dwar Klaba distant de Fès de 47 Km pour être dans ses mêmes conditions de travail aussi bien d'amendement que d'irrigation du sol.

L'évaluation de la qualité des composts à boues a eu lieu par le suivi, d'une part, des paramètres de croissance et de production des deux cultures, et d'autre part, des paramètres physico-chimiques caractérisant les sols avant et après leur amendement et récolte des cultures.

Ce chapitre est scindé en cinq axes :

- Le premier concerne un aperçu sur l'application des composts comme amendement
- Le deuxième présente les matériaux et les méthodes mis en œuvre lors de ces essais
- Le troisième donne la composition des matériaux dédiés à ce travail à savoir : Le sol, l'eau d'irrigation et les amendements.
- Les quatrième et cinquième axes présentent respectivement les résultats de ces applications sur le radis et la pomme de terre.

I. Application du compost à boues comme amendement

Les analyses chimiques des boues ont révélé leur richesse en éléments fertilisants notamment en azote et en phosphore. Leur application pour l'amendement des sols appauvris, à cause de l'érosion et les cultures intensives, pourrait être une solution de sa valorisation et même de son élimination de façon radicale. Cependant l'épandage direct des boues a dévoilé des contaminations de la chaine trophique à long terme en raison de leur charge en micropolluants chimiques et organiques. D'où la nécessité de leur traitement au préalable pour éviter tout risque de pollution aussi bien des sols que des cultures.

Le traitement des boues par compostage en mélange avec des déchets cellulosiques a prouvé l'obtention d'un produit stable riche en substances humiques, ayant une odeur d'humus qui est relativement hygiénique semblable à celui trouvé par Jouraiphy et al. 2007; EL Fels, 2014.

En effet, le compost constitue un amendement pour la terre, il apporte de la matière organique aux sols, augmente le drainage dans les sols lourds et argileux, la rétention d'eau dans les sols légers et sableux et facilite la croissance des racines. C'est également un excellent fertilisant naturel qui additionne l'azote, le phosphore, le potassium et beaucoup d'autres éléments. Contrairement aux engrais chimiques qui ont une action immédiate, ils libèrent ces éléments progressivement dans le sol. De nombreux auteurs (Bazzoffi et al., 1998, Aggelides et Londra. 2000) ont prouvé que l'application du compost affecte positivement les propriétés physiques et chimiques des sols et améliore sa qualité agronomique traduits par l'augmentation de la biomasse des végétaux cultivés (Kyela, 2011). De plus, Sort Epstein a montré que le mélange du compost de faible densité et riche en matière organique améliore la structure du sol, augmente sa porosité totale et forme de nouveaux agrégats stables par adhésion, notamment les acides humiques (Mrabet, et al., 2011). Par ailleurs, Justin et al., 2010 ont démontré que l'apport du compost augmente la conductivité électrique du sol proportionnellement à la dose d'apport qui à son tour, augmente le pool du nutriment potentiellement disponible pour les végétaux. Comme il favorise l'activité tellurique et le développement des racines des plantes (aération et espace) et les rend résistant à l'érosion du sol par une parfaite stabilité et une meilleure filtration de l'eau.

D'autres études se sont intéressées à l'impact du compost sur le rendement des cultures à grande échelle. En effet, l'utilisation du compost des ordures ménagères comme fertilisant à des doses de 4 kg/m^2 dans le cas des céréales et 5 kg/m^2 dans le cas du maraichage, a attesté une augmentation du rendement allant respectivement de 28 et 13 % par rapport au témoin sans apport (Shiralipour ct al., 1992). Baziramakenga et Simard (2001) ont aussi prouvé l'amélioration du rendement de l'haricot, de la pomme de terre et de la laitue en utilisant des composts des boues de désencrage, du fumier de poule et un compost des déchets municipaux (Shiralipour, 1992) pour la tomate (Maynard, 1995).

II. Méthodologie d'application des composts

II.1 Matériels végétaux

II.1.1 Cultures

Le matériel végétal choisi pour cette étude est le Radis et la pomme de terre.

- **Le radis, espèce** *Raphanus sativus L*, appartient à la famille des *Crusifrès*, c'est un légume racinaire cultivé par les chinois il y a plus de 3000 ans. Sa racine de couleur rose vif est mangée crue, connue par sa saveur piquante et son goût rafraichissant renferme des quantités considérables en vitamine C, en sels minéraux, en substances chimiques et en ferments qui stimulent l'appétit et facilitent les procédés digestifs dans l'organisme. Sa culture s'effectue surtout en saison fraiche d'hiver et de printemps. Au Maroc, la production des légumes racinaires présente une part très importante dans l'activité maraichère. Les carottes, navets, **radis** sont les plus cultivées et dans une moindre mesure la betterave à salade, céleri-rave, Salsifis sont d'importance secondaire.
- **La pomme de terre, espèce** *Solanum tuberosum* est une plante vivace, originaire de l'Amérique du Sud et appartient à la famille botanique des Solanacées. La partie consommée est le tubercule. Le légume présente une haute valeur nutritive car il est riche en phosphore et en vitamine B. Il a été choisi vu son importance sur le marché. Au Maroc, la pomme de terre est la première culture maraîchère tant du point de vue de la superficie que de la production. Selon les chiffres du cabinet Green Smile, spécialisé au conseil en agriculture, la production atteint annuellement 1,4 millions de tonnes. Celle-ci est destinée principalement pour le marché local. Les exportations n'ont cessé de baisser depuis une dizaine d'années et oscillent entre 10.000 à 30.000 tonnes. Les importations, quant à elles, augmentent et se situent entre 40.000 à 60.000 tonnes chaque année (Meriama Moutik ;

2014). La pomme de terre est le premier légume consommé au Maroc, devant les tomates, les oignons et les carottes. Avec une consommation annuelle de 35 à 40 kg par habitant, la pomme de terre fait partie du quotidien des familles marocaines.

II.1.2 Les amendements

Les sols ont été amendés par :

- Le compost à boues (CB) et le compost témoin (C) élaborés à l'échelle semi industrielle
- Le fumier de bovin procuré des fermes de la région de Douar Klaba (F).

II.2 Méthodes

II.2.1 Méthodologie de plantation

II.2.1.1 Radis

La plantation du radis au champ visait l'etude de l'effet des composts seuls ou mélangés avec des doses bien déterminées du fumier. Le choix des doses s'est basé sur une recherche bibliographique où les essais à la ferme correspondaient à des combinaisons d'amendements : Le fumier seul (100% Fumier), le compost seul (100% Compost), et des mélanges de fumier et compost en raison de 50% de compost et 50% de fumier, 75% de compost et 25% de fumier.

Pour cela, le terrain au champ a été réparti en 7 mailles équidistantes. Les mailles ont été disposées de manière aléatoire et les différentes combinaisons ont été incorporées dans le sol et non seulement étendus sur la surface. La parcelle 100% de fumier était considérée comme la parcelle témoin. L'amendement des 7 mailles a eu lieu selon la composition présentée dans le Tableau 21.

Tableau 21: Traitement des mailles par les amendements

Mailles	M_0	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
Compost (%)	0	100	100	75	75	50	50
Types de composts	-	C	CB	C	CB	C	CB
Fumier (%)	100	0	0	25	25	50	50

En parallèle, l'essai du laboratoire de la plantation du radis dans le sol de la faculté des sciences Dhar El Mahraz-Fès visait la substitution du fumier par le compost. Le terrain a été réparti en 4 mailles de 4 m^2 de surface chacune dont la répartition était : Sol brut; Sol+ 100% F; Sol+ 100% compost C; Sol+ 100% compost CB. La parcelle brute a été considérée comme

témoin pour évaluer l'effet des composts, d'une part, sur l'enrichissement du sol ; et d'autre part, sur la culture du radis.

La préparation des deux sols dans les deux essais était comme suit :

- Affinement de la terre ;
- Retournement du sol ;
- Répartition des parcelles ;
- Amendement des terrains avec 3t/ha;
- Plantation Selon Conseils de culture et d'entretien des radis ; Rustica,, nous avons tracé des longs sillons espacés de 20 cm, déposé les graines des radis en ligne, sans les serrer et recouvert de 2 cm de terre puis tassé légèrement le sol et nous avons arrosé juste après.

II.2.1.2 Pomme de terre

Les deux essais de la pomme de terre, au champ et au terrain de la FSDM- Fès visaient la substitution du fumier par le compost et l'étude de l'effet du compost direct sur cette culture. Pour cela, les terrains ont été répartis sur 4 ou 3 parcelles respectivement pour l'essai 1 et 2. Chaque parcelle a été amendée par un type d'amendement (Fumier, compost C et compost à boues CB) à raison de 6 tonnes par hectare [*Chambre d'Agriculture Martinique; 2007]*.

La plantation de la pomme de terre consiste à embellir la pomme de terre germinée sur 20 cm de profondeur, espacer les plants de pommes de terre de 30 cm et les rangs de 70 cm, recouvrir les plantes délicatement et ramener la terre sur les pommes de terre en formant une butte.

Les deux essais ont connu le même traitement et le même suivi. La différence entre ses deux essais réside dans la superficie, les conditions de la plantation et la parcelle témoin :

- L'essai (1) à la FSDM était sur une superficie de 16 m^2, planté sans engrais ni pesticides et sa parcelle témoin était celle du sol brut.
- L'essai (2) au champ était d'une superficie de 1 hectare, plantée dans les conditions de l'agriculteur, avec engrais et- pesticides modéré et sa parcelle témoin était la parcelle amendée par le fumier.

II.2.2 Prélèvement et échantillonnage

II.2.2.1 Échantillonnage

La méthode d'échantillonnage appliquée pour le prélèvement du sol est la méthode aléatoire systémique par maillage carrée. Les échantillons du sol avaient les mêmes masses et

ont été prélevés du centre de chaque maille, mélangés et homogénéisés pour former un seul échantillon composite.

II.2.2.2 Prélèvement

Le prélèvement du sol a été effectué selon la norme AFNOR X 31-100 par une bêche. Cette norme propose les règles de base pour la constitution d'un échantillon de qualité ; et qui consiste à prélever 15 carottages au minimum avec une profondeur de 10 cm pour atteindre la zone recevant les engrais, ayant une fertilité élevée et soumise à la sécheresse. Une fois les échantillons du sol sont prélevés, ils sont homogénéisés dans un seau propre puis mis dans un emballage étiqueté accompagné d'une feuille de renseignement puis conservé et transporté à température ambiante à l'abri de la lumière.

NB : Le prélèvement des échantillons du sol au champ a été effectué par un laboratoire spécialisé agrégée par le Ministère d'Agriculture.

II.2.3 Localisation

La zone de l'étude au champ a été géo-référencée dans le système information géographique (SIG) avec le logiciel Qgis 8.02, en coordonnées géographiques Lambert Conic Conform (Merchich Maroc, ordonnée gps : X : –5, 331717 et Y : 34,266367).

II.2.4 Paramètres de caractérisation des matériaux

II.2.4 .1 Caractérisation du sol et d'eau d'irrigation

Le sol du premier essai, réalisé à la faculté des sciences de Fès, a été caractérisé par la mesure du pH, de la conductivité, de la matière organique, du carbone organique et de l'azote totale. Et l'eau d'irrigation a été caractérisée au laboratoire LIEME par mesure de :

- Nitrates dosé par la méthode spectrométrique UV- visible avec l'acide salicylate
- Ammonium dosé par la méthode spectrométrique UV- visible
- Orthophosphate par Méthode spectrométrique au molybdate d'ammonium
- Nitrites dosé par la méthode spectrométrique par le Réactif de Zambelli
- Sulfates par dosage des ions sulfates par la méthode néphélométrique.
- DCO par oxydation de la matière organique par le bichroomate de potassium
- DBO_5 par Incubation après 5 jours dans le Système Velp capteur de pression 6D gamme PV2000.

Alors que le sol et l'eau d'irrigation de l'essai 2 au champ ont été analysés par un laboratoire agréé par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime.

II.2.4 .2 Caractérisation des amendements

Les amendements ont été caractérisés par les mesures du pH, de la conductivité (CE), de la matière organique (MO), de l'azote Kjeldahl (NTK), de l'azote minéral, du phosphore (Exprimé en P_2O_5), du potassium (Exprimé en K_2O), et du rapport C/N.

II.2.5 Paramètres de suivi des cultures

Les cultures ont été accompagnées d'un suivi régulier des paramètres morphologiques jusqu'au jour de la récolte. La mesure de tous les paramètres a été effectuée trois fois pour s'assurer de la reproductibilité des résultats. La valeur prise en considération est la moyenne des trois mesures.

Les paramètres mesurés sont :

- Le nombre de tiges/plante ;
- La longueur des tige/plante ;
- La surface foliaire.

Le jour de la récolte, nous avons évalué pour :

- Le radis :
  - Le rendement total ;
  - La longueur et le diamètre du fruit racinaire.
- La pomme de terre :
  - Le nombre de tubercules/ plante ;
  - Le rendement/plante ;
  - La longueur et le diamètre des tubercules;
  - Le rendement total.
  - Longueur de tige/plant :

NB : Au champ l'essai du radis a été évalué par mesure du rendement total seulement.

II.2.5.1 Longueur des tiges

La tige est l'axe aérien qui prolonge la racine et porte les bourgeons et les feuilles. Les mesures de la longueur de la tige ont été effectuées à l'aide d'une règle graduée, à raison de trois répétitions. La moyenne présente la valeur finale.

II.2.5.2 Nombre de feuille/plante

La feuille est la partie responsable de la photosynthèse chez les végétaux. Elle est le siège de la respiration et de la transpiration. Les feuilles stockent les éléments nutritifs et l'eau. Ce paramètre est un indicateur important pour mesurer la biomasse végétative. Le nombre de feuilles a été déterminé par calcul de la moyenne des trois premières plantes pour chaque rangée.

II.2.5.3 Surface foliaire

Ce paramètre indique la production de biomasse végétative liée à la photosynthèse.

La surface des feuilles du radis a été mesurée par le logiciel MESURIM Pro qui consiste à calculer la surface foliaire des feuilles d'une plante à partir d'une image scannée.

Alors que pour les feuilles des pommes de terre, la surface foliaire est calculée par deux méthodes ; le logiciel et par la relation de SAKALLOVA (Razika, 2011)

$$S_F = L \times l \times K$$

Avec :

S_F : Surface foliaire en cm^2.

K : Coefficient relatif à la forme de la feuille pour le radis, il est égal à *0.674.*

L : Longueur de feuille en cm.

l : Largeur de feuille en cm.

II.2.5.4 Rendement

Le rendement de la production (Kg/ha) a été calculé par la relation suivante:

$$R_{ed} = \frac{P}{S_p}$$

Avec

P : Le poids total de radis ou de la pomme de terre de chaque parcelle en Kg.

Sp : La surface de parcelle en hectare (ha).

II.2.5.5 Calibre

Le calibre consiste à mesurer la longueur et le diamètre du radis et de la pomme de terre (5 radis par parcelle et 3 pour la pomme de terre). Les mesures ont été prises à l'aide du pied à coulisse pour prendre en considération la moyenne.

II.2.5.6 Qualité nutritive

La qualité nutritive de la pomme de terre récoltée au champ a été évaluée par la mesure en éléments traces métalliques par Spectrométrie à plasma à couplage inductif (ICP) et en protéine par la méthode macro-Kjeldahl. Sa composition en matière sèche en amidon et en fibres ainsi que sa valeur énergétique ont été effectuées par un laboratoire agroalimentaire agrée.

II.2.6 Etude statistique

Une étude statistique descriptive a été réalisée pour les résultats obtenus par le modèle linaire bi varié afin de faire une comparaison significative entre l'effet des amendements sur chaque test et paramètre caractérisant les cultures du radis et de la pomme de terre.

III. Caractérisation des amendements, des sols et de l'eau d'irrigation

III.1 Amendements

La caractérisation physico-chimique des amendements F, C et CB (Tableau 22) atteste que ces composés portent une forte charge organique et minérale. Les deux composts C et CB sont légèrement basiques et se caractérisent par des charges en carbone organique total, en azote total Kjeldahl, en azote minérale, en phosphore et en potassium plus grandes que celles du fumier. La charge en éléments fertilisants N, P, K des composts à boues est plus grande que celle des autres amendements.

Tableau 22: Caractérisation des amendements étudiés (CB, C et F)

Produits / Paramètres	CB_{SI}	C_{SI}	F
pH	8,15	8,13	7,57
CE (mS/cm)	4,03	2,55	3,44
Matière sèche (%)	93,52	92,43	90,56
Matière Organique(%)	41,67	49,84	38,07
COT (%)	24,17	28,91	20,5
NTK (%)	1,95	2,22	1,45
C/N	12,38	13,02	14,13
Phosphore (Exprimé en P_2O_5) en mg/Kg	1,78	0,41	0.37
Potassium (Exprimé en K_2O) en mg/Kg	9,91	6,43	5,85
Azote (Exprimé en azote minérale) en mg/Kg	0,56	0,55	0,55

III.2 Site de l'étude

III.2.1 Emplacement spatial des zones d'études

Le terrain de la faculté des sciences de Fès se situe dans un espace ensoleillé toute la journée, très bien placé côté vent et valable pour assurer une agriculture dans de bonnes conditions.

Le terrain de l'application au champ, localisé à l'aide du système de positionnement global (GPS) lié au système SIG, se trouve près de Qaria dans une région appelée Meknassa située à 59 Km de Fès. Plus précisément le terrain se situe au cœur du Douar Klabaa. Il est d'une superficie d'un hectare très bien placé, bien ensoleillé avec un climat équilibré et sa température minimale du sol au moment de la plantation est comprise entre 7 et 8°C.

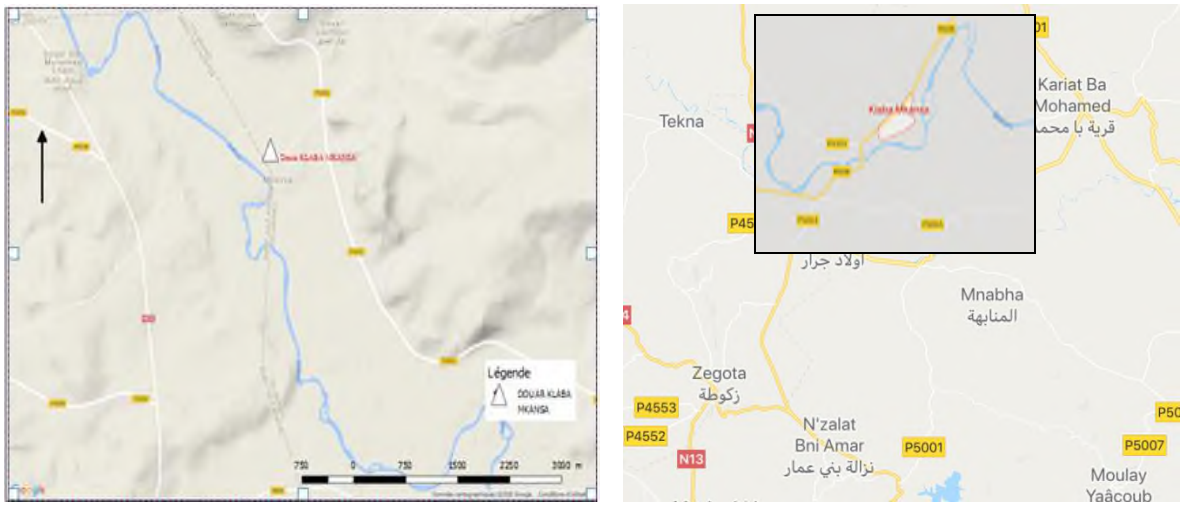


Figure 26: Localisation du champ cultivé

III.2.2 Caractérisation des sols

Le sol de la faculté avant amendement (Tableau 23) a une texture argileuse-sableuse-limoneuse. Il est basique voisin de la neutralité, riche en matière organique, pauvre en azote, mais avec un rapport C/N satisfaisant pour être cultivé et une forte minéralisation avec une disponibilité d'azote très élevée. Sa conductivité électrique est très basse ; cela signifie un niveau d'éléments très bas pour soutenir les croissances rigoureuses et témoigne aussi que c'est un sol non salé adapté aux cultures sensibles à la salinité (Barbouchi et al., 2013; Tahiri, 2015).

Tableau 23 : Caractérisation des sols de la FSDM avant la plantation

Sol + types AM / Paramètres	Sol nu	Sol + F	Sol + C	Sol + CB
pH	7,5	7,74	8,02	7,87
CE (mS/m)	0,03	0,04	0,05	0,04
%MO	6,3	8,61	8,08	9.58
%COT	3,65	4,98	4,67	5,7
%N	0,7	1,06	1,3	1,6
C/N	5,21	3,5	2,72	2,21

La teneur en matière organique des composts composites est élevée et leur ajout au sol améliore souvent ses propriétés physiques et chimiques et améliore ses activités biologiques. Après amendement, une augmentation de la teneur en matière organique a eu lieu notamment pour le sol amendé avec le compost à boues. En effet, les composts fournissent une forme stabilisée de matière organique qui améliore les propriétés physiques des sols en augmentant la capacité de rétention des nutriments et de l'eau, l'espace poreux total, la stabilité des agrégats, la résistance à l'érosion, l'isolation thermique et la diminution de la densité apparente. L'application des composts a aussi amélioré les propriétés chimiques en augmentant le pH, la conductivité électrique, la capacité d'échange de cations et la teneur en éléments nutritifs du sol. Les résultats ainsi obtenus corroborent avec ceux du G. Convertini, et al., 2004 qui ont prouvé aussi que l'amendement du sol avec le compost des déchets municipaux a amélioré les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol.

Le sol du champ a une texture lourde constitué de limon argileux, non calcaire et un pH modérément alcalin. Il est pauvre en azote, en phosphore et en matière organique.

Le niveau de la matière organique MO est faible (Tableau 24), ceci pourrait réduire l'activité biologique du sol, limiter ses réserves en eau et rendre délicat le travail de la terre (Francesco Montemurro, 2017). De ce fait, l'ajout du fumier ou des composts pourraient apporter en plus d'éléments fertilisants majeurs, des oligo-éléments indispensables à une croissance et à une fructification correcte. Ils pourraient également contribuer à l'amélioration de la qualité du sol en perméabilité et structure, redresser et assurer les besoins de la culture et soutenir les réserves du sol en phosphore.

En termes d'éléments fertilisants, ce sol a une charge moyennement élevée en potassium qui reste insuffisante pour couvrir la totalité des besoins de la culture en potassium veillant à réduire l'apport fractionné d'engrais potassiques. Les résultats attestent aussi qu'il s'agit d'un sol à teneur moyenne en chlorure, faible en sels dissous et faible en oligo-éléments.

Tableau 24: Analyse du sol du champ

Texture du sol						
Argile	**Limon fin**	**Limon grossier**	**Limon totaux**	**Sable fin**	**Sable grossier**	**Sable totaux**
28,99	40,44	19,37	59,81	10,55	0,65	11,2
Statut acido-basique						
pH eau		**pH KCl**		**Calcaire total %**	**Calcaire actif %**	
7,65		7,00		32,62	10,58	
Paramètres de maturation						
Azote minéral (mg/Kg)				**Matière organique %**		
44,90				1,42		
Salinité						
EC mmhos/cm				**Sodium échange Na_2O**		
0,204				154,62		
Métaux lourds par MS en mg/Kg						
Cuivre		**Zinc**		**Fer**	**Manganèse**	
0,50		0,24		6, 32	0,61	
Eléments solubles en mg/Kg						
Chlorures Cl^-	**Calcium soluble Ca^{++}**	**Magnésium soluble Mg^{++}**	**Phosphore soluble P^+**	**Sodium soluble Na^+**	**Potassium soluble K^+**	**Bicarbonates solubles HCO_3^-**	**Sulfates solubles SO_4^{2-}**
53,20	104,20	9,70	Traces	41, 10	31,60	1073,60	11,40

Sur la base des résultats de l'analyse du sol du champ, un FERTI PLAN (Tableau 25) a été proposé par le laboratoire afin d'améliorer et de maximiser la qualité et les volumes de la récolte. Le plan proposé prévoit la correction du sol et son adaptation aux besoins de la pomme de terre au cours de sa croissance.

Tableau 25: Ferti plan pour les pommes de terre

Période d'apport	Nature d'engrais	Quantité d'engrais	
		Unité /ha	Kg/ha
Fumure de fond	Sulfate d'ammoniaque 21% TSP% Potassium	30 100 50	150 210 100
Plantation- Le début de la tuberculose (Début d'apparition des tubercules) Chaque semaine	Ammonitrate 33,5% TSP 45% Potassium	08 08 09	25 15 20
Le début de la tuberculose - Début de croissance des tubercules Chaque semaine	Ammonitrate 33,5% TSP 45% Potassium	12 10 14	35 25 30
Renflement des tubercules Chaque semaine	Ammonitrate 33,5% TSP 45% Potassium	18 10 23	55 25 50

Rappelons qu'on distingue 4 stades de croissance de la pomme de terre. Chaque stade a ses propres besoins nutritifs. Selon l'analyse du sol, la plante avait besoin dans un premier temps de150 kg de sulfate d'ammonitrate (21%) qui couvrirait les besoins de la plante en urée, 210 Kg du triple super phosphate (TSP) 45 % qui assurerait les besoins de phosphore pour la pomme de terre et 100 kg de potassium. Ces quantités devraient être mises comme fumure de fond dans le sol avant la plantation. Ensuite, au moment de l'apparition des tubercules, il fallait ajouter 25 kg d'ammonitrate (33.5%), 15 kg du triple super phosphate (TSP) et 20 kg de potassium. Ces apports favoriseraient la germination de la plante.

Au moment de la croissance des tubercules, il fallait rajouter 35 kg d'ammonitrate, 25 kg du triple super phosphate (TSP) et 30 kg de potassium. Ces quantités répondront aux besoins de croissance de la pomme de terre. L'étape finale nécessitait un rajout supplémentaire de 55 kg d'ammonitrate, 25 kg du triple super phosphate (TSP) et 50 kg de potassium, qui assurerait un bon calibre de la pomme de terre.

NB : Le Ferti plan a été proposé juste pour l'essai de la pomme de terre. L'essai du radis était sans engrais.

III.3 Caractérisation de l'eau d'irrigation

L'eau d'irrigation utilisée dans la parcelle de la faculté des sciences, est une eau de puits qui alimente toute la faculté. Elle a été analysée au laboratoire LIEM par la mesure du pH, de la DCO, de l'ammonium, des sulfates, de l'azote, des ortho-phosphate,….. Les résultats obtenus (Tableau 26) attestent que c'est une eau qui respecte les normes de l'irrigation et qui ne présente aucun risque pour le système sol-plante.

Tableau 26: Analyse de l'eau d'irrigation de la faculté

Paramètres / Eaux d'irrigation	S^{2-} (mg/L)	pH	NO_3^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	NH_4^+ (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	PO_4^{3-} (mg/L)	DCO (mg $d'O_2$/L)
Eau d'irrigation de la faculté	0,076	7,11	0,8	0,0011	1,087	0,5	0,22	93,05
Norme marocaine des eaux d'irrigation	-	6,6 à 8,4	1,5	-	-	250	-	-

Les eaux d'irrigation utilisées au champ sont légèrement alcalines et présentent une teneur en électro-conductivité de 1133 µs/cm leur conférant une charge moyennement élevée en sels dissous.

La dureté totale, peu élevée de cette eau, exprime des teneurs moyennes en calcium et en magnésium. La concentration en bicarbonates est élevée pouvant engendrer des risques de chlorose de ce sol calcaire. Le faciès chimique dominant de cette eau est le bicarbonate de calcium.

Les taux de chlorure du sodium sont moyens. Les concentrations en potassium, ammonium, sulfate, phosphate et nitrate sont faibles.

En fonction de la fraction du Sodium Absorbable SAR, cette eau est classée en C3 S1. Il s'agit d'une eau à risque élevé de salinisation et à faible risque d'alcalinisation. Cette eau est utilisable sur un sol bien aménagé, présentant des aptitudes d'un bon drainage et sur une culture ayant une bonne tolérance pour le sel comme c'est le cas de la pomme de terre.

Tableau 27: Analyse de l'eau d'irrigation du champ

Alcalinité et salinité	**Eau utilisée**	**Norme marocaine**
pH	7,65	6,5- 8,4
Conductivité (µs/cm)	1133	1200
Salinité (Teneur en sels totaux) (g/L)	05, 44	0 ,768
Titre hydrotimétrique (méq/L)	0,72	-
Fraction Sodium Absorbable	2,63	-
Charge Cationique en mg/L	**Eau utilisée**	**Norme marocaine**
Sodium Na^+	99,54	-
Potassium K^+	10,27	-
Magnésium Mg^{2+}	38,89	-
Calcium Ca^{2+}	68,52	-
AmmoniumNH_4^+	Traces	-
Charge Anionique en mg/L	**Eau utilisée**	**Norme marocaine**
Chlorures Cl^-	142,00	350
Carbonates CO_3^-	00,00	-
Bicarbonates HCO_3^-	339,16	518
Dihydrogénophosphate $H_2PO_4^-$	01,44	-
Sulfates SO_4^{2-}	66,70	250
Nitrates NO_3^-	1,50	1,5

IV. Culture du Radis

La croissance du radis de l'essai effectué à la FSDM a été suivie par la mesure des paramètres morphologiques à savoir :

- la longueur des tiges,
- le nombre de feuilles, et
- la surface foliaire

et des paramètres de production qui sont :

- Le nombre de graines germées par parcelle,
- Le rendement, et
- Le calibre du fruit.

et celle de l'essai au champ a été évaluée uniquement par la mesure du rendement.

IV.1 Paramètres morphologiques

IV.1.1 Longueur des tiges / plante

La Figure 29 présentant le suivi de la longueur des tiges par plant de radis révèle que la longueur des tiges/plante aux premiers jours est presque la même quel que soit le type d'amendement. Le changement n'apparait qu'après la troisième semaine où la croissance a eu lieu remarquablement de plus de 6 cm pour les graines plantées sur le sol nu ou amendé. Ensuite, la tige continue d'augmenter avec un pas presque de 2 cm par semaine jusqu'à une stabilisation à partir de la 8ième semaine. La plus grande longueur des tiges a été observée pour le radis amendé par le CB 16,44 cm. Ceci s'explique par la teneur élevée du CB en N, P, K éléments responsables du développement des parties vertes dans les plantes et ayant un rôle principal dans la croissance des plantes (Grieu et al., 2008). Comme il peut s'interpréter par la présence du cuivre et du zinc dans les composts. Ces oligoéléments sous formes cationiques et particulièrement le cuivre interviennent dans la synthèse des protéines et dans la photosynthèse. Alors que le zinc est responsable de la synthèse d'amidon et il a un rôle spécifique dans le métabolisme de l'auxine : Hormone responsable de l'élongation cellulaire, comme il protège aussi la plante du stress des oxydants en conditions de forte lumière et de sécheresse.

