

2023-06

Essai d'optimisation de la production du compost à partir du co-compostage des déchets solides ménagers organiques avec les déjections d'élevage

RUCAKUMUGUFI, Daniel

UB

<https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/467>

Téléchargé depuis le dépôt institutionnel officiel de l'Université du Burundi

UNIVERSITÉ DU BURUNDI
École Doctorale

Centre de Recherche en Sciences Naturelles et de l'Environnement



**ESSAI D'OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DU COMPOST À PARTIR DU
CO-COMPOSTAGE DES DÉCHETS SOLIDES MÉNAGERS ORGANIQUES AVEC
LES DÉJECTIONS D'ÉLEVAGE**



THÈSE

Présentée et soutenue publiquement en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences Chimiques

Par Daniel RUCAKUMUGUFI

Spécialité: Sciences et Gestion de l'Environnement

Membres du Jury:

Prof. Salvator KABONEKA	Université du Burundi	Président
Prof. David NAHIMANA	Université du Burundi	Secrétaire
Prof. Modou DIENG	UCAD (Sénégal)	Examineur externe
Prof. Céline Gisèle JUNG	ULB (Belgique)	Membre et Présidente du comité d'accompagnement
Prof. Vestine NTAKARUTIMANA	Université du Burundi	Promoteur local
Prof. Codou Gueye MAR	UCAD (Sénégal)	Promoteur externe
Prof. Patrice BIGUMANDONDERA	Université du Burundi	Co-promoteur local

Bujumbura le 26 Juin 2023

Table des matières

Table des matières	i
Dédicaces.....	v
Remerciements	vi
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	viii
Liste des Sigles et Abréviations	x
Liste des publications et communications	xii
Résumé.....	xiii
Abstract	xiv
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PREMIÈRE PARTIE: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	5
Chapitre 1: Déchets solides ménagers en vue de leur utilisation en compostage.....	6
Introduction.....	6
I.1. La production des déchets solides ménagers dans les Pays en Développement.	6
I.2. Caractérisation des déchets solides municipaux (DSM).....	9
I.3. Conclusion.	13
Chapitre 2: Enjeux de la gestion des déchets solides ménagers.....	14
II.1. Définition de la salubrité.....	14
II.2. Etat des lieux de la salubrité dans les PED.	14
II.3. Filière de gestion des déchets solides ménagers.	15
II.3.1. Types de Gestion	15
II.3.2. Étapes de la filière de gestion des déchets solides ménagers.	15
II.3.3. Gestion des déchets dans les pays en développement.	16
II.3.4. Gestion des déchets ménagers dans la ville de Bujumbura.....	18
II.3.4.1. Historique de la Politique Nationale d'Assainissement (PNA).	18
II.3.4.2. Situation et défis du secteur.	19
II.3.4.3. Objectifs de la PNA sur l'amélioration de la gestion des déchets.....	19
II.3.4.4. Situation actuelle de la gestion des déchets solides ménagers dans la ville de Bujumbura.....	21
II.4. Traitement des déchets solides ménagers.....	25
II.4.1. Comment peut-on minimiser la production des déchets solides?	26
II.4.2. Les voies de traitement des déchets solides ménagers et assimilés.	27
II.4.3. Traitement des déchets solides ménagers dans la ville de Bujumbura.	29
II.5. Conclusion.	31
Chapitre 3: Compostage.....	32
III.1. Introduction.....	32
III.2. Définitions du compostage.....	32

III.3. Déchets acceptés dans les unités de compostage.	33
III.4. Les principaux paramètres à contrôler lors du compostage.	34
III.5. Les principaux procédés de compostage.	38
III.5.1. Compostage extensif en andains retournés.	38
III.5.2. Compostage intensif en aération forcée.	39
III.5.3. Compostage industriel en réacteur.	39
III.5.4. Lombricompostage (ou Vermicompostage).	40
III.6. Ajout d'Adjuvants de compostage.	40
III.7. Équilibre entre matières azotées et carbonées du compost: choix des matières de compostage.	41
III.8. Les critères de qualité des composts.	42
III.8.1. Maturité et stabilité du compost.	42
III.8.2. Indicateurs physiques de maturité d'un compost.	43
III.8.3. Indicateurs chimiques.	43
III.8.4. Activités biologiques.	45
III.9. Avantages du compost.	46
Conclusion de l'étude bibliographique.	47
DEUXIÈME PARTIE: EXPÉRIMENTATIONS.	50
Chapitre 1: Matériel et méthodes.	51
I.1. Introduction.	51
I.2. Caractérisation des régions d'expérimentation.	51
I.2.1. Caractérisation de la ville de Dakar (Sénégal).	51
I.2.2. Caractérisation de la ville de Bujumbura (Burundi).	52
I.3. Les déchets compostés.	52
I.3. 1. Les déchets compostés à Dakar.	52
I.3. 2. Les déchets compostés à Bujumbura.	53
I.4. Détermination des proportions des substrats et adjuvants utilisés et choix des outils.	54
Chapitre 2. Méthode de compostage et méthodes d'analyses des paramètres de compostage.	56
II.1. Méthodes de compostage.	56
II.1.1. Méthode de compostage à Dakar.	56
II.1.2. Méthode de compostage à Bujumbura.	57
II.2. Paramètres et période de suivi du compostage.	58
II.3. Méthodes d'analyses des paramètres de compostages.	59
II.3.1 Caractérisation physique.	60
II.3.1.1. Masse volumique ($\mu = \text{kg. L}^{-1}$ ou T.m^{-3}) des intrants et du compost mûr.	60
Introduction.	60
II.3.1.2. Mesure de la variation de la hauteur du compost.	61
II.3.1.3. Détermination de l'humidité (H en %).	61
II.3.1.4. Température.	63

II.3.1.5. Retournement des andains.	63
II.3.2. Composition chimique.	64
II.3.2.1. pH.	64
II.3.2.2. Matière organique totale (MOT).	64
II.3.2.3. Azote total Kjeldahl (NTK).	65
II.3.2.4. Carbone organique total (COT).	66
II.3.2.5. Détermination du phosphore total (PT).	67
II.3.2.6. Mesure de la teneur en Potassium (K).	68
Chapitre 3. Méthodes d'évaluation des critères d'innocuité.	69
III.1. Teneurs en éléments traces métalliques (ETM).	69
III.2. Analyse microbiologique des adjuvants et composts.	70
III.3. Tests de phytotoxicité des composts.	72
III.4. Effet de l'ajout du compost sur le développement de l'amarante (<i>Amaranthus hybridus</i>).	73
III.4. 1. Matériel végétal.	73
III.4. 2. Dispositif expérimental.	73
Analyses statistiques.	74
TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS ET DISCUSSION.	75
Introduction.	76
Chapitre I: Influence du rapport C/N des intrants sur la qualité du compost produit.	77
Introduction.	77
I.1. Caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques des intrants.	77
I.2. Suivi du Processus de compostage.	81
I.2.1. Caractéristiques physiques.	83
I.2.1.1. Masse volumique (en Kg/dm ³ ou T/m ³)	83
I.2.1.2. Évolution de la hauteur des andains en fonction du temps de de compostage.	85
I.2.1.3. Évolution de la température des andains en fonction du temps de compostage et des retournements.	88
I.2.2. Caractéristiques chimiques.	94
I.2.2.1. Matière organique.	94
I.2.2.2. Évolution du rapport C/N des composts produits à Dakar et à Bujumbura.	96
I.2.2.3. Évolution des éléments fertilisants des composts produits à Dakar et à Bujumbura.	98
I.3. Caractéristiques des composts.	100
I.3.1. Calcul du rendement et caractéristiques des composts finis.	100
I.3.1.1. Rendement et caractéristiques physiques des composts produits à Dakar.	100
I.3.1.2. Rendement et caractéristiques physiques des composts produits à Bujumbura.	101
I.3.2. Taux de cendres des composts produits à Bujumbura.	102
I.4. Conclusion.	103
Chapitre 2: Effet de la variabilité climatique sur la qualité du compost produit.	105

ESSAI D'OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DU COMPOST À PARTIR DU CO-COMPOSTAGE DES DÉCHETS SOLIDES
MÉNAGERS ORGANIQUES AVEC LES DÉJECTIONS D'ÉLEVAGE.

Introduction.....	105
II.1. Caractéristiques physico-chimiques et microbiologique des intrants.	105
II.2. Comparaison des paramètres physico-chimiques de Suivi du processus du compostage.	107
II.2.1. Comparaison des caractéristiques physiques.	109
II.2.1.1. Masse volumique (en kg/dm ³ ou T/m ³) et les matières sèches (MS).....	109
II.2.1.2. Évolution de la hauteur.	111
II.2.1.3. Évolution de la température en fonction du temps.....	112
II.2.2. Comparaison des caractéristiques chimiques.	117
II.2.2.1. Évolution de la matière organique.	118
II.2.2.2. Interrelations entre les différents paramètres du compostage.....	120
II.2.2.2. Comparaison des rapports carbone-azote (C/N).	120
II.2.2.3. pH et teneurs en éléments fertilisants majeurs des composts finis.	120
II.3. Conclusion.	122
Chapitre 3. Évaluation des critères d'innocuité des composts produits.....	124
Introduction.....	124
III.1. Composition en éléments traces métalliques des composts produits.....	124
III.2. Évaluation de la qualité sanitaire des composts produits.....	126
III.3. Tests biologiques de phytotoxicité des composts produits.	128
III.3.1. Étude de la phytotoxicité des composts produits à Dakar.....	128
III.3.2. Étude de la phytotoxicité des composts produits à Bujumbura.	131
III.3.3. Comparaison de toxicité des composts des deux villes à conditions climatiques différentes.....	134
III.4. Effets des composts produits à Bujumbura sur les paramètres agronomiques d'amarantes.....	137
III.5. Conclusion.	143
CONCLUSION GÉNÉRALE.	145
Références Bibliographiques.....	149
Annexes.	166

Dédicaces

À mes chers parents

Votre fils vous prouve, à travers ce travail, que vous puissiez encore une fois être fier de l'éducation que vous avez inculquée à votre enfant, longue vie à mon père et reposez-vous en paix ma mère.

À ma chère épouse et compagne de ma vie, Caritas

Pour avoir supporté les longs moments d'absence sans la moindre manifestation de frustration

À mes enfants et gendre, Leila Raïssa & Jean Bosco,
Sam Gildas, Guy Dascar et Anie Daniella

C'est ce que j'ai fait étant loin de vous, vous êtes au-delà de ma joie de vivre, ma source d'espérance.

À mes très chers petits fils, Shana Erin Maylis et Orens Jayden

Pour vos sourires et exercices physiques, vous me remplissez de joie et vous me faites savourer les bons moments de ma vie.

À toute ma famille

Remerciements

Une recherche doctorale n'est pas une **sinécure**, mais avec un comité d'accompagnement engagé, animé d'un esprit scientifique et rodé dans la recherche, même un jeune chercheur comme moi finit par atteindre le bout du tunnel.

Au terme de ce travail, il me tient particulièrement à cœur de remercier mes Promoteurs, Mesdames le Professeur **Vestine Ntakarutimana** et le Professeur **Codou Guèye Mar/Diop**, mon co-promoteur, le Professeur **Patrice Bigumandondera**, pour avoir dirigé et porté l'intérêt constant à ce sujet de recherche. Pour toute l'attention qu'ils m'ont accordée durant toutes les années de recherche. Pour les contributions permanentes apportées, les conseils, la disponibilité et la patience dont j'ai bénéficié pour mener à bien ce travail.

Je remercie Madame le Professeur **Gisèle Jung**, membre et présidente du comité d'accompagnement, pour ses conseils et remarques objectives qu'elle m'a apportés.