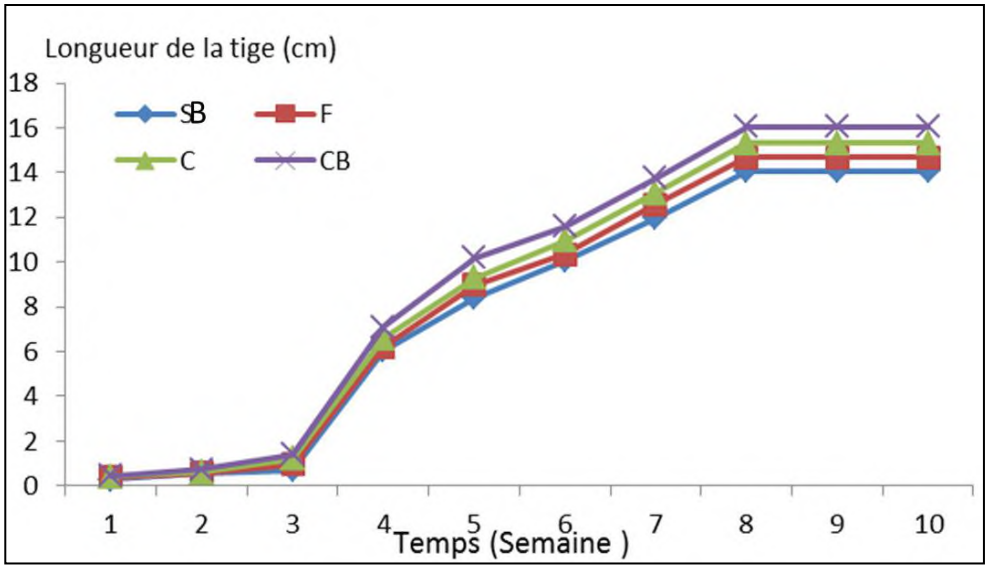


Figure 27: Longueur de la tige du radis en fonction du temps

L'analyse de la variance correspondant au suivi de la longueur des tiges/ plante (Figure 27) montre un effet significatif sur la longueur des tiges. Ces derniers passent de 1cm à 12,52 cm obtenu pour le sol nu, de 0,8 cm à 14,49 cm pour le fumier, de 1,2 cm à 15,52 cm pour le compost C et de 1cm à 16,44 cm pour le compost CB. Cette amélioration du couvert végétal prouve que l'amendement du sol par les composts améliore la longueur de la tige du radis en assurant les éléments nutritifs favorables à leur croissance.

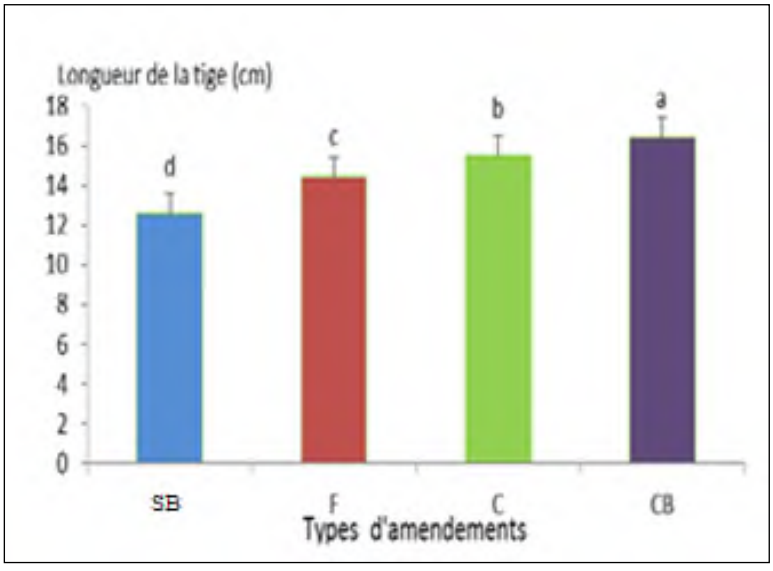


Figure 28: Effet comparatif de la longueur de la tige du radis en fonction du type d'amendement

IV.1.2 Nombre de feuilles / plante

La Figure 20 présente l'analyse de la variance relative au nombre de feuilles par plante. Les histogrammes montrent un effet significatif des différents types d'amendements sur ce paramètre. Le nombre de feuilles varie de 7 feuilles par plant obtenu avec le sol nu et le fumier à 8 et 9 feuilles respectivement pour les composts C et CB soit une augmentation de l'ordre de 14,28% et 28,57% respectivement pour le C et le CB par rapport au sol nu.

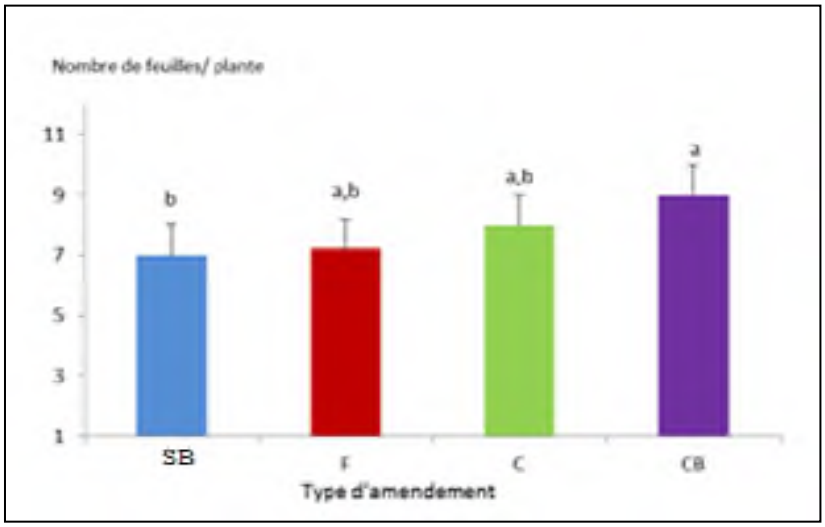


Figure 29: Effet comparatif du nombre des feuilles par plante du radis en fonction du type d'amendement

L'augmentation du nombre de feuilles pour les radis amendés par les composts C et CB pourrait s'expliquer par :

- La richesse des composts en matière organique qui se minéralise pour former le phosphore minéral ayant un rôle physiologique à plusieurs niveaux et participe à la croissance et la coloration des feuilles des plantes et facilite la floraison, la photosynthèse et la respiration des jeunes plantes ;
- La présence du calcium qui active les enzymes, crée des liens entre les parois cellulaires et contribue à la maintenance de la qualité des fleurs, des fruits et des légumes durant l'entreposage ;
- L'existence du magnésium qui présente l'atome central dans la molécule de chlorophylle et contribue à l'activation des enzymes et à la synthèse des protéines.

IV.1.3 Surface foliaire

La Figure 30 présente le suivi de la superficie foliaire des feuilles du radis. Les résultats attestent que la surface foliaire des plantes du radis a augmenté très lentement pendant les 5

premières semaines. Puis elle a augmenté linéairement avec un pas de 10 cm^2 par semaine quel que soit le type du sol étudié. La plus grande surface a été notée pour les feuilles du radis amendées par le compost CB.

En effet, la surface foliaire détermine à la fois les quantités d'eau utilisées par la plante sous forme de transpiration et celle du carbone fixé par voie photosynthétique. Elle conditionne la résistance à la sécheresse ; plus la surface foliaire est élevée plus la plante perdra de l'eau; contrairement à celle qui a une faible surface foliaire. Selon Johnson et al., 1973, Adjab, 2002, les plantes à plus grande surface foliaire peuvent tolérer la déshydratation et maintenir un potentiel hydrique élevé. Par contre, Kirkham et al.,1980, suggèrent qu'une surface foliaire réduite peut être avantageuse, du fait qu'elle réduit effectivement les pertes en eau totale de la plante (Kasongo et al., 2013).

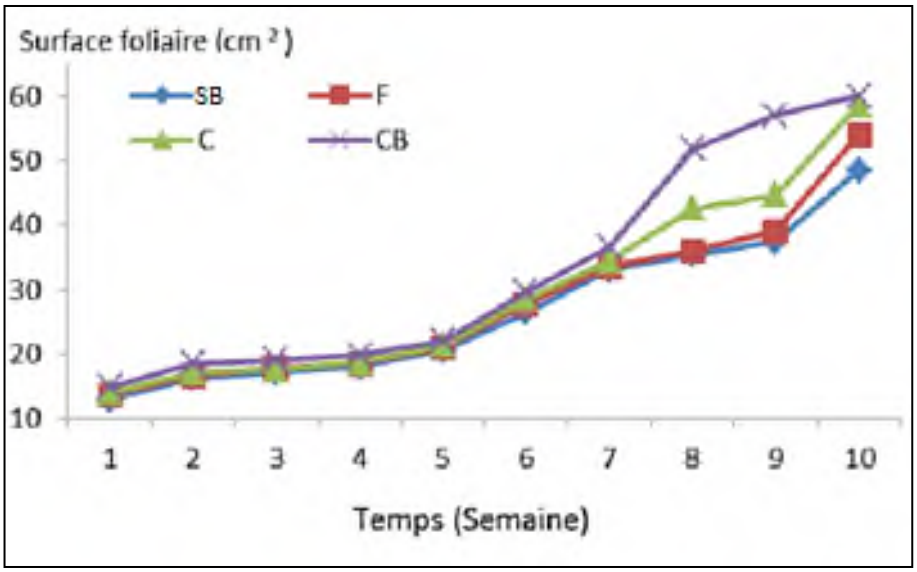


Figure 30: Surface foliaire des feuilles du radis en fonction du temps

L'analyse de la variance de la superficie foliaire présentée sur la Figure 31, montre un effet significatif pour les différents types des produits organiques sur ce paramètre. La superficie varie de 174,47cm^2 obtenue pour le sol nu, 194, 51 cm^2 pour le fumier et 286 à 317,16 cm^2 respectivement pour les composts C et CB soit une augmentation de l'ordre de 11,5, 63,38 et 81,75% respectivement pour le fumier, les composts C et CB par rapport au sol témoin.

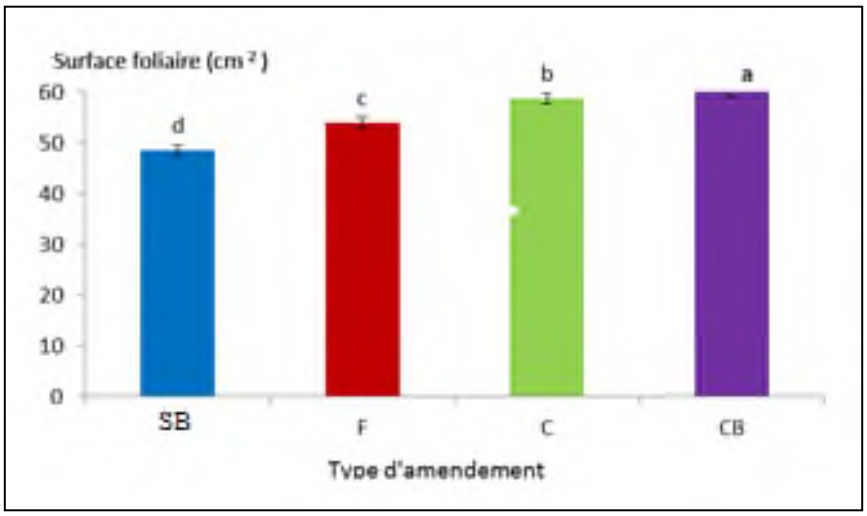


Figure 31: Effet comparatif de la surface foliaire des feuilles du radis en fonction du type d'amendement

IV.2 Paramètres de production

La récolte du radis a été effectuée après 2 mois de sa plantation



a : Essai à la faculté



b : Essai au champ

Figure 32: Les radis récoltés

IV.2.1 Calibre du fruit racinaire

Les résultats de l'étude de la variance, mentionnée sur la Figure 33, attestent que le type d'amendement organique a nettement amélioré le calibre du radis.

Le plus grand calibre est noté pour les radis amendés par les composts C et CB, la différence est significative pour les deux paramètres (Longueur et diamètre de tubercule) par rapport au sol nu. Dans ce cas, nous pouvons dire que les produits C et CB ont développé très favorablement la partie racinaire et la maturation du fruit. Cela est dû à leurs richesses en oligo-éléments et en éléments nutritifs, ce qui a fourni aux plantes plus d'éléments nécessaires pour leur croissance et leur renflement. Comme il pourrait aussi être attribué à la structure

poreuse du sol crée lors de l'ajout du compost qui permet le développement des racines des cultures exprimé par l'amélioration du calibre et de la maturité du fruit racinaire ; le radis. Les résultats ainsi obtenus concordent ceux trouvés par Mouria & Douira, 2010 qui ont remarqué que l'apport du compost améliore significativement le calibre des tomates.

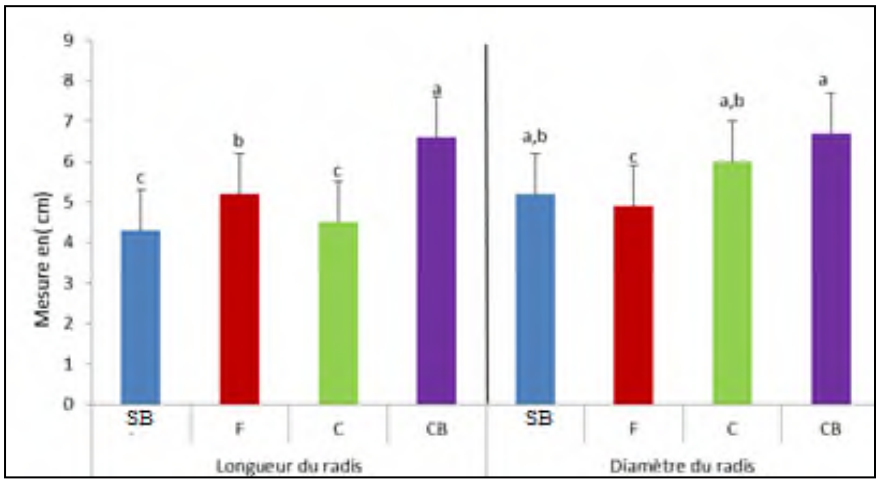


Figure 33: Effet comparatif du calibre (longueur et diamètre) du fruit racinaire du radis en fonction du type d'amendement

IV.2.2 Rendement

Le rendement total des deux essais de plantation du radis (FSDM, champ), les récoltes ont été influencées d'une manière très significative par le changement des amendements appliqués aux sols.

La récolte de l'essai à la parcelle est de 10 T/ha pour le sol brut contre 23,75 T/ha pour le sol amendé obtenue avec le fumier, 29,25 T/ha avec le compost C et 39,75 T/ha avec le compost CB. Ceci dit, une augmentation de 13 % pour le fumier, 19,25 % pour C et 29,75% pour CB par rapport au témoin. Cette différence semble être due à la qualité du produit utilisé pour l'amendement notamment le compost CB. En effet, ce dernier est d'une meilleure qualité que le compost C et le fumier, il a fourni à la plante plus d'éléments nécessaires qui favorisent la germination des semences et la maturation des plantes. Les résultats ainsi obtenus se joignent à ceux prouvés par Jouraiph (2007) lors d'une application du compost à boues activées sur la culture du blé où le rendement s'est amélioré de 14%.

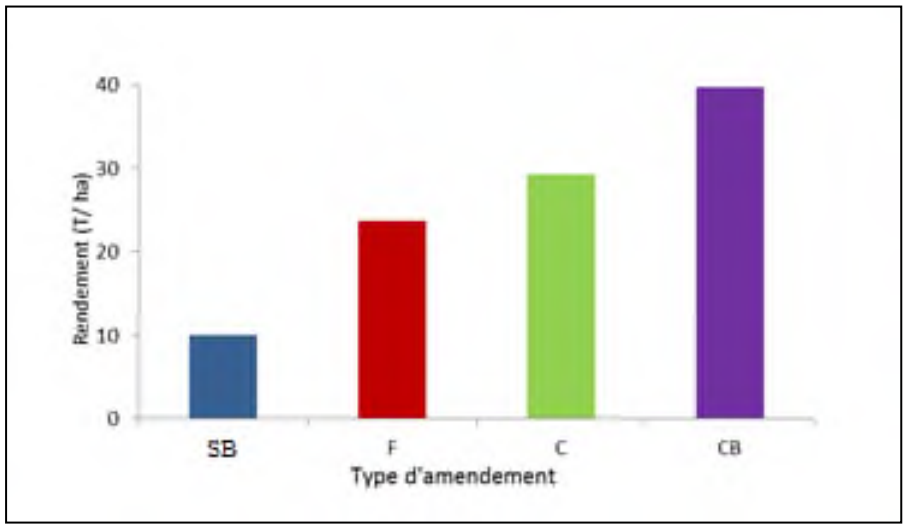


Figure 34: Effet comparatif du rendement total de la culture du radis en fonction du type d'amendement

Les rendements de la récolte du radis de l'essai au champ sont présentés sur l'histogramme de la Figure 35. Le dépouillement des résultats exhibe les effets bénéfiques des composts C et CB sur le rendement. Le sol amendé par le fumier donne une production de 25 T/ha. Une fois le fumier est combiné avec 50% de compost C, le rendement s'est amélioré pour atteindre les 27,3 T/ha. Quand le compost C est substitué par le compost CB, avec les mêmes proportions, le rendement est de 29,2 T/ha.

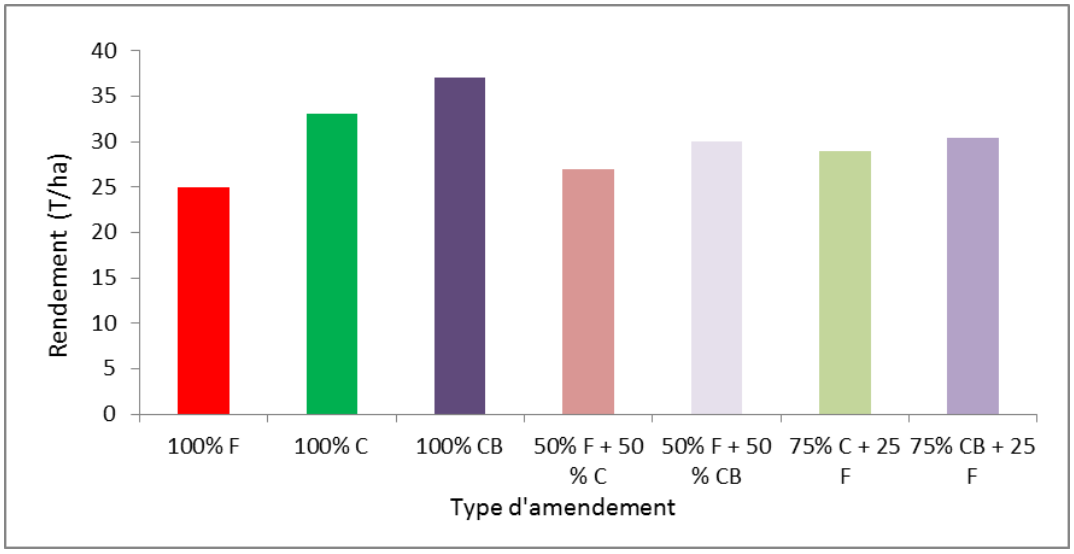


Figure 35: Effet du type et du taux d'amendement de la culture sur le rendement du radis

Avec des combinaisons de 75% CB et 25% Fumier, le rendement est amélioré à 29 T/ha et 30,4 T/ha respectivement pour C et CB. Alors que lorsque le sol est amendé avec du compost

C ou CB seuls, le rendement s'est accru respectivement à 31,5 T/ha et 37 T/ha ; soit une augmentation de 26% et 48%.

Ceci confirme les effets bénéfiques de l'ajout des composts C et CB aussi bien sur la qualité et le rendement des cultures que sur l'activation de la fertilité des sols. Plus le taux des composts dans les mélanges d'amendement augmente plus le rendement des cultures est grand. Cependant, les sols amendés avec le compost à boue a conduit à la couverture des besoins du sol grâce à sa richesse en éléments nutritifs et sa composition modérée en fraction lignocellulosique.

A la lumière de ces résultats, nous remarquons l'apport bénéfique des composts aux cultures et aux sols, notamment celui élaboré avec la boue du fait de sa composition riche en éléments nutritifs N, P, K, Ca, Mg et Fe. En effet, ces éléments agissent efficacement sur la croissance des plantes et favorisent leur activité végétative.

V. Pomme de terre

La croissance de la pomme de terre a été suivie pour les deux essais par la mesure, d'une part, des paramètres morphologiques: longueur des tiges, nombre de feuilles, surface foliaire; et d'autre part, des paramètres de production : nombre de pommes germées par parcelle, calibre, rendement par plant et le nombre des tubercules par plante.

V.1 Paramètres morphologiques

V.1.1 Nombre de feuilles / plante

Les feuilles de la pomme de terre sont décidues, alternes, ont de dix à vingt centimètres de longueur. Elles sont composées imparipennées et comptent 7 à 9 folioles de forme lancéolée et de taille hétérogène, de toutes petites folioles s'intercalant par paires entre les plus grandes. Les feuilles basales peuvent parfois être entières.

Le nombre de feuilles par plante évolue en fonction du cycle de la croissance des pommes de terre. La Figure 36 montre que la poussée des feuilles n'a débuté qu'à partir de la troisième semaine de la plantation de la pomme terre marquant ainsi la phase de la levée ou dite aussi croissance avec 3 à 7 feuilles. La phase du développement et de formation des feuilles présente la phase de développement de tubercules c'est le sommet de croissance et de formation des feuilles avec 40 à 45 feuilles par plante pour tous les composts. La différence ne se distingue qu'à partir de la phase d'épanouissement et de fructification, phase aussi dite de formation de floraison où la pousse des feuilles atteint le maximum et commence à se stabiliser. 77 feuilles jusqu'à 87 feuilles ont été comptées par plante pour le compost CB et

47 à 53 feuilles par plante pour le sol brut. Cette différence s'explique par la richesse des composts et surtout le compost CB en phosphore; élément responsable de la rigidité, la croissance, la fécondation et la fructification des plantes. Après ce stade, le nombre de feuilles reste constant et elles commencent à jaunir marquant la phase de dessèchement.

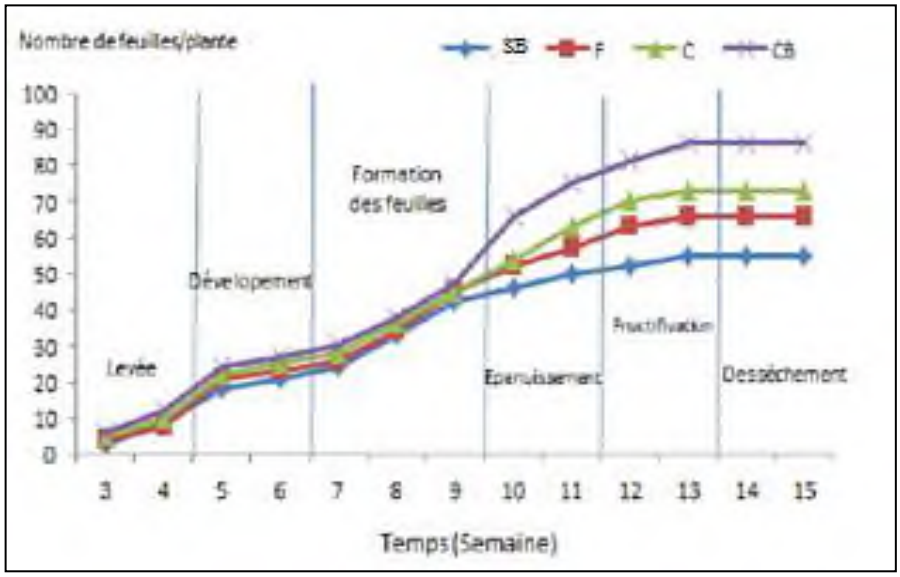


Figure 36: Nombre de feuilles/ plate de la pomme de terre en fonction du temps : Essai à la parcelle

L'analyse de la variance relative au nombre de feuilles par plante (Figure 38) a montré un effet significatif par rapport aux types d'amendements sur ce paramètre. Ce nombre varie de 53 feuilles par plante obtenu pour le sol nu, 66 feuilles–pour le fumier à 73 et 87 feuilles respectivement pour les composts C et CB.

Les caractéristiques extérieures des plantes, forme et couleur, ont aussi été régulièrement contrôlées pendant la période de croissance et aucune anomalie n'a été constatée.

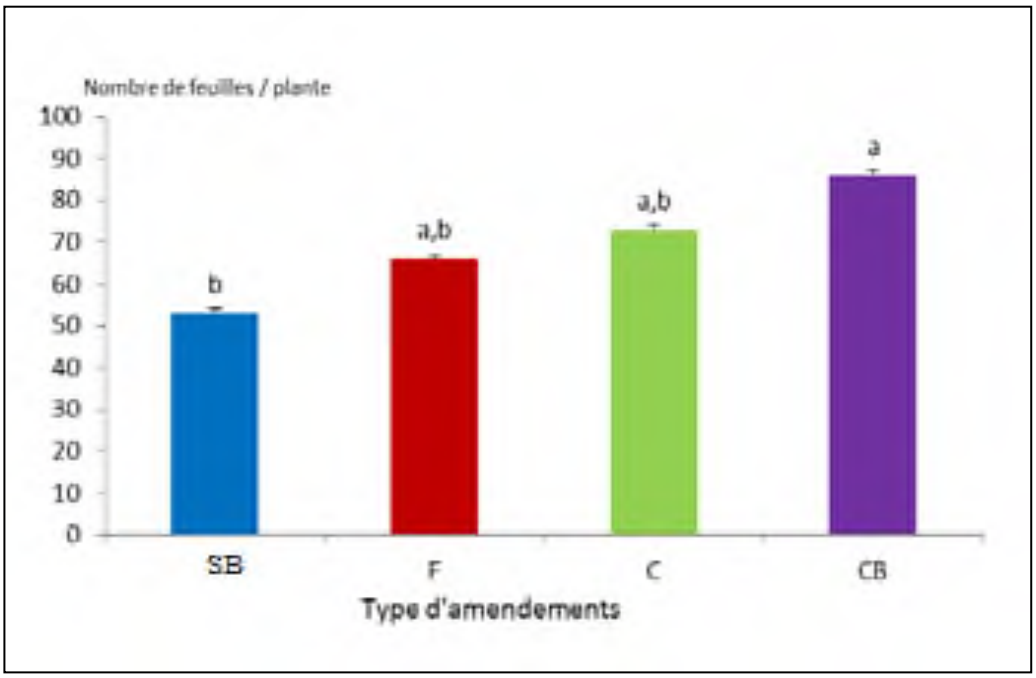


Figure 37: Effet comparatif du nombre de feuilles par plante de la pomme de terre en fonction de type d'amendement. Essai à la parcelle

Il est à noter qu'on n'a pas pu mesurer ce paramètre au champ en raison du grand nombre de feuilles par plante qui dépassait les 100 feuilles.

V.1.2 Surface foliaire

L'indice foliaire indique sur le volume du couvert végétal ; plus l'indice est grand plus l'interception de la lumière est importante et plus le couvert végétal est volumineux. Il est lié à la capacité photosynthétique de la plante et à sa production.

Le suivi de la surface foliaire dans l'essai à la parcelle, mesuré par les deux méthodes, a donné le même résultat et atteste que la surface foliaire des feuilles a connu un changement dès les premiers jours de la croissance de la feuille, et suit le cycle de croissance de la pomme de terre. Les plus grandes valeurs ont été notées durant la phase d'épanouissement connue par la floraison de la plante et sa croissance complète et finale de cette partie.

La plus grande surface a été notée chez les pommes de terre amendées par le compost CB. Ces résultats confirment ceux obtenus avec le radis, et nous concluent que les cultures amendées par le fumier résisteront moins aux périodes de sécheresse. Par contre celles amendées avec les composts C et CB pourraient mieux supporter la déshydratation et maintenir un potentiel hydrique élevé (Khedir et al., 2008 ; Tirchine et al., 2015 ; Irié et al., 2017).

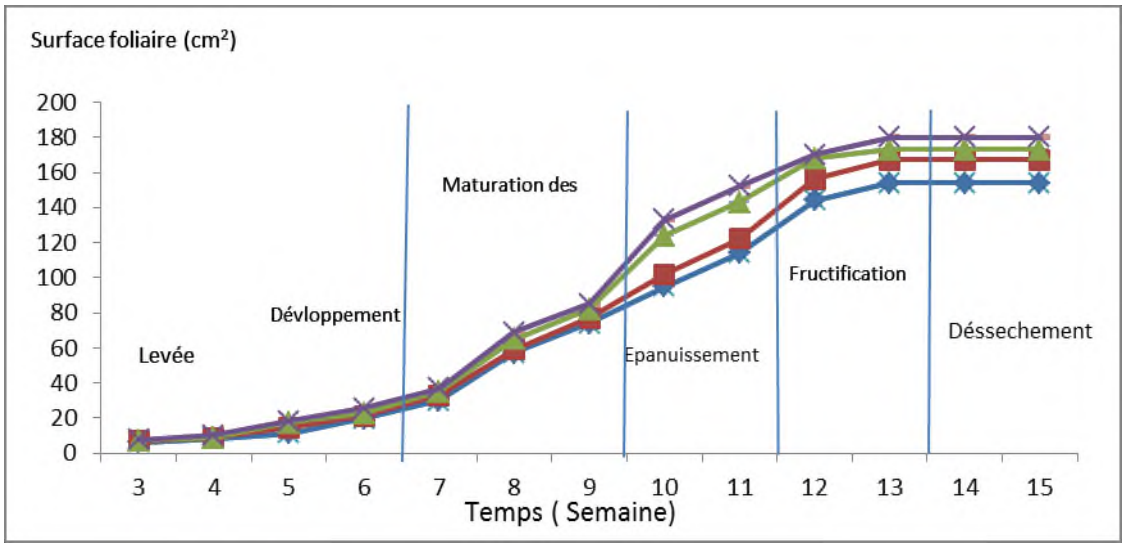


Figure 38: Evolution de la surface foliaire des feuilles de la pomme de terre en fonction du temps : Essai à la parcelle

Les résultats de d'analyses de la variance ont montré un effet très significatif, notamment pour les sols amendés par les composts C et CB qui sont respectivement de 174,7 cm^2 et 179,3 cm^2. Ceci dit que l'amendement avec le compost à boues a un impact positif sur le couvert végétal et donc fort probablement sur le rendement à la fin de la récolte malgré l'absence des engrais.

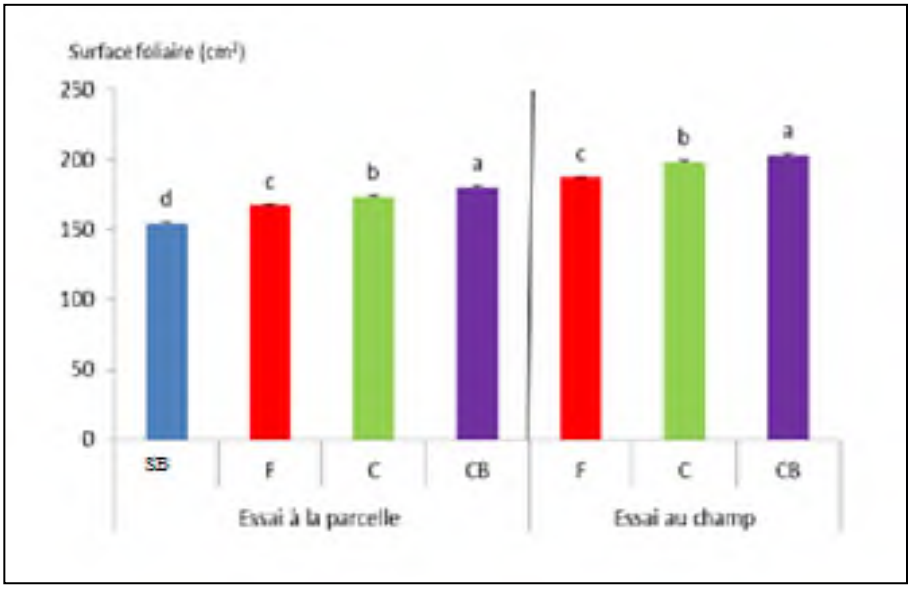


Figure 39: Effet comparatif de la surface foliaire des feuilles de la pomme de terre en fonction du type d'amendements

Pour l'essai au champ, les résultats de cette analyse sont semblables à ceux obtenus à la parcelle avec une légère augmentation de la surface foliaire d'environ 13% pour les deux

composts. Ce qui permettra de prévoir l'accroissement du rendement des parcelles amendées par les composts en plus de la capacité photosynthétique pour les plantes amendées par CB. Des résultats similaires ont été signalés par (Wissem Chaich et al., 2017), qui ont montré que l'addition du compost ou du vermi-compost à des supports de cultures de tomates améliorent significativement la surface foliaire de leurs feuilles.

V.1.3 Nombre de tiges par plante

Les plantes de la pomme de terre germées à partir des boutures n'ont qu'une seule tige principale érigée, servant de support au reste de la plante. De cette tige se ramifie des tiges latérales au nombre variable. En effet, le nombre de tiges latérales par plant indique sur la qualité de la croissance de la plante et de sa morphologie, l'importance et l'abondance du nombre des tiges permettant aux plants de bien s'alimenter en eau et en sels minéraux (Khaled, 2012).

Les résultats du nombre de tiges par plante, pour les deux essais, sont illustrés sur la Figure 40. L'analyse de la variance n'a montré aucun effet significatif sur le nombre des tiges par plante. Pour les deux essais, ce paramètre varie de 3 à 4 tiges par plante obtenues pour le sol amendé ou non. Nonobstant, le grand nombre a été atteint par le sol amendé avec le compost à boues pour les deux cas.

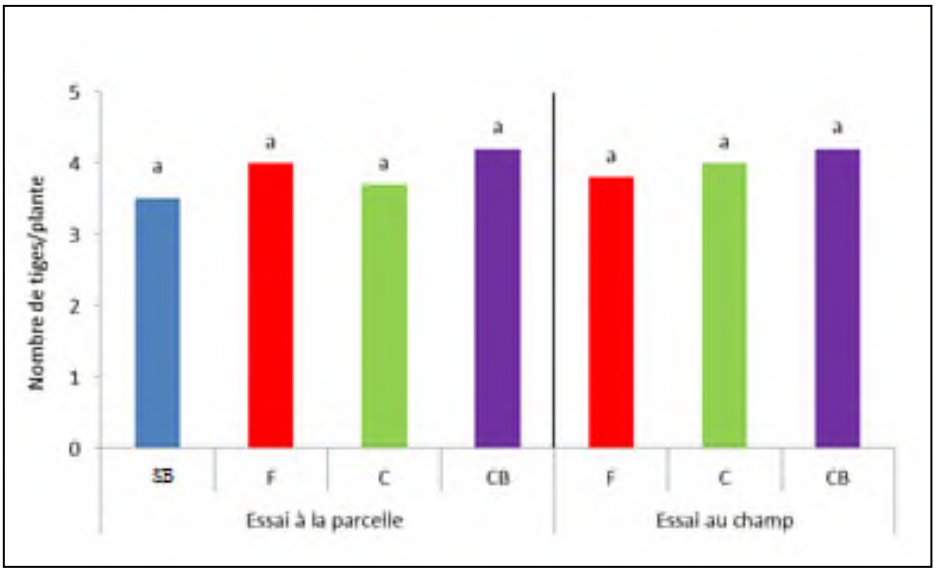


Figure 40: Effet comparatif du nombre de tiges de la pomme de terre par plante en fonction du type d'amendement

V.1.4 Longueur des tiges par plant

La tige des plantes est l'axe, généralement aérien, qui prolonge la racine et porte les bourgeons et les feuilles. Elle nait à partir des bourgeons présents sur le tubercule utilisé

comme semence. Elle est herbacée et peut atteindre de 0,6 à 1 m de longueur (Khedir, et al.; 2008, Chaouechi; 2014).

La Figure 41, présentant le suivi de la longueur des tiges par plante pour l'essai à la parcelle, montré que la longueur des plantes a connu un changement dès les premiers jours de la plantation. La plus grande valeur a été observée pour la pomme de terre amendée par le compost CB avec une longueur de 57,2 cm. Ces résultats confirment ceux obtenus avec le radis ; la teneur élevée du CB en azote, est responsable du développement des parties vertes des plantes et de leur la croissance.

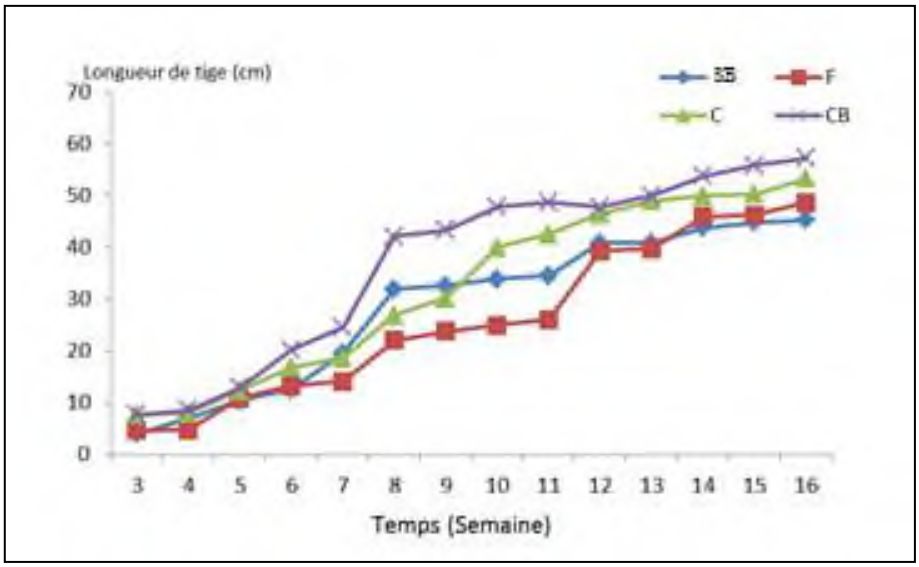


Figure 41: Longueur de tiges de la pomme de terre en fonction du temps : Essai à la parcelle

Pour l'essai au champ les résultats du suivi de la croissance de la tige de la pomme de terre (Figure 42) montrent que la longueur des tiges a connu une augmentation dès la 3ième semaine de l'apparition des tiges. Les plus grandes tiges ont été observées chez la pomme de terre amendée par le compost CB avec 0,9 m.

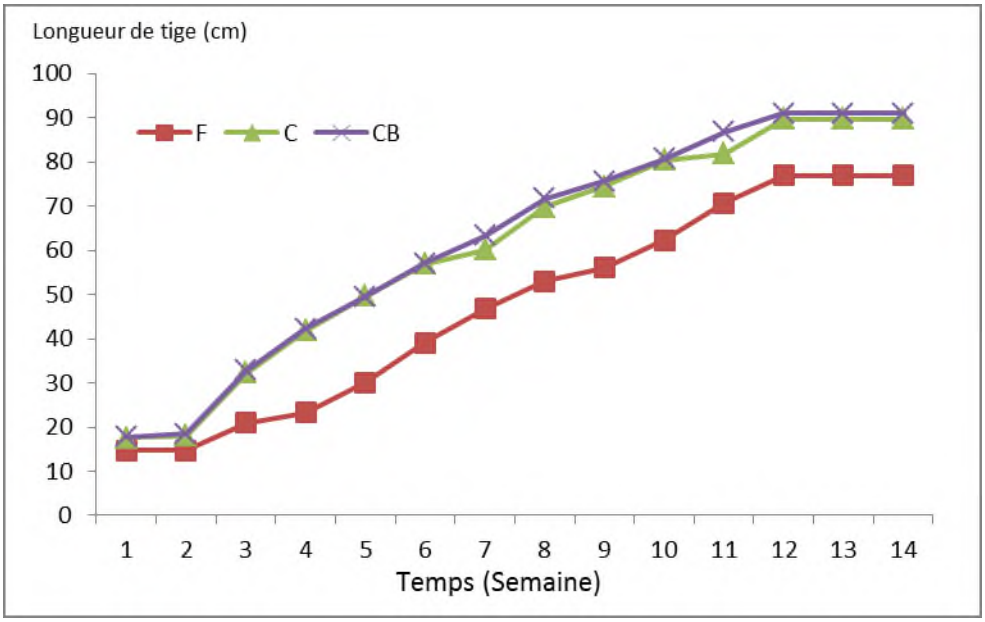


Figure 42: Longueur de tige de la pomme de terre en fonction du temps: Essai au champ

Il est à signaler que la longueur des tiges dans le cas de la pomme de terre cultivée au champ était plus importante que celle cultivée à la parcelle. Ceci pourrait être dû aux engrais ajoutés à cet essai et donc les pommes de terre ont bénéficié des doses plus importantes en éléments nutritifs qui y sont présents.

L'analyse de la variance a manifesté un effet significatif en modifiant le type d'amendement pour les deux essais (Figure 43). Au champ, la longueur passe de 77 cm pour le témoin fumier à 91 cm pour le CB et 89 cm pour le C, soit un taux d'augmentation de l'ordre de 17,79 et 15,58 % respectivement pour les composts CB et C par rapport au fumier. A la parcelle, la longueur passe de 42 cm pour le sol brut à 50 cm pour le sol amendé avec le fumier contre 55 cm et 58 cm successivement pour les sols amendés par les composts C et CB.

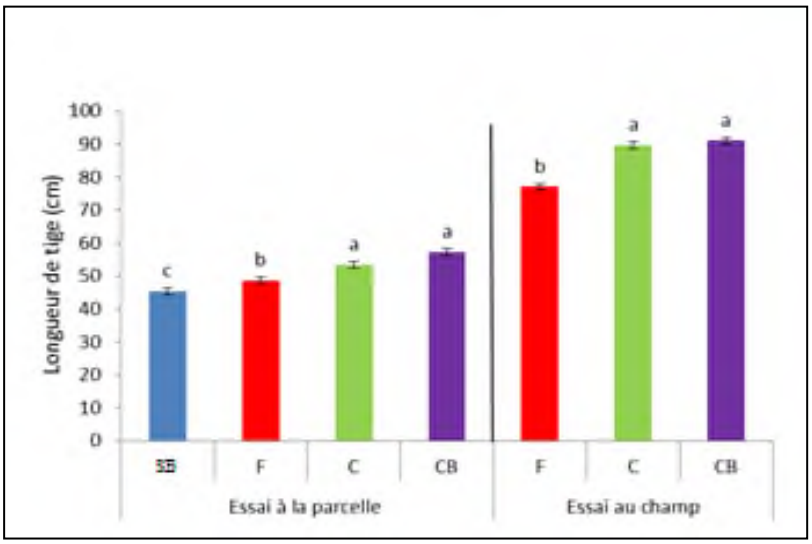
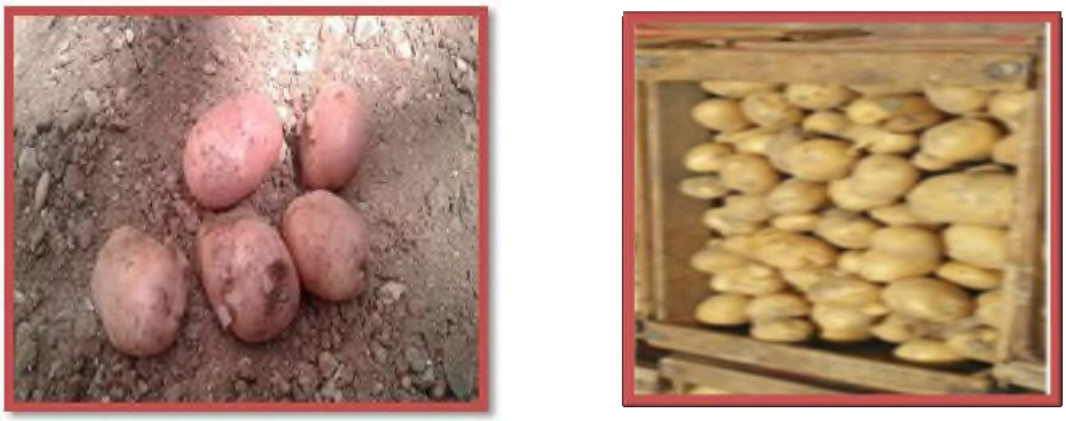


Figure 43: Longueurs des tiges de la pomme de terre en fonction du type d'amendement au champ et la parcelle

V.2 Paramètres de production

La récolte de la pomme de terre a été effectuée après 3 mois de sa plantation par une fourche-bêche, après avoir observé les fleurs fanées.



a : Essai à parcelle b : Essai au champ

Figure 44:Pommes de terre récoltées

V.2.1 Nombre de plantes germées par parcelle

L'analyse de la variance du nombre de plantes germées par parcelle illustrée sur la Figure 45 n'a montré aucun effet significatif pour les différents types d'amendements. Toutes les pommes de terre ont germé sauf pour le sol brut où le nombre germé était de 11 pommes de terre sur les 12 plantées. Comme hypothèse, nous pouvons dire que les trois amendements ont fourni à la pomme de terre, et par égalité, les éléments nécessaires ayant favorisé la germination des semences, la floraison et l'accélération de la maturation de la plante.

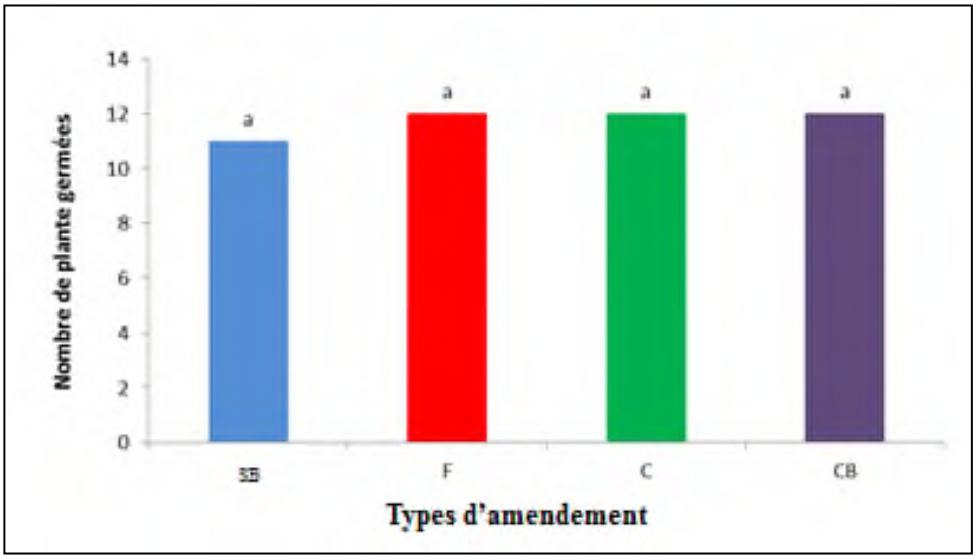


Figure 45: Effet comparatif du nombre de plants germés par parcelle de la pomme de terre en fonction du type d'amendement

NB : Ce paramètre n'a été réalisé que pour l'essai à la parcelle en raison de la grande superficie de l'application au champ. Il nous était difficile de compter le nombre de pommes semées ou germées.

V.2.2 Nombre de tubercules par plant

Le rendement de la plantation de la pomme de terre dépend fortement du nombre de tubercules par plant, du poids et du calibre des tubercules qui sont des caractères essentiels pour le choix des semences. Il s'agit ici de compter le nombre de tubercules par plant. La Figure 46 présentant les résultats de l'analyse de la variance relative au nombre de tubercules par plant pour l'essai à la parcelle, montre un effet significatif des différents types d'amendement sur ce paramètre. Le nombre de tubercules varie de 4 par plant obtenu pour le sol nu, de 6 par plant pour le sol amendé avec le fumier ou le compost C et 7 pour celui amendé avec le compost CB soit une augmentation de l'ordre de 14 et 28 % respectivement pour C et CB par rapport au témoin. Cet accroissement pourrait s'expliquer par la richesse des amendements en matières organiques et en azote qui se minéralisent pour donner à la pomme de terre les éléments nutritifs nécessaires pour sa reproduction.

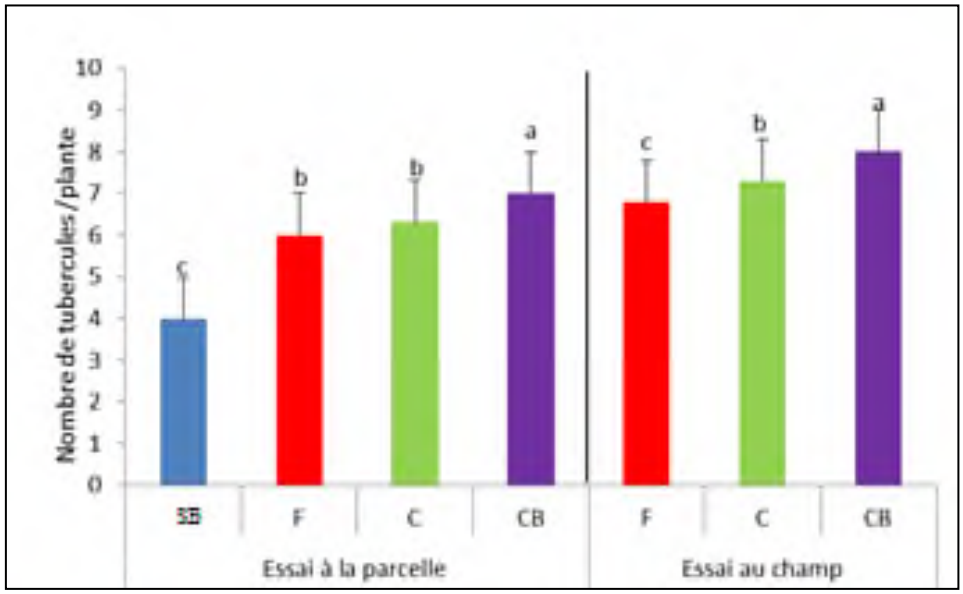


Figure 46: Effet comparatif du nombre des tubercules par plante de la pomme de terre en fonction du type d'amendement

Pour l'essai au champ, l'analyse de la variance relative au nombre de tubercules par plante montre un effet aussi significatif. Le nombre de tubercules est de 6 par plant pour le fumier, 7 pour le compost C et 8 pour le compost CB; soit une augmentation de l'ordre de 16,8% et 33,3 % respectivement pour C et CB par rapport au fumier.

Pour les deux essais, le nombre des tubercules par plant amendée avec les composts varie entre 7 et 8. Ceci dit que l'essai à la parcelle avec uniquement les amendements et sans aucun autre ajout d'engrais ou pesticide a rivalisé devant l'essai au champ en présence des engrais et des pesticides. Cela confirme que les composts ont fourni à la pomme de terre les éléments nécessaires pour sa reproduction et sont très favorables pour sa croissance.

V.2.3 Calibre du tubercule

Le calibre est défini par la mesure de la longueur et la largeur de la pomme de terre. Les résultats de l'étude de la variance de ce paramètre, mentionnés sur la Figure 47, attestent que les trois types d'amendements ont nettement amélioré le calibre des tubercules. Le meilleur calibre est noté pour les pommes de terre amendées par les composts C et CB. La différence est significative par rapport au sol brut, ce qui prouve que les composts ont participé au développement des tubercules lors de leur maturation grâce à la forte concentration de ces amendements en potassium. En effet, la déficience en potassium se manifeste surtout au début de la formation des tubercules quand le besoin de la pomme de terre en potassium est maximal et qui s'étend sur une période de 30 à 40 jours (Doumbouya, 2018). Normalement le potassium augmente la moyenne du calibre et la proportion des tubercules. Archer (1976) a

trouvé que la proportion des tubercules commercialisables était de 84,4 % avec 0 kg de K_2O/ha; 85,6 % avec 188 kg de K_2O/ ha et 86,6% pour la dose de 282 kg K_2O/ha (Doumbouya, 2018).

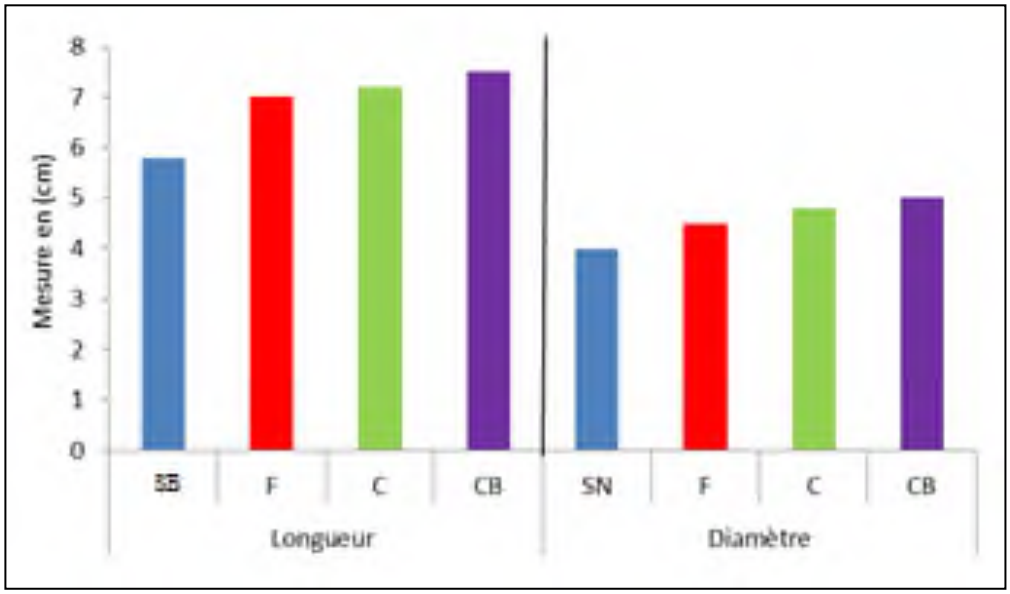


Figure 47: Effet comparatif de la longueur et du diamètre des tubercules de la pomme de terre en fonction du type d'amendements : Essai de la parcelle

Pour l'essai à la parcelle, le calibre de la pomme de terre amendée par le compost CB a été de 5, 3/7,8 contre 3,7/5,5 pour le sol brut.

Quant à l'essai au champ, le calibre de la pomme de terre amendée par le fumier a été de 5,4/11,5 par rapport à 6/12,6 et 6/13,7 pour la pomme de terre amendée successivement par les composts C et CB (Figure 48).

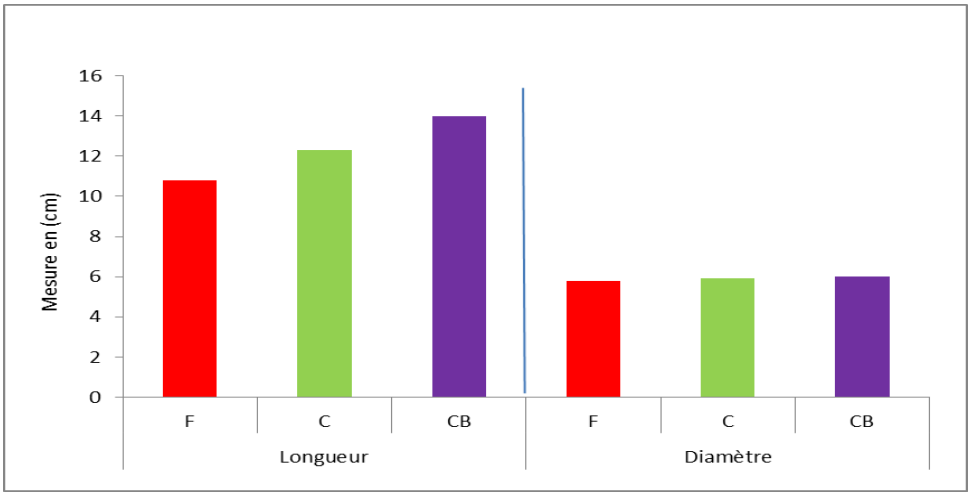


Figure 48: Effet comparatif de la longueur et du diamètre des tubercules de la pomme en fonction de type d'amendement; Essai au champ

La différence du calibre entre les deux essais a été très prononcée. En effet, les engrais ont nettement aidé à la croissance et le renflement des tubercules.

V.2.4 Rendement par plant

Les résultats de l'analyse de la variance du rendement par plante (Figure 49) renforcent ceux du test du nombre de tubercules/plante. Les amendements ont beaucoup amélioré le rendement des plants.

Pour l'essai à la parcelle, le plus important rendement par plant a été remarqué pour les plants amendés par le compost à boues (CB). Cette différence est le fruit de sa richesse en oligoéléments et en éléments nutritifs nécessaires à la croissance et la production de la pomme de terre.

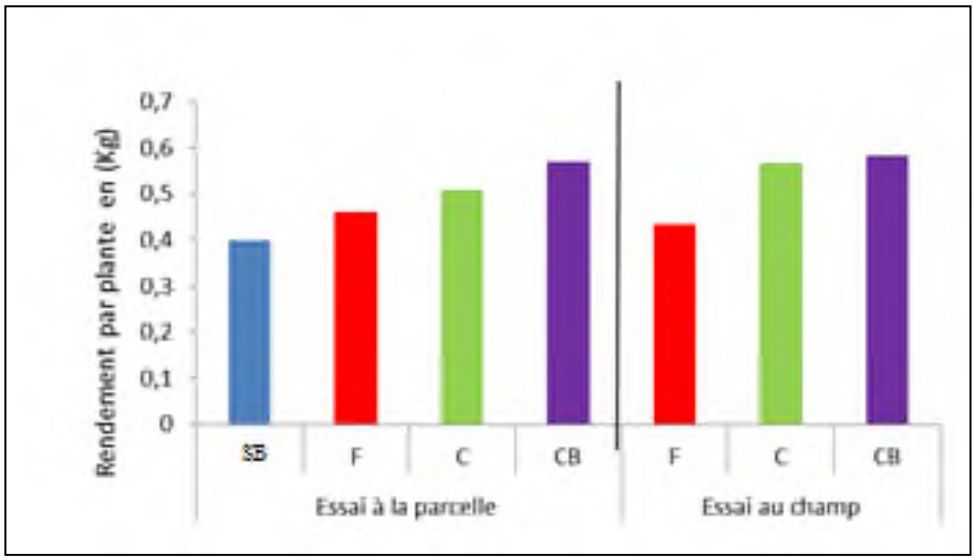


Figure 49: Effet comparatif du rendement par plante de la pomme de terre en fonction du type d'amendement

Pour l'essai au champ, l'analyse de la variance a montré aussi un effet hautement significatif sur le poids des tubercules par plante. Celui-ci passe de 0,54 g pour les sols enrichis par le fumier à 0,56 g pour le compost C et 0,58 pour le compost CB. Le taux d'augmentation est de l'ordre 3,6% et 7,4% respectivement pour les composts C et CB grâce à l'apport de la matière organique, d'azote, du potassium et du phosphore à la composition du sol. Les composts ont fourni à la pomme de terre plus d'éléments nécessaires qui contribuent à sa maturation et sa croissance.

V.2.5 Rendement total

Le rendement total a été influencé par le changement des amendements appliqués au sol (Figure 50). Un accroissement du rendement a été obtenu avec le traitement des sols quels que soit les types d'amendement et du sol. Néanmoins, les rendements ont plus que doublé pour l'essai au champ grâce, d'une part, à l'utilisation des engrais, et d'autre part au type de sol et de la variété de la pomme de terre. Ces rendements sont très importants pour les sols amendés avec le compost CB. L'efficacité des amendements sur le rendement de la culture de la pomme de terre les classe selon l'ordre décroissant suivant :

S+ CB + Engrais > S+ C+ Engrais > S+ F + Engrais > S+ CB > S+ C > S+ F > SB

Les meilleurs résultats ont été atteints pour les sols amendés avec le compost CB qui a assuré à la pomme de terre plus d'éléments nécessaires qui ont favorisé sa germination, sa reproduction et sa maturation.