J'exprime ma reconnaissance à tous les enseignants et/ou chercheurs et aux personnels d'appui des laboratoires du Département de Génie Chimique et Biologie Appliquée de l'Ecole Supérieure Polytechnique de l'UCAD-Sénégal qui ont appuyé l'expérimental d'une partie de cette étude effectuée dans leurs laboratoires. Une attention particulière est accordée au Professeur **Modou Dieng** pour sa disponibilité et sa gentillesse durant ce stage. Je remercie également l'Agence Universitaire de la Francophonie, Antenne Afrique des Grands Lacs de Bujumbura qui ont financé ce stage.

J'exprime ma reconnaissance au Professeur **Salvator Kaboneka**, pour sa grande aide et disponibilité lors des tests agronomiques effectués avec les composts produits à Bujumbura. Merci également pour avoir accepté de consacrer du temps à l'examen et présidence du jury de ce travail.

C'est l'occasion pour moi d'exprimer mes sincères remerciements au Professeur **David Nahimana** qui a bien accepté d'être le rapporteur de cette thèse ainsi qu'à tous les membres du jury qui ont accepté de lire et d'évaluer ce travail.

Merci aux deux étudiants de master en Contrôle et Analyse chimique: **Mireille Hakizimana** et **Emery Nkurunziza** que j'ai eu l'occasion d'encadrer au cours de leurs travaux de mémoires, pour leur contribution dans la réalisation de ce travail. J'adresse un merci très amical à toute personne et amis qui m'ont apporté tout leur soutien et leur appui afin d'arriver au terme de cette thèse, à tous les doctorants, surtout ceux de la première cohorte, pour les bons moments passés ensemble.

A toutes les personnes qui ont été à l'origine de la création de l'Ecole Doctorale de l'Université du Burundi et du Centre de Recherche en Sciences Naturelles et Environnement «CRSNE», qu'elles trouvent ici mes sincères remerciements.

Je remercie infiniment mes parents qui ont toujours cru en moi et qui ont su me guider pendant mes études. Je remercie également ma sœur, mes frères, mes beaux-parents, belles-sœurs et beaux-frères, pour leur sympathie et leur profonde bonté qui ont participé d'une manière ou d'une autre à la réalisation de cette thèse.

The last not the least, j'exprime ma grande gratitude à toute ma famille: mon épouse Caritas, mes enfants Leila Raïssa et Jean Bosco, Sam Gildas, Guy Dascar, Amie Daniella ainsi que mes petits-enfants: Shana Erin Maylis et Orens Jayden, pour la bonne ambiance, le soutien indéfectible et l'encouragement qui m'ont fortifié tout au long de cette belle aventure.

Liste des figures

Figure 1 <i>Situation de la gestion des déchets solides ménagers dans la ville de Bujumbura</i>	22
Figure 2: <i>Schéma type de la gestion des déchets solides ménagers dans la ville de Bujumbura</i>	23
Figure 3: <i>Photos de la situation de gestion des DSM du ramassage à la décharge de Mubone</i>	24
Figure 4: <i>Schéma de l'organigramme de la chaîne de gestion des déchets ménagers et assimilés</i>	29
Figure 5: <i>Schéma descriptif du principe de compostage</i>	33
Figure 6: <i>Courbe théorique d'évolution de température et du pH au cours du compostage</i>	36
Figure 7 <i>Étapes de mise en place des andains à Dakar</i>	57
Figure 8: <i>Processus de construction des andains à Bujumbura</i>	58
Figure 9: <i>Activité et tassement de l'andain au cours du processus de compostage</i>	61
Figure 10: <i>Relevé in situ de la température de l'andain après un jour de compostage (à Dakar)</i>	63
Figure 11: <i>Photo de mesure du pH de la suspension du compost</i>	64
Figure 12: <i>Courbe d'étalonnage du Phosphore (P)</i>	68
Figure 13: <i>Évolution de la hauteur des andains en fonction du temps de compostage (à Dakar)</i>	85
Figure 14: <i>Évolution de la hauteur des andains en fonction du temps de compostage (à Bujumbura)</i>	87
Figure 15: <i>Évolution de la température des andains montés à Dakar au cours du compostage</i>	88
Figure 16: <i>Évolution de la température d'avant et après les retournements des deux andains montés à Dakar</i>	90
Figure 17: <i>Évolution de la température des andains montés à Bujumbura au cours du compostage</i>	91
Figure 18: <i>Évolution de la température d'avant et après les retournements des quatre andains montés à Bujumbura</i>	93
Figure 19: <i>Évolution de la matière organique (% sur MS) en fonction du temps de compostage</i>	94
Figure 20: <i>Évolution de la matière organique en fonction du temps de compostage à Bujumbura</i>	95
Figure 21: <i>Aspects physiques des deux composts mûrs obtenus à Dakar</i>	101
Figure 22: <i>Aspects physiques des quatre composts mûrs obtenus à Bujumbura</i>	102
Figure 23: <i>Courbes d'évolution de la hauteur en fonction du temps de compostage (Bujumbura-Dakar)</i>	111
Figure 24: <i>Température moyenne quotidienne à Dakar et à Bujumbura au cours de la période de compostage</i>	113
Figure 25: <i>Évolution de la température durant le compostage</i>	114
Figure 26: <i>Évolution de la température avant et après les retournements des andains à Dakar et à Bujumbura</i>	114
Figure 27: <i>Évolution de la température maximale après les retournements des quatre andains (2 de Dakar et 2 de Bujumbura)</i>	115
Figure 28: <i>Courbes d'évolution de MO en fonction du temps de compostage (Buja-Dakar)</i>	118
Figure 29: <i>Interrelations entre les différentes paramètres (T- H-MO) de compostage</i>	128

Figure 30: Aspects des graines d'arachides d'avant et après germination.....	128
Figure 31: Évolution des indicateurs biologiques de toxicité en fonction des concentrations des extraits des deux composts.....	130
Figure 32: Comparaison des états de germination des graines d'arachides de maïs en fonction des doses.....	132
Figure 33: Test de phytotoxicité des composts obtenus avec les graines de maïs et d'arachides	133
Figure 34: Évolution des indices de germination en fonction des concentrations des extraits des composts produits à Dakar et à Bujumbura.....	135
Figure 35: Évolution de l'amarante du repiquage à la récolte.....	138
Figure 36: Évolution de la hauteur de l'amarante en fonction du temps (périodicité de 7 jours)	140

Liste des tableaux

Tableau 1: Composition des déchets en % de matière sèche dans quelques capitales africaines	8
Tableau 2: Taux de collecte des déchets solides dans quelques grandes villes africaines.	9
Tableau 3: Caractéristiques physico-chimiques des DSM de la ville d'Abomey-Calavi	11
Tableau 4: Composition en métaux dans les déchets urbains (ou composts) de quelques PED	12
Tableau 5: Composition chimique en % des différentes catégories de déchets de quelques pays	12
Tableau 6: Classement des déchets en fonction de la source d'approvisionnement	34
Tableau 7: Paramètres de contrôle et de suivi du procédé de compostage	38
Tableau 8: Paramètres de stabilité et de maturité [en % d'apparition dans la littérature].....	42
Tableau 9: Proportions des différents substrats et adjuvants intrants à Dakar	55
Tableau 10: Proportions des différents substrats et adjuvants intrants à Bujumbura	55
Tableau 11: Paramètres et période de suivi.....	59
Tableau 12: Étalonnage pour le dosage du phosphore.....	67
Tableau 13: Procédure suivie pour l'identification des microorganismes.....	71
Tableau 14: Caractéristiques physico-chimiques des substrats de départ (à Dakar)	77
Tableau 15: Caractéristiques microbiologiques des adjuvants (à Dakar)	79
Tableau 16: Caractéristiques physico-chimiques des substrats de départ (à Bujumbura)	79
Tableau 17: Caractéristiques microbiologiques des adjuvants (à Bujumbura).....	80
Tableau 18: Comparaison des valeurs physico-chimiques (des 2 composts produits à Dakar) aux valeurs obtenues par d'autres auteurs et quelques normes internationales.....	81
Tableau 19: Comparaison statistique des caractéristiques physico-physiques des 2 composts produits à Dakar.....	81

Tableau 20: Comparaison des valeurs physico-chimiques (des 4 composts produits à Bujumbura) aux valeurs obtenues par d'autres auteurs et quelques normes internationales.....	82
Tableau 21: Comparaison statistique des caractéristiques physico-physiques des 4 composts produits à Bujumbura.....	83
Tableau 22: Taux de cendres des composts produits à Bujumbura	102
Tableau 23: Proportion des masses sèches des différents substrats de départ et adjuvants de Bujumbura et Dakar.....	106
Tableau 24: Caractéristiques microbiologiques des adjuvants.....	107
Tableau 25: Comparaison des valeurs physico-chimiques des intrants et composts finis aux valeurs obtenues par d'autres auteurs et quelques normes internationales	108
Tableau 26: Comparaison statistique des paramètres physico-chimiques des composts obtenus à Bujumbura et à Dakar	109
Tableau 27: Comparaison statistique des teneurs en matières sèches des composts produits à Dakar avec ceux de Bujumbura.....	110
Tableau 28: Conditions météorologiques à Dakar et à Bujumbura au cours de la période de compostage.....	113
Tableau 29: Durée de compostage mois par mois à Dakar et à Bujumbura	115
Tableau 30: Teneurs en éléments traces métalliques des composts produits en comparaison avec quelques normes et resultats d'autres auteurs.....	124
Tableau 31: Micro-organismes présents dans les adjuvants intrants et composts mûrs obtenus	126
Tableau 32: Résultats du taux de germination (TG) des composts sur les graines d'arachides.....	128
Tableau 33: Valeur moyenne de l'indice de germination (IG) induit par les composts.....	129
Tableau 34: Taux de germination (TG) des graines d'arachides et graines de maïs	133
Tableau 35: Indice de germination (IG) des graines d'arachides et graines de maïs.....	133
Tableau 36: Comparaison des taux de germination sur les graines d'arachide des extraits aqueux des composts produits à Dakar et à Bujumbura (C/N =30 des intrants).....	135
Tableau 37: Indices de germination sur les graines d'arachide des extraits aqueux des composts composts produits à Dakar et à Bujumbura (C/N =30 des intrants).....	135
Tableau 38: Évolution de la hauteur et le taux de croissance de l'amarante en fonction du temps	139
Tableau 39: Tableau récapitulatif du taux moyen de croissance de l'amarante au 28 ^{ème} jour.....	139
Tableau 40: Traitement statistique de la variation de la hauteur en fonction du compost	139
Tableau 41: Traitement statistique de la variation de la hauteur en fonction de la dose	140
Tableau 42: Résultats de la biomasse végétale en fonction de la dose du compost appliquée	140

Liste des Sigles et Abréviations

ADEME	: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ADLP	: Association pour le Développement et la Lutte contre la Pauvreté
ADN	: Acide Désoxyribonucléique
AFNOR	: Associations Françaises de Normalisation
AMA	: Acra Metropolitan Assembly
ANG	: Associations Non Gouvernementales
BCC	: Bujumbura Cleaning Company
BGC	: Bujumbura Garbage Company
BP	: Baird-Parker
CCME	: Canadian Council of Ministers of the Environment
CEFREPADE	: Centre Francophone de Recherche Partenariale sur l'Assainissement, les Déchets et l'Environnement
C/N	: Rapport Carbone-Azote
CICR	: Comité International de la Croix-Rouge
COT	: Carbone Organique Total
COTEBU	: Complexe Textile de Bujumbura
CSR	: Combustibles Solides de Récupération
DBACR	: Dispositif en Blocs Aléatoires Complètement Randomisés
DCO	: Demande Chimique en Oxygène
DEEE	: Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques.
D.S.O.U.R	: Dry Specific Oxygen Uptake Rate
DSM	: Déchets Solides Ménagers
DSMA	: Déchets Solides Ménagers et Assimilés.
DU	: Déchet Ultime
ETM	: Éléments-Traces Métalliques
FABI	: Faculté d'Agronomie et Bio-Ingénierie
FMAT	: Flore Mésophile Aérobie Totale
H.M	: Hauteur moyenne
HSW	: Household Solid Waste
H (%)	: Pourcentage d'Humidité
IG	: Indice de Germination
ISABU	: Institut des Sciences Agronomiques du Burundi
ISTEEBU	: Institut de Statistiques et d'Études Économiques du Burundi
LASPA	: Laboratoire d'Analyse des Sols et des Produits Agro-alimentaires
MEEATU	: Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme
M.P.R	: Masse de la Partie Racinaire
M.P.A	: Masse de la Partie Aérienne
MOT	: Matière Organique Totale
MS	: Matières Sèches
MSV	: Matières Solides Volatiles
NTK	: Azote Total Kjeldahl
ODD	: Objectifs de Développement Durable
OBPE	: Office Burundais pour la Protection de l'Environnement
OM	: Ordures Ménagères

OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
PCA	: Plate Count Agar
PCI	: Pouvoir Calorifique Inférieur
PED	: Pays En Développement
pH	: Potentiel d'Hydrogène
PI	: Pays Industrialisés
PME	: Petites et Moyennes Entreprises
PNA	: Politique Nationale d'Assainissement
PNS	: Politique Nationale de Santé
PPP	: Partenariat Public Privé
PTMB	: Pre-Traitement Mécanique et Biologique
SAA	: Spectrophotométrie d'Absorption Atomique
SETEMU	: Services Techniques Municipaux
S.O.U.R	: Specific Oxygen Uptake Rate
SPI	: Secrétariat permanent pour la prévention des pollutions industrielles en Vallée de Seine.
TBX	: Tryptone Bile X Glucuronide
T.C	: Taux de croissance
TG	: Taux de Germination
TSN	: Tryptone Sulfite Néomycine
UB	: Université du Burundi
UCAD	: Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal)
UFC	: Unité Formant Colonie
ULB	: Université Libre de Bruxelles (Belgique)
VRBL	: Violet Red Bile Lactose
°C	: Degré Celsius
μ	: Masse volumique en (kg/dm ³)

Liste des annexes

Annexe I : Photos de l'appareil Vulcan en activité (Détermination du taux de MO)

Annexe II : Dosage de l'azote par la méthode Kjeldahl

Annexe III : Détermination du carbone organique total (COT) par la méthode de Walkley and Black

Annexe IV : Mode opératoire pour la recherche de la teneur en phosphore par la méthode Spectrophotométrique

Annexe V : Mode opératoire pour la recherche et dénombrement des microorganismes

Annexe VI : Tableaux des résultats des traitements statistiques des variations de la hauteur et des biomasses de l'amarante

Liste des publications et communications

Articles scientifiques

1. D. RUCAKUMUGUFI, M. DIENG, V. NTAKARUTIMANA, F. M. SAMBE, P. BIGUMANDONDERA et C. M. DIOP, «Influence du rapport C/N des intrants sur la qualité du compost produit», *Afrique Sciences* 20(6) (2022) 14 – 27. ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.net>
2. D. RUCAKUMUGUFI, E. NKURUNZIZA, P. BIGUMANDONDERA, S. KABONEKA, C. M. DIOP et V. NTAKARUTIMANA, «Co-compostage des déchets solides ménagers avec les déjections d'élevage: Optimisation du rapport C/N des substrats», *Afrique Sciences* 18(2) (2021) 94 – 107. ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.net>

Communications orales

- 1) **D. RUCAKUMUGUFI** et S. KABONEKA, «Compostage et gestion du rapport C/N des matières organiques aux déchets urbains biodégradables et aux résidus de récolte», Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales «CRAVE», (10-09-2022), Bujumbura, Burundi.
- 2) **D. RUCAKUMUGUFI** «Co-compostage des déchets solides ménagers avec les déjections d'élevage: Optimisation du rapport C/N des substrats», Semaine de l'Université du Burundi Edition 2020, sous la thématique: Agriculture et Environnement (du 30-08 au 03-09-2021), Bujumbura, Burundi.
- 3) **D. RUCAKUMUGUFI**, P. BIGUMANDONDERA et V. NTAKARUTIMANA, «Co-compostage des déchets solides ménagers avec les déjections d'élevage: Optimisation du rapport C/N des substrats», conférence dans le Centre de Recherche en Sciences Naturelles et de l'Environnement (CRSNE), (18-02-2021), Bujumbura, Burundi.

Posters scientifiques

- 1) **D. RUCAKUMUGUFI**, «Influence du rapport C/N des intrants sur la qualité du compost produit», exposition des échantillons des composts obtenus, Forum/Exhibition Ademia-Public-Private Partnership (APPP) édition 2022 (du 09 au 11-06-2022), Bujumbura, Burundi.
- 2) **D. RUCAKUMUGUFI**, «Co-compostage des déchets solides ménagers avec les déjections d'élevage: Optimisation du rapport C/N des substrats», Forum/Exhibition Ademia-Public-Private Partnership (APPP) édition 2021 (du 24 – 26- juin-2021), Bujumbura, Burundi.

Résumé

Eu égard de la forte croissance démographique et spatiale de la ville de Bujumbura, de l'augmentation qualitative et quantitative des déchets solides ménagers (DSM), de la quasi-inexistence à la fois du mode de leur gestion et de décharge contrôlée, il est urgent que des actions appropriées soient opérées en vue d'une gestion efficace et pérenne des DSM de cette ville. La valorisation par compostage présente une perspective intéressante de gestion des DSM fermentescibles et une réponse aux agriculteurs pour l'accroissement de la productivité agricole. Cependant, un compostage nécessite un savoir-faire, une maîtrise des paramètres de contrôle et de caractérisation afin de produire un compost de meilleure qualité. C'est dans cette optique que cette thèse a été menée avec pour objectif «**Essai d'optimisation de la production du compost à partir du co-compostage des déchets solides ménagers organiques avec les déjections d'élevage**». Les caractérisations physico-chimiques effectuées sur les intrants nous ont révélé que ces déchets sont de bonne qualité pour le compostage avec des teneurs moyennes en matières organiques (MO) variant entre 83,62-84,43 % (à Dakar) et 86,37 - 87,84 % (à Bujumbura). Des déchets fermentescibles et déjections d'élevage ont servi à monter six types d'andains de rapports C/N différents: C1B (C/N=30); C1D (C/N=30); C3B (C/N=35) et C4B(C/N=25) avec comme adjuvant bouses de vaches, C2B (C/N=30) et C2D (C/N=30) avec comme adjuvant les fientes de poules. Le procédé de co-compostage par retournements des andains aérés a été retenu et le processus a duré 55 jours pour les andains de Dakar et entre 60 - 68 jours pour ceux de Bujumbura. Les températures maximales atteintes sont de 69,3°C (C1D), 66,6°C (C2D) et varient de 64,5°C - 70,5°C pour les andains de Bujumbura. En plus des analyses physico-chimiques, nous avons également effectué des analyses microbiologiques, biologiques et des tests agronomiques sous-serre. Les résultats des analyses effectuées sur les composts finis montrent des valeurs de pH légèrement basiques; des teneurs en matières organiques totales (MOT), en carbone, en éléments minéraux majeurs (N, P, K) et des rapports en C/N caractéristiques des composts de qualité appréciable. Les abattements de la densité microbienne ont varié jusqu'à 8,05 log₁₀. Les IG, plus sensibles pour les graines de maïs (*Zea mays L.*), sont meilleurs pour la dose de 25 %. C'est cette même dose de 25% qui donne les meilleurs taux et indices de germination sur les graines d'arachides (*Arachis hypogea L.*) pour tous les composts fabriqués. Les concentrations en éléments traces métalliques (ETM) sont de loin inférieures aux normes internationales pour tous les composts de Bujumbura. Pour les essais agronomiques sur l'amarante (*Amaranthus hybridus*) cultivée sous- serre, les doses de 25% et 50% manifestent de meilleures performances de croissance en hauteur et en biomasse par rapport au témoin et; le compost C1B se classe premier par rapport aux trois autres et plus particulièrement pour la dose de 25%. Si on considère toutes les caractérisations établies, tous les six composts fabriqués sont mûrs et de bonne qualité agronomique. Néanmoins, nous remarquons que les composts de rapport C/N =30 des intrants sont meilleurs par rapport à ceux de C/N =25 et C/N=35 et, ***c'est ce rapport de C/N=30 qui peut être considéré comme mélange optimal des intrants de compostage et plus particulièrement avec l'adjuvant bouses de vaches***. De plus, les résultats de cette étude montrent qu'à égal rapport de C/N des intrants et même méthode de compostage, les conditions climatiques manifestent leur influence sur la cinétique de dégradation des matières premières compostées et non sur la qualité du compost obtenu.

Mots clés: Compostage, fermentescible, andain, densité microbienne, phytotoxicité, adjuvant, C/N

Abstract

In view of the strong demographic and spatial growth of the city of Bujumbura, the qualitative and quantitative increase in household solid waste (HSW), the virtual non-existence of both the mode of their management and controlled landfill, it is urgent to take appropriate actions with a view to effective and sustainable management of the HSW of this city. Valorization by composting presents an interesting approach for the management of fermentable HSW and a response to farmers for increasing agricultural productivity. However, composting requires know-how, mastery of control and characterization parameters in order to produce better quality compost. It is with this in mind that this thesis was carried out with **the objective of "Trial of optimization of compost production from the co-composting of organic household solid waste with livestock droppings"**. The physico-chemical characterizations carried out on the inputs revealed to us that this waste is of excellent quality for composting with average organic matter (OM) contents varying between 83.62-84.43% (in Dakar) and 86.37-87.84% (in Bujumbura). Fermentable waste and livestock manure were used to assemble six types of windrows with different C/N ratios: C1B (C/N=30); C1D (C/N=30); C3B (C/N=35) and C4B (C/N=25) with cow dung as an adjuvant, C2B (C/N=30) and C2D (C/N=30) with chicken droppings as an adjuvant. The co-composting process by turning the aerated windrows was retained and the process lasted 55 days for the windrows in Dakar and between 65 - 75 days for those in Bujumbura. The maximum temperatures reached are 69.3°C (C1D), 66.6°C (C2D) and vary from 64.5°C - 70.5°C for the Bujumbura windrows. In addition to physico-chemical analyses, we also carried out microbiological, biological and agronomic tests in the greenhouse. The results of the analyses carried out on the finished composts show slightly basic pH values; contents of TOM, carbon, major mineral plant nutrients (N, P, K) and C/N ratios characteristic of composts of appreciable quality. The reductions in microbial density varied up to 8.05 log₁₀. The germinations indices (GIs), which are more sensitive for maize (*Zea mays L.*) seeds, are better for the dose of 25%. It is this same dose of 25% that gives the best germination rates and indices on peanut seeds (*arachis hypogea L.*) for all the composts produced. The metallic trace elements (MTE) concentrations are far below international standards for all Bujumbura composts. For agronomic trials on amaranth (*Amaranthus hybridus*) grown under greenhouse, the doses of 25% and 50% showed better growth performance in height and biomass compared to the control and; C1B compost ranks first compared to the other three and more particularly at the dose of 25%. If we consider all the established characterizations, all the six composts produced are mature and of good agronomic quality. Nevertheless, we notice that the composts of ratio C/N =30 of the inputs are better compared to those of C/N =25 and C/N=35 and, it is this ratio of C/N=30 which can be considered as an optimal mix of composting inputs, particularly with the cow dung adjuvant. In addition, the results of this study show that for an equal C/N ratio of the inputs and the same composting method, the climatic conditions reveal their influence on the kinetics of degradation of the composted raw materials and not on the quality of the compost obtained.

Keywords: *Composting, fermentable, windrow, microbial density, phytotoxicity, adjuvant, C/N*

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'évolution démographique et l'urbanisation croissante dans les pays en développement (PED) font que la quantité de déchets urbains produits ne cesse d'augmenter, ce qui préoccupe fortement les responsables locaux et les habitants de plus en plus conscients des risques sanitaires humains et environnementaux y associés (Cheniti 2014; Tshala *et al.*, 2017). Selon un rapport de la Banque Mondiale, si rien ne change rapidement, la production de déchets passera de 2,01 milliards de tonnes (chiffres de 2016) à 3,40 milliards de tonnes par an en 2050, soit une augmentation de 70 % (Rhouma *et al.*, 2019; Kaza *et al.* 2018). Cette production de déchets sera multipliée par trois en Afrique subsaharienne et par deux en Asie du Sud, les estimations montrent par ailleurs que ces deux régions représenteront 35% des déchets produits sur la planète en 2050 (Longanza *et al.*, 2015; Rhouma *et al.*, 2019; Kaza *et al.*, 2018).