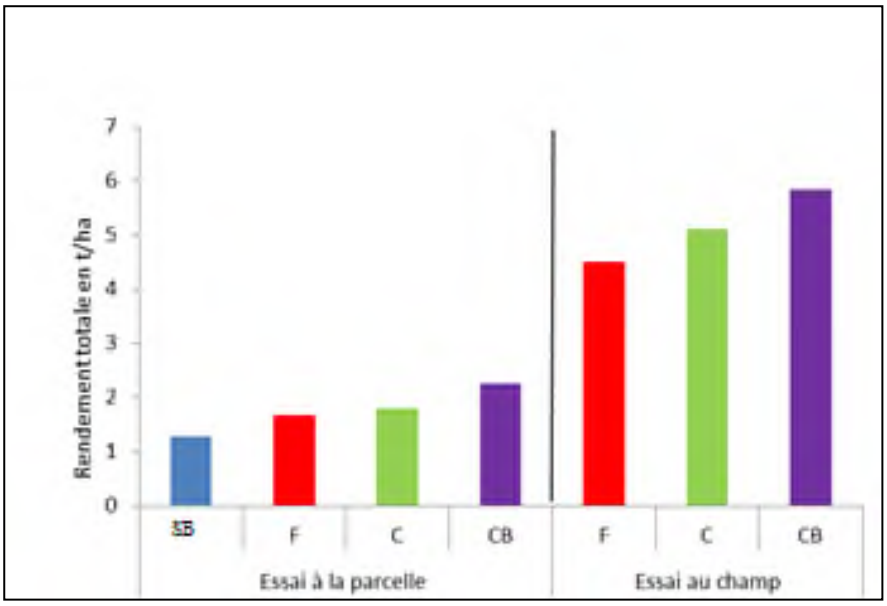


Figure 50: Effet comparatif du rendement total de la pomme de terre en fonction du type d'amendement

V.3 Qualité nutritive de la pomme de terre cultivée au champ

La pomme de terre présente un profil nutritionnel varié. Elle possède à la fois tous les atouts d'un féculent, mais aussi des fibres, des vitamines et des minéraux. Un aliment diététique qui s'intègre aussi aux régimes hypocaloriques (Ker Armel, 2009).

Afin d'évaluer la qualité nutritionnelle des pommes de terre cultivées au champ, elles ont été comparés à des pommes de terre commercialisées provenant du marché et qui sont destinées aux consommateurs. Les résultats des analyses des Tableaux 28 et 29 attestent que

les pommes de terre récoltées des terres amendées par les deux composts C et CB, présentent la même valeur nutritionnelle que celles cultivées avec le fumier ou celles commercialisées.

Les résultats ainsi trouvés se joignent à ceux de Ker Armel (2009) qui a aussi cité que la pomme de terre est un produit riche en eau (80 % d'eau). Sa matière sèche se compose de 80 % d'amidon, 7 % de fibres, 3 % de protéines et 10 % de minéraux et vitamines avec une valeur énergétique de 19 g de glucides, 2 g de protides, 0,1g de lipides et 85 Kcal de calories. Ceci atteste que l'amendement des sols améliore le rendement des cultures et la qualité du sol et confirme les travaux (Barje et al., 2008) ayant montré que les bio-déchets, produits de l'assainissement, sont potentiellement de bons fertilisants. Ils pourraient soit pallier à l'épineux problème de faible productivité des sols par leur apport, soit réduire le coût de production dû à l'utilisation du fumier qui dans la majorité du temps nécessite un traitement préalable car il influence, dans la plupart du temps, la qualité nutritive de la pomme de terre ce qui n'est pas notre cas.

Tableau 28: Qualité nutritionnelle des pommes de terre cultivées

Analyses / Pomme de Terre (PT)	Trace des métaux lourds	Protéines (%)	Amidon (%)	Fibres (%)
PT avec compost CB	Négative	3	80	7
PT avec compost C	Négative	3	80	7
PT avec fumier	Négative	3	80	7
PT commercialisée	Négative	3	80	7

Tableau 29: Valeurs énergétiques des pommes de terre cultivées

Valeurs énergétiques / Pomme de terre (PT)	Glucides (g)	Protides (g)	Lipides (g)	Calorie (Kcal)
PT avec compost CB	19	2	0,1	85, 03
PT avec compost C	19,01	2	0,1	84,76
PT avec fumier	19	2	0,1	85,03
PT commercialisée	18,97	2	0,1	85,00

V.4 Caractérisation des sols après culture

Les résultats des analyses physico-chimiques du sol après récolte en comparaison avec ceux du sol avant la culture, pour l'essai à la parcelle (Tableau 30); montrent que le sol reste légèrement basique. Son pH n'a pas beaucoup varié, il a fluctué entre 8, 14 et 8,47. De même pour le carbone organique total, il n'a presque pas varié pour le sol amendé avec le fumier et a légèrement diminué pour les amendements. Ceci nous a montré que cet élément soit n'a pas réagi avec le sol, ou la quantité transmise au sol a été absorbée ou utilisée par la culture.

Pour l'azote et la matière organique, ils ont augmenté grâce à la richesse des amendements en ces éléments qui ont été relargués dans le sol et dont une partie a été consommée par les cultures. Nous notons aussi que le compost à boue (CB) a considérablement corrigé la composition du sol en azote et a augmenté son pouvoir fertilisant.

Tableau 30 : Caractérisation des sols après la plantation

Sol / Paramètres	Sol nu	Sol + F	Sol + C	Sol + CB
pH	8,29	8,47	8,32	8,14
CE (mS/cm)	0,3	0,2	0,5	0,4
%MO	5,3	7,41	7,07	7,05
%COT	3,65	3,7	3,54	3,53
%N	0,4	0,9	1,00	1,12
C/N	9,13	4,11	3,54	3,15

La caractérisation du sol avant et après son amendement par C, CB, ou F, révèle que le sol amendé par le compost CB prouve la bonne réaction du sol et des cultures avec les éléments nutritifs qui les compose.

Les tests ont dégagé des différences significatives entre ces types d'amendement pour les paramètres de la croissance végétative morphologiques et de production étudiés (Nombre de feuilles/plante, surface foliaire, la longueur de tiges/plante, etc.).

Pour les deux cultures, du radis et de la pomme de terre, les meilleurs résultats concernant ces paramètres morphologiques et de production ont été enregistrés pour l'amendement CB.

Conclusion

L'application agricole des composts C et CB à la parcelle et au champ pour la culture des radis et de la pomme de terre révèlent :

- Une augmentation appréciable de la production et des paramètres végétatifs des cultures du radis et de la pomme de terre.
- Un bon développement du feuillage de la pomme de terre
- Une bonne formation et renflement des récoltes
- Une activation notable du sol amendé par le compost à boues CB et un bon développement des paramètres morphologiques et de production des cultures étudiées.
- Une qualité nutritive de la pomme de terre semblable à celle commercialisée quel que soit l'amendement
- Une amélioration de la qualité du sol en matière organique et en azote

A la lumière des résultats ainsi obtenus, les boues pourraient être valorisées dans la filière de compostage et les composts à boues pourraient servir à la correction des sols pauvres en éléments fertilisants et en oligo-éléments, des sols acides en neutralisant leur pH, activant la croissance des plantes et augmentant leurs rendements.

Le chapitre suivant relate les tests de l'aspect antifongique du compost à base de boues d'épuration et la possibilité d'utiliser les composts comme des pesticides dans le but de réduire l'utilisation des produits chimiques nocifs.

CHAPITRE IV : APPLICATION DU COMPOST À BOUES POUR LA LUTTE BIOLOGIQUE

Introduction

Dans le cadre d'élargir le champ d'utilisation du compost à boues, nous avons testé son efficacité pour la lutte biologique contre les maladies phytopatogènes des plantes. Les tests ont été effectués in vitro avec des jus de composts préalablement préparés.

Ce chapitre présente, dans un premier temps, un aperçu bibliographique sur les jus de compost, leur domaine d'utilisation et leur effet sur la lutte biologique. Dans un deuxième temps, il décrit, d'une part, la méthodologie appliquée pour le développement de l'activité bactérienne du jus de compost au cours de leur fermentation. D'autre part, il exhibe les résultats de l'étude in vitro du pouvoir antifongique du jus de compost sur le *Fusarium oxysporum* et du pouvoir antibactérien sur l'*Erwinia*.

I. Jus de compost

Le jus de compost est le résultat de la percolation des matières liquides en formation dans un processus de compostage naturel ou accéléré par l'être humain en tas ou dans un composteur. Il contient des éléments organiques, minéraux et micro-organismes acteurs du processus de décomposition : Les détritivores, les cryptogames et les bactéries.

I.1 Utilisation

Le jus peut être récupéré pour utilisation comme fertilisant en épandage en l'additionnant à l'eau d'irrigation ou, filtré, comme pulvérisât sur les parties foliaires des plantes. Il sert alors de stimulant des défenses immunitaires par apport de micro-organismes entrant en concurrence avec des germes pathogènes. En plus, l'extrait du compost, connu sous le nom du jus de compost, est un outil de protection des plantes en agissant comme inhibiteur des maladies foliaires et comme inoculant qui rétablit ou augmente la microflore du sol.

I.2 Techniques de préparation et d'extraction des jus de compost

Les méthodes par lesquelles les jus de compost sont préparés varient d'un chercheur à un autre. Néanmoins, il semble y avoir deux méthodes de préparation divergentes, l'une par aération et l'autre par fermentation.

La méthode d'extraction originale, par fermentation a été développée par le chercheur allemand Heinrich Wetzein et améliorée par Will Brinton en 1996 sur la Côte Est des Etats-Unis (Znaïdi, 2002) . La méthode consiste à couvrir le compost avec de l'eau à une proportion entre 1/5 à 1/8 exprimée en volume. Le contenu est remué une fois et laissé pour fermentation à l'air à une température entre 15 et 20°C. Après une période d'absorption mentionnée comme « Le temps d'extraction », la solution est passée à travers un filtre et appliquée, ensuite, avec un pulvériseur ordinaire. Les périodes d'extraction se sont étendues entre 2 à 21 jours bien qu'elles soient le plus souvent entre 3 à 7 jours.

La méthode aérobie décrite par Cantisano en novembre 1995 à St. Louis aux Etats- Unis consiste à couper un tube PVC de 12 pouces en deux suivant le sens de la longueur, à disposer les 1/2 tubes au-dessus d'un réservoir qui collectera le jus de compost. Le tube PVC qui s'introduit dans le réservoir collecteur est troué en bas par une multitude de petits trous pour laisser passer le jus. Les tubes PVC montés l'un dans l'autre formeront une cuvette où sont placés des sacs contenant le compost, un courant d'eau passera alors dans les tubes et emmène le jus de compost extrait directement au réservoir où une pompe le refoulera en haut des tubes PVC pour qu'il refasse le chemin de nouveau. Les jus de compost sont ainsi aérés et cette

opération peut durer 7 jours mais des variations pourraient ramener le temps d'extraction de jours en heures (2 à 8 heures).

I.3 Pouvoir biologique des jus de compost

Depuis plusieurs années, les recherches ont montré que le compost et le jus de compost pourraient être efficaces pour la gestion des maladies des plantes en agriculture biologique. Pour le compost, Serra-Wettling et al. (1995, 1997) ont révélé que l'addition de 10% en volume de compost de fraction fermentescible d'ordures ménagères à un sol limoneux permet de diminuer voire supprimer le développement de la *Fusariose* vasculaire du lin (Causée par *Fusariumoxyporum*). Dans le même contexte ? Serra-Wettling et al. (1996) rapportent que d'autres exemples d'amélioration de la résistance du sol par apport de compost ont été observés: Résistance aux *Rhizoctones, Fusariose, Fonte de semis*, pourritures provoquées par *Rhizoctoniasp*. L'effet bénéfique du compost est dû à l'activité biologique et/ou à une modification physique du milieu. La résistance d'origine biologique est attribuée soit à l'ensemble des micro-organismes du sol et du compost (C'est la résistance générale), soit à la présence des micro-organismes antagonistes des agents pathogènes.

Pour le jus de compost, connu sous le nom d'extrait de compost, des études menées par Tratch et Bettiol 1997, sur des composts biologiques ont montré que la pulvérisation d'une solution de jus de compost à 10% de concentration inhibe la croissance mycélienne de la majorité des pathogènes testés (Une dizaine dont *Rhizoctonia solanii, Fusarium oxysporium, Botrytis cinerea, Alternaria solani, Septoria lycopresicii*…). La germination des spores est inhibée à des concentrations de 20% pour *Botrytis cinerea* et 10% pour *Alternaria solanii*. Le jus de compost est donc un outil de protection des plantes agissant comme inhibiteur des maladies foliaires et comme inoculant qui rétablit ou augmente la microflore du sol. Des recherches menées en Allemagne, au Japon, en Israël et aux Etats Unis ont montré que les jus de compost pourraient être efficaces dans le contrôle de plusieurs maladies telles que le Mildiou de la pomme de terre, *Phytopthora* de la tomate, la pourriture grise de la fève, *Botrytis Cinerea* de la fraise, le *Fusarium oxyporum, le Mildiou* et *Oïdium* de la vigne, *l'Oîdium* Pourriture grise de la tomate du concombre *Sphaerotheca Fuliginea, la g*ale de pomme *Venturia Conidia.* Ces maladies ont été traitées par des extraits de composts respectivement de cheval Weltzein (1990), de bovins Weltzein (1990), d'écorce Kai et al. (1990), de déjections animales, de déjections de volailles et de bovins (1994), de marcs de raisin Elad et Shtienberg (1994) et de champignon dépensé, et de Cronin et Andrew (1996).

D'après Brinton et William (1995), les extraits de compost permettent un bio contrôle par leurs actions sur la phyllosphère (la surface des feuilles et les microbes associés). Plusieurs mécanismes qui sont l'induction de la résistance, l'inhibition de la germination des spores, l'antagonisme et la compétition avec les pathogènes semblent être les responsables de l'effet suppressif. Les composants actifs du jus de compost qui ont été identifiés jusqu'à maintenant sont des bactéries(*le Bacille*), des levures (*Sporobolomyces* et *Cryptococcus*) et des moisissures, aussi il y a des antagonistes chimiques tels que les phénols et les acides aminés identifiés par Trankner et Andreas en 1992 (Znaïdi, 2002).

En s'inspirant des travaux mentionnés et du brevet (Abid et al., 2016) sur le pouvoir antifongique des jus de compost à base des margines que vient l'idée de l'étude du pouvoir antifongique et antibactérien des jus de compost, à base de boues d'épuration, respectivement sur le *Fusarium oxysporum* et l'*Erwinia*.

II. Matériaux et Méthodes

II.1 Matériaux

- **Jus de compost** : Des jus préparés à partir des composts C et CB préalablement élaborés à l'échelle semi industriel,
- ***Fusarium oxysporum*** : Une espèce de champignons ascomycètes de la famille des *Nectriaceae*. C'est un complexe d'espèces telluriques, ubiquistes, parasites de plantes, comprenant de nombreuses formes spéciales (f. sp.), qui infectent collectivement plus de 100 hôtes différents, provoquant des pertes économiques importantes chez de nombreuses plantes cultivées comme le bananier, le cotonnier, le melon, la tomate. Ce champignon survit aussi bien dans les graines que dans les résidus de culture et dans le sol, provoquant des maladies appelées fusarioses. Il est favorisé en automne par les sols humides et au printemps par les sols secs et la forte concentration d'engrais ; ce qui cause un envahissement des collets, des racines ou des gaines foliaires comme il peut provoquer aussi la pourriture des semences et la brûlure des semis. Cette souche a été isolée, identifiée et procurée par la banque de l'Institut d'Olivier de Sfax.
- ***Erwinia amylovora*** : Une souche bactérienne procurée aussi par la banque de l'Institut de l'Olivier de Sfax, appelée aussi le feu bactérien, est une Bactérie, *Gram Négatif* de la famille des *Enterobacteriaceae*. Elle est considérée comme un organisme de quarantaine au Maroc. Elle attaque toutes les parties aériennes des plantes-hôtes (Fleurs, feuilles, pousses, troncs, collets et porte-greffes). Les symptômes les plus communs et caractéristiques sont:

- Sur fleurs : Dépérissement et mort des inflorescences. Les fleurs mortes se dessèchent et deviennent brunâtres. Elles restent attachées à la plante en général.
- Sur pousses: Flétrissement et mort des pousses et rameaux. De jeunes pousses et rameaux flétrissent, brunissent, et dans la plupart des cas l'extrémité de la pousse se recourbe en forme de crosse caractéristique.
- Sur feuilles : Brûlure des feuilles les infectent en présentant un noircissement des pétioles et de la nervure principale avant d'envahir toute la feuille.
- Sur fruits : Les fruits infectés brunissent, voire noircissent aussi, se ratatinent, et, de même que les fleurs, restent attachés et prennent un aspect momifié.
- Sur branches et tronc : Brûlure des troncs et des charpentières avec formation des chancres (Eastgate, 2000).

II.2 Méthodes

II.2.1 Préparation du jus de compost

Le jus du compost a été préparé suite à une extraction du compost réalisée dans l'eau avec une proportion de 1/5 (w/v). La suspension a été incubée pendant 5 jours à 25 °C et agitée manuellement chaque jour pour favoriser une fermentation. Le surnageant a été séparé de la partie solide (de culot) par une décantation, suivi d'une centrifugation à 4000 trs/min pendant 15 min par une centrifugeuse de type MIXTASE- BLT

II.2.2 Caractérisation des jus de compost

Les jus de composts ont été caractérisés par la mesure des paramètres chimiques, à savoir : Le potentiel d'hydrogène (pH), la conductivité électrique (CE), la Demande Chimique en Oxygène (DCO), la Demande Biologique en Oxygène (DBO_5), l'Azote Total Kjeldhal (NTK), l'azote ammoniacal (NH_4^+); le Carbone Organique Total (TOC) et la perte en feu. Le Tableau 31 regroupe toutes les méthodes standardisées d'analyses utilisées durant cette étude.

Tableau 31:Méthodes standardisées d'analyses

Paramètres physico-chimiques	Méthodes/Appareillages
pH	pH mètre/pH-mètre Type CONSORT- Modèle-C535
Conductivité **(mS/cm)**	Conductimétrie/Conductimètre Type CONSORT- Modèle-C535
DBO_5 **(mg O_2/L)**	NF EN 1899-2 (mai 1988). Qualité de l'eau. Détermination biologique en oxygène après n jours (DBO_n)
DCO **(mg O_2/L)**	NF T90-101(Février 2001). Oxydation de la matière organique par le bichromate de potassiums; oxydant fort. DCO mètre du type SELECTA Minéralisateur
NTK **(mg/L)**	NF EN 25663 (Janvier 1994). Dosage de l'azote Kjeldhal : Méthode après minéralisation au sélénium (Indice de classement T90110). Appareil d'azote Kjeldhal type SMECTA.
NH_4^+ **(mg/L)**	Méthode de dosage direct à partir d'un échantillon par distillation en milieu alcalin par spectrométrie UV- visible. De type UV-6300PC Double Beam Spectrophotometer
TOC **(mg/L)**	Calculé à partir de la matière organique
Matière organique dissoute volatile **(mg/L)**	NF EN 15169, Mai 2007. C'est la volatilisation de la matière organique résultant à un chauffage de 550°C/ Four à moufle type NABERTHERM

II.2.3 Préparation de l'inoculum

La préparation de l'inoculum a été réalisée à partir des souches bactériennes ou avec de la levure sur la gélose nutritive en tubes inclinés et conservés à 4°C vingt-quatre heures avant le test. Nous avons effectué des pré-cultures en bouillon nutritif à partir des souches conservées. Ces pré-cultures ont été incubées à 37°C.

II.2.4 Détermination de l'effet antifongique

L'effet des jus des composts C et CB sur la croissance des champignons a été étudié en se référant à la croissance mycélienne du champignon testé et en calculant le pourcentage d'inhibition. La méthode de diffusion en gélose a été pratiquée à des dilutions de 1/4 et 1/2. Le jus a été mélangé avec le milieu gélosé au dextrose et à la pomme de terre (Potato dextrose agar : PDA) et coulé dans des boîtes de Pétri. Un disque de champignon de 6 mm a été placé au milieu de la boîte. Le milieu PDA a été utilisé comme milieu témoin.

Les boîtes sont ensuite incubées à 25 °C pendant 3 à 5 jours. La mesure du diamètre moyen de la croissance des champignons est déterminée lorsque les filaments mycéliens atteignent la périphérie de la boîte dans les lots témoins. L'évaluation de l'inhibition exercée par l'extrait de compost a été estimée par le calcul du pourcentage d'inhibition de la croissance mycélienne, selon l'expression suivante (Hmouni et al., 2005) :

$$\textbf{Pourcentage d'inhibition (\%)} = \frac{D-d}{D} \times 100$$

Où D : le diamètre moyen (cm) de la croissance du champignon sur milieu témoin;
d : le diamètre moyen (cm) de la croissance du champignon sur milieu additionné du jus de compost

II.2.5 Détermination de l'effet antibactérien

L'effet des jus de composts sur la souche d'*Erwinia* a été évalué en se basant sur la méthode des puits. En premier lieu, le milieu King B solide a été mélangé avec 5 mL de la pré-culture de la souche, préalablement préparée, ensuite coulée dans une boîte de Pétri. Après refroidissement du milieu, des puits ont été percés et remplis par 50 µL de chaque jus de compost et finalement les boites sont incubés à 30°C pendant 48 heures. L'eau distillée stérile nous a servi comme témoin.

L'effet suppressif des jus a été déterminé par l'apparition d'un halo clair autour du puits, témoignant l'inhibition de la croissance de la souche bactérienne.



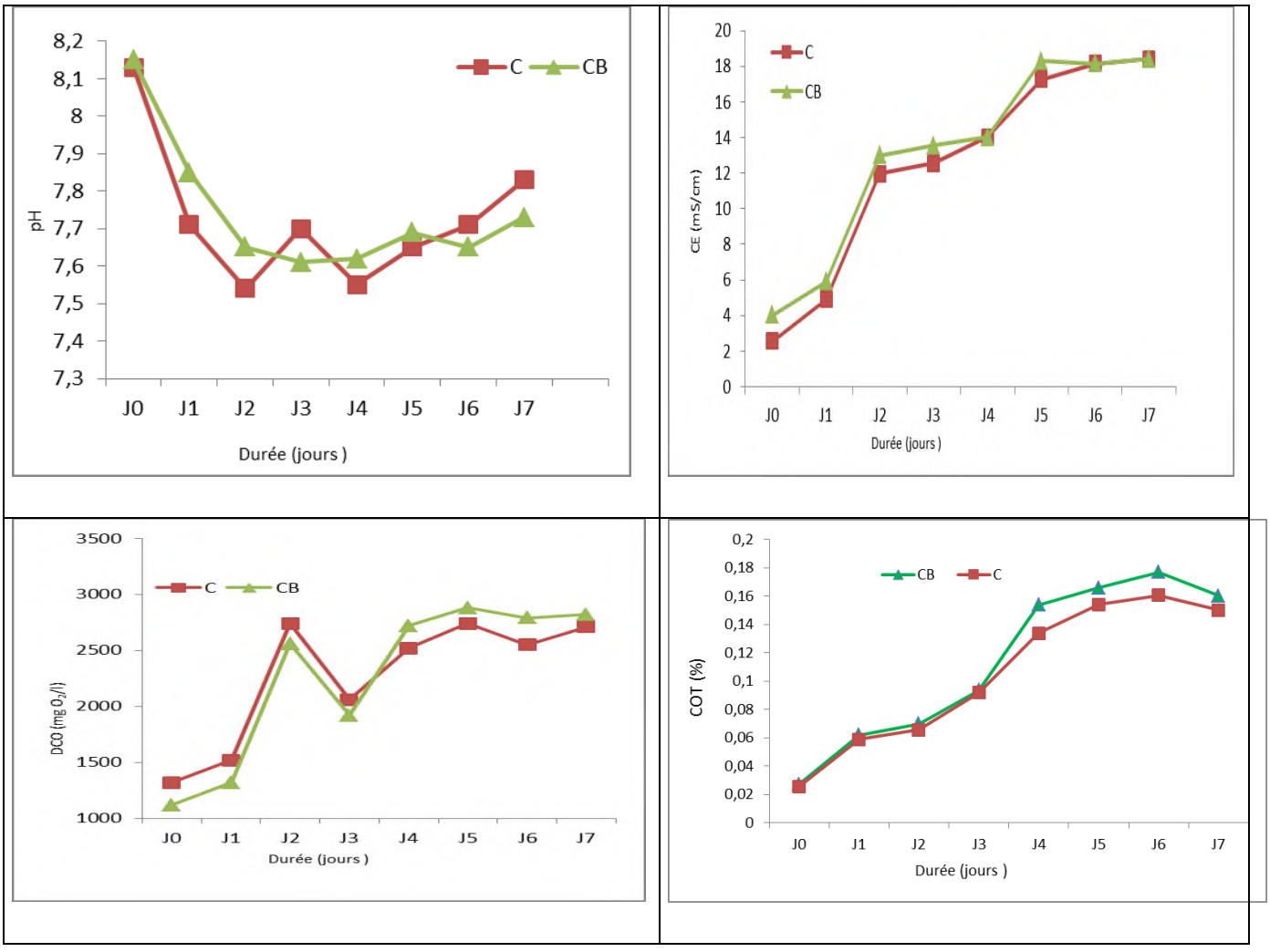
Figure 51: Technique des puits

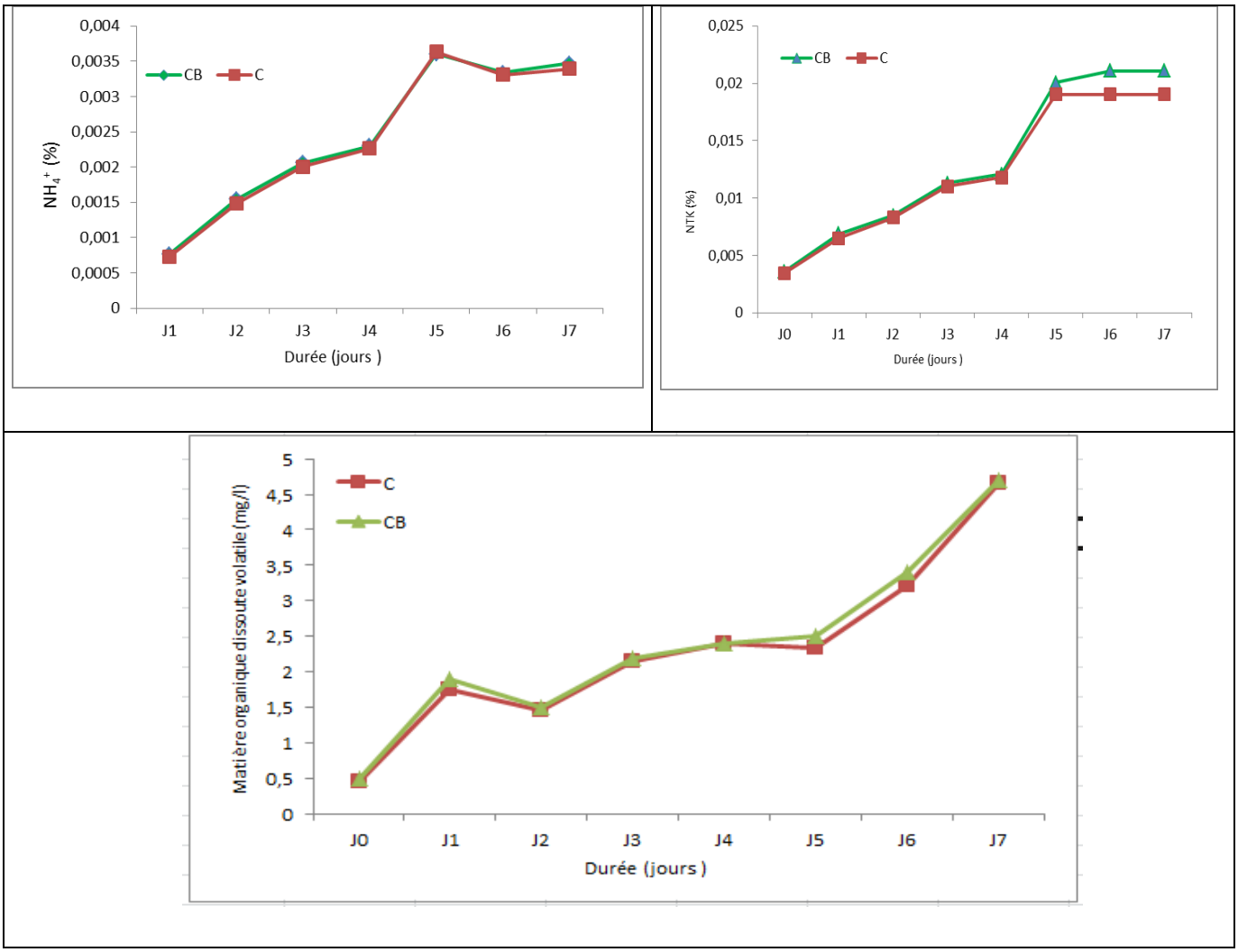
III. Evolution des caractéristiques physico-chimiques des jus de compost en fonction du temps

Deux séries des jus des composts ont été préparées afin d'étudier l'évolution de leurs paramètres physico-chimiques au cours de la fermentation. La Figure 52 récapitule les résultats de ce suivi au cours de la semaine de fermentation.

Les deux jus présentent des pH légèrement alcalins qui témoignent du métabolisme alcalin des micro-organismes. Pendant les deux premiers jours, le pH a diminué vers presque la neutralité puis il a légèrement augmenté à partir du 4ème jour jusqu'à des valeurs de 7, 74 et 7,88 successivement pour les composts CB et C au 7ème jour. Les jus de compost présentent une conductivité électrique et une salinité relativement élevées qui augmentent de la même façon au cours de la fermentation jusqu' au 5ème jour où elles se stabilisent à la même valeur de 18ms/cm. Ces extraits montrent des valeurs croissantes au cours du temps de la fermentation et qui atteignent au 7éme jour 1506 mg/L et 1601mg/L respectivement pour les composts C et CB.