Selon Cuccheilla *et al.* (2017), la gestion des déchets solides constitue aujourd'hui l'un des défis majeurs dans l'atteinte des Objectifs de Développement Durable (ODD) (Cucchiella *et al.*, 2017). Il est à noter que 4 des 17 ODD, soulignent la nécessité de réduire et de gérer convenablement toutes les formes de déchets d'ici à 2030 (Debornes 2017). La gestion de ces déchets et leur élimination devient une obligation pour tout pays.

La ville de Bujumbura, capitale économique de la République du Burundi, a subi une forte croissance démographique et spatiale. En exploitant les données des trois recensements généraux de la population déjà menés au Burundi, respectivement en 1979, 1990 et 2008 et un modèle de croissance de la population de Bujumbura qui suit une progression géométrique (Niyongabo, 2006). Ainsi, pour une année « X » donnée, la population de la ville de Bujumbura est donnée par la relation suivante: $[P_n = P_0(1+r)^n]$ * (Niyongabo, 2006) . Avec un taux de croissance annuel « $r = 4,2\%$ » donné par le Ministère de l'intérieur (2008), la population de la ville de Bujumbura à l'année 2020, 2025, 2030 et 2065, est estimée respectivement à 814 543, 1 000 582, 1 229 111 et 5 187 539 habitants (Ministère de l'intérieur 2008). D'ici 2065, la population de la ville de Bujumbura aura presque été multipliée par un facteur 5,87 (passant de 884 401 à 5 187 539 habitants) ce qui implique ipso-facto une grande quantité de déchets à gérer.

La question d'évacuation des déchets fait couler beaucoup de salive dans ces jours. Depuis 1983, date de création des Services Techniques Municipaux (SETEMU) (Ministère de l'Aménagement du Territoire du Tourisme et de l'Environnement 2007), la question de la propreté en Mairie de Bujumbura est restée préoccupante. En plus des SETEMU, des associations et des sociétés privées se sont succédées dans la collecte et l'enlèvement des déchets. Cependant, toutes ces associations et sociétés ont enregistré un échec dans ce secteur.

Ainsi, l'assainissement des déchets solides, qui est un des éléments centraux dans cette thèse, présente d'énormes manquements à Bujumbura comme dans la plupart des pays en développement (PED). Dans ces villes, surtout africaines, elles utilisent des décharges à ciel ouvert (exemple du dépotoir placé à Mubone-province de Bujumbura pour le cas de la ville de Bujumbura) pour déverser les déchets solides municipaux non triés. Cette pratique est un problème en débat constant car, ces décharges non sécurisées en termes de protection de l'environnement développent des impacts négatifs sur ce dernier (Tchuikoua *et al.*, 2014; Diarrassouba *et al.*, 2018; Jaglin *et al.*, 2019; Trombert, 2019, Manirakiza *et al.*, 2020).

D'une façon générale, les déchets produits dans les pays en développement (PED) se caractérisent par de plus grandes quantités de matières fermentescibles d'une moyenne comprise entre 50 et 70% (Bangoura 2018; Temgoua 2014; Ngnikam *et al.*, 2017; Tshala *et al.*, 2017).

Pour garantir un bon état sanitaire et une protection optimale de l'environnement, des alternatives incluant une valorisation énergétique doivent être entreprises. Il s'agit principalement du compostage, de la méthanisation et de l'incinération. De toutes ces technologies, le compostage paraît comme une écotecnologie et en même temps une technologie à faible coût «Low cost», il permet en outre la valorisation des matières organiques en matières fertilisantes limitant ainsi la fuite des matières premières par les décharges et répond pleinement au principe du développement durable adapté aux pays en développement (PED) (Tchicama *et al.*, 2018; Kanté 2019; Ilunga *et al.*, 2019; Garba *et al.*, 2020). Les composts produits peuvent remplacer partiellement ou totalement les fertilisants chimiques du fait qu'ils présentent des teneurs élevées de matière organique et d'éléments nutritifs (N, P, K). Ils contribuent à la nutrition des plantes et permettent l'augmentation significative des rendements des cultures (Compaoré *et al.*, 2010; Garba *et al.*, 2020; Lacour 2013; Longanza *et al.*, 2015; Ngom *et al.*, 2017; Mella *et al.*, 2018). Cependant, les composts de déchets d'ordures ménagères seules restent insuffisamment riches en éléments fertilisants majeurs (Garba *et al.*, 2020), en particulier l'azote, le phosphore et le potassium (Biekre *et al.*, 2018; Compaoré *et al.*, 2010; Gnimassoun *et al.*, 2020). A cet effet, dans le souci d'enrichir le compost en ces éléments majeurs, des procédés de co-compostage avec ajout d'adjuvants de déjections d'élevage ont été entrepris dans notre expérimentation (Biekre *et al.*, 2018; Compaoré et Nanéma 2010; Rafolisy *et al.*, 2015). Le choix des adjuvants reste donc un des points le plus pertinent pour obtenir un compost de qualité. De plus, le secret d'un compost réussi réside dans le bon équilibre entre matières azotées et carbonées dont le rapport du mélange des substances de départ à composter doit être fixé et se situer entre 25-35 pour finir entre 10-15 en fin de mûrissement (Gnimassoun

et al. 2020; Rafolisy et al., 2015). En raison de gestion des déchets solides ménagers de la ville de Bujumbura, la présente étude a pour orientation de contribuer à l'amélioration de la qualité sanitaire et environnementale en réduisant les risques associés à la gestion actuelle des DSM en ville de Bujumbura. Ainsi, l'**objectif global** se veut l'«Essai d'optimisation de la production du compost à partir du co-compostage des déchets solides ménagers organiques avec les déjections d'élevage». De cet objectif général découle quatre **objectifs spécifiques**: (1) produire un compost amélioré par co-compostage de la fraction organique des DSM avec les adjuvants de déjections animales tout en optimisant le rapport C/N des substrats de départ; (2) évaluer la qualité dudit compost sur base de certains paramètres physico-chimiques, microbiologiques et biologiques; (ces deux premiers objectifs constituant le calage du processus de compostage afin de comparer les composts produits en fonction de la variabilité des conditions climatiques); (3) déterminer l'influence du rapport C/N, rapport calculé au préalable en utilisant une formule mathématique, des intrants sur la qualité du compost produit; (4) évaluer les critères d'innocuité y compris des essais sous serre des composts produits.

Après la partie introduction qui se focalise sur le contexte, la problématique du sujet et les objectifs de notre recherche, trois principales parties constituent ce volet de thèse:

- La première partie bibliographique fait état des lieux sur la production et la salubrité des déchets solides des villes africaines en général et de la ville de Bujumbura en particulier. Cette partie permet de dégager les paramètres à prendre en compte dans la gestion des déchets d'une façon générale, leurs modes de caractérisation et de traitement;
- Une deuxième partie est consacrée aux matériels et méthodes analytiques où nous grouperons les études expérimentales et les différentes méthodes analytiques utilisées pour le suivi du processus de compostage et l'évaluation des propriétés physico-chimiques, microbiologiques, biologiques et agronomiques des composts obtenus;
- La troisième partie présentera les résultats et les discussions portant sur les analyses effectuées, les intrants et les composts produits.

Le travail de thèse se clôture par une conclusion générale et la présentation des perspectives en vue d'une maîtrise du compostage des déchets solides ménagers, particulièrement à l'application aux déchets de la ville de Bujumbura.

PREMIÈRE PARTIE: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1: Déchets solides ménagers en vue de leur utilisation en compostage.

Introduction.

Bien que le terme «déchet», ou ses équivalents, «ordures», détritiques», voire «résidu», soient des termes de langage courant, leur définition précise n'est pas récente et reste largement évolutive (Cheniti 2014; SPI 2015).

De façon subjective, un bien devient déchet lorsque son propriétaire a la volonté de s'en débarrasser. Ce bien demeure lui appartenir tant qu'il n'a pas quitté la propriété de cette personne (Aloueimine 2006; Cheniti 2014; Sotamenou 2012).

De façon objective, un déchet se définirait comme un objet dont la gestion doit être contrôlée au regard de la protection de la santé publique et de l'environnement, indépendamment de la volonté du propriétaire et de la valeur économique de l'objet. En tout état de cause, le détenteur d'un bien est soumis à la réglementation locale et ne peut se décharger de ses responsabilités face au devenir du déchet sous prétexte de sa valeur économique devenue nulle (Topanou 2012). Notons également que la définition de déchet est complétée par la **notion de «déchet ultime» (DU)** consacrée par la loi française N° 92-646 du 13 juillet 1992, défini par tout «déchet, résultant ou non d'un traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment» (Pesqueux 2021; SPI 2015).

I.1. La production des déchets solides ménagers dans les Pays en Développement.

Il est clairement établi dans presque toute la littérature dédiée à ce sujet, une différence significative entre la génération des déchets par habitant dans les pays industrialisés (PI) et celle des PED (Cheniti 2014).

Alors que les pays à revenu élevé ne rassemblent que 16 % de la population mondiale, ils génèrent plus d'un tiers (34 %) des déchets de la planète, indique le rapport qui dresse un état des lieux mondial et régional de la situation. Près d'un quart de la production mondiale de déchets (23 %) est actuellement imputable à la région Asie de l'Est-Pacifique. Ces déchets vont continuer de s'amonceler. L'estimation globale est ainsi passée de 1,3 milliard de tonnes annuelles en 2012 à 2,01 milliards en 2016, et devrait gonfler sans discontinuer jusqu'à atteindre 3,40 milliards de tonnes de déchets par an en 2050 (Kaza et al., 2018).

Le rapport prédit qu'à l'horizon 2050 la production de déchets sera multipliée par plus de trois et plus de deux en Afrique subsaharienne et en Asie du sud respectivement (Kaza et al., 2018). Ce sont les États – Unis d'Amérique, qui, à eux seuls, sont à l'origine de 12 % des ordures dans le monde, alors qu'ils ne représentent que 4 % de la population mondiale, soit 773 kg par

individu et par an (contre 530 pour la France et 150 au Bangladesh). Ce qui leur permet d'occuper la première place de l'index de production des détritiques (Kaza *et al.*, 2018)