Figure 52: Paramètres physico-chimiques des jus des composts C et CB en fonction du temps de leur fermentation





Le carbone organique total (COT) est de 1601 mg/L pour CB et 1501 mg/L pour le compost C, équivaut à 0,16 % et 0,15 % respectivement. Concernant la charge azotée et en matière organique, elles sont presque totalement relarguées dans les deux jus de composts avec une augmentation au cours du temps. Ce qui prouve que l'augmentation du temps de fermentation améliore la teneur de la matière organique dans un jus de compost. Une activité bactérienne est aussi affirmée par les teneurs croissantes de la demande chimique en oxygène (DCO) au cours de la fermentation et justifie aussi la minéralisation de l'azote qui s'est déroulée en même temps provoquant ainsi une augmentation du NH_4^+.

Les résultats obtenus, indiquent que les jus des composts C et CB sont qualifiés à être utilisés juste après le cinquième jour de la fermentation des composts car la plupart des paramètres se sont stabilisés. A cette date, les jus de compost s'avèrent être riches en microflore responsable de l'activité inhibitrice.

IV. Etude de l'effet antifongique des jus de composts C et CB

L'étude de l'activité antifongique des jus des composts préparés a été testée sur le champignon phytopatogène : *Fusarium oxysporum*. L'incorporation des jus de compost dans le milieu PDA a été traduite par une réduction importante de la croissance mycélienne de cette espèce de champignon. L'étude de ce phénomène a été réalisée par la technique de diffusion avec des jus des composts de 5 jours de fermentation. Ces mêmes jus de compost ont été renforcés par l'ajout de l'inoculum (Levure et bactérie). Le Tableau 32 présente le codage des jus de composts étudiés.

Tableau 32: Codage et composition des jus étudiés

Echantillon de compost	Echantillon de compost	Composition
1K (CB)	1-0-K	Jus de compost CB Sans inoculum
	1-B-K	Jus de compost CB + Inoculum de bactérie
	1-L-K	Jus de compost CB + Inoculum de levure
2K (C)	2-0-K	Jus de compost C, Sans inoculum
	2-B-K	Jus de compost C + Inoculum de bactérie
	2-L-K	Jus de compost C + Inoculum de levure

IV.1 Détermination du rapport d'inhibition

Les différentes combinaisons des jus des composts C et CB ont été incorporées séparément dans le milieu de culture (PDA) du pathogène.

Le pouvoir antifongique des jus des composts a été étudié in vitro vis-à-vis du *Fusarium*, son évaluation a été réalisée par le calcul du rapport d'inhibition de la croissance mycélienne du champignon phytopatogène en présence ou non du jus de compost. Les résultats sont illustrés sur la Figure 54 et ont révélé qu'il y a une inhibition de ce champignon pour toutes les combinaisons des jus testés comparativement au témoin qui n'a présenté aucun effet fongicide, quoique le taux d'inhibition varie de 33 à 70 % et dépend de la combinaison des jus.

Le jus de compost C avec inoculum levure (L) et celui du compost CB avec boues avec inoculum bactérien (B) témoignent des taux d'inhibitions supérieurs à 50%. Ils sont

respectivement de 69,5%, 58,72% et 50,5% et il est égal à 70% uniquement pour le jus du compost C sans inoculum. Ces résultats témoignent aussi d'une présence de différence significative entre le pouvoir fongicide et les combinaisons des jus.

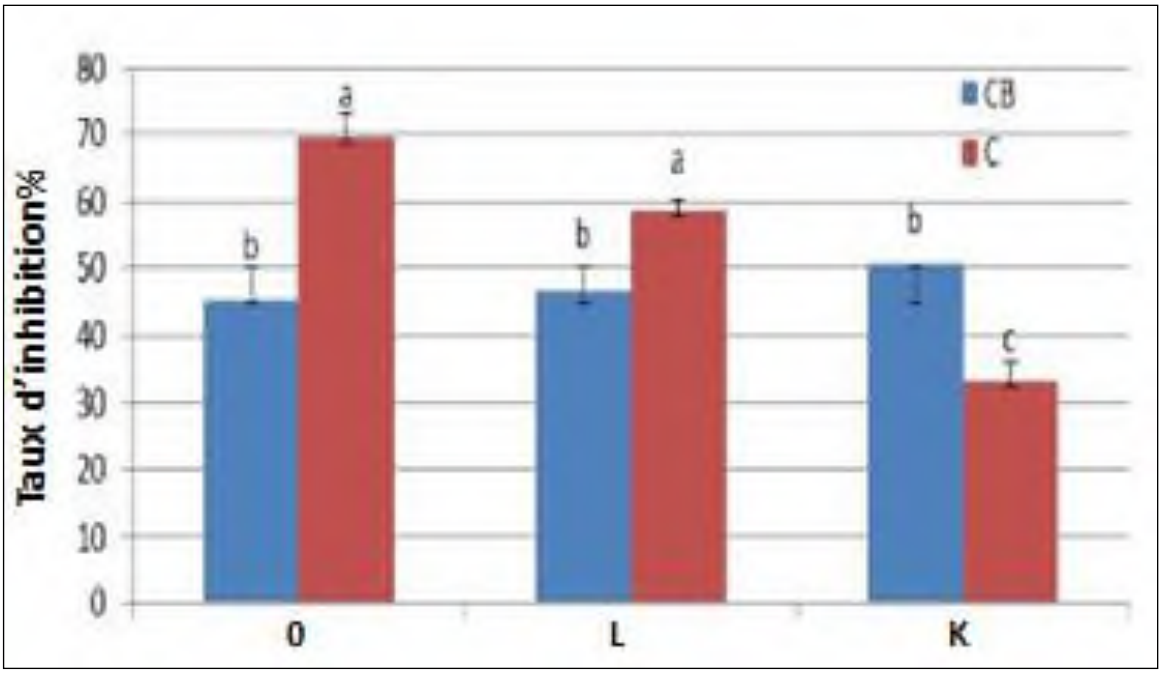


Figure 53: Activité Antifongique des Jus de Compost contre le Fusarium oxysporum

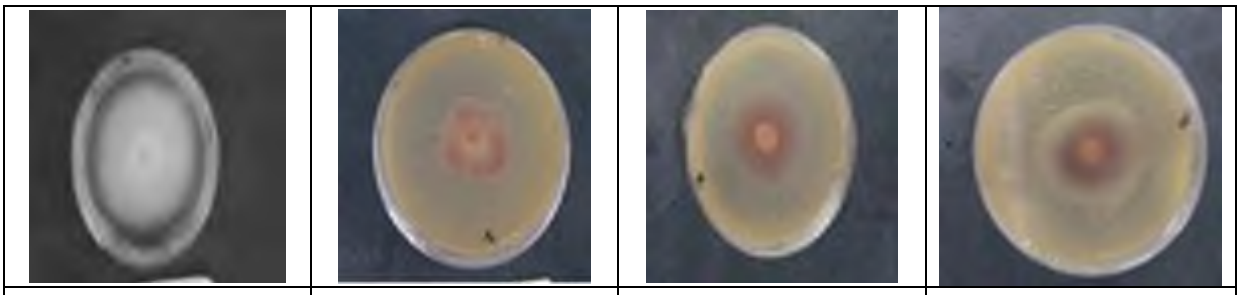
La comparaison entre les deux jus des composts montre que l'activité antifongique contre le *Fusarium oxysporum* a été améliorée avec l'ajout de l'inoculum pour le compost CB, qui n'est pas le cas pour le compost C. Ceci a démontré que le compost à boue (CB) a relargué des éléments indésirables dans le jus qui ont moyennement inhibé le pouvoir antifongique du margine, et elle ne s'est améliorée qu'en présence d'un inoculum bactérien.

Ces résultats vont dans le même sens que ceux de Lima et al. (2008) qui ont montré que le jus de compost à base des déchets de trituration des olives à une dose de 50 % (v/v) présente une inhibition de la croissance du *V. dahliae*, ou encore ceux de Wadii ABID (2018) qui a prouvé que son compost à base des margines et de déchets de palmier est pertinent contre la *Verticilliose* de l'olivier.

IV.2 Présentation de l'aspect de l'activité antifongique

La Figure 54 illustre l'aspect antifongique des jus des composts les plus apparents. Nous notons une inhibition de croissance du mycélium *de Fusarium Oxysporum* accompagnée d'un stress qui a été la cause de la sécrétion du pigment rouge.

L'activité antifongique témoigne de la présence des substances qui inhibent le développement et la croissance mycélienne du champignon. Ces facteurs influencent l'efficacité d'extraits de compost comme: La nature des matériaux de départ, les composts issus d'extraits d'animaux qui conservent plus longtemps leur activité que les composts d'origine uniquement végétale, le type de pathogène cible, la méthode de préparation du jus, le mode et la fréquence d'application de l'extrait, l'âge du compost et les conditions climatiques. Toutefois, l'efficacité du jus de compost pourrait être améliorée suite à une inoculation par des microbes bénéfiques.



Témoin	Compost C sans inoculant	Compost C + inoculant levure	Compost CB + inoculant bactérien

Figure 54: Les meilleures inhibitions du Fusarium Oxysporum des jus de composts C et CB

V. Etude du pouvoir antibactérien des jus des composts

V.1 Détermination de l'effet antibactérien

L'étude de l'activité antibactérienne des jus des composts a été effectuée sur la souche d'*Erwinia* avec les mêmes combinaisons des jus de composts (Tableau 32). Cette souche est capable d'infecter plus de 140 espèces végétales appartenant à 39 genres de la famille des rosacées.

L'étude a été traitée par la méthode des puits, qui montre la présence d'halos entourant les différents puits contenant les jus de compost par comparaison au puits témoin contenant de l'eau physiologique (Figure 56). Nous avons remarqué que les halos diffèrent par leur diamètre selon le jus.

L'analyse des résultats montre la présence des halos dans le cas des jus suivants : le jus de compost CB + inoculum de bactérie, jus de composts C sans inoculum et jus de composts CB+ inoculum de levure avec des diamètres variant de 1,2 cm à 1,7 cm. Le diamètre le plus grand a été marqué pour le jus de compost CB + inoculum de bactérie. Ceci dit que cette combinaison est la plus performante et que l'inoculation bactérienne a amélioré l'efficacité du compost à boues; prouvée par le fait que les molécules responsables de cette activité sont des protéines. De ces résultats, nous pouvons aussi déduire que le jus de compost à boues a un

pouvoir antifongique contre le *Fusarium oxysporum* plus fort que son pouvoir antibactérien contre l'*Ewinia*. Nos résultats corroborent avec ceux de Salma CHTOUROU (2014) qui a démontré le pouvoir antibactérien du jus de compost à base des boues de la STEP de Sfax contre le *Pseudomonas savastonoï.*



Figure 55: Effets des différents jus du compost sur l'Erwinia

V.2 Détermination du type de l'activité antibactérienne

Ce test consiste à repiquer les bactéries inhibitrices qui ont fait signe d'une activité antibactérienne contre l'*Erwinia* afin de reconfirmer son pouvoir antibactérien, tester sa puissance et voir s'il s'agit d'une activité extra ou intra cellulaire.

Après une incubation de 3 jours, les résultats du repiquage sur la Figure 56 attestent que le meilleur rayon d'inhibition a été remarqué pour le jus de compost CB + inoculum bactérien. Le pourcentage d'inhibition a été de 29,29% pour la bactérie du compost CB en présence de l'inoculum bactérien et 22,5% pour la bactérie du compost C sans inoculum. La 3ème bactérie du jus de compost C plus inoculum bactérien a perdu son activité antibactérienne ; le test dans son cas a été négatif. Comme nous pouvons aussi déduire de la Figure 57 que ces bactéries ont un pouvoir inhibiteur intracellulaire ; l'indicateur coloré n'a pas atteint l'intérieure des halos. Théoriquement, il s'agit d'une activité lipolytique des micro-organismes et leur capacité à produire et sécréter des *lipases* ou libérer de la *lyse* des bactéries (Intracellulaires). Finalement, nous pouvons conclure que les différentes sources de carbone présentes dans les constituants des composts pourraient influer de façon positive ou négative sur l'activité et la production *lipasique* (Kosugi*et al.*, 1988).

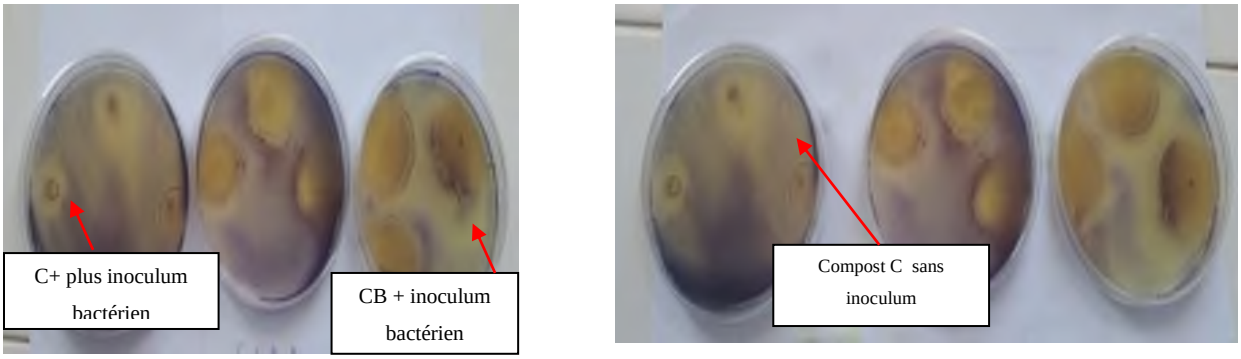


Figure 56: Activité antibactérienne des jus des composts C et CB sur l'*Erwinia* par la technique de confrontation

Conclusion

Les résultats de l'étude *in vitro* du pouvoir antifongique et antibactérien des extraits de composts C et CB sur le *Fusarium oxysporum et l'Erwinia* révèlent :

- Une inhibition de la croissance mycélienne du champignon du *Fusarium oxysporum qui* peut atteindre les 70%;
- Une sécrétion d'une couleur rouge résultant d'un stress mycélien du *Fusarium oxysporum ;*
- Une présence des halos signifiant un pouvoir antibactérien contre l'*Erwina* ;
- Une activité antiaérienne de type intracellulaire.

En effet, les jus des composts ont montré une inhibition des espèces phytopatogènes étudiées (*Fusarium oxysporum et Erwinia*) grâce à leur richesse en micro-organismes présents dans les composts et aux lipides qui pourraient avoir un effet inducteur ou inhibiteur sur la production et l'activité des *lipases* responsables de cette inhibition.

Ces résultats aussi obtenus confirment davantage le rôle capital de la valorisation des boues par filière de compostage et l'intérêt des produits matures dans l'agriculture en vue de protéger les cultures des maladies phytopatogènes. Ils peuvent en effet pallier à l'épineux problème de l'utilisation des produits chimiques (Engrais et pesticides) et réduire leur impact sur la santé et l'environnement, en plus, du bénéfice en termes du coût de revient des jus de composts en comparaison à ces produits.

Compte tenu, des résultats encourageants de l'étude de la possibilité de se débarrasser intégralement des boues des stations d'épuration des eaux usées en les valorisant en un produit stable : le compost, composé d'éléments fertilisants et présentant un pouvoir antibactérien et conforme à la norme française NFU 44-095, il s'est avéré judicieux d'estimer

son coût et sa place dans le marché et auprès des agriculteurs. Ceci fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE V : EVALUATION DU COÛT ET DE LA MISE EN MARCHÉ DU COMPOST À BOUES

Introduction

La valorisation des boues dans la filière de compostage avec les déchets ménagers pourrait être une technique prometteuse de leur traitement afin d'éviter leur stockage dans les décharges contrôlées ou leur épandage direct sur les terres agricoles qui étaient des solutions provisoires et montraient d'autres conséquences néfastes sur l'environnement.

La mise en place d'un tel procédé nécessite préalablement la réalisation d'une étude prouvant son intérêt économique, sa rentabilité et surtout l'existence d'une place sur le marché.

Nous nous attacherons ici à voir la rentabilité que la technique du compostage des boues de la STEP de la ville de Fès avec les déchets ménagers, et notamment les marchés existant pour les composts de façon générale et les techniques de commercialisation de ces composts auprès des agriculteurs, des jardiniers et des pépiniéristes, etc.

Pour l'atteinte de ces objectifs, une démarche méthodologique a été menée, reposant sur :

- La présentation du marché du compost, les expériences acquises ailleurs soit par d'autres pays, d'autres villes ou municipalités,
- La présentation des éléments contextuels et les connaissances nécessaires à la maîtrise des principaux enjeux de cette étude économique,
- La présentation des résultats de l'estimation du coût de revient du compost à boues, du marché de concurrence au quel il fera face et des enquêtes qui ont eu lieu pour palper le marché des produits agricoles ou des intrants agricoles et la formulation d'un business model propre à la production du compost à boues.

I. Marché du compost

Faire du compost à partir des déchets biodégradables permet de résoudre, au moins partiellement, les problèmes liés à leur gestion (Pollution olfactive, pollution de la nappe phréatique du fait des écoulements de la masse de matière en fermentation, incendies liés à la production de méthane par fermentation,…) et/ou remédier à l'appauvrissement des sols par le biais de la mise en disponibilité d'un amendement organique ou un engrais organique pour une production agricole améliorée et un sol meilleur.

De ce fait, dans les années à venir, à la grandeur du monde entier, des centaines de milliers de tonnes de compost seront produites. Pour cela, ce compost devra trouver preneur comme le rapporte Alexander dans son livre publier en 2010.

The Practical Guide To Compost Marketing And Sales, publié en 2010, présente le marketing du compost comme une situation particulière, car elle constitue l'opposé d'un marché traditionnel basé sur l'offre et la demande. En effet, « Le marché du compost évolue selon de fausses conditions: On ne produira pas du compost parce qu'un besoin est présent mais on le produit en voulant valoriser la matière organique des déchets. A cet effet, on doit créer un produit pour lequel une demande doit être développée et ceci constitue l'essentiel de la difficulté » (Alexander ; 2010). En plus, pour le marché du compost, il ne faut se lancer dans sa mise en vente et sa production sans s'assurer au préalable d'un débouché stable. En effet, l'équilibre financier des unités de compostage ne peut espérer être atteint que si le compost peut se vendre en quantité et à un coût suffisants et satisfaisants.

En Europe, aux États-Unis et au Canada, le compost se vend sur deux marchés différents. Sur le premier, **le marché de volume**, le compost est écoulé en très grandes quantités, mais les acheteurs payeront un prix par unité plus bas. Ce compost est employé pour des usages non spécialisés. Le compost est souvent jugé de moins bonne qualité parce qu'il est soit immature, contient des matières indésirables visibles, des concentrations en métaux ou en pathogènes par exemple qui dépassent les limites de la première qualité de compost. *(Recyc-Québec, 2006, p.69).* Le deuxième marché est **le marché de valeur ;** les exigences des consommateurs, en regard de la qualité, sont très strictes. Le compost qui y est écoulé peut être utilisé sans restriction. Par exemple, selon le Guide propre à la valorisation des matières fertilisantes, le compost certifié et utilisé selon un mode d'emploi bien prescrit, ne requiert pas de certification d'autorisation du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) avant d'être épandu en milieu agricole (Hébert,

2008). Le prix à la tonne est suffisamment élevé pour générer un profit. Par contre, le marché est plus restreint.

Le Tableau 33 présente les divers domaines d'utilisation du compost propres aux marchés de volume et de valeur.

Tableau 33: Marchés de volume et de valeur pour le compos *(Recyc-Québec;2006)*

Marché de volume	Marché de valeur
Agriculture	Agriculture biologique
Sylviculture	Aménagement paysager
Gazon en plaque	Golf et terrains sportifs
Restauration des sites dégradés	Terreaux (Sacs)
Emprises de routes	Pépinière
Terreaux (Vrac)	Jardiniers amateurs
Entrepreneurs en construction	Serre
Recouvrement journalier (Sites d'enfouissement)	Vente au détail
Biofiltre	-
Espaces verts (Parcs)	-

Sur ces divers marchés, le compost se vend sous deux formes : en vrac et en sacs. En 2008, la quantité de compost donné ou vendu s'élevait à 386 323 tonnes, soit 73 % en vrac et 27 % en sacs (Taillefer, 2010).

Au Maroc, la production régulière du compost est très limitée voire inexistante. En effet, il y a eu des expériences menées à l'échelle pilote dans des structures de recherche dans le cadre du développement du pays et chez des particuliers. De plus, certaines tentatives de compostage par des industriels ont vu le jour ces dernières années, notamment dans les villes d'El Jadida, de Marrakech et Meknès, sauf que ces actions sont timides et leurs produits sont commercialisés à l'échelle nationale et d'une façon très limitée. Pour cela, dans la présente étude, nous nous sommes fixés l'objectif d'étudier les différences de ce produit par rapport au marché: l'estimation approximative de son coût de revient, l'évaluation du marché de la concurrence, l'étude des causes de son absence sur le marché pour pouvoir proposer un plan

de commercialisation afin de lui créer une clientèle fidèle, régulière et aussi lui trouver une place sur le marché des produits agricoles.

II. Approche Méthodologique

Les techniques utilisées pour calculer le coût de revient, disposer de l'information notamment du questionnaire et sa conception, calculer la taille de l'échantillon en vue de se rapprocher de la problématique posée et d'atteindre les résultats réalistes sont présentées ci-dessous.

II.1 Coût de revient

Le **coût de revient** correspond à l'ensemble des coûts directs et indirects, fixes et variables, de production et de distribution pour une unité de bien ou de service vendus.

La connaissance du coût de revient est quasiment indispensable pour que nous puissions chiffrer correctement les devis émis aux clients et aux prospects. En effet, le chiffre d'affaires budgété doit permettre de couvrir toutes les dépenses à engager et de générer du bénéfice, de travailler sur le produit en question en déterminant les éléments qui le définissent. Le but de cette opération est d'améliorer et de diminuer ce coût, prendre des décisions quant à sa stratégie commerciale : fixation du prix de vente, choix des fournisseurs et établissement des prévisions et des budgets pour piloter au mieux son activité économique et de production.

Pour notre cas, le coût de revient a été calculé de façon classique, en se référant aux règles de la comptabilité analytique tout en évaluant le coût total du produit, la somme des charges directes et indirectes que l'on peut affecter.

Coût de revient = coûts d'achat et d'approvisionnement + coûts de production + coûts de distribution + coûts administratifs

- **Les coûts d'achat** représentent toutes les charges liées à l'achat des matières premières ou à l'achat des marchandises jointes à la production du produit.

- **Les coûts de production** représentent toutes les charges liées aux frais de fabrication du produit : Salaires et charges sociales des ouvriers, sous-traitance éventuellement.
- **Les coûts de distribution** correspondent aux charges de commercialisation du produit : Ils incluent les commissions des vendeurs, les frais de prospection, les frais de publicité, etc.

- **Les coûts administratifs** représentent les charges liées aux « Services supports » dans l'entreprise : Les salaires du personnel administratif, toutes les dépenses fixes telles que le loyer, l'électricité ainsi que l'amortissement des machines et des outils.

II.2 Etude transversale du marché de compost

Il s'agit d'une enquête transversale simple à visée descriptive et analytique que nous avons menée sur une population bien définie dans le but d'étudier de près le marché du compost et insérer le nôtre.

II.2.1 Lieux de l'étude

C'est le lieu où s'est déroulé l'étude ou/et l'enquête. Dans notre cas, nous avons ciblé les lieux régionaux qui peuvent regrouper le maximum de personnes intéressées par l'activité agricole, le jardinage, les espaces verts à savoir :

- Le Salon International de l'Agriculture au Maroc (SIAM) dans sa 13ème édition du 24 au 28 avril 2018,
- Les pépinières de la ville,
- Les vendeurs des produits agricoles,
- Les jardins de la ville de Fès et la région.
- Les rencontres avec les agriculteurs

II.2.2 Population étudiée

On doit définir la population cible tôt durant le processus de conception de l'enquête. Il s'agit de la population pour laquelle on a besoin d'informations de la quelle, il faut soustraire les personne qui refusent répondre au questionnaire; appelée la population observée.

Dans notre cas, la population cible de notre enquête a été composée de tous les candidats présents sur nos lieux d'études et toutes les personnes intéressées par le type de notre produit :

- Les agriculteurs visiteurs du Salon International de l'Agriculture,
- Les autres visiteurs du salon International de l'Agriculture au Maroc : Autorités, décideurs, les associations, autres, ….
- Les agriculteurs de la région
- Les jardiniers
- Les pépiniéristes,

- Les vendeurs des produits agricoles.

Tandis que la population observée pourrait exclure les personnes qui refusaient la participation à notre questionnaire ou ne sont pas du domaine.

II.2.3 Taille de l'échantillon

La détermination de la taille d'échantillon et le calcul d'une proportion sont très importants dans le cadre d'une étude de marché du fait des proportions obtenues, par le biais du sondage ou de l'enquête, des décisions importantes sont prises. En effet, la fiabilité des données n'est jamais absolue, mais se situe plutôt dans un intervalle de confiance. Plus la taille de l'échantillon est grande, plus l'intervalle est étroit et plus la marge d'erreur est petite. La taille de l'échantillon est déterminée par:

$$n = (z)^2 p (1 – p) / d^2$$

n = Taille de l'échantillon

z = Niveau de confiance selon la loi normale centrée réduite

Pour un niveau de confiance de 95%, z = 1.96,

Pour un niveau de confiance de 99%, z = 2.575)

p = Proportion estimée de la population, (On utilise p = 0.5)

d = Marge d'erreur tolérée (Par exemple on veut connaître la proportion réelle à 5% près)

II.2.4 Conception du questionnaire

Le questionnaire a été établi pour identifier l'intérêt que peut porter le client à notre concept et aider à développer le projet via les réponses aux questions posées.

Notre questionnaire est conçu sur la base de l'échelle de Likert. « Cette *échelle d'évaluation est très répandue. Selon cette échelle les répondants doivent indiquer le degré de leurs accord ou désaccord directe avec chaque proposition.*» (Malhotra, N. et al, 2011, p. 212). Des échelles nominales et ordinales ont été également utilisées pour connaître le profil des répondants et de les classer en fonction de leurs caractéristiques (Par exemple, le nombre de hectares cultivés, leur profession et leur types de cultures) avant d'opérationnaliser l'enquête.

Une phase préalable a précédé le questionnaire final : Il s'agit d'un pré-test qui a porté sur un mini échantillon de dix personnes dont le but d'identifier les problèmes éventuels du

questionnaire. Etant donné que les personnes n'ont pas notifié d'anomalies ou de problèmes spécifiques, le questionnaire a été rendu public. Il a été distribué au cours du salon international d'agriculture de Meknès (SIAM) du 24 au 28 avril 2018, au cours des tournés sur le terrain et des interviews ont eu lieu avec les agriculteurs, à la direction régionale d'agriculture (DRA) et la direction provincial d'agriculture (DPA) ou lors des réunions menées avec les associations des agriculteurs. Le choix a porté sur ces sites car les personnes cibles sont supposées être actives sur ce type de manifestation. De plus, le salon international d'agriculture de Meknès permet d'embrasser un grand nombre d'agriculteurs et des personnes intéressées par l'agriculture de manière aléatoire et anonyme. Cet évènement s'est avéré donc être le meilleur moyen pour obtenir un large éventail de réponses issues de profils différents.

II.2.5 Recueil des données

Toutes les 326 réponses ont été obtenues, un échantillon très représentatif dans ce genre d'étude. Selon Malhotra, N., et al (2011) « Un échantillon représentatif compte en général entre 200 et 400 sujets» (Malhotra, N. et al. 2011). Toutes les réponses ont été saisies et traitées via le logiciel Statistical Package for the Social Sciences (SPSS).

Etant donné que la première question était une question filtre, les répondants ont été dirigés dès le départ vers onsommateurs ou non consommateurs du compost.

Les questions regroupent comme informations générales (Le type d'activité agricole, le type d'amendement, le type de culture,..,). Pour le cas des non-consommateurs, des données sur l'amendement : Son prix, son traitement…. Et dans le cas des consommateurs des questions sur le compost : Son prix d'achat, sa marque, ses attentes envers son utilisation, son conditionnement, les points de sa vente,…

II.2.6 Analyse statistique

Les données des questionnaires ont été traitées, codées, saisies, et validées statistiquement par le logiciel SPSS puisque les données sont, constituées par un ensemble d'individus pour lesquels nous disposons de plusieurs variables structurées en groupes. Il est important de préciser que dans notre base de données SPSS, les lignes correspondent au nombre de réponses récoltées et donc au nombre d'individus. Quant aux colonnes, elles correspondent aux variables qui sont reprises dans chacune des questions. En outre, il est à préciser que très peu d'individus, ont omis de répondre à un certain nombre de questions et afin d'éviter d'avoir des non réponses qui pourraient biaiser les analyses, les données manquantes ont été remplacées par la médiane de la variable concernée.

II.2.7 Analyse de la variance (ANOVA)

L'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée pour comparer la variance des groupes afin d'inférer une relation entre eux, permettant de rejeter ou non l'hypothèse nulle et donc de prendre une décision quant à la valeur de cette hypothèse (Significatif ou non ?).

Avant de procéder à une analyse de la variance, il a fallu formuler les hypothèses statistiques (H0 et H1). Dans notre cas, l'hypothèse H0 était le prix du compost et H1 toutes les hypothèses suggérées. Le choix de l'hypothèse prix du compost a été basé sur son importance auprès de la clientèle cible qui, comme tout investisseur, cherche à se procurer la matière première à moindre coût. Le but de cette analyse est donc d'étudier la signification du prix de compost avec les sous- hypothèses suggérées et renforcer les résultats de l'étude empirique (Questionnaire).

III. Etude du coût de revient et du marché de concurrence du compost à boues

III.1 Estimation du coût de revient du compost élaboré à l'échelle semi industrielle

Le coût de production calculé concerne les 28 tonnes de compost produit à l'échelle semi industrielle et qui a été lancé à partir de 70 tonnes de déchets. Le Tableau 34 détaille le coût de revient du compost élaboré avec toutes les charges directes et indirectes supportées par notre équipe.

Le calcul montre que le coût des matières premières ne représente que 10,41% du coût de production du produit. Les boues et les margines sont généralement des déchets que la régie autonome paye pour leur mise en décharge ou leur traitement, donc leur procuration était gratuite. Les déchets verts aussi sont un fardeau pour les municipalités donc leur valorisation s'avère une bonne solution pour s'en débarrasser. Les fientes de volailles est le seul déchet qui peut être acheté actuellement vu que c'est un déchet plus ou moins demandé par les agriculteurs qui l'utilisent comme un amendement de fond ou les éleveurs de bétails qui l'utilisent illégalement pour nourrir les élevages.