Cette différence de production de déchets s'explique en partie par les niveaux de vie et les modèles de consommation. Les PI abritent des sociétés dites de consommation avec un niveau de vie élevé et, plus le niveau de vie est élevé, plus la population consomme des produits préparés, générant plus d'emballages à jeter (Rhouma *et al.*, 2019; Kaza *et al.*, 2018). Le modèle de consommation est marqué par la rapidité d'utilisation des produits à courte durée de vie avec des emballages importants (Rhouma *et al.* 2019; Kaza *et al.*, 2018). Or les PED, sont à l'opposé de ce modèle et le niveau de vie est moins important. Le modèle de consommation est basé sur les produits locaux, bruts ou semi fini, utilisant un emballage minimum. Ces différences dans les modèles de consommation conjuguées aux conditions de développement inhérentes aux PED posent quelques difficultés méthodologiques et techniques quant à la gestion des déchets. Ainsi, les déchets de ces pays sont marqués par leur très grande variabilités et hétérogénéités, ce qui rend inopérant l'emploi des méthodes développées dans les contextes des PI (Ben Ammar et Fouilly 2008; Ekmekçioğlu *et al.*, 2010; Cheniti 2014; Ngnikam *et al.*, 2017; Ben Ammar 2006). Par ailleurs, tous les modèles de gestion se basent sur les données statistiques fiables. Or, il a été démontré que les statistiques officielles en matière de production et de composition des déchets ménagers dans les PED sont non seulement difficiles à obtenir mais aussi approximatives (Ngnikam *et al.*, 2017; Akpo *et al.*, 2021). Elles sont produites sur la base de recensements non exhaustifs de la population et une évaluation sommaire de la quantité et de la qualité des déchets collectés. La collecte des déchets y est irrégulière et les moyens de pesée à l'entrée des décharges non contrôlés ou même inexistantes. La détermination de la nature et de la composition des déchets doit être évaluée en respectant des critères d'échantillonnage stricts et impose une démarche méthodologique basée sur des mesures et des analyses réelles afin d'éviter l'exploration des résultats biaisés (Cheniti 2014; Ngnikam *et al.*, 2017; Tahraoui 2013). D'une façon générale, les déchets des PED se caractérisent par de plus grandes quantités de matières fermentescibles variant entre 50 et 70 % contre une valeur moyenne de 35% dans les PI à l'exception de la Grèce (Temgoua *et al.*, 2014; Ngnikam *et al.*, 2017; Bangoura 2018; Garba *et al.*, 2020; Akpo *et al.*, 2021). Par contre pour les fractions papiers, verres et matières plastiques, on note un fort pourcentage chez les PI. Cela reflète la différence dans les modes de consommation des populations des PI et des PED. Par ailleurs, grâce aux politiques menées dans les PI visant à réduire à la source les taux de plastique, qui provient aussi en grande partie des emballages, cette catégorie a tendance à diminuer dans la poubelle ménagère au profit d'autres fractions moins polluantes. Par contre, l'absence de politique similaire dans les PED

ESSAI D'OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DU COMPOST À PARTIR DU CO-COMPOSTAGE DES DÉCHETS SOLIDES MÉNAGERS ORGANIQUES AVEC LES DÉJECTIONS D'ÉLEVAGE.

fait que cette catégorie demeure encore très présente et peut représenter plus de 20 % de la masse des ordures ménagères (OM) (Aloueimine 2006; Ben Ammar et Foully 2008; Kondoh *et al.*, 2019; Ben Ammar 2006).

Les résultats du **Tableau 1** permettent d'avoir une idée non exhaustive de la variation de composition de certaines catégories de déchets ménagers le plus souvent citées dans les différents pays. Par ailleurs, la fraction «Autres» varie beaucoup et se compose de différents matériaux. Selon les auteurs, on peut y trouver un ou plusieurs matériaux mélangés tels que du sable, cailloux, pierres, céramiques, couches culottes, mousses, batteries etc.

Tableau 1: Composition des déchets en % de matière sèche dans quelques capitales africaines

Pays	Références	Organique (putrescibles)	Verres	Papiers/cartons	Plastiques	Métaux	Autres (Inertes, combustibles,..)
Algérie	(Guermoud and Addou 2014)	65,5	4	13	7	3,5	7
Benin	(Topanou 2012)	52,9	0,7	2,7	4,3	1,2	38,2
Burkina Faso	(Folléa <i>et al.</i> , 2002)	39,0	3,0	9,0	10,0	4,0	35
Burundi	(Mizero <i>et al.</i> , 2015)	57	15	6	8	5	9
Cameroun	Ngnikam <i>et al.</i> , 2017)	76,1	1,7	3,5	10	0,8	7,2
Côte d'Ivoire	(Nitrogen <i>et al.</i> , 2021)	73	0,8	2,8	11,1	3,5	8,8
Egypte	(PNUE 2018)	56	4	13,0	10	2	15
Ghana	(Debornes 2017; Oteng-Ababio <i>et al.</i> , 2013)	85,0	2,0	5,0	3,0	3,0	2
Guinée	(Sotamenou 2012)	69,0	0,3	4,1	22,8	1,4	2,4
Kenya	(PNUE 2018)	65,0	2,0	6,0	12	1,0	15
Liban	(Sotamenou 2012)	62,4	5,6	11,3	11	2,9	-
Maroc	(Souabi <i>et al.</i> , 2011)	74,0	1,2	6,6	8,1	2,2	10,6
Mauritanie	(Aloueimine 2006)	4,8	3,8	3,6	20,0	4,2	63,6
Niger	(Debornes 2017)	31	1	1	0	1,0	51
Nigeria	(PNUE 2018)	62,6	2,5	10,7	4,2	2,2	19,7
Sénégal	(Debornes 2017)	56,3	3	9,7	9,0	3,4	24,4
Tchad	(Debornes 2017)	25,0	1,0	3,0	6,0	2,0	63
Tunisie	(Grissa 2017)	68	3,0	11	7	4	7
Zimbabwe	(Debornes 2017)	26,0	6,0	34,0	15,0	5,0	14
Togo	(PNUE 2018)	70	0,7	2	4,1	3,0	4,0
Tanzanie	(Bello <i>et al.</i> , 2016)	71	4,0	9,0	9,0	2	47,2

Remarque: Le total n'est pas de 100 % dans certaines villes puisque les données des auteurs considérés ont été rapportées telles quelles.

Du fait de la mondialisation et du changement de style de vie, les variétés et le volume des déchets solides en Afrique ont augmenté. La mondialisation n'a donc pas seulement eu effets positifs sur le style de vie des africains car elle a hélas aussi favorisé l'importation des modes de collecte des déchets solides qui ne correspondent pas toujours aux spécificités géographiques, culturelles, économétriques et même technologiques de nos pays. Dans la plupart des villes africaines, moins de la moitié des déchets produits au quotidien est collectée. Ces faibles taux de collecte sont synonymes de pollution et de prolifération

de maladies (Ziraba *et al.* 2016). Le **Tableau 2** présente les taux de collecte des déchets solides dans quelques grandes villes africaines.

Tableau 2: Taux de collecte des déchets solides dans quelques grandes villes africaines.

Villes	Références bibliographiques	Taux de collecte des déchets solides
Treichville (Côte d'Ivoire)	(Effebi <i>et al.</i> , 2017)	70 %
Accra (Ghana)	(PNUE 2018)	80 %
Caire (Égypte)	(Bangoura 2018; Sotamenou 2017)	68 %
Bamako (Mali)	(Kanté 2019)	60 %
Bujumbura (Burundi)	(Ministère de l'environnement, de l'agriculture et de l'élevage 2019)	46 %
Conakry (Guinée)	(Debornes 2017)	71 %
Dakar (Sénégal)	(PNUE 2018)	47 %
Dar-es-Salam (Tanzanie)	(Sotamenou 2017)	39 %
Kigali (Rwanda)	(Debornes 2017)	70 %
Lagos (Nigeria)	(PNUE 2018)	40 %
Lomé (Togo)	(Debornes 2017)	37 %
Lusaka (Zambie)	(PNUE 2018)	45 %
Nairobi (Kenya)	(Sotamenou 2017)	55 %
Ouagadougou (Burkina Faso)	(Dahani et Compaoré 2021)	50 %
Ouganda	(PNUE 2018)	65,2 %
Rabat (Maroc)	(Sotamenou 2017)	70 %
Yaoundé (Cameroun)	(PNUE 2018)	47 %

De par la nature très composite et variée des déchets solides produits en Afrique, il est urgent d'ajuster les systèmes de gestion mise en place. En effet, plus de la moitié de la production de DSM dans les principales villes africaines est constituée de matières organiques (voir le **Tableau 1**).

I.2. Caractérisation des déchets solides municipaux (DSM).

1. La masse volumique

La masse volumique est l'un des paramètres importants aussi bien dans le choix et la conception des moyens de collecte des déchets ménagers que dans les techniques de valorisation/recyclage de ces déchets. En raison de l'humidité élevée, de la typologie des déchets, de la proportion importante de la fraction des fines inférieures à 8 mm (sable et poussière), des fermentescibles et des constituants lourds, la masse volumique est en moyenne plus élevée dans les PED que dans les PI (PNUE 2018; Topanou 2012). Selon les études réalisées par certains auteurs, la masse volumique moyenne augmente et double pratiquement pendant le transport, et., les déchets reprennent pratiquement leur masse volumique initiale après déversement dans les quais de déchargement (Ngnikam *et al.*, 2017). De plus, la masse volumique des déchets des PED est élevée en raison de la teneur élevée de la matière organique, de leur taux d'humidité et du pourcentage de la fraction des fines (Koledzi 2011).

La masse volumique ou masse spécifique est une grandeur physique qui représente la masse par unité de volume. Elle est exprimée en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ou $1000\text{kg}/\text{m}^{-3}$ dans le système MKSA (Mètre, Kilogramme, Seconde, Ampère (Ngnikam et al., 2017).

2. L'humidité

L'humidité est un paramètre déterminant pour fixer les conditions d'exploitation d'une décharge, le taux de dégradation d'un déchet, ou les modes de traitement des déchets (Aina et al., 2006; Effebi et al., 2017) : Elle oriente souvent les choix de valorisation des déchets, tels que le compostage, la méthanisation ou l'incinération.

- ❖ Si le taux d'humidité (H en %) est plus élevé: $H \text{ (en \%)} \geq 50 \%$ (60 %), les possibilités de valorisation énergétique par combustion sont réduites, donc, l'incinération des ordures est non recommandée (Naquin et Ngnikam 2012; Ngnikam et al., 2017; Bennama 2016);
- ❖ Si $45 \% < H < 70 \%$, alors le compostage des ordures est recommandable (Bennama 2016).

L'humidité est fortement dépendante de la composition des déchets. Le pourcentage d'eau dans les ordures est d'autant plus élevé qu'elles sont plus riches en matières organiques (fruits, légumes, reste de nourriture) dont l'humidité moyenne est autour de 80 % et que la quantité considérable de déchets de fruits que l'on observe en certaines saisons les rend encore plus humides (Koledzi et al., 2011). Il en résulte que la teneur globale en eau varie largement aussi bien avec les saisons, le climat du pays qu'avec les conditions sociales des populations concernées. Ainsi, pendant la saison sèche, l'humidité moyenne peut descendre jusqu'à 15 % et dans ces conditions, la décomposition de la matière organique est inhibée (Koledzi et al., 2011). Les déchets des PED riches en matières organiques se caractérisent par une importante teneur en eau (Guermoud et Addou 2014).

Le taux d'humidité et la masse volumique se mesurent directement après déversement d'ordures ménagères au niveau du site d'étude. À titre d'exemple, la valeur moyenne du taux d'humidité observée pour la ville d'Abomey-Calavi est de 68,85 % et se situe dans l'intervalle caractéristique des PED qui est comprise entre 40 - 80 %. Le haut standing a, tout comme au niveau des fermentescibles, le taux d'humidité le plus faible (Kple 2018).

3. Matières solides volatiles (MSV) et teneur en cendres

Les matières solides volatiles (MSV), représentent la fraction volatile obtenue par calcination (au four à $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ d'une matière organique préalablement séchée à 105°C) de la matière organique totale: la matière organique biodégradable (fermentescibles et papiers) et non biodégradable (plastiques). Ce paramètre est utile pour évaluer le potentiel organique polluant

ou non des déchets (Bennama 2016; Topanou 2012). Le taux de matières solides volatiles est un indicateur important dans le choix de la filière de traitement (incinération ou compostage) des déchets car une valeur élevée de MSV fait augmenter le pouvoir calorifique inférieur (PCI) des déchets, ce qui permettrait de confirmer une valorisation par incinération. Par contre, une valorisation par compostage ou par méthanisation, serait un traitement recommandé face à une valeur faible de MSV (Charnay 2005; Jung 2013; Bennama2016).

Puisque la teneur en cendres correspond aux parts non combustibles des déchets, il en résulte la relation mathématique suivante [*Formules 1 et 2*] entre la teneur en volatiles (V: composants combustibles) et en cendres (C: composants non Combustibles) (Bennama 2016):

$$C + V = 100\% \quad (1);$$

En considérant la part d'eau évaporée par séchage (Hu), alors la formule générale sera:

$$C + V + Hu = 100\% \quad (2)$$

Le Tableau 3 donne les données de caractérisation des DSM de la ville d'Abomey- Calavi par niveau de standing.