Tableau 34: Evaluation du coût de revient

	Quantité	Prix unitaire (Dh)	Montant
Charges Directes			9850
Matières premières			1650
Boues	30 tonnes	0 DH	0
Déchets Verts	30 tonnes	0 DH	0
Fientes de Volailles	12 tonnes	75 DHs/ tonne	900
Margines	12 tonnes	0 DH	0
Sacs d'emballages	300 sacs de 50 Kg	2,5 DHs/sac	750
Main d'œuvre directe			8200
Tri	3 ouvriers pour 15jours	100 DHs/ ouvrier	3000
Retournement	1/semaine/4mois	200 DHs/retournement	3200
Humidification	16 fois/ 4 Mois	100 DHs/ fois	1600
Emballage	2 ouvriers/2 jours	100 DHs/ ouvrier/ jour	400
Charges indirectes			6000
Conditionnement	Frais de location du terrain Frais de location du dépôt		0
Transport et chargement	4 voyages	200 DHs/ voyage (10 tonnes)	800
Mise en andain	2 andains/2 ouvriers /1jour	100 DHs/2 ouvriers	200
Laboratoire	Frais des analyses du suivi de compost		5000
Coût de production	Somme des Charges indirectes et directes		15850
Frais d'administration	10% du coût de production		1585
Coût de revient des 25 tonnes de compost élaboré	Somme du coût de production + frais d'administratifs		17435
Coût de revient d'une tonne de compost			622,68
Coût de revient d'un sac de 50 Kg de compost			31,13

La somme la plus importante dans la production du compost est celle de la main d'œuvre indirecte, elle s'élève à 8250 DHs pour les 28 tonnes de compost élaboré ce qui représente 51,73% du coût de production. Ceci est dû à :

- La nature des déchets ménagers reçus et qui ont nécessité un tri.
- Le retournement et l'humidification

Les charges indirectes dans notre cas ont été des frais de logistique et ont représenté 37 % du coût de production, le pourcentage est plus ou moins tolérable et s'élève à 15850 DHs/ 28 tonnes.

Pour calculer le coût de revient final du produit, nous avons dû limiter les frais administratifs. Pour ce faire, nous nous sommes fiés à une recherche bibliographique où la majorité des études l'ont fixé à 10% du coût de production, ce qui conduit à un coût de

revient de 17435 DHs/ 28 tonnes équivaut à **622,28 DHs/ tonne** et à 31, 13 DHs/ par sacs de 50Kg de compost et presque 0,62 DH/kg

Le prix de vente communiqué actuellement sur le marché du compost est de 60 DHs le sac de 50 Kg et 1200 à 1600 DHs/tonne. Avec une taxe sur la valeur ajoutée (TVA) de 20% son prix hors taxe est estimé à 1000 DH/tonne, ce qui fait que la marge unitaire obtenue après calcul dans notre cas est un peu plus supérieure que la moitié du coût de revient (avec 350 DHs/tonne).

En guise de conclusion, la production du compost à boues pourrait être très coûteuse si on tient compte du prix des déchets, du personnel, des frais d'analyse et autre charges (Local, eau, électricité…). Pour notre cas, nous avons obtenu une rentabilité de production du compost à boues que grâce aux conventions et aux conditions de travail qui nous ont été mises à notre disposition. Et donc nous recommandons aux autorités locales et responsables de la STEP que la réussite de son application est tributaire des conditions suivantes :

- Fixer un prix de vente des boues.
- Avoir un site de production in situ la STEP ou créer un site à la décharge contrôlée
- Promouvoir le tri à la source,
- Réaliser un réseau d'assainissement séparé et propre à la collecte des margines à la sortie des unités de trituration,
- Faire des conventions et des partenariats avec les organismes concernés (l'Universités, Régie Autonome intercommunale de Distribution d'Eau et d'Electricité de Fès (RADEEF), la société de gestion des déchets de la ville de Fès (OZONE), la direction régionale d'agriculture (DRA), l'Office National de Sécurité Sanitaire des produits Alimentaires (ONSSA), l'Office National du Conseil Agricole (ONCA), la Direction Provinciale de l'Agriculture (DPA).
- Impliquer les acteurs concernés comme, le Ministère de l'Environnement, le Ministère de Transport et de Logistique, …
- Sensibiliser la population, les établissements et les industriels au tri à la source.

III.2 Evaluation du marché concurrent au Maroc

Le compost est jusqu'à l'heure actuelle un produit peu connu sur le marché des intrants agricoles au Maroc, le tableau 35 représente les producteurs leadeurs nationaux actuels.

Tableau 35: Analyse de la concurrence du marché de compost

Concurrents	Présentation de la société	Caractéristiques du produit	Produits
AGRIFERTIL	C'est une société installée à EL Jadida depuis 1993 dans la zone industrielle, pour la fabrication des fertilisants liquides et du compost « BIOFERTIL». **Production :** Durée 4 mois. Le taux de production est d'environ 10000 tonnes/an **Prix :** 60 DHs/50 Kg de matière sèche. 	**Le Biofertil** : Compost produit à partir des marcs de café et de fumier. **Conditionnement :** Sacs de 50 Kg.	
Eléphants vert	Une société installée à Meknès depuis 25 ans, et 2 autres nouvelles à Berkane et Sousse. Eléphants vert produit environ 60000 tonnes / an des bio-engrais (composts) et 120000 tonnes / an des pesticides BIO. Le prix de compost chez eux varie entre 40 à 70 DHs / Kg et dépend du type de compost et sa matière première	**FERTINOVA** est biofertilisant riche en matière organique, en éléments nutritifs NPK et en oligo-éléments d'origine naturelle. **Composition :** Azote (N) 4%, Anhydride phosphorique (P_2O_5) 3%, Oxyde de potassium (K_2O) 3%, Oligo-éléments (Fe, B, Ze, Mo...) 1%, Matière organique Sup. à 25% C/N 8 à 12%, Humidité 20% **Conditionnement** : sacs de 50 Kg ou 25 Kg.	

BioDEch s.a.r.l « L'GHBAR ».	Une entreprise installée à Marrakech, crée en 2012 d'un capital de 80 000 DH et un chiffre d'affaire inférieur à 1,000,000 DHs, elle produit du compost appelé L'GHBAR. Biodech est à l'origine de 4 brevets Marocains qui traitent tous de la problématique de la gestion et la valorisation des déchets.	**L'GHBAR** : Un compost produit à base des déchets ménagers, des déchets verts et des écumes produites par les sucreries nationales. **Conditionnement**: Des sacs de 50 Kg ou en vrac.	
Naturactive naturactive HIGH QUALITY COMPOST	Une société localisée à Doukkala-Abdaa à Sidi Smaïl. NaturActive propose un compost organique entièrement naturel (N'ayant subi aucun traitement chimique ni ajout d'engrais chimique) Elle restitue une fumure traditionnelle de qualité qui constitue un engrais homogène à haute valeur nutritionnelle, répondant aux normes qualitatives des engrais BIO.Le prix de vente est de 60 DHs/50 kg	**NaturActive**: Un compost produit à partir du fumier et des produits naturels. **Conditionnement :** Un sac de 50 Kg. ou en vrac; **Composition***:* Matière organique (MO) 30%, Teneur en azote (N) 1,5%, Rapport carbone/azote (C/N) 12, Humidité 30-40%, Conductivité électrique : 3-4 ms/cm, pH= 7	
Bio-Compost (Brahim Zniber) BIO-COMPOST Brahim Zniber	Créé par le groupe Zniber en 2004, à Meknès avec un effectif entre 20 et 50 employeurs, un chiffre d'affaire de 10,000,000 à 50,000,000 DHs, un capital 100 000 DHs, une superficie de 25.000 m² et a une capacité de production de 10.000 tonnes annuellement et un prix de 50 à 60 DHs/ 50 Kg Le compost produit est conforme aux exigences d'une agriculture saine et durable.	Le Bio-Compost : est un compost produit à base des sous-produits des unités de production agricoles et des industries agroalimentaires du groupe, tels que les bois de taille, les marcs de raisins, ainsi que les grignons d'olive. **Conditionnement :** du Bio- Compost se présente sous forme de sac de 50kg.	
COMPOSTING MOROCOMP composting MOROCOMP	C'est un projet sur la fabrication du compost. cofinancé par le programme Life-Pays-Tiers de l'Union Européenne et l'Université Chouaib Doukkali, **Production :** durée 35 à 40 jours **Prix :** Le prix de vente est de 90 DHs/50 Kg de matière sèche.	L**e** compost MOROCOMP est produit à partir de boues d'épuration des eaux usées et de déchets organiques biodégradables (DOB). **Conditionnement :** Le compost MOROCOMP se présente sous forme de sac de 50 Kg.	

L'analyse des producteurs des composts sur le marché permet de constater que la majorité des sociétés leaders dans le domaine du compostage sont Flocalisées à El Jadida ou Meknès. Cette localisation limite sa distribution dans toutes les régions du royaume. Il est à signaler que malgré l'expérience des sociétés comme Eléphant Vert, Brahim Zniber et **AGRIFERTIL** dans le domaine de fertilisants, le compost est un produit qui n'a commencé à prendre sa place sur le marché des produits agricoles au Maroc qu'à partir de l'année 2002. De plus, sa production est toujours non régulière. De même, le prix actuel de ce dernier reste un peu élevé par rapport aux engrais chimiques et au-dessous des moyens d'un simple agriculteur qui utilise le fumier de son élevage (Produit gratuit). Tous ces problèmes sont donc les raisons pour lesquels le compost demeure encore un produit qui a une faible place sur le marché des produits agricoles.

IV. Analyse des résultats de l'étude empirique

L'analyse des résultats obtenus a été basée sur les données recensées à travers le questionnaire dédié à l'évaluation de l'intérêt des agriculteurs consommateurs ou non du compost à boues.

Les questions destinées au consommateur sont :

- Devrait-on faire passer de l'idée d'un compost, à base des boues de la station d'épuration de Fès et des déchets de la région, du laboratoire à l'industrialisation?
- Si oui, comment pouvons-nous assurer sa commercialisation et sa réussite sur le marché»?

Les hypothèses mises en œuvre sont :

- Cas des consommateurs du compost : Le type de la clientèle d'un compost, les raisons de son utilisation, l'évaluation de son marché,…
- Cas des non consommateurs : Le type et les critères de l'amendement choisi, l'évaluation de la stratégie marketing des amendements concurrents, l'appréciation du compost à bases des boues chez la clientèle cible et la mise au point d'un plan commercial.

IV.1 Analyse des hypothèses : cas des consommateurs du compost

Dans cette partie, 5 hypothèses (Hi) ont été analysées pour les consommateurs du «Compost». Le questionnaire 1 (Annexe 1) se compose de 11 questions qui ont été traitées dans le but de mieux comprendre et évaluer les faiblesses de la stratégie de commercialisation actuelle du compost et comprendre les raisons de son absence sur le marché.

Les hypothèses prétendues sont :

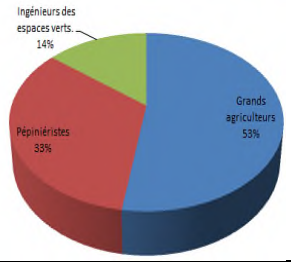
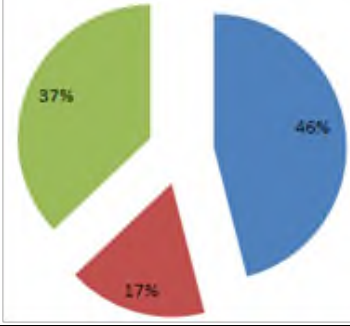
- Type de la clientèle du compost
- Performance du marketing
- Utilisation du compost
- Evaluation du marché de compost

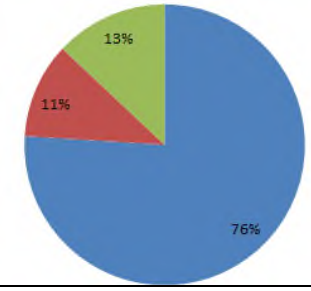
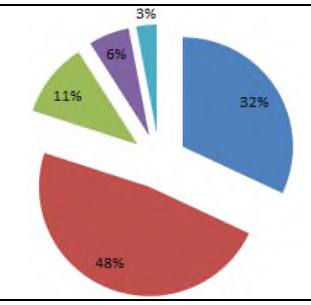
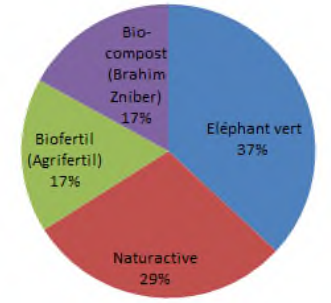
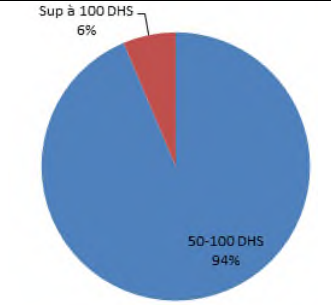
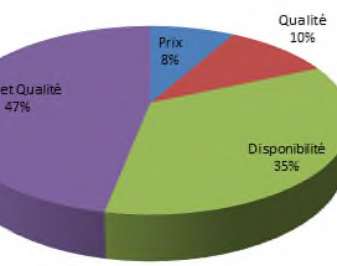
Les résultats de l'enquête sont illustrés dans le tableau 36 et montrent que :

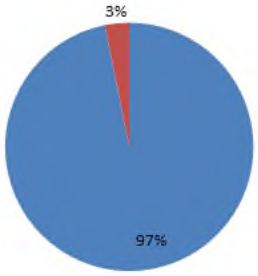
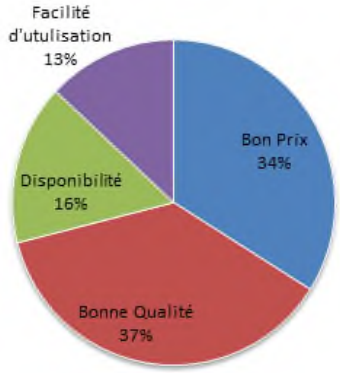
H_1 : Type de la clientèle du compost

Seulement 63/326 étaient des utilisateurs du compost, dont 53% sont de grands agriculteurs, 33% des pépiniéristes et 14% des ingénieurs des espaces verts. Le compost est utilisé juste chez une catégorie très spécifique, à savoir celle : des grands agriculteurs qui ont l'expérience et les moyens de se l'offrir, des pépiniéristes dont le-domaine exige la perfection et l'aspect ou des ingénieurs des espaces verts grâce à leur niveau de connaissance.

Tableau 36: Résultats de l'enquête réalisée sur les consomateurs du compost

Hypothèses	Variables	Résultats	Présentation graphique
H_1 : Type de la clientèle du compost	Activité des acheteurs – Grands agriculteurs – Pépiniéristes – Ingénieurs des espaces verts	33(52,38) 21(33,33) 9(14,29)	 Utilisateurs du compost
H_2 : Performance du marketing	Flux de communication – Bouche à oreilles – Autres	34 (54, 97) 29 (46, 03)	 Flux de communication actuel du compost
	Raison d'absence sur le marché – Manque de communication – Prix élevé – Disponibilité sur le marché	29 (46, 03) 23 (36,51) 11 (17,46)	

			Raison d'absence sur le marché
H_3 : Utilisation du compost	Raisons d'utilisation – Amélioration du rendement, du calibre et du sol – Amélioration du rendement et calibre – Amélioration du sol	48 (76,19) 8 (12,7) 7 (11,11)	 Raisons d'utilisation du compost
	Type de cultures –Maraichages –Arboricultures –Légumineuses –Viticultures –Gazon	20 (31,75) 30 (47,62) 7 (11,11) 4 (6,35) 2 (3,17)	 Cultures amendées par le compost
H_4 : Evaluation du marché de compost	Marques du compost – Eléphant vert – Naturactive – Biofertil (Agrifertil) – Bio- compost (Brahim Zniber)	24 (38,1) 17 (26,9) 11 (17,5) 11 (17,5)	 Marques du compost utilisées
	Prix d'un sac de 50 Kg – 50-100 DHs – > 100 DHs	59 (93,65) 4 (6,35)	 Prix du compost commercialisé
	Critères de choix – Prix – Qualité – Disponibilité – Prix et Qualité	5 (7,94) 6 (9,52) 22 (34,92) 30 (47,62)	 Critères déterminant le choix du

			compost acheté
H_5 : Volonté d'achat du compost à boues	Engagement d'achat du compost à boue – Oui – Non	61 (96,83) 2 (3,17)	 Engagement d'achat du compost à boues
	Attentes de la clientèle – Bon prix – Bonne qualité – Disponibilité – Facilité d'utilisation	21 (33 ,33) 23 (36,5) 10 (15,87) 8 (12 ,7)	 Attentes de la clientèle du compost à boues

H_2 : Performance du marketing

La mesure de la performance du marketing adaptée par les concurrents producteurs du compost a expliqué l'absence du compost dans le marché des intrants agricoles et a prouvé que 46% de ses utilisateurs l'ont connu par le bouche à bouche et 54% étaient soit des expériences gratuites, soit des journées organisées entre agriculteurs. C'est un produit qui manque de publicité. Ils ont également confirmé qu'il y a une absence de formation et de sensibilisation sur le produit : ses avantages, son mode d'utilisation, etc. Seuls 37% des répondants ont trouvé que le prix est très élevé pour se permettre de l'utiliser. Ils ont aussi affirmé que le compost n'est pas très disponible régulièrement sur le marché. Il y a donc une absence d'un plan d'action commerciale en adéquation avec les exigences du milieu dans lequel le compost est produit et est destiné à utilisation. Quel produit offrir ? Quel type de communication? Quel canal de distribution à suivre ? etc.

H3 : Utilisation du compost

Pour la question relative aux raisons d'utilisation du compost, les consommateurs du produit ont répondu chacun en fonction de sa profession. 76 % ont déclaré avoir opté pour le compost afin d'améliorer le rendement, le calibre et le sol, 13% ont témoigné l'avoir choisi dans le but d'améliorer le rendement et le calibre, cas des agriculteurs. Les 11% restant ont confirmé leur préférence pour l'amélioration des sols, cas des pépiniéristes ou des ingénieurs des espaces verts.

Ceci dit que les consommateurs actuels du compost sont conscients de son rôle et des bénéfices qu'ils peuvent tirer suite à son utilisation.

Le compost était utilisé surtout pour les arboricultures coûteuses comme par exemple : l'avocat, les bananes, les fraises, …, les viticultures et les maraichages dont le rendement est grand et bénéfique tels que la pomme de terre, les poivres,…, ou encore les légumineuses dont les récoltes sont rentables. Il est aussi utilisé pour le gazon dans les grands jardins et terrains.

Cependant, la majorité des participants ont répondu non à l'utilisation d'un autre type d'amendement autre que le fumier, la tourbe ou le compost. Juste 9% des participants témoigné avoir amendé très peu de fois par les fientes de volailles pour l'amélioration de la teneur en azote de leurs sols. Ils ont aussi signalé qu'il y avait une expérience d'épandage directe des boues après leur séchage à l'air libre**.** Ces expériences démontrent que l'agriculteur marocain est soucieux du sort de son sol et essaie de l'améliorer en faisant appel à ses connaissances personnelles.

H_4 : Evaluation du marché de compost

Elle a été effectuée par l'analyse du niveau de la concurrence, son prix actuel sur le marché et son type d'emballage à travers les sociétés dont les participants procurent leurs composts.

Les résultats du questionnaire ont indiqué que les sociétés les plus connues dans le marché sont dans l'ordre décroissant Eléphants vert (37%), Nature Active (27%), Bio-Fertil et Bio-Compost (18%). Il parait très clair que la distribution actuelle est régionale, et que le marché de compost est très limité par la région de l'étude. Ceci est prouvé aussi par une étude similaire du marché de compost réalisée au niveau de la région d'El Jadida, la société dominante était AGRIFERTIL.

A propos du prix du compost, il est compris entre 50 et 100 DHs/50Kg. Ces résultats confirment ceux obtenus par l'étude de la concurrence sur le marché qui a montré que le prix actuel de la majorité des sociétés est compris entre 60 et 70 DHs pour des sacs de 50 Kg.

Quant au conditionnement du compost, les consommateurs ont rapporté que le compost se vent dans des sacs de 50 Kg, ou en vrac à 1000 DHs ou 1200 DHs la tonne sans transport. Dans l'ensemble de l'enquête, tous les participants affirment que le prix du compost reste toujours élevé surtout pour les petits agriculteurs dont le budget est très limité. A titre d'exemple, les cultures maraichères exploitent 6 à 12 tonnes de compost par hectare, l'équivalent de 6000 DHs/hectare à 12000 DHs/hectare, juste pour les frais d'amendement. Ce qui reste une somme très importante pour un petit agriculteur ou pour un agriculteur disposant d'une grande superficie.

En effets, les critères sur lesquels se base le consommateur du compost, pour son achat, dépendent fortement de son prix et de sa qualité, en plus de sa disponibilité sur le marché et la facilité de sa procuration. De ce fait, l'utilisation du compost par l'agriculteur et une opération non rentable et décourageante à cause principalement de son coût élevé, de sa non disponibilité et de la rareté des points de sa vente outre les frais de transport

H5 : Volonté d'achat du compost à boues

Suite à la réponse positive de 97% des participants pour l'achat du compost à boues, il est vivement recommandé aux organismes responsables de procéder à la valorisation de ce déchet qui pourrait être co-produit qui sera vendu que l'opération de compostage soit rentable ces mêmes participants ont conditionné leur volonté à sa qualité (37%), son prix convenable (34%), sa disponibilité (16%) et son mode d'utilisation (13%). Les 3% restant sont des pépiniéristes méfiants de la contamination vu la charge des boues en éléments traces métallique, l'un des constituants initiaux des boues ce qui pourra pour eux nuire à leurs plantes et à leurs sols surtout que le Maroc ne dispose pas encore d'une norme marocaine relative à la boue qui pourra être dédiée après au compostage. Ces résultats corroborent l'étude du marché du marché du compost à boues, réalisée en 2017 dans la région d'El Jadida, ayant été couronnée de succès avec des conditions résumées dans la qualité (38%), le prix (35%) et la facilité d'utilisation (27%).

L'analyse des hypothèses considérées auprès des consommateurs des composts enregistre qu'ils sont satisfait du produit et conscients de ses avantages. Comme ils sont toujours prêts à changer pour améliorer leurs sols, leurs cultures et leurs recettes. Sauf que pour eux les raisons, pour lesquelles le compost n'a toujours pas sa place sur le marché des produits agricoles au Maroc, sont très liées à sa valeur agro-économique concentrée sur le prix, la

disponibilité et la communication. Les conditionnements les plus attractifs pour le consommateur soit en sac de 50 Kg soit d'une tonne. Les prix les plus convenables pour l'achat de ce produit sont compris entre 50 à 60 DHs en sacs de 50 Kg ou 1000 DHs/tonne y compris le transport.

IV.2 Analyse du questionnaire : Cas des NON consommateurs du compost

Dans cette partie, il a été analysé **les 4 variables** qui concernent les non-utilisateurs du compost, le questionnaire 2 (Annexe II) comporte **12 questions** qui ont été dépouillées dans le but de mieux connaitre l'amendement concurrent du compost et analyser de près sa clientèle et son marché.

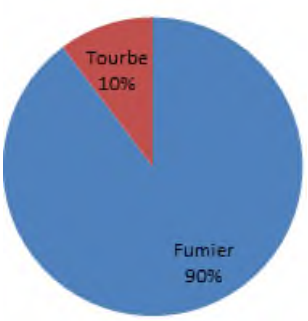
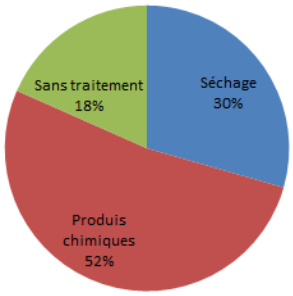
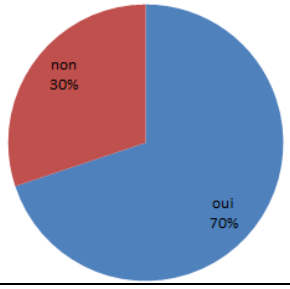
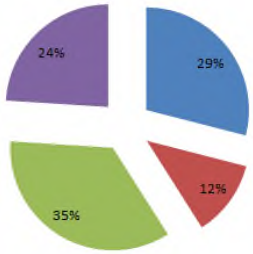
Il faut dire que les non consommateurs du compost présentent 80,6% des participants. Ce chiffre a été réparti entre 62% des non connaisseurs du produit et 18,6% des connaisseurs mais non consommateurs.

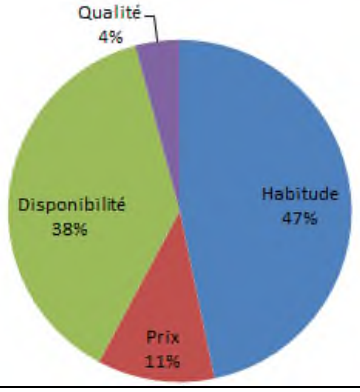
Les hypothèses supposées sont en nombre de 4 :

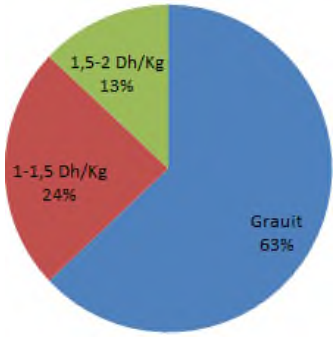
- Détermination du type d'amendement concurrent
- Evaluation de la stratégie marketing de l'amendement concurrent
- Appréciation de l'idée du compost à base des boues
- Plan d'action commerciale

Et les résultats sont répertoriés dans le Tableau 37 de l'enquête réalisée sur les non consommateurs du compost.

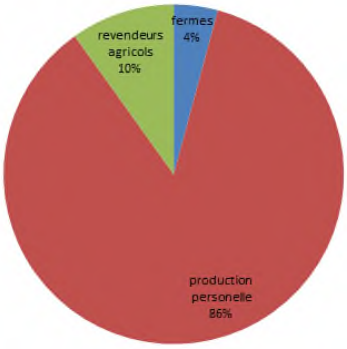
Tableau 37: Résultats de l'enquête réalisée sur les non consommateurs du compost

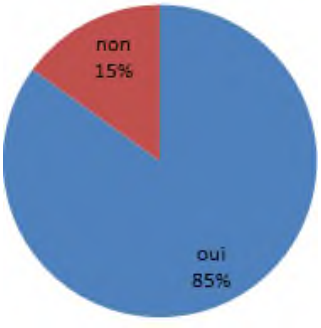
Hypothèses	Variables	Résultats	Présentation graphique
H_1 : Détermination du type d'amendement concurrent	Type d'amendement concurrent – Fumier – Tourbe	236 (89,74) 27 (10,26)	 Type d'amendement
	Mode d'utilisation – Produits chimiques – Séchage – Sans traitement	137 (52,09) 77 (29,28) 49 (18,63)	 Mode de traitement du fumier
	Problèmes – Oui – Non	184 (69,96) 79 (30,04)	 Présence ou absence des problèmes
	Types de problèmes : – Maladies phytopatogènes – Pousse des mauvaises herbes – Mauvais rendement – Maladies phytopatogènes + mauvais herbes	76 (28 90) 32 (12,17) 63 (23,95) 92 (34,98)	 Problèmes rencontrés au champ

<table>
<tr>
<td rowspan="3">H2 : Evaluation de la stratégie marketing de l'amendement concurrent</td>
<td>Critères d'achat :
– Habitude
– Prix
– Disponibilité
– Qualité</td>
<td>123 (46,77)
29 (11,03)
100 (38,02)
11 (4, 18)</td>
<td>

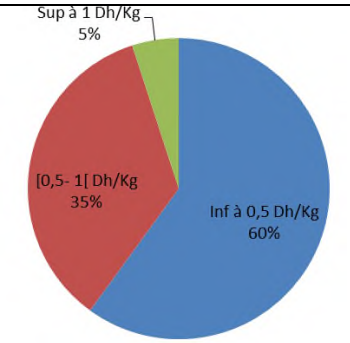
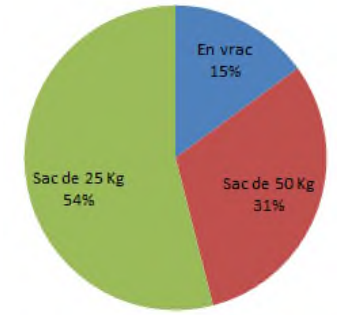
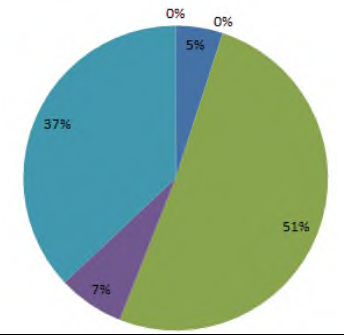
Critères du choix de compost</td>
</tr>
<tr>
<td>Prix du fumier :
– Gratuit
– 1-1,5 DH/Kg
– 1,5-2 DHs/ Kg</td>
<td>165 (62,74)
64 (24, 33)
134 (12,93)</td>
<td>

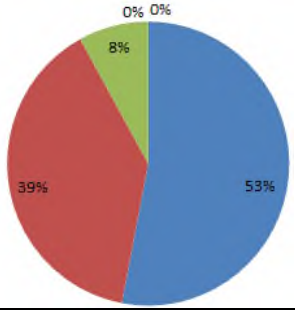
Prix du Fumier</td>
</tr>
<tr>
<td>Point de vente du fumier :
– Revendeurs des produits agricoles
– Souks
– Fermes
– Grandes surfaces
– Production personnelle</td>
<td>26 (9,88)

0 (0)
11 (4,18)
0 (0)
226 (85,94)</td>
<td>

Point de vente du fumier</td>
</tr>
<tr>
<td>H3 : Appréciation de l'idée du compost à base des boues</td>
<td>Contre ou pour la valorisation des boues par compostage :
– Oui
– Non</td>
<td>223 (84,79)
40 (15,02)</td>
<td>

Volonté d'utilisation du compostage</td>
</tr>
</table>

	Attentes des consommateurs : – Bonne qualité – Prix bas – Prix et Qualité – Prix, qualité, disponibilité – Disponibilité	26 (9,8) 40 (15,3) 84 (31, 94) 113 (42,96) 0 (0)	 Attentes des consommateurs
H_4 : Plan d'action commerciale	Prix de vente souhaité : – > 0,5 DH – 0,5 – 1 DH – < 1 DH	158 (60,08) 92 (34,98) 13 (4,94)	 Prix de vente souhaité
	Conditionnement : – En vrac – Sac de 25 Kg – Sac de 50	39 (14,83) 142 (53,99) 82 (31,18)	 Type d'emballages
	Points de vente souhaitée : – Représentant de la société – Revendeur – Grandes surfaces – Souks – Sur internet	13 (4,94) 134 (50,95) 19 (7,21) 97 (36,88) 0 (0)	 Points de vente souhaitée

	Flux de communication : – Radio – Télévision – Journaux – Internet – Posters et Flyers	139 (52,85) 103 (39,16) 21 (7,99) 0 (0) 0 (0)	 Flux de communication

H_1 : Détermination du type d'amendement concurrent

Les résultats étaient : Presque 90% des participants utilisent le fumier et 10 % utilisent la tourbe qui n'a été appliquée que par les pépiniéristes et les jardiniers ou quelques agriculteurs pratiquant les cultures hors sol.