Tableau 3: Caractéristiques physico-chimiques des DSM de la ville d'Abomey-Calavi

	Haut standing	Moyen standing	Bas standing	Moyenne
pH	7,9	8	7,7	7,8
Taux d'humidité (%)	57,4	70,2	73,4	68,9
Matières solides volatiles (%)	63,3	66,7	52,7	59,0
Carbone Organique (mg de C /g de matière sèche)	15,3	12,4	17,5	15,0
Azote Kjeldahl (mg/g)	1,4	0,7	0,6	1
Rapport C/N	10,7	16,8	32	15,8

Source: (Kple 2018).

4. Eléments traces métalliques (ETM) des déchets solides municipaux (DSM).

Parmi les éléments traces métalliques, il existe des oligo-éléments, indispensables à la vie et les xénobiotiques dont la présence, même à faible quantité, peut se révéler toxique (Aboudy 2010; Topanou 2012). L'évaluation des quantités des métaux dans les déchets est nécessaire et permet d'évaluer leur potentiel polluant et, par conséquent d'entreprendre les mesures appropriées pour atténuer leur impact sur la santé des populations et sur l'environnement (Koledzi *et al.*, 2011). La présence des métaux dans les déchets est tout d'abord due en grande partie à leur utilisation dans l'industrie pour la fabrication de produits (piles, aérosols, ustensiles de cuisine, peintures, encre, composants électriques, etc.) ou comme emballage pour divers produits (boites de conserve, briques de lait et de jus, papier, carton, plastiques, etc.). Cependant, l'apport de ces métaux dans les ordures ménagères varie en fonction des catégories qui composent le déchet et en fonction du métal considéré. Leurs toxicités varient considérablement d'un métal à l'autre (Aloueimine 2006; Koledzi 2011; Bouallegue 2010; Manirakiza *et al.*, 2020; Topanou 2012). La mise en place des données relatives au potentiel polluant en métaux par catégorie est une

étape essentielle dans la gestion des déchets en vue de l'atténuation de l'impact de ces éléments sur la santé et l'environnement. Pour une meilleure maîtrise des risques liés à la présence des éléments traces métalliques dans les déchets, il est important d'identifier leurs différentes sources. Citons l'exemple du cuivre, qui est généré au sein des déchets par les câbles électriques et métaux mais aussi par les textiles et les plastiques. Une fois la source identifiée, il est possible de réduire voire supprimer la présence du métal dans les déchets (Topanou 2012). Le **Tableau 4** présente les teneurs en métaux dans les déchets de certains PED.

Tableau 4: Composition en métaux dans les déchets urbains (ou composts) de quelques PED

Pays	Référence	Teneurs en métaux lourds (mg/kg)/MS						
		Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
Algérie	(Aina <i>et al.</i> 2006)	50 - 55	/	200 - 245	/	300 - 365	503 - 552	276 - 360
Burkina Faso (Ougadougou)	(Aina <i>et al.</i> , 2006; Compaoré et Nanéma 2010)	/	/	130 - 170	/	209 - 303	292 - 733	134 - 397
Burundi (Bujumbura)	(Rucakumugufi <i>et al.</i> , 2022)	0,3	/	4,3	138	3,6	< 4	35,2
Mauritanie (Nouakchott)	(Aloueimine 2006)	14	228	54	/	64	183	53
Côte d'Ivoire	(Gnimassoun <i>et al.</i> , 2020)	/	58	/	/	/	88,5	167,5
Cameroun (Dschang)	(Temgoua <i>et al.</i> 2014)	12,6	191,3 - 210,4	37,0 - 55,8	/	43,8 - 46,8	24,8 - 29,2	52,4 - 253,3
Togo	(Bokobana <i>et al.</i> , 2017; Toundou <i>et al.</i> , 2015)	2,4	/	40,0 - 135,5	254,0 - 315,0	35,1 - 72,5	418,1 - 640,0	210,0 - 482,2

/: non identifié

5. Composition élémentaire des différentes fractions dans les DSM.

Le **Tableau 5** présente les exemples de composition des différentes catégories de déchets dans quelques villes de pays africains

Tableau 5: Composition chimique en % des différentes catégories de déchets de quelques pays

auteur	Catégorie	MO (en %)	COT (en %)	NTK (en %)	P (en %)	Cendres (en %)
Burundi (RUCAKUMUGUFI <i>et al.</i> 2022)	DSM	85,9	46,2	1,6	0,11	/
Togo- (KOLEDZI 2011)	DSM	66,3	49,6	0,8	/	3
Togo- (Bokobana <i>et al.</i> 2017)	DSM	79,5	32,6	1,8	0,2	4,3
Algérie- (Guermoud et Addou 2014)	DSM	62,2	27,6	1,4	/	37,6
Benin- (Kple 2018)	Carton	81,9	7,5	< 0,1	/	10,6
Benin- (TOPANOU 2012)	DSM	59,1	15,0	1	/	/

/: non identifié

La connaissance de ces paramètres permet d'apprécier le potentiel polluant des décharges, ou la charge organique du massif de déchets et mieux encore, permet de prendre une décision quant au traitement des déchets comme le compostage dans les PED. La composition des déchets est

très variable même au sein d'une catégorie. La teneur en matière organique (MO) dans les putrescibles varie de 21,4 à 75,5 % (Koledzi 2011). Les plastiques contiennent de fort taux de matière organique (variant de 86,9 à 98,7 %), mais très peu dégradable, or leur présence peut conduire à surestimer le taux de matière biodégradable (Koledzi 2011). Les plastiques, surtout les polystyrènes et les polyéthylènes contiennent la teneur la plus élevée en carbone (Koledzi 2011; Kple 2018). Les cartons contiennent le taux d'hydrogène le plus élevé suivi des putrescibles. L'azote est plus présent dans les DSM (*Tableau 5*).

I.3. Conclusion.

La gestion des déchets solides dans les pays en développement et plus particulièrement en Afrique demeure une problématique qui prend de plus en plus de l'ampleur face aux taux élevés de croissance des populations, à l'urbanisation galopante et à la diversification des déchets émis. Ainsi, afin de choisir et d'adapter les filières de gestion des déchets solides ménagers, il est impératif de procéder au triage sélectif et à leur caractérisation à la source et non au niveau des sites de transit ou de décharges finales. Malgré ses multiples nuisances générées, la mise en décharges à ciel ouvert (sauvages) est une pratique courante dans les pays en développement qui n'ont pas toujours les moyens nécessaires pour gérer convenablement les déchets (OMS 2016; Yapi et al., 2021). C'est le cas de Bujumbura, capitale économique du Burundi, qui affiche des difficultés à gérer les déchets hétérogènes produits au niveau des ménages. Or, les déchets d'équipements électriques et électroniques, les pneumatiques, les matières plastiques et les déchets médicaux présents sur décharges sauvages de déchets ménagers peuvent être sources de forte concentration des métaux lourds dans les sols (Bodjona *et al.*, 2012). Les éléments traces métalliques ou métaux lourds peuvent s'incorporer dans la chaîne alimentaire ou migrer vers les eaux souterraines (Biaou *et al.*, 2019; Zaakour et Chemsî 2014). Pour cela, le problème de la gestion des déchets solides ménagers de la ville de Bujumbura doit être résolu au plus vite tout en envisageant des solutions alternatives simples dont les chances d'être appliquées sont grandes.

Chapitre 2: Enjeux de la gestion des déchets solides ménagers.

II.1. Définitions de la salubrité.

Selon l'OMS citée par Ngahane (2015) (Ngahane 2015), la salubrité est un état de l'habitat dont les services ci-après sont assurés avec efficacité:

1. Évacuation régulière des déchets ménagers, des immondices, des excréta, des eaux usées et de ruissellement
2. Traitement régulier des effluents d'eaux usées et de divers déchets, y compris les déchets radioactifs
3. Désinsectisation et dératisation de tous les vecteurs de maladies et des agents de nuisance notamment les moustiques, les rats, les mollusques, les mouches, les glossines, les simulies, les cafards, etc.(Bangoura 2018; Ngambi 2016).

II.2. Etat des lieux de la salubrité dans les PED.

De tous les temps et de tous les lieux, la production des déchets est inhérente aux activités humaines, qu'elles soient domestiques, agricoles, industrielles ou commerciales. Mais en Afrique, comme partout, ce n'est qu'avec le fait urbain qu'elle devient véritablement une problématique publique.

Aujourd'hui, en Afrique, à la faveur d'une urbanisation galopante et de ses corollaires, l'assainissement et la gestion des déchets sont devenus des préoccupations importantes (Hafidi 2015; Maléki 2018). Il suffit de traverser n'importe quelle ville africaine pour constater les manifestations de ce problème: amoncellement de déchets, détritrus le long des routes, ruisseaux (ou rivières) bloqués, site d'enfouissements menaçant la santé dans les secteurs résidentiels, et élimination inadéquate des déchets toxiques (Segbeaya 2012). Ces phénomènes ont des conséquences dans les domaines de l'habitat, de l'éducation, de la santé et de l'environnement (Segbeaya 2012). Les capacités des autorités urbaines à procurer aux citoyens des services de base adéquats et un environnement sain sont dépassés. Les pressions sur l'environnement sont tangibles, les infrastructures et les réseaux urbains en place sont surchargés et/ou inopérants. Donc, les villes africaines produisent des déchets dont elles ne peuvent se débarrasser de manière à préserver leur santé et leur environnement (Tchuikoua *et al.*, 2014; Ngnikam *et al.*, 2017; Plateforme Re-Sources 2015; Yapi *et al.*, 2021).

II.3. Filière de gestion des déchets solides ménagers.

II.3.1. Types de Gestion

La nécessité de gestion des déchets est dictée par les impératifs sanitaires et environnementaux. Ceci est d'autant plus important que la quantité des déchets générés ne cesse d'augmenter et de se diversifier. Ce caractère d'hétérogénéité des déchets représente le principal obstacle pour une généralisation d'une filière de gestion et de traitement de leurs refus (Aloueimine 2006; Meilhac 2014). L'objectif zéro déchet s'inscrit dans un modèle de société plus que dans le cadre de la gestion des déchets. Cet objectif se base de plus en plus sur les **5R** à savoir **R**éduire à la source, **R**éparer, **R**éutiliser, **R**ecycler et **R**éinventer. Cette stratégie invite le consommateur, producteur de déchets à s'engager à ce que ses déchets ne finissent pas ni en décharge ni incinérés (PNUE 2018). Outre la diminution de la production de déchets, cette approche permet d'économiser les ressources naturelles indispensables pour produire de nouveaux objets: pétrole, terres rares, ...

Un nouveau modèle de société à construire: réinventer un monde plus durable, un monde plus respectueux de la nature, un monde dans lequel l'homme ne puisera que ce que la nature peut remplacer car le coût environnemental de tout ce que nous produisons est phénoménal. Plutôt que de recycler, il convient avant tout d'une part d'éviter d'acheter ou à défaut de réduire les achats inutiles, et d'autre part de réparer voire de réutiliser les produits (Topanou 2012).

II.3.2. Étapes de la filière de gestion des déchets solides ménagers.

La filière de gestion des DSM est l'ensemble des étapes qui entrent dans le processus du cycle de vie d'un déchet. Elle comprend quatre étapes: le tri, la collecte, le transfert et le traitement/valorisation. La gestion des déchets, quel que soit le pays, a pour but final la réduction du volume des déchets destinés à la décharge finale et devrait respecter quatre principes:

- Lors de l'élaboration d'un produit, la prise en compte de technologies appropriées en vue de l'optimisation du procédé de fabrication et la production de moins de polluant;
- La mise en œuvre de filières de réutilisation, de recyclage ou de compostage des déchets est l'aspect le plus important dans la gestion des déchets;
- Le rejet des déchets en respect de l'environnement, notion fondamentale lorsqu'aucune des stratégies ne peut être appliquée
- L'enfouissement ultime des déchets qui n'ont pas pu être réduits, réutilisés, recyclés ou compostés (donc, l'élimination n'est qu'un dernier recours) (Babalola *et al.*, 2010).