La tourbe est en fait utilisée directement contrairement au fumier qui doit subir un traitement; 52% des agriculteurs traitent leur fumier par des produits chimiques (la soude ou la chaux), 30% le traitent par un séchage à l'air libre et seulement 18% l'utilisent sans traitement.

En plus, 30% des participants n'ont réclamé aucun problème lors de l'utilisation de la tourbe et du fumier. Contrairement à une certaine catégorie d'utilisateurs de fumier qui représente 70% des participants ayant témoigné avoir eu des problèmes dans certaines circonstances, à savoir ; un fumier de mauvaise qualité, non traité ou un abus des quantités appliquées. Les problèmes rencontrés se sont manifestés par l'apparition des maladies phytopatogènes se manifestant par la poussée de mauvaises herbes avec 35%, une attaque des espèces phytopathogènes sans poussée de mauvaises herbes de 29% ou seulement la poussée de mauvaises herbes à des pourcentages de 12% et 24% des agriculteurs ont témoigné une dégradation de la qualité et le rendement de leurs récoltes.

La comparaison des témoignages, a permis de constater que dans la plupart du temps :

– La poussée de mauvaises herbes est le fruit des quantités exagérées,
– Les maladies phytopatogènes et le mauvais rendement sont le résultat d'un fumier de mauvaise qualité, un fumier mal traité ou utilisé directement sans traitement.

H_2 : Evaluation de la stratégie marketing de l'amendement concurrent

Le grand concurrent du compost et le leader dans le marché des amendements est le fumier. Dans le but de comprendre pourquoi et comment chercher le secret de sa forte prédominance, trois sous-hypothèses ont été considérées : Les raisons de son choix, son prix

et point d'achat. 47% des agriculteurs ont avoué que le fumier pour eux est par expérience l'amendement que tous les agriculteurs utilisent par tradition. Les 38% et les 11% ont évoqué le prix ou la disponibilité des agriculteurs qui accompagnent cette activité avec l'élevage. Donc pour eux c'est un produit disponible sur place et gratuit. Alors que, les 4% des agriculteurs exigeant la qualité sont ceux qui l'achètent ou des utilisateurs de la tourbe.

Pour ce qui est du prix, 63% des agriculteurs ont affirmé que leur fumier est gratuit et que c'est une production par foyer. Pour les acheteurs, le fumier est un produit qui se vend en vrac et son prix dépend de son type (Bovin ou chevaux, ânes, mulets, moutons, chèvres, porcs, volailles,..) et il varie de 1000 DHs/tonne à 1800 DHs/tonne sans transport, l'équivalent de 1 à 2 DHs maximum le kilogramme.

Quant au point de vente le plus populaire du fumier et de la tourbe, 10% des utilisateurs de la tourbe l'achètent des revendeurs des produits agricoles. Pour ce qui est du fumier, c'est une production de leur élevage personnelle, 4% des acheteurs ont témoignée qu'il n'y a pas un point de vente précis, la majorité se la procure directement des fermes.

H_3 : Appréciation de l'idée du compost à base des boues

La perception du consommateur envers le compost à boues a eu lieu après avoir lui présenté ses avantages, son rôle, son efficacité et les bénéfices qu'il pourrait en avoir suite à son utilisation. 85 % des répondants se sont montrés soucieux de la problématique environnementale qu'a résolue le compostage et ils encouragent vivement la valorisation des déchets dans cette voie. Alors que 15% des participants se sont montrés favorables au produit traditionnel; le fumier. En effet, la majorité de ces 15% étaient des agriculteurs qui font de l'élevage en parallèle avec l'agriculture. De ce fait, l'amendement par le fumier est pour eux une alternative d'élimination de ce déchet et aussi une solution qui est bénéfique pour leurs sols depuis des décennies. Et pour soutenir la raison, qui pourrait attirer plus de consommateurs potentiels vers le compost à boues, on leur a demandé leurs attentes et leurs exigences envers le compost. 45% des agriculteurs cherchent un mix d'avantages (Le prix, la qualité et la disponibilité), 32% ont répondu par le prix et la qualité et les 15%, leur critère s'est limité au prix. Tandis que seulement 10% ont porté un intérêt particulier à la qualité. De ce fait, le prix reste le facteur le plus déterminent pour l'agriculteur et le vendeur.

H_4 : Plan d'action commercial

La présente hypothèse a été proposée dans le but de mettre au point un plan d'action commercial répondant aux attentes des consommateurs afin d'assurer la réussite du produit sur le marché. Ce plan comprend : Le prix désiré, le type d'emballage, les points de vente et le type de flux de communication populaire :

- pour le prix, comme tout investisseur, l'agriculteur essaie d'améliorer le maximum de son bénéfice et de se procurer sa matière première à moindre prix.
- pour le conditionnement, 54% ont apprécié les sacs de 25Kg, 31% de 50 Kg et 15% la vente en vrac.

Ce choix pourrait être dû aux conditions de stockage et/ou de transport, des petits sacs de 25 Kg sont moins lourds à transporter lors du chargement ou déchargement du compost. De plus, les sacs de 25 Kg et 50 Kg peuvent être gardés en stockage sans crainte de dégradation de la qualité du produit par l'humidité ou la poussière par exemple. En fait, le compost vendu en sac pourrait développer de nouveaux marchés et attirer de nouveaux consommateurs.
A propos du point de vente, le consommateur cherche le point le plus près de son champ pour minimiser aussi le coût du transport ; ce qui renforce l'hypothèse de la question précédente qui consiste à maximiser le bénéfice.

Pour ce qui est moyen de communication, celui le plus commun et apprécié par les consommateurs c'est à travers des médias, (82%), dont 53% apprennent l'information par la radio et 39% par la télévision, 8% s'informent par la lecture des journaux. Quant à l'internet ou la publicité par les affiches, les flyers ou tout autre moyen, n'attirent pas leurs intérêts.

IV.3 Résultats d'analyse de la variance (ANOVA)

L'étude d'interaction des sous-hypothèses suggérées avec le prix du compost, pour le cas des consommateurs, démontre une relation très significative avec la majorité des hypothèses (Tableau 38).

Tableau 38: Analyse de la variance ANOVA des différentes hypothèses (Cas des consommateurs) en fonction du prix du compost

Paramètre des consommateurs	Prix du compost			
	M.S	F	P value	Signification
Profession	8,145	20,106	0,000***	OUI
Flux de communication	3,620	3,744	0,058 ns	NON
Absence sur le marché	5,123	6,749	0,012**	OUI
Critères d'utilisation	5,123	10,313	0,02**	OUI
Types de cultures	19,251	17,337	0,000***	OUI
Autre types d'amendements	0,0017	0,282	0,598 nS	NON
Marques achetées	11,417	5,943	0,018**	OUI
Types d'emballage	4,582	5,346	0,024**	OUI
Critères de la marque	2,799	3,227	0,047**	OUI
Appréciation de l'idée du compost à boues	2,107	171,381	0,000***	OUI
Attentes	14,984	18,281	0,000***	OUI

a = 0,05 : (ns) Différences non significatives
p < a = 0,05 : (*) Différences juste significatives
p < a = 0,01 : (**) Différences hautement significatives
p < a = 0,001 : (***) Différences très hautement significatives
F: Valeur F de Fisher ;
M.S: Moyenne quadratique

La profession, le type de culture, l'appréciation du compost à boues et les attentes de la clientèle envers le compost à boues sont très hautement significatives. Ceci dit que réellement le premier facteur qui compte pour le client du compost est son prix, et que sa profession ou son/et cadre ainsi que les types de culture jouent un grand rôle dans la détermination du prix.

Au deuxième rang vient l'absence du compost sur le marché, les critères de la marque choisie par le consommateur et leur utilisation, les marques achetées, les types d'emballage, avec une différence hautement significative. Et cela prouve toujours que le prix du compost reste un facteur déterminant pour le client lors de son choix du compost et son type emballage.

Alors que la comparaison des sous- hypothèses (Tableau 39), cas des non consommateurs, avec le même facteur (Prix du compost) montre que le facteur du prix est plus significatif

statistiquement avec les hypothèses supposées pour les consommateurs que celles des non consommateurs. Toutefois la moyenne quadratique de toutes les hypothèses, dans le cas des consommateurs est inférieure à celle des non consommateurs.

Tableau 39: Analyse de la variance ANOVA des hypothèses suposées (Cas des non consommateurs) en fonction du prix du compost

Paramètres non consommateurs	Prix du compost			
	M.S	F	P value	Signification
Type d'amendement	0,169	2,193	0,113 ns	Non
Lieu de procuration	0,012	0,052	0,949 ns	Non
Prix d'achat	0,004	0,006	0,994 ns	NON
Mode d'utilisation	16,051	107 ,689	0,000***	oui
Type de traitement	42,034	69,188	0,000***	oui
Problèmes d'utilisation de l'amendement	1,257	6,142	0,002**	OUI
Problèmes rencontrés	3,359	2,250	0,106 ns	non
Choix de l'amendent	80,303	28,867	0,004**	OUI
Changement	6,972	31,639	0,000***	OUI
Attentes du compost à boues	14,123	28,585	0,000***	OUI
Point d'achat souhaité	1,21	1,58	0,192 ns	Non
Flux de communication actuelle	0,010	0,069	0,934 ns	NON
Flux de communication souhaité	0,01	0,0 0 3	0,997ns	NON

a = 0,05 : (ns) Différences non significatives
p < a = 0,05 : (*) Différences juste significatives
p < a = 0,01 : (**) Différences hautement significatives
p < a = 0,001 : (***) Différences très hautement significatives
F: Valeur F de Fisher ;
M.S: Moyenne quadratique

Les variables : Le prix d'achat, le lieu de procuration, le type d'amendement, les problèmes rencontrés, le point d'achat souhaité, le flux de communication actuelle et le flux de communication souhaité sont des variables non significatives avec le paramètre ou la variable du prix du compost. Ce qui est très attendue car par ces questionnaires, nous avons pu comprendre les habitudes des non utilisateurs et pouvoir construire, un modèle économique du compost à boue (Cf. Busness model en annexe III), quoique nous remarquions une réponse très hautement significative entre le prix, le mode et les conditions d'utilisation , le type de

traitement du sol ou de la plante et les attentes des clients envers ce produit. Ces résultats renforcent ceux de l'analyse descriptive et confirment que le client est prêt à substituer l'amendement traditionnellement utilisé par le compost à boue si on le lui offre à bas prix.

Conclusion

L'évaluation du coût du compost élaboré à partir des boues de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Fès et d'autres substrats, son insertion dans le marché et l'étude d'intérêt auprès des agriculteurs a nécessité une étude rigoureuse et des enquêtes qui ont eu lieu aussi bien pour les consommateurs que les vendeurs.

Les résultats de cette étude révèlent que :

- La production du compost est très coûteuse et compliquée à l'échelle industrielle, elle nécessite pour sa réussite un vrai engagement de la part de la société, des autorités et des citoyens et / ou coproduit doit être vendu.
- La concurrence dans ce domaine est, d'une part, très forte, les sociétés déjà présentes sur le marché sont de grandes boites ; et d'autre part, le secteur est actif et l'investissement dans ce volet est en augmentation.
- Le produit chez les agriculteurs marocains demeure cher, moins disponible sur le marché et il n'a pas eu sa part de publicité.

Finalement, pour la réussite la production et la commercialisation de ce produit, nous recommandons de promouvoir le compostage des déchets organiques, notamment les boues, et la connaissance de la valeur de l'amendement obtenu et son efficacité. La vulgarisation pour sa diffusion pour convaincre les agriculteurs de son intérêt, une planification des campagnes publicitaires très intensives par les autorités locales et leurs services comprenant des courriers directs aux habitants, des présentations dans les villages, des campagnes dans les écoles, des démonstrations,...Ainsi que des annonces dans la presse, à la télévision et à la radio et même sa distribution pour un essai à titre gratuit; ce qui facilitera sa vente à partir des infrastructures municipales.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans une démarche de développement durable et d'une économie circulaire par la contribution à la valorisation des boues de la station d'épuration ; cas de la ville de Fès ; via la filière de compostage, tout en répondant ainsi aux exigences et à la l'évolution des valeurs réglementaires du compost et du compostage. Les principaux objectifs étaient de produire un amendement organique stable et dans les normes, s'assurer de sa non toxicité et son efficacité par une application sur le terrain, étudier l'effet antibactérien et antifongique de son jus, et évaluer le coût et la perception du consommateur.

La caractérisation physico-chimique des boues qui a montré qu' elles sont neutres, riches en carbone organique, en matière organique et en azote avec une charge métallique conforme à la norme française relative aux boues destinées au co-compostage.

L'expérience du co-compostage se résume dans la production de deux composts : Un compost à boues et un compost sans boues qui nous a servi de témoin. L'essai était mené sur deux échelles : Laboratoire et semi-industrielle. La production des composts de l'essai primaire a duré 2 moins, celle des composts semi industriels était de quatre mois. La différence est due aux périodes d'élaboration et aux quantités des mélanges initiaux. Cette biotransformation est le résultat d'une activité microbienne intense pendant la phase thermophile, ce qui a permis d'hygiéniser le compost en éliminant les micro-organismes pathogènes.

Les composts finaux ont des caractéristiques semblables et sont conformes aux composts NF U44-051 pour les mélanges sans boues et NF U44-095 pour les composts à boues. En effet, l'incorporation des boues n'a pas influencé la composition minérale des composts. Leurs teneurs en éléments minéraux et fertilisants les classent parmi les composts à usage agricole et les qualifient parmi les fertilisants et les amendements organiques sans risque d'utilisation. Leur application sur le sol, et les cultures du radis et de la pomme de terre a eu lieu à la parcelle et dans un champ.

Les résultats révèlent : Une augmentation appréciable de la production et des paramètres végétatifs des cultures étudiées; une qualité nutritive de la pomme de terre identique à celle commercialisée, une amélioration de la qualité du sol en matières organiques, à savoir : Le carbone, les oligo-éléments, et l'azote, et en matière minérale potassium et phosphore, un bon

développement du feuillage de la pomme de terre et une bonne formation et renflement des récoltes. Les meilleurs résultats, concernant les paramètres morphologiques et productifs, ont été enregistrés pour l'amendement avec le compost à boues. Ce qui confirme le rôle capital que les boues jouent dans la fertilisation des sols.

A la lumière des résultats encourageants, le pouvoir du jus des composts dans la lutte biologique a été testé. Les résultats de l'étude *in vitro* du pouvoir antifongique et antibactérien des extraits de composts élaborés sur le *Fusarium oxysporum et l'Erwinia ont* révélé : une inhibition de la croissance mycélienne *du champignon du Fusarium oxysporum arrivant à 70%*; une sécrétion d'une couleur rouge résultant d'un stress mycélien du *Fusariumoxysporum*, et une présence des halos signifiant un pouvoir antibactérien contre l'*Erwinia* et une activité antiaérienne du type extracellulaire. Ceci dit que les jus de compost ont montré une inhibition des espèces phytopatogènes étudiées (*Fusarium oxysporum et Erwinia*) due à la présence des micro-organismes et des lipides qui peuvent avoir un effet inducteur ou inhibiteur sur la production des lipases responsables de cette inhibition.

L'estimation du coût du compost à boues et l'évolution de sa place sur le marché et auprès des consommateurs concernés par le biais des règles de la comptabilité analytique et d'une enquête transversale simple à visée descriptive et analytique.

Les résultats ont démontré que le compost est un produit moyennement connu chez les agriculteurs marocains, cher, moins disponible sur le marché et qui n'a pas eu sa part de publicité auprès des agriculteurs marocains. Afin de promouvoir la valorisation des boues de STEP par filière de compostage, il faut bien étudier le prix de revient du compost, son conditionnement, sa disponibilité sur le marché, la proximité des point de vente, sa vulgarisation pour convaincre les agriculteurs de ses intérêts. Il assurera également, sa publicité sur les flux de communication les plus convoités et son service après-vente.

En guise de conclusion, l'approche pluridisciplinaire mise en œuvre dans cette thèse a permis d'intégrer au sein d'une même démarche différents acteurs universitaires et industriels et différents aspects et disciplines : Chimie verte, analyse environnementale, agronomie, biologie et économie afin de répondre à la problématique de la valorisation des boues par co-compostage et d'obtenir un produit organique stable qui pourrait être utilisé en tant qu'un amendement que pour ses effets sur :

- Les plantes par l'accroissement du rendement, de sa précocité et son amélioration de la morphologie de la plante.

- Les micro-organismes pathogènes et les réactions enzymatiques par la destruction des bactéries et des champignons ;

- La stimulation de l'activité biologique et l'amélioration de la dynamique du sol.

Ces résultats incitent les autorités locales et les décideurs du pays à mettre en place un système de co-compostage des déchets de la région Fès –Meknès avec les boues de la STEP-Fès afin de produire un amendement organique et un pesticide-bio et en parallèle réduire la pollution au niveau de la région.

Pour promouvoir davantage l'industrialisation du compostage, nous proposons les perspectives suivantes :

- Concrétiser un partenariat entre les organismes concernés : La régie, les communes, le ministère de l'environnement, les sociétés de gestion, des déchets urbains et ménagers, les associations, les organismes internationaux œuvrant pour la préservation de l'environnement…..
- Mettre au point le système du tri à la source.
- Installer un réseau d'acheminement des margines des tritureries d'olives jusqu'à la station de compostage.
- Prévoir l'installation de l'unité de compostage à proximité de la décharge dont le but d'économiser les frais de transport et réduire le coût de la production du compost
- Encourager l'investissement dans ce sens.
- Etudier la possibilité d'améliorer la qualité du compost en fonction de la nature des sols par l'ajout d'autres déchets abondants dans la région.
- Etudier la possibilité d'accélérer le processus de compostage avec un coût réduit.

Annexe I : Questionnaire ; Cas des consommateurs

☆ Utuliser vous le compost?

- Oui
- Non

Cas des consommateurs

☆ C'est quoi votre profession ?

- Agriculteur ☐
- Pépiniériste ☐
- Ingénieurs des espaces vers ☐
- Jardinier ☐

Autres (à préciser) :…….

☆ Cas de l'agriculteur : La superficie cultivée

- Inférieur à 10 hectares ☐
- [10-30[hectares ☐
- Supérieure à 30 hectares ☐

☆ Comment avez-vous connu le compost ?

- TV, Radio ☐
- Bouche à bouche ☐
- Un représentant de la société ☐
- Autres ☐

A préciser :……

☆ Pourquoi à votre avis le compost n'est pas si connu ?

- Manque de communication du produit ☐
- Non disponibilité sur le marché ☐
- Son prix très élevé pour l'agriculteur ☐
- Un produit qui n'est pas adapté à vos besoins ☐

☆ Pour quoi vous avez choisi d'utuliser le compost comme amendement ?

- Améliorer le rendement ☐
- Améliorer le sol ☐

— Améliorer le calibre ☐

☆ Pour quelle culture vous utilisez le compost ?

- Arboricultures
- Viticultures
- Maraichages
- Légumineuses

A préciser les cultures : …….

☆ Avez-vous déjà utilisé un autre amendement que le compost ou la tourbe et le fumier ?

— Oui ☐

— Non ☐

- Si oui le quel …….

☆ Quelle marque de compost vous utilisez ?

— Elephant vert ☐

— NaturActive ☐

— BIOFERTIL (AgriFERTIL) ☐

— L'GHBAR (BioDEch s.a.r.l) ☐

— BIO-Compost (Brahim Zniber) ☐

☆ A combien vous achetez le compost ?

— Sup à 100 DH/50KG ☐

— [50-60[DH/50KG ☐

☆ Sous forme de quoi vous achetez le compost ?

— Sacs de 50 Kg ☐

— Sacs de 25 Kg ☐

— En vrac ☐

☆ En fonction de quoi vous choisissez la marque de votre compost?

— Qualité ☐

— Prix ☐

— Disponibilité ☐

☆ Accepteriez l'utilisation d'un compost à base des boues de la STEP- Fès ?

- Oui ☐
- Non ☐

☆ Pour quels critères vous pourriez changer votre produit habitué ?

- Le prix ☐
- La qualité ☐
- La disponibilité ☐
- Mode d'utilisation ☐
- Autres à préciser : ……

Annexe II : Questionnaire ; Cas des non consommateurs

☆ Utuliser vous le compost?

- Oui
- Non

Cas des non consommateurs

☆ Connaissez-vous le compost

- Oui ☐
- Non ☐

☆ Par quoi vous amendez vos sols

- Tourbe ☐
- Fumier ☐

☆ Traitez vous votre amendement ?

- Oui ☐
- Non ☐

☆ Si oui : Par quoi vous traitez votre amendement ?

- Produit chimique ☐
- Séchage ☐
- Autre a précisé……..

☆Trouvez-vous des problèmes à l'utilisation du fumier ou la tourbe?

- Oui ☐
- Non ☐

☆ Qu'ils sont les problémes que vous rencontrez ?

- Maladies phytopatogénes ☐
- Poussée de mauvaises herbes ☐
- Mauvais rendement ☐

☆ Critères de base pour le choix l'amendement ?

- Améliorer le rendement ☐
- Améliorer le sol ☐

☐

— Améliorer le calibre ☐

☆ A combien vous achetez votre amendement ?

— Gratuit ☐

— 1-1,5 DH /Kg ☐

— 1,5-2 DH /Kg ☐

— Supérieur à 2 DH /Kg ☐

☆ D'où vos procurez votre amendement ?

— Production personnel ☐

— Acheté ☐

☆ Serez-vous d'accord d'amander par du compost à base des boues (avec un petit briefing sur le compostage et le compost à boues)

— Oui ☐

— Non ☐

☆ Vos attentes vers le compost à boues?

— Le prix bas ☐

— La bonne qualité ☐

— La disponibilité ☐

— Le S.A.V (transport) ☐

— Autres à préciser : ……

☆ A combien vous serez prêt a acheté le compost ?

— Inf à 0,5 Dh/Kg ☐

— 0,5-1 Dh/Kg ☐

— Sup à 1 Dh /Kg ☐

☆ Vous préfériez le compost dans des sacs de ?

— 10 Kg ☐

— 25 Kg ☐

— 50 kg ☐

— En vrac

☆ D'où vous préfériez vous acheté le compost ?

- Représentant ☐
- Directement de la société ☐
- Revendeur ☐
- Des grandes surfaces ☐
- Souks ☐
- Sur internet ☐

☆ Par quel moyen de publicité vous pensez que le compost arrivera au plus grand nombre de personnes ?

- Radio ☐
- Télévisons ☐
- Journaux ☐
- Internet ☐
- Flyer et poster ☐

Annexe III : Business model

Le Tableau 38 présente le business model que nous proposons pour la création d'une installation de compostage des boues de la station d'épuration de la ville de Fès pour passer de l'étude à l'industrialisation afin d'assurer le flux de production de compost désiré par les agriculteurs.

Partenaires clés	
Qui sont nos ***Partenaires clés****?*	– La Régie autonome Intercommunale de Distribution d'Eau et d'Electricité – La Commune Principale de Fès – Groupe OZONE: La société de gestion des déchets de la ville de Fès – L'Université Sidi Mohammed Ben Abdellah- Fès – Les organismes d'agriculture : DPA, DRA, ONCA, ONSSA, …. – Les services municipaux – Les associations œuvrant dans la présentation de l'environnement
Qui sont nos ***Fournisseurs clés?***	– La station d'épuration des eaux usées de la ville de Fès – Les tritureries d'olives – Les décharges, les restaurants et tous les producteurs de déchets organiques (Marchés de gros, restaurants, hôtels, …) – Les fermes d'élevage des poules – Les industries qui disposent d'une station d'épuration de leurs eaux usées
Quelles **ressources clés** obtenons-nous de nos partenaires?	**Cadres scientifiques** **Expertise dans :** Le choix des substrats La caractérisation des substrats La formulation du mélange de déchets à composter Les données sur les déchets à valoriser (Typologies, quantité, composition, …) Le suivi du processus du compostage et validation de la maturation du produit final **Ressources techniques :** Equipements de compostage (Camion de transport, broyeurs, trax pour le retournement, d'andains) Equipements d'analyses physico-chimiques et biologiques Serres pour essais Aménagement de la station de compostage (Dépôt de stockage des déchets, hall de conservation des produits finis, salle de stockage des produits d'analyses, laboratoire,

	sanitaire,…)
Activités clés	
Quelles activités clés nos **propositions de valeur** nécessitent-elles? Nos **chaînes de distribution**? **Relations avec la clientèle***?* Les sources de revenus*?*	– Production d'un amendement/fertilisant organique – Production d'un bio pesticide - Elimination, traitement et valorisation des boues de la station d'épuration des eaux usées de la ville et des déchets organiques. - Solution écologique (Amélioration de la structure du sol, des rendements des cultures et lutte contre les attaques des phytopathogènes) **- Vente directe :** • Agriculteurs • Pépiniéristes • Paysagistes • A travers les municipalités • Utilisation internes de la ville • Vendeur et revendeur des produits agricoles - Participation aux salons internationaux d'agriculture - Animation des journées de sensibilisation avec les agriculteurs grands producteurs - Organisation des rencontres avec les associations des agriculteurs - Mise en place d'un service de livraison (Cas des grandes quantités) - Création d'un service après-vente pour le suivi des cultures et des agriculteurs~~)~~ – Les subventions de la Commune, des Régies Autonomes, des Fonds Industriels de Développement du Personnel, du Ministère de l'Environnement, de la Coopération Internationale Allemande ...) – le prix de ventes des produits
Ressources Clés	
Quelles sont les ressources clés dont nos propositions de valeur ont besoin?	o **Ressources tangibles (ou matérielles)** : - Physiques : Procuration ou subvention du terrain, construction des hangars (De dépôts des déchets et de stockage des produits et des biens), d'un bâtiment de direction (Bureaux du directeur, de secrétaire, de réunion, de stockage des produits, laboratoire, sanitaire,garage...). . - Financières : Capacité d'autofinancement, capacité d'endettement etc. **o Ressources intangibles (Immatérielles)** :

	-Technologiques : Savoir-faire, - Commerciales : Formation pour acquérir une réputation et une relation avec la clientèle, … -Application de la stratégie de marketing pour la vente du produit - Humaines : Dynamisme des équipes, flexibilité, échanges d'informations, - Organisationnelles : Création d'un système d'information et de sensibilisation, établissement d'une base de données, normalisationdu produit (selon les normes ISO), prévention des mécanismes de coordination.
Propositions de Valeur	
Quelle **valeur** délivrons-nous au client?	-Un produit **biologique** pour l'amendement organique du sol - Un **bio-fertilisant** répondant aux besoins de la plante pour améliorer le rendement des cultures - Un **bio-pesticide** pour la lutte contre les maladies fongiques
Quels **problèmes** aidons-nous à résoudre pour notre client?	- Amélioration de la structure du sol et de la qualité des cultures et de leur production - Lutte contre les phytopathogènes - Réduction des coûts de production et radication de l'utilisation des produits chimiques.
Quelles sélections de produits et de services proposent à chaque segment de clientèle?	- Amendement organique - Bio-fertilisants et biopesticides substituant les produits chimiques - Formation pour l'application des composts et des jus de compost - Formation pour la valorisation de leurs déchets
Quels sont les besoins du client que nous satisfaisons?	- Amélioration du calibre et du rendement des cultures - Compost produit est destiné pour tous types de culture - Composition peut être modifiée pour répondre à certains besoins spécifiques de l'agriculteur en termes de N, P, K.
Relations Clients	
Quel **type de relation** chacun de nos segments de clientèle s'attend-il à ce que nous établissions et nous entretenions avec	- Suivi de l'application du compost - Réalisation des prélèvements de sol et des plantes pour le contrôle des phytopathogènes - Réalisation des sessions de formation pour sensibiliser les agriculteurs de l'effet néfaste du produit chimique et de l'importance de l'agriculture

eux? Quels sont ceux que nous avons **établis**?   <

Canaux	
*À **travers quelles chaînes** nos segments de clientèle souhaitent-ils être atteints?*	- Contrat de coopération avec les associations des agriculteurs - Distribution, au départ, du produit gratuitement et démonstration de son application - Formation gratuite - Distribution d'une fiche technique du produit (Bien argumentée et convaincante)
Comment les atteignons-nous maintenant?	- Via les outils facebook, page web dans un site très consulté, - Publication/diffusion des articles présentant le produit et les résultats atteints dans un journal - Présentation d'émissions à la radio, à la télévision - Préparation d'un documentaire passant d'un déchet au compost, à la production agricole et à la consommation
*Comment **intégrer** nos canaux?*	- Publicité à la radio et la télévision - Compagne publicitaire - Publication d'articles dans les journaux les plus demandés par les agriculteurs
*Comment les **intégrons-nous aux routines des clients**?*	-Sensibilisation des agriculteurs de l'importance des bio fertilisants et des bio pesticides. -Implication et sensibilisation avec formation d'autres agriculteurs, - Service après-vente
La Structure des coûts	
*Quels sont les **coûts les plus importants** inhérents à notre modèle d'entreprise ?*	-La réalisation d'une plateforme de compostage et l'achat d'équipements (Retourneur d'andain, broyeur et un hachoir)et véhicules de transport - L'installation d'un petit laboratoire équipé de matériels et de produits chimiques et d'une unité de microbiologie + coûts de main d'œuvre, produits chimiques pour la réalisation des analyses microbiologiques, déplacements, contrôle et suivi, expertise,...
*Quelles **ressources clés** sont **les plus coûteuses**?*	- L'implication d'une main d'œuvre qualifié : Docteurs, ingénieur, masters, techniciens,… - Equipements de la station - Equipements du laboratoire - Marketing et publicité du produit

*Quelles **activités clés sont les plus coûteuses**?*	- La collecte tri et transport des déchets et le compostage - Les analyses physico-chimiques et biologiques pour garantir la qualité du produit - La préparation des biopesticides
Sources de Revenus	
Pour quelle valeur sont nos clients vraiment prêts à payer?	Sa qualité agro-économique -Efficacité du produit pour l'amendement du sol et la protection de la plante -Rapport qualité/prix du produit par comparaison aux autres amendements -Produit préservant la santé et l'environnement
Pour ce qu'ils paient actuellement?	- Amendement du sol par le fumier ou un engrais chimique qui coûteront très chers avec une quantité très limitée sur le marché. - Pesticides, herbicides et parfois insecticides pour la lutte contre les phytopathogènes qui sont néfastes à la santé
Comment paient-ils actuellement?	-Cache - Traite bancaire - Echange de matière (En dépend du type de l'agriculture et du pouvoir de l'agriculteur)

Références bibliographiques

A. Leonard. (2015). *Evolution des pratiques associées à la gestion des boues d'épuration Dans Le Contexte D'une Economie Circulaire*.

A. Léonard. (2018). *Etat De Lieux Des Programmes De Recherches Sur Les Boues De Station D'épuration En Europe*.

A. Mellak, Y. Le Roux, R. Bouarab, T. A.-Z. (2019). *Contribution A La Production Du Biogaz A Partir D'effluents D'élevage Animaliers En Algérie*.

Abdelmajid Jouraiphy. (2007). *Compostage Des Boues Activées-Déchets Verts : Analyses Physicochimiques, Microbiologiques, Toxicologiques, Bilan Humique Et Valorisation Agronomique*. Faculté Des Sciences Semlalia Marrakech.

Abid, W., Ammar, E., Triki, M.A., Ben Abbou, M., Elhaji, M. (2016). Gestion Et Valorisation Des Margines Par Co Compostage Avec Les Déchets Verts Et Amendements Des Sols Agricoles Pour L'amélioration Des Rendements. *Brevet Déposé À L'office Marocain De La Propriété Industrielle Et Commerciale., Ma 2015044*(74).

Abid, W. (2018). *Caractérisation Et Valorisation Par Co-Compostage Des Fibres Du Palmier Dattier Et Du Fumier Applications Pour L'amendement De Sols Et La Lutte Biologique*.

Abigail A. Maynard. (1995). Cumulative Effect Of Annual Additions Of Msw Compost On The Yield Of Field-Grown Tomatoes. *Compost Science & Utilization*, *3*(2), 47–54.

Adel Rigane, Intissar Farida, Kamel Zouaria. (2015). Origin Of The Groundwater Salinity And Geochemical Processes In Detrital And Carbonate Aquifers: Case Of Chougafiya Basin (Central Tunisia). *Journal Of Hydrology*, *Volume 530*, 508–532.

Afgane Rachida. (2016). *Techniques Valorisation Des Boues De La Station D A€^{Tm} Epuration Des Eaux Usées Fès (Step-Fès).*

Afilal Mohamed Elamin. (2015). Potentiel Des Déchets Organiques Et Valorisation Energétique Au Maroc Introduction :

Ait Ayane Karima Et Soufiya Dounia. (2009). *Valorisation Agricole Et Energétique Des Boues Issues De L ' Epuration Des Eaux Usées De La Ville De Marrakech*.

Albrecht, R. (2007). Co-Compostage De Boues De Station D ' Epuration Et De Déchets Verts : Nouvelle Méthodologie Du Suivi Des Transformations De La Matière Organique To Cite This Version : Hal Id : Tel-00174775.

Alhassane Bah. (2013). *Caracterisation Des Rejets Des Eaux Residuaires Des Stations-Service De Total : Cas De La Ville De Conakry*.

Amf: Association Des Maires De Farance. (2015). *Le Maire Et Les Boues D'épuration*.

Amir, S. (2005). C*ontribution A La Valorisation De Boues De Stations D'épuration Par Compostage : Devenir Des Micropolluants Métalliques Et Organiques Et Bilan Humique Du Compost.*

Amorce. (2012). *Boues De Station D'epuration : Techniques De Traitement, Valorisation Et Elimination*.

Anged. (2014). Rapport Sur La Gestion Des Déchets Solides Au Maroc.

Aggelides S.M., P. A. L. (N.D.). Effects Of Compost Produced From Town Wastes And Sewage Sludge On The Physical Properties Of A Loamy And A Clay Soil. *Bioresource Technology*, *Volume 71*,(Issue 3,), 253–259.

Anne Alix, Enrique Barriuso, Carole Bedos , Bernard Bonicelli , Thierry Caquet, Igor Dubus, Chantal Gascuel, Jean-Joël Gril, (2013). *Devenir Et Transfert Des Pesticides Dans L'environnement Et Impacts Biologiques*.

Ait Badd G., Alburquerque J., Gonzálve J., Cegarra J., M. H. (2004). Chemical And Spectroscopic Analyses Of Organic Matter Transformations During Composting Of Olive Mill Wastes. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *54*(1), 39–44.

Diouf Aziz. (2019). Valorisation Des Déchets. Que Prévoit La Nouvelle Stratégie Nationale.

Shiralipour Aziz, D. B. M. C. W. H. S. (1992). Uses And Benefits Of Msw Compost: A Review And An Assessment. *Biomass And Bioenergy*, *3*,(3–4), 267–279.

Barbouchi, M., Lhissou, R., Chokmani, K., Abdelfattah, R., Harti, A. El, & Aissa, N. Ben. (2013). *Caractérisation De La Salinité Des Sols A L 'Aide De L ' Imagerie Radar Satellitaire : Cas De La Tunisie Et Du Maroc*.

Baudry, M. (2010). *Les Marchés De Brevets Dans L'économie De La Connaissance Rapport*.

C. Depres, O. Aznar, D. Vollet, P. J. (2011). *Identification Et Notion De Coûts D'organisation Dans Les Services Collectifs Locaux Étude De Cas : Le Service D'épandage Agricole Des Boues D'épuration*.

Carvalhais, L.C., Muzzi, F., Tan, C-H., Hsien-Choo, J., Schenk, P. M. (2013). Plant Growth In Arabidopsis Is Assisted By Compost Soil-Derived Microbial Communities. *Front Plant Science*, *4*, 235.

Cédric Francou. (2004). *Stabilisation De La Matière Organique Au Cours Du Compostage De Déchets Urbains : Influence De La Nature Des Déchets Et Du Procédé De Compostage - Recherche D ' Indicateurs Pertinents*.

Cesana, J. (2015). Programme De Gestion Et De Protection De L'environnement Au Maroc (Pgpe).

Cfcim, C. F. De C. Et D'industrie Du M. (2015). *Fiche Marché : Les Déchets Au Maroc* (Vol. D).

Conseil Canadien Des Ministres De L'environnement. (2005). L*ignes Directrices Sur La Qualité Du Compost.*

Cordier. (2013). Principaux Engrais Organiques. *Copyright Snhf*.

Crohn, D. M. (2011). *Mpact Of Compost Application On Soil Erosion And Water Quality*. California Department Of Resources Recycling And Recovery.

Daniel Said-Pullicino, Flora G.Erriquens, G. G. (2007). *Changes In The Chemical Characteristics Of Water-Extractable Organic Matter During Composting And Their Influence On Compost Stability And Maturity*. *Bioresource Technology*, *Volume 98*(Issue 9), 1822–1831.

Division De La Mise En Valeur Des Terres Et Des Eaux (Dmvte). (2006). *Utilisation Des Engrais Par Culture Au Maroc*.

Dorothée Batsch. (2011). *L ' Impact Des Pesticides Sur La Santé Humaine*. Univercité De Lorriane.

Dorothée Laperche. (2012). Stations D'épuration : Vers Une Production De Bioplastiques En 2020. Retrieved From Https://Www.Actu-Environnement.Com/Ae/News/Stations-Epuration-Bioplastiques-Boues-Pha-Micro-Organismes-15454.Php4

Doumbouya, M. (2018). *Diagnostic De Sol Et Recommandations Potassiques Pour La Culture De Pomme De Terre En Sol Minéral*. Université Laval.

Dumont, A., Graillot, D., Bourgois, J., Tardy, A., Dumont, A., Graillot, D., … Tardy, A. (2010). *Outil D ' Aide Au Choix De Procédés D ' Epuration Des Eaux Usées En Milieu Isolé To Cit*.

El Allaoui, N. (2018). *Evaluation De La Charge Polluante Et Traitement Des Effluents De La Step Par Des Procédés Intégrès : Optimisation Et Modélisation Des Résultats*. Université Sidi Mohammed Ben Abdellah Faculté Des Sciences Dhar El Mahraz Fès.

El Fels, L. (2014). *Suivi Physico-Chimique, Microbiologique Et Ecotoxicologique Du Compostage De Boues De Step Melangees A Des Dechets De Palmier: Validation De Nouveaux Indices De Maturite*.

El Madani Fatima Zahra. (2015). *Etude De La Siccité Des Boues De La Station D'épuration Des Eaux Usées De La Ville Fès*.

Éléphant Vert. (2016). *Une Agriculture Saine Et Durable*.

Elisabeth Bagge, Leena Sahlstro¨ M, A. A. (2006). T*he Effect Of Hygienic Treatment On The Microbial Flora Of Biowaste At Biogas Plants*. *Water Research*, (January). Https://Doi.Org/10.1016/J.Watres.2005.03.016

Elouazzani, D. C., Bouamrane, A., Mansouri, K., & Fokam, C. B. (2012). V*alorisation Des Boues De Papeterie Dans Le Btp : Analyses Minéralogiques De L ' Incidence Des Conditions D ' Incinération (Valorization Of Paper Mill Sludge In Construction : Mineralogical Analysis Of The Impact Of Incineration Conditions*), *3*(4), 628–635.

Epuration, L. E. S. B. D., Periquet, A., & Lecerf, J. (2011). *Les Boues D'épuration*.

Fabienne Muller. (2016). *Epandage.*

Fabrizio Adani, Cesare Ubbiali, P. G. (2006). *The Determination Of Biological Stability Of Composts Using The Dynamic Respiration Index: The Results Of Experience After Two Years. Waste Management*, *26*(1), 41–48.

Farid Djekmani. (2011). *Le Cadre Juridique Relatif A La Gestion Des Dechets Industriels Au Maroc.*

Fatma Sellami, Salma Hachicha,Mohamed Chtourou, Khaled Medhioub, E. A. (2008). Maturity Assessment Of Composted Olive Mill Wastes Using Uv Spectra And Humification Parameters. *Bioresource Technology*, *Volume 99*,(Issue 15,), 6900–6907.

Filali, A. (1995). *Bulletin Officiel N° 4325 Du 24 Rabii 1416 (20 Sept Embre 1995) Louange*.

Fouad Dimane, Khadija Haboubi, Issam Hanafi, A. E. H. (2016). Étude De La Performance Du Dispositif De Traitement Des Eaux Usées Par Boues Activées De La Ville D'al-Hoceima, Maroc. *European Scientific Journal*, *12*(17), 272–286. Https://Doi.Org/10.19044/Esj.2016.V12n17p272

Francesco Montemurro Grazia Convertini Donato Ferri. (2017). Mill Wastewater And Olive Pomace Compost As Amendments For Rye-Grass. *Sciences Agricoles*.

Francesco Rigobello ; Giulia Mansutti ; M. Saeed Khan. (2017). Pattern Recovering Of Conformal Antenna Array For Strongly Deformed Surfaces. *European Conference On Antennas And Propagation*, *3*, 245–255.

Ghezri, F. (2013). *Les Métaux Lourds Et Leurs Effets Sur L'environnement*.

Goswami, L., Nath, A., Sutradhar, S., Bhattacharya, S.S., Kalamdhad, K., Vellingiri, K., Kim, K.-H. (2017). Application Of Drum Compost And Vermicompost To Improve Soil Health, Growth, And Yield Parameters For Tomato And Cabbage Plants. *Journal Of Environmental Management*, *200*, 243–253.

Gouvernement. (2015). *Décret N° 2-14-85 Du 28 Rabii I 1436 (20 Janvier 2015) Relatif A La Gestion Des Déchets Dange* (Vol. 1436).

Hasnaoui Moulaydriss. (2017). *Nouvelle Approche Durable De Gestion Des Déchets Tri , Collecte Et Revalorisation Des Déchets Au Maroc : Stress Hydrique :*

Haut Commissariat Du Paln. (2006). *Statistiques Environnementales Au Maroc*.

Hodomihou, N. R., Feder, F., Masse, D., Agbossou, K. E., Amadji, G. L., Ndour-Badiane, Y., & Doelsch, E. (2016). Diagnostic De Contamination Des Agrosystèmes Périurbains De Dakar Par Les Eléments Traces Métalliques, *20*(3), 397–407.

Ibrahim El Akram Znaïdi. (2002). *Etude Et Evaluation Du Compostage De Différents Types De Matières Organiques Et Des Effets Des Jus De Composts Biologiques Sur Les Maladies Des Plantes*.

Idrissi Nisrine. (2018). *Évaluation De La Qualité Des Eaux De Surface Et Leurs Relations Avec Certaines Maladies Hydriques (Cas De La Ville De Fès) : Approche Sig-Seq.* Usmba-Fsdm.

Ilin M.. (2012). Simulation Of Co-Incineration Of Sewage Sludge With Municipal Solid Waste In A Grate Furnace Incinerator. *Waste Management*, *Volume 32*(Issue 3), 561–567.

Isabelle Baldi, Sylvaine Cordier, Xavier Coumoul, Alexis Elbaz, Laurence Gamet-Payrastre,

Pierre Lebailly, Luc Multigner, Roger Rahmani, Johan Spinosi, G. V. M.-F. (2019). *Pesticides : Effets Sur La Santé*. *Edp Sciences*.

Jardé, E. (2005). *Composition Organique De Boues Résiduaires De Stations D ' Epuration Lorraines : Caractérisation Moléculaire Et Effets De La Biodégradation*.

Jorge Sierra Et Lucienne Desfontaines. (2018). *La Dynamique De L'azote Biodisponible Dans Les Sols Acides De Guadeloupe*.

Julia Martínez-Blanco, Pere Muñoz, Assumpció Antón, J. R. (2011). Assessment Of Tomato Mediterranean Production In Open-Field And Standard Multi-Tunnel Greenhouse, With Compost Or Mineral Fertilizers, From An Agricultural And Environmental Standpoint. *Journal Of Cleaner Production*, *Volume 19*,(Issues 9–10), Pages 985-997.

Julie A. Eastgate. (2000). Pathogen Profile Erwinia Amylovora : The Molecular Basis Of Fireblight Disease E . A M Y L O V O R A V I R U L E N C E Fac To R S. *Molecular Plant Pathology*, *1*, 325–329.

Julie Faverial. (2016). *Compostage Et Vermicompostage Des Effluents D'élevage*.

Kahina Chenni Et Yasmina Maghlouche. (2013). *Compostage Des Déchets Verts : Cas De La Station Biocompost D'el-Kseur*.

Kammoun, M., Medhioub, K. (2011). *Assessment Of Properties Of Tunisian Agricultural Waste Composts: Application As Components In Reconstituted Anthropic Soils And Their Effects On Tomato Yield And Quality*. *Ressource, Conservation And Recycling*, *55*, 785–792.

Khaled, B. (2012). *Comportement De Trois Variétés De Pommes De Terre (Spunta, Désirée Et Chubaek) Entre Deux Milieux De Culture Substrat Et Hydroponique*, *Thèse.* Université Aboubekr Belkaïd – Tlemcen Faculté.

Kopitopoulos, D. (2005). *Guide Pour De L'assainissement Liquide Des Douars Marocains*.

Kyela, C. M. (2011). *Utilisation Des Composts De Biodechets Menagers Pour L ' Amelioration De La Fertilite Des Sols Acides De La Province De Kinshasa (République Démocratique Du Congo) Dissertation Originale Présentée En Vue De L ' Obtention Du Grade De Docteur En Sciences*.

La Chambre Des Représentants Et La Chambre Des Conseillers. (2016). *Loi N°36-15 Relative A L'eau*.

Lachassagne, D. (2015). *Devenir De Micropolluants Présents Dans Les Boues D ' Epuration , Du Traitement A L ' Epandage Agricole : Application Aux Micropolluants Métalliques (Cd , Cu) Et Organiques (Médicaments) Issus Du Traitement Biologique Conventionnel D ' Effluents Urbai*.

Lahlou, K., Abbou, M. Ben, Majbar, Z., Zaytouni, Y., & Karzazi, O. (2017). Recovery Of Sludge From The Sewage Treatment Plant In The City Of Fez (Step) Through The Composting Process. *Journal Of Materials And Environmental Sciences*, *8*(12), 4582–4590.

Lapworth, D. J., Baran, N., & Ward, R. S. (2012). Emerging Organic Contaminants In

Groundwater : A Review Of Sources , Fate And Occurrence.

Le Matin. (2016). *La Faculté Des Sciences Semlalia De Marrakech Met Au Point Un Nouveau Biofertilisant.*

Lin, Y., Du, D., Si, C., Zhao, Q., Li, Z., Li, P. (2014). *Potential Biocontrol Bacillus Sp. Strains Isolated By An Improved Method From Vinegar Waste Compost Exhibit Antibiosis Against Fungal Pathogens And Promote Growth Of Cucumber*s. *Biological Control*, *71*, 7–15.

Lme Kasongo, Mt Mwamba, Mp Tshipoya, Mj Mukalay, Sy Useni, Km Mazinga, K. N. (2013). Réponse De La Culture De Soja (Glycine Max L. (Merril) A L'apport Des Biomasses Vertes De Tithonia Diversifolia (Hemsley) A. Gray Comme Fumure Organique Sur Un Ferralsol A Lubumbashi, R.D. Congo. *Journal Of Applied Biosciences*, *63*.

Loubna El Idrissi. (2009). *Cytotoxicité Du Cadmfum , Du Plomb Et Du Mercure Et Caractérisation Du Transport Membranaire De Cadmfum Dans Les Cellules Alvéolaires (A549)*.

Loudni, A. (2017). Traitement Des Eaux Usées, Le Maroc Très Loin Du Compte. Retrieved From Https://Lnt.Ma/Traitement-Eaux-Usees-M

Magali Beffy, D. F. And A. M. (2012). Choosing The Field Of Study In Postsecondary Education: Do Expected Earnings Matter? *The Review Of Economics And Statistics*, *94*(1), 334–347.

Magazine, I. (2017). La Gestion Des Déchets : Des Actions Stratégiques A Mettre En Oeuvre - Innovant Magazine - Le Magazine Des Innovations Et Du Monde Futur Avec Un Regard Sur L'avenir.

Meftah Amine. (2017). *Valorisation Energétique Par La Méthanisation De Boues De Station D'épuration (Step), Cas D'étude Station Est De La Ville Tizi- Ouzou (Pont De Bougie).*

Mehta, C.M., Palni, U., Franke-Whittle, U.H., Sharma, A.K. (2014). Compost: Its Role, Mechanism And Impact On Reducing Soil-Borne Plant Diseases. *Waste Management*, *34*, 607–622.

Ministère De L'agriculture Et De La Pêche Maritime. (2011). *Projet De Renforcement Des Capacités Sur L ' U Tilisation Sans Danger Des Eaux Usées En Agriculture Rapport National Du Maroc*.

Ministère De L'énergie, Des Mines, De L'eau Et De L'environnement. (2006). *Loi N° 28-00 Relative A La Gestion Des Déchets Et A Leur Elimination* (Vol. 1427).

Misonga, K., Tshala, A., Joseph, U., Arsene, K. M., Marcel, T. I., & Michel, K. (2016). Effets De Différentes Doses De Compost Sur La Production Et La Rentabilité De La Tomate (Lycopersicon Esculentum Mill) Dans La Ville De Kolwezi , Province Du Lualaba (Rd Congo). *Journal Of Applied Biosciences*, 9669–9679.

Mouline, S. (2012). *Dechets Industriels*.

Mounia Tahiri. (2015). *Evaluation Et Quantification De L ' Erosion Et La Sédimentation A*

Partir Des Modèles Rusle , Musle Et Déposition Intégrés Dans Un Sig . Application Au Sous-Bassin De L'oued Sania (Bassin De Tahaddart , Rif Nord Occidental , Maroc). *European Journal Of Scientific Research*, *125*(2), 157–178.

Mouria, B., & Douira, A. (2010). Valorisation Agronomique Du Compost Et De Ses Extraits Sur La Culture De La Tomate.

Mrabet, L., Belghyti, D., & Attarassi, A. L. B. (2011). Étude De L' Effet Du Compost Des Déchets Ménagers Sur L ' Amélioration Du Rendement De Maïs Et De La Laitue Résumé, *7*(2), 74–84.

Naamane, S., Rais, Z., Chaouch, M., Modélisation, D., Dhar, S., & Mehraz, E. (2014). *Incorporation De La Boue , D ' Epuration Des Eaux Usées , Traitée Par Lavage Par Eau Dans Le Ciment* (Incorporation Of Wastewater Sludge Treated By Water Washout In Cement), *5*, 2515–2521.

Naamane, S., Rais, Z., Lachquar, M., & Taleb, M. (2014). *Characterization Of Calcined Sewage Sludge For Its Incorporation In Cement*, *5*, 2212–2216.

Naamane, S., Rais, Z., & Taleb, M. (2016). T*he Effectiveness Of The Incineration Of Sewage Sludge On The Evolution Of Physicochemical And Mechanical Properties Of Portland Cement. Construction & Building Materials*, *112*, 783–789.

Nadine Ker Armel. (2009). *Les Qualités Nutritionnelles De La Pomme De Terre*.

Ngaram, N. (2015). *Contribution A L ' Etude Analytique Des Polluants (En Particulier De Type Métaux Lourds) Dans Les Eaux Du Fleuve Chari Lors De Sa Traversée De La Ville De N ' Djamena*.

Ouattara, B., Savadogo, P.W., Traore, O., Koulibaly, B., Sedogo, M.P., Traore, A.S. (2010). Effet Des Pesticides Sur L'activité Microbienne D'un Sol Ferrugineux Tropical Du Burkina Faso. *Cameroon Journal Of Experimental Biology*, *6,* 11–20.

Proietti P., Calisti R., Gigliotti G., Nasini L., Regni L., And A. Marchini. (2016). "*Composting Optimization: Integrating Cost Analysis With The Physical-Chemical Properties Of Materials To Be Composted*." *Journal Of Cleaner Production*, *137*, 1086–1099.

Paolo Bazzoffi Sergio Pellegrini Andrea Rocchini Miranda Morandi Olga Grasselli. (2006). The Effect Of Urban Refuse Compost And Different Tractors Tyres On Soil Physical Properties, Soil Erosion And Maize Yield. *Soil And Tillage Research*, *Volume 48,*(Issue 4,), 275–286.

Paula Alvarenga, Clarisse Mourinha, Márcia Fartoateresasantos, Patrícia Palma, Joana Sengo, Marie-Christine Morais, C.-Q. (2015). Sewage Sludge, Compost And Other Representative Organic Wastes As Agricultural Soil Amendments: Benefits Versus Limiting Factors. *Waste Management*, *40*, 44–52.

Phenixa, G. (2013). Réutilisation Des Eaux Traitées Et Valorisation Des Boues. Retrieved From Http://Www.Phenixa.Com/Reference/Hydraulique-Ref/Reutilisation-Des-Eaux-Traitees-Et-Valorisation-Des-Boues-Ref/

Philippe Grieu, Pierre Maury, Philippe Debaeke, A. S. (2008). Innovations Agronomiques, *2*,

37–51.

Pilli, S. (2015). Evaluation Des Technologies De Pré-Traitement Des Boues Pour Améliorer L A€^{Tm} Efficacité De La Digestion Anaérobie : Bilans Massique Et Energétique Et Emissions.

Pisson Cyril. (2000). *Impact De L ' Epandage Agricole Des Boues Résiduaires Urbaines Sur La Qualité Des Productions Céréalières En Particulier Sur L ' Aspect Des Eléments Traces Métalliques*.

Pradel, M. (2011). *Analyses De Cycle De Vie (Acv) Appliquées Au Traitement Des Boues D'épuration : Etat De L'art, Bilan Des Connaissances Et Des Impacts Environnementaux*.

Qasim, B. H. (2016). *Détermination, Spéciation Et Biodisponibilité Des Eléments Traces Métalliques Dans Les Sols Contaminés Et Technosols*.

Rafolisy, T., Thuriès, L., Técher, P., Moussard, G., & Paillat, M. (2015). A L ' Ile De La Réunion : Hygiénisation , Pertes De Nutriments Et Homogénéité Du Compost Produit. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, *19*(4), 329–337.

Ramdani, N. (2015). *Transformation De La Matière Organique Au Cours Du Co Compostage De Boues De Station D'épuration Et De Déchets Verts : Approche Expérimentale Pour Une Production Durable De Compost*.

Ramdani Nadia. (2007). *Contribution A L ' Etude Des Boues Urbaines De La Station D ' Epuration Des Eaux Usées Résiduaires . Effet Sur La Fertilité D ' Un Sol Sableux*.

Recep Kulcu, O. (2007). Composting Of Goat Manure And Wheat Straw Using Pine Cones As A Bulking Agent. *Bioresource Technology*, *98*(14), 2700–2704.

Roy-Dumesnil, G. (2016). *Capture Passive Du P Hosphore D ' Une Eau Usée Municipale En Contexte De*.

Sánchez-Monedero, A. Roig, C.Paredes, M. P. B. (2001). Nitrogen Transformation During Organic Waste Composting By The Rutgers System And Its Effects On Ph, Ec And Maturity Of The Composting Mixtures. *Bioresource Technology*, *78*, 301–308.

Scc (Sous-Comité Du Compostage), Gtgds (Groupe De Travail Sur La Gestion Des Déchets Solides), C. (Conseil Des Ministre De L'environnement). (1996). *Critère De Qualité Du Compost*.

Scheiner Javier David. (2005). *Spéciation Du Carbone, De L"Azote Et Du Phosphore De Différentes Boues De Stations D"Epuration Au Cours De Leurs Incubations Contrôlées Dans Deux Types De Sol*. L'institut National Polytechnique De Toulouse.

Seee Secrétariat D'etat Chargé De L'eau Et De L'environnement. (2015). *Programme National Des Déchets Ménagers*. Rabat.

Sikuzani, U., Kibenge, C., Kalumbu, T., & Musaya, M. (2013). Utilisation Des Déchets Humains Recyclés Pour L ' Augmentation De La Production Du Maïs (Zea Mays L .) Sur Un Ferralsol Du Sud-Est De La Rd Congo. *Journal Of Applied Biosciences*, *66*(1997–5902), 5070–5081.

Slim, R. (2008). *Étude Et Conception D ' Un Procédé De Séchage Combiné De Boues De Stations D ' Epuration Par Energie Solaire Et Pompe A Chaleur*.

Soufi Razika. (2011). *La Réponse Physiologique Et Biochimique De La Pomme De Terre (Variété Spunta) A La Salinité En Présence De Fertilisant Organique (Fumier Des Volailles) (Cas De Ouargla)*. Faculte Des Sciences De La Nature Et De La Vie Et Sciences De La Terre Et De L'univers.

Steven W. Van Ginkel, B. L. (2005). Increased Biological Hydrogen Production With Reduced Organic Loading. *Water Research*, *39*, 3819–3826.

Tayeb Ameziane El Hassani. (2015). *Bases Physiologiques De L'élaboration Du Rendement*. Institut Agronomique Et Vétérinaire Hassan Ii, Rabat,Maroc.

Thomas Lendormi. (2000). *Etude De L'oxydation En Voie Humide De Boues Résiduaires Urbaines Et Intégration Dans Une Station D'épuration*.

Tratch R, . Bettiol W. (1997). Effect Of Biofertilizer On Micelial Growth And Spores Germination Of Plant Pathogenic Fungi. *Guide Des Matières Organiques.*, *1*.

Van Der Wurff, A.W.G., Fuchs, J.G., Raviv, M., Termorshuizen, A. J. (2016). Handbook For Composting And Compost Use In Organic Horticulture. *Biogreenhouse Cost Action Fa 1105*. Retrieved From Www.Biogreenhouse.Org.

Viatour, L. (2019). De Nombreux Défis A Relever Pour Sortir Du Sous-Développement. Waterleau. (2015). *Le Traitement Des Eaux Usées De La Ville De Fès*.

Wiart, J., & Schwartzbrod, J. (1997). Arasitological Contamination Of Urban Sludge Philippe Gaspard, 429–436.

Wissem Chaichi, Zahr-Eddine Djazouli, Imène Djemai, Soumia Hasna Abdelkader, I. R. Et J. M. N. (2017). S Timulation Des D Efenses N Aturelles E Ffet Sur Les P Arametres P Opulationnels D ' A Phis F Abae S Cop . *Lebanese Science Journal*, *18*(1), 81–97.

Yu, G.H., Wu, M.J., Luo, Y.H., Yang, X.M., Ran, W., Shen, Q.R. (2011). Fluorescence Excitation–Emission Spectroscopy With Regional Integration Analysis For Assessment Of Compost Maturity. *Waste Management*, *31*, 729–1736.

Yu Liu, J.-H. (2001). Strategy For Minimization Of Excess Sludge Production From The Activated Sludge Process. *Biotechnology Advances*, *Volume 19*,(Issue 2,), Pages 97-107.

Zaim N., Souabi S., Aboulhassan A.. (2007). Compostage Des Boues Produites A La Station D'épuration D'une Huilerie, En Mélange Avec Des Déchets De Jardin. *Déchets Sciences Et Techniques*, *N°48*, 20–25.

Zoghlami, R. I., Aissa, N. B. E. N., Hamdi, H., & Khelil, M. N. (2016). Minéralisation Du Carbone Organique Et Sa Corrélation Avec La Biomasse Microbienne Dans Deux Sols Agricoles Suite A Un Amendement De Boues Résiduaires, *31*(11), 1812–1821.

Zraibi, L., Chaabane, K., Berrichi, A., Sbaa, M., Badaoui, M., Zarhloule, Y., … Maroc, O. (2015). Assessment Of The Agronomic Value Of The Sludge Compost For The Wastewater Treatment Plant From Nador City, *6*(10), 2975–2985.