Ces différents principes régissent la gestion des déchets en ayant recours simultanément à plusieurs stratégies de gestion (ADEME, 1999). En France (à Nice) par exemple, la collecte traditionnelle cohabite avec la collecte sélective. De même, le mode de traitement des déchets de la ville regroupe à la fois, une valorisation organique, matière, énergétique et la technique de stockage. Il n'existe donc pas de solution unique pour une filière de Gestion de Déchets Solides Ménagers (GDSM). Pour diminuer réellement la quantité de déchets, il faut se rappeler du célèbre adage français: «**Le meilleur déchet est celui qui n'existe pas**». On cherche à limiter les déchets à la source, par exemple en évitant le suremballage, en n'achetant pas de produits vite cassés et irréparables, l'évitement du gaspillage alimentaire, etc. (Bangoura 2018). Dans les PED, par contre, les étapes de transfert et traitement sont généralement inexistantes. La collecte se résume à un déplacement des DSM des ménages vers des sites non autorisés. Toutefois, dans certains pays africains, des filières parallèles, comme la récupération et le réemploi constituent une pratique en pleine expansion (Bahers 2012).

II.3.3. Gestion des déchets dans les pays en développement.

L'urbanisation rapide des villes des PED a eu pour conséquence une croissance des taux générés de déchets auxquels les gestionnaires urbains n'étaient pas préparés à faire face (Aloueimine 2006; Bangoura 2018). Selon Koledzi *et al.* (2011), la gestion des déchets solides dans les PED se résume généralement à la *collecte*, au *transport* et à leur *élimination*. Contrairement aux pays du Nord (pays développés) où les systèmes de gestion des déchets solides vont de la collecte sélective à la valorisation énergétique (biogaz) en passant par l'incinération et le recyclage.

Alors que la gestion des déchets solides était seule l'apanage des municipalités dans les années 1960, de nos jours, la plupart des municipalités font appel au Partenariat Public Privé (PPP) pour assurer la gestion de leurs déchets solides. On assiste de plus en plus en Afrique à un nouveau mode organisationnel de la gestion des déchets solides qui débouche sur une gouvernance participative qui intègre les municipalités, les entreprises de collecte agréées, les structures informelles de pré-collecte¹ et les ménages. Dans certaines villes africaines, on assiste également à une gestion communautaire des déchets solides avec la participation des Associations Non Gouvernementales (ANG) mais leurs actions restent inefficaces car les pays en développement n'ont pas toujours les moyens nécessaires pour gérer convenablement les déchets (Biaou *et al.*, 2019; Thonart *et al.*, 2005). Toutefois, quelques villes africaines

¹ La pré-collecte est l'ensemble des opérations liées à la collecte et au transport des déchets des zones à accès difficile vers les zones accessibles aux dispositifs communaux de collecte des déchets (bacs à ordures et camions de ramassage)

connaissent une avancée satisfaisante dans la gestion des déchets solides (**Tableau 2**). Sur base des données du **Tableau 2**, nous trouvons que les villes telles Accra, Conakry, Kigali et Yaoundé (au Cameroun) connaissent des taux de collecte supérieurs ou égaux à 70 %, loin au-dessus du seuil de 50 % que beaucoup d'autres villes du continent peinent à franchir.

Selon Hebette (1996) cité par Tahraoui (2013) et par Bangoura (2018), un taux de collecte inférieur au seuil de 75 % est préjudiciable aussi bien pour la santé que pour l'environnement. En Afrique, les déchets solides non collectés restent dans les quartiers et obstruent les voies de canalisation, entraînant ainsi des inondations en saison des pluies et constituant un lieu idéal pour la prolifération de toutes sortes d'organismes vecteurs et pathogènes (Lohri *et al.*, 2014; Maléki 2018; PNUE 2018, Bangoura, 2018; Tahraoui 2013).

Accra (au Ghana), est l'une des villes qui enregistre les taux de collecte les plus élevés (80% en moyenne). À ce titre, elle est considérée comme un exemple type de PPP réussi. En effet, la gestion des déchets solides à Accra est assurée par un consortium, associant des intérêts privés locaux et extérieurs avec l'appui des petites et moyennes entreprises (PME) sous-traitantes. Accra est divisée en 16 zones de collecte, chacune liée à une PME par un contrat de collecte et d'élimination des déchets solides collectés. L'«Accra Metropolitan Assembly» (AMA) se contente juste de veiller au respect des termes du contrat passé entre chaque zone et une PME, et de superviser des opérations de collecte et d'élimination des déchets solides collectés à la décharge de TEMA située à 37 km de la sortie Est de la ville d'Accra. Près de 90 % des déchets solides produits sur le territoire de l'AMA sont ainsi collectés au moyen de conteneurs publics disposés dans les quartiers aussi bien par l'AMA que par les PME prestataires de services. Ces PME sont rémunérées par l'AMA au poids livré en décharge. Comme les déchets solides collectés à Accra sont à 85 % constitués de matières organiques, Accra dispose d'un projet de compostage communautaire à petite échelle et d'une unité de récupération de matériaux (Debornes 2017; PNUE 2018).

Kigali au Rwanda, comme Accra, est également connue pour être un modèle de propreté en Afrique. Les autorités municipales ont signé un contrat avec une quinzaine de coopératives qui ont la charge de nettoyer la ville. La participation mensuelle des ménages s'élève à environ 1,5 euro. Des poubelles sont positionnées tout au long des rues et les entreprises privées disposent de camions qui balayent les chaussées et qui signent des contrats avec des particuliers (magasins, bureaux, marchés, établissements scolaires...) (Debornes 2017; PNUE 2018).

Au regard de ce qui est mentionné dans les paragraphes précédents, on retient que les villes qui connaissent les taux de collecte les plus élevés sont celles où la gestion des déchets solides est décentralisée et participative (existence de plusieurs opérateurs de collecte agissant à tous les

niveaux). Plusieurs raisons peuvent justifier les faibles taux de collecte enregistrés dans bon nombre de villes africaines: elles vont des contraintes financières aux contraintes physiques en passant par les contraintes institutionnelles et techniques. Pourtant, l'époque appelle aujourd'hui à un changement d'attitude pour bien gérer les déchets produits et minimiser par la suite leurs impacts sur l'environnement (Ngnikam *et al.* 2017; PNUE 2018; Souabi *et al.*, 2011).

II.3.4. Gestion des déchets ménagers dans la ville de Bujumbura.

II.3.4.1. Historique de la Politique Nationale d'Assainissement (PNA).

Si de nombreux pays africains peinent toujours à gérer convenablement leurs déchets solides à plus de cinquante ans après leur indépendance, cette situation s'explique par le fait que dans ces pays, la gestion des déchets solides est confrontée à des problèmes tels que l'étroitesse du budget consacré à la gestion des déchets, les conflits d'intérêts entre les institutions étatiques impliquées dans la gestion des déchets, l'inadéquation du matériel de collecte au regard de la nature des déchets à collecter et l'existence de nombreux bas-fonds (Kondoh *et al.*, 2019; Parrot *et al.*, 2009; Topanou 2012). A cette série de problèmes, nous pouvons ajouter une prise de conscience des populations (engagement personnel) mais aussi une gestion participative des associations et autres...

Selon Hamza (2014), «*Le déchet constitue le symbole de la consommation dans les pays développés, et les signes du désespoir (dans la prise en charge) dans les pays en développement*» (Cheniti 2014).

Ainsi, la ville de Bujumbura, capitale économique du Burundi, n'est pas épargnée face aux difficultés de gestion des déchets ménagers.

Le diagnostic mené dans le cadre de la préparation de la Politique Nationale d'Assainissement (PNA) (MEEATU 2013) a montré que le secteur de l'assainissement était très dynamique et prêt à se mobiliser pour relever les défis posés. Malgré les éléments positifs, le secteur a besoin d'un soutien particulier: les ressources humaines qualifiées sont insuffisantes, les investissements sont très inférieurs aux besoins et le cadre institutionnel et réglementaire nécessite une amélioration. La PNA reconnaît que l'assainissement dans toutes ses dimensions constitue un aspect fondamental du bien-être social, économique et sanitaire des populations. Elle trouve qu'il est nécessaire de poser l'assainissement comme une priorité au niveau national et de mobiliser des financements publics et privés à des niveaux significatifs. Elle ajoute qu'il est également nécessaire de définir une vision qui puisse mobiliser tous les acteurs, mettre en cohérence des actions jusqu'à présent limitées ou disparates et augmenter le niveau de priorité politique accordée à l'assainissement.

II.3.4.2. Situation et défis du secteur.

La PNA (2013) trouve que le secteur de l'assainissement au Burundi est régi par des textes épars dont certains datent de la période coloniale et, pour n'avoir pas été révisés depuis lors, restent encore en vigueur; d'autres, qui ont été élaborés après l'indépendance, ont repris la législation antérieure en s'y référant.

Afin de renforcer le cadre légal et institutionnel, la PNA (2013) propose la mise en place de 4 directions: i) *Amélioration du cadre légal et réglementaire : Mise en cohérence des textes existants et de la production de nouveaux textes destinés à réglementer* les nombreux aspects du secteur de l'assainissement ;

ii) *Clarification du rôle des institutions et de leurs relations:* Le transfert de la compétence assainissement de l'Etat vers les communes sera matérialisé par un texte réglementaire qui précisera notamment, outre les compétences, le patrimoine et les ressources financières transférés aux communes;

iii) *Amélioration de la coordination et de concertation sectorielle:* Les ministères concernés par l'hygiène et l'assainissement se coordonneront au travers d'une structure opérationnelle qui a pour objectifs principaux : l'échange d'information, l'harmonisation des approches, la programmation intersectorielle ... ;

iv) *Mise en place d'un mécanisme de suivi-évaluation:* Le secteur sera doté d'un dispositif de suivi-évaluation performant, reposant sur les enquêtes ménages réalisées régulièrement et sur les données collectées annuellement au niveau des communes et des services déconcentrés des ministères concernés (MEEATU 2013).

II.3.4.3. Objectifs de la PNA sur l'amélioration de la gestion des déchets.

1. Assainissement liquide domestique et industriel.

Le taux d'accès à un assainissement amélioré visé par la PNA en 2025 est de 90 % des ménages en milieu urbain et de 80% des ménages en milieu rural. D'ici à 2025, l'essentiel des ménages disposeront d'un assainissement adéquat des excréta et des eaux usées ménagères (eaux noires et eaux grises) au travers de l'assainissement autonome.

Concernant les déchets liquides industriels, la PNA fait remarquer que très peu de sites industriels disposent de dispositifs adéquats d'évacuation et/ou de traitement des déchets liquides. La PNA propose la progressivité de la mise aux normes et l'équilibre entre les mesures coercitives (amendes) et incitatives (possibilité d'avoir accès à certains financements publics). Ainsi, la PNA s'attend qu'en 2025, toutes les industries aient des systèmes d'évacuation des

eaux usées répondant aux normes en vigueur (prétraitement et/ou raccordement au réseau) (MEEATU 2013).

2. Assainissement des déchets solides domestiques et industriels.

La PNA visait à ce que jusqu'en 2020, 80 % des ménages dans les villes de plus de 50 000 habitants et 50 % des ménages dans les villes de 5 000 à 50 000 habitants aient leurs ordures ménagères collectées et évacuées au moins une fois par semaine dans des conditions d'hygiène qui garantissent à la fois la santé des populations et celles des agents fournissant le service.

Pour l'entreposage, jusqu'en 2020, des Centres d'Enfouissement Technique (CET) devraient être équipés pour entreposer et traiter les déchets solides domestiques dans toutes les villes de plus de 25 000 habitants. La gestion de ces sites devrait être sous la responsabilité des communes qui contractent à cet effet des opérateurs autonomes visant l'équilibre de leur compte d'exploitation.

Pour ce qui est des déchets solides industriels, jusqu'en 2013, très peu de sites industriels disposaient des dispositifs adéquats d'évacuation et/ou de traitement des déchets solides. La PNA prévoit des principes d'intervention sur cet axe notamment la progressivité de la mise aux normes et l'équilibre entre les mesures coercitives (amendes) et incitatives (possibilité d'avoir accès à certains financements publics). Ainsi, d'après la Politique Nationale d'Assainissement (PNA) (2013), les résultats attendus sont:

- En 2020, 70 % des déchets industriels sont évacués via un opérateur agréé vers un site adapté pour le traitement;
- En 2025, 100 % des déchets industriels sont évacués via un opérateur agréé vers un site adapté pour le traitement.

Malheureusement, force est de constater que non seulement jusqu'à cette date butoir de 2020 rien n'était encore fait, mais aussi qu'après trois années de cette date butoir, nous observons qu'il n'y a aucun changement dans le souci d'améliorer le système d'assainissement sur tous les axes. Ainsi, un important travail sur le plan réglementaire et financier accompagnant cet axe est plus que nécessaire. Pour le moment, globalement, les mesures légales et règlementaires en vigueur sont lacunaires et partiellement mises en application.

II.3.4.4. Situation actuelle de la gestion des déchets solides ménagers dans la ville de Bujumbura.

1. Etat des lieux.

Depuis 1983, date de création des Services Techniques Municipaux (SETEMU), la question de la propreté en Mairie de Bujumbura est restée préoccupante.

Créé en 1983 par le décret N° 100/162 du 12 juillet 1983, les SETEMU avaient pour objet l'étude, la réalisation et l'exploitation pour le compte de la Mairie de Bujumbura de tous les travaux techniques, en particulier les travaux de drainage et de voirie, d'évacuation des eaux usées, d'enlèvement des immondices etc. Ils sont également chargés de la construction et de la maintenance des immeubles de l'Etat. Au départ, les SETEMU étaient un service d'assainissement de la Régie de Production et de Distribution d'Eau et d'Electricité (REGISED0). Ils furent réellement créés en 1983 sous la double tutelle des ministères des travaux Publics et de l'Intérieur. En juillet de la même année, les SETEMU passèrent sous la tutelle du ministère de l'Intérieur.

Dans les années 1990, la ville était encore petite et les SETEMU bénéficiaient d'appuis internationaux. Mais, avec la crise de 1993, les appuis ont cessé. Au fur et à mesure que la population urbaine a augmenté, et que la ville s'est agrandie, les déchets ménagers ont aussi augmenté et les SETEMU ont été incapables de remplir leur mission (ONU-Habitat 2012).

Face à cette situation d'impuissance, à partir de l'année 2000, les SETEMU ont impliqué les associations et les sociétés privées dans cette activité. Les plus importantes sont l'Association pour le Développement et la Lutte contre la Pauvreté (ADLP) et Bujumbura Garbage Company (BGC).

Toutefois, ces associations, les travaux communautaires ainsi que les SETEMU contribuent à l'enlèvement de 46 % de la quantité totale des déchets. On comprend que 54 % des déchets ménagers solides ne sont pas collectés. (Citeretse 2008; Mizero *et al.*, 2015)

Face encore à cet échec flagrant, la Mairie a décidé de réorganiser la collecte et l'enlèvement des déchets. D'autres associations et sociétés privées se sont succédées pour accomplir cette activité. Mais, ces dernières n'ont jamais été à la hauteur de leur mission. Toujours soucieux du problème de la propreté de la ville, en 2017, la Mairie a jugé bon de confier cette activité à une seule société «**Bujumbura Cleaning Company (BCC)**», là aussi, l'échec s'est vite dessiné. À partir du mois d'octobre de la même année, 13 associations et coopératives ont été retenues et autorisées à collecter les déchets dans tous les quartiers de la ville en remplacement de BCC.

<https://www.yaga-burundi.com/2017/collecte-immondices-capitale-fiasco/> Les déficits d'ordre

organisationnel, technique et institutionnel, l'insuffisance des infrastructures ainsi que par manque de preuve de civisme poussent les populations à abandonner leurs déchets n'importe où.

C'est ainsi que malgré ces différentes tentatives de la Mairie d'améliorer la gestion des déchets ménagers solides, sur terrain, nous constatons que des dépotoirs sauvages se multiplient.

Des amas d'immondices se développent aux abords des routes, à côté de parking, des marchés, etc.

La **Figure 1** (a, b 1-3 et c) illustre l'état des lieux de la situation de gestion des déchets solides ménagers dans la ville de Bujumbura:



(a) : à côté de la rivière Nyabagere zone séparant Ngagara-Cibitoke (b1-3) : côté marché et sur les rues (c) : Usage des poubelles

Figure1: Situation de la gestion des déchets solides ménagers dans la ville de Bujumbura

Les poubelles publiques récemment installées dans la ville de Bujumbura (Commune Mukaza) ne sont pas utilisées convenablement par les citoyens. Certains habitants jettent toujours les ordures tout autour de ces poubelles (**Figure 1** c). D'une façon générale, les rues et les espaces publics y compris les caniveaux d'évacuation des eaux pluviales sont considérés comme des lieux où il est permis de jeter des déchets de toutes sortes. Au fait, les ménages non abonnés aux services formels de collecte des déchets font partie des premiers responsables de ces dépotoirs sauvages. En effet, certains de ces ménages confient l'évacuation de ces déchets aux évacuateurs ambulants moyennant un paiement journalier en fonction de la quantité transportée et ne se soucient guère de leur destination (préoccupation du second ordre). D'autres profitent des heures avancées de la soirée (obscurité), la nuit ou le matin pour se débarrasser eux-mêmes de ces déchets en les jetant au dépotoir le plus proche de leur habitation. Ces immondices se développent ici et là alors qu'au sein de la Mairie, il existe une Police chargée de la protection de l'environnement. Pour éradiquer la gestion informelle des déchets ménagers solides, il appartient à l'administration de la Mairie (depuis la base jusqu'au sommet) d'interdire, contrôler quotidiennement et sanctionner, à travers cette police, les récalcitrants qui jettent

n'importe où les déchets. Toutefois, les autorités municipales devraient déployer des efforts supplémentaires afin de bien gérer ces déchets solides ménagers. La gestion des déchets solides ménagers à Bujumbura se résume par le petit schéma ci-dessous (**Figure 2**) :

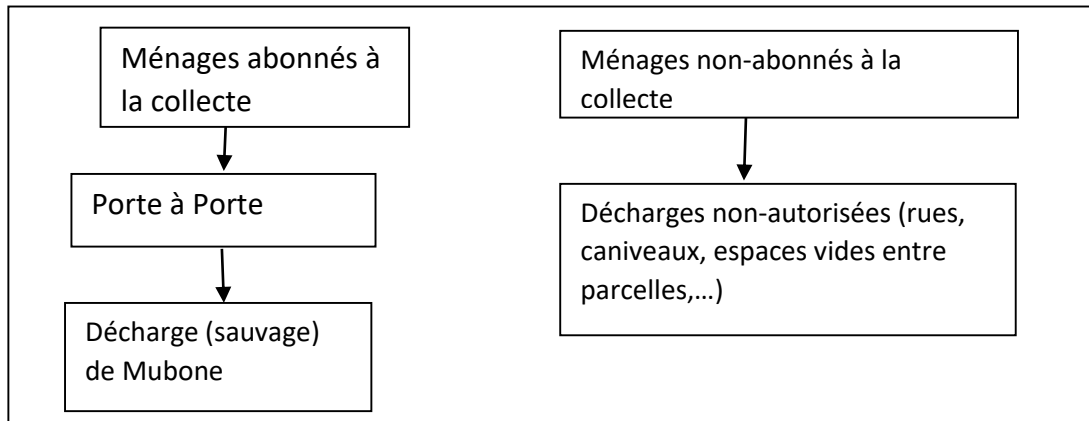


Figure 2: Schéma type de la gestion des déchets solides ménagers dans la ville de Bujumbura

2. Conséquences liées à la mauvaise gestion des déchets ménagers de la ville de Bujumbura.

Les SETEMU, les associations et les sociétés privées agréées transfèrent tous les déchets solides urbains collectés vers le dépotoir sauvage de Mubone (jusqu'en 2009, c'était à Buterere). Sur ce site, ces services de collecte de déchets autorisés y déversent un mélange de tous les déchets: ménagers, des industriels, des hôpitaux, des marchés, etc (**Figure 3 a**). L'abandon de ces déchets peut provoquer des nuisances et des impacts sur le sol, l'eau, l'air, la faune, la flore et la santé humaine:

- i) Dégagement des gaz à effets de serre notamment le CH₄ et CO₂;
- ii) Dégagement des gaz toxiques suite à la digestion incontrôlée et au brûlage à l'air libre et humide;
- iii) Pollution des eaux souterraines et/ou de surface;
- iv) Émanation des odeurs nauséabondes qui occasionnent la prolifération des mouches et par conséquent risque des maladies des mains sales, etc.

Malheureusement, les avis sont partagés pour les gens des environs (de ce dépotoir de Mubone): «Déchets pour les uns, un moyen de survie pour les autres». Ainsi, pour les pauvres, ce dépotoir de Mubone constitue une source de revenus. Ces chiffonniers fouillent dans ces déchets dans l'objectif de trouver des objets qu'ils peuvent vendre (**Figures 3 b & c**). Il s'agit notamment des bouteilles d'eau, des habits, du charbon, etc. Grâce aux montants issus de la vente de ces objets ramassés dans ce dépotoir, certains ramasseurs disent qu'ils leur permettent de satisfaire les

besoins primaires: payer à manger pour la famille, acheter des vêtements, se faire soigner, payer le minerval des enfants, etc.

Mais pour les moins pauvres et l'administration communale, ils sont conscients du danger évident pour la population qui respire l'air pollué et consomme les saletés déposées dans ce dépotoir. Ils demandent à la Mairie et aux services des Services Techniques Municipaux (SETEMU) un déménagement éventuel de ce dépotoir ou un recyclage de ces ordures. La **Figure 3** (a, b, c) présente l'état de la gestion des déchets solides émanant de la ville de Bujumbura, du ramassage et transport jusqu'au site de la décharge de Mubone:



a1-a2 et b1-b2: ramassage et transport; c1-c4 : à la décharge de Mubone

Figure 3: Photos de la situation de gestion des DSM du ramassage à la décharge de Mubone

La collecte irrégulière et inappropriée des déchets entraîne une prolifération des dépôts sauvages et anarchiques dans la ville. Cette situation ternit l'image de la ville. En effet, dans la ville de Bujumbura, les ménages n'ayant pas accès au service de collecte (volontairement ou involontairement) se servent des espaces nus les plus proches d'eux pour se débarrasser de leurs déchets. Les déchets jetés n'importe où sans épargner les caniveaux provoquent par conséquent l'obstruction de ces derniers. Les eaux de ruissellement surtout pendant la période pluviale

perdent leur cours normal. Elles envahissent les ménages et détruisent les différentes infrastructures y compris les routes. Compte tenu de la basse altitude du lac Tanganyika par rapport à la ville de Bujumbura, ces déchets mal gérés sont charriés vers ce lac et finissent par impacter ce grand patrimoine en eau douce sans oublier que ce phénomène augmente le déséquilibre de l'écosystème.

La PNA (2013), à la rubrique «*Hygiène et comportements*», stipule qu'au Burundi, l'espérance de vie faible (48 ans) et la mortalité infantile élevée (180 pour 1 000 décès enfants de moins de 5 ans) sont des reflets des conditions d'hygiène précaire qui prévalent. Les diarrhées emportent 22,1 % des enfants de moins de 5 ans. En 2007, 365 cas de choléra et 14 cas de tétanos néonataux, étant déclarés. Une part importante des problèmes observés relève d'une carence en connaissances au niveau de la population, tant sur l'origine des problèmes de santé que sur leur lien avec des mesures d'hygiène. Selon la même source, d'après l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (MEEATU 2013), le Burundi fait partie des 21 pays dans le monde les plus touchés par la pollution de l'air à l'intérieur des habitations, qui est à l'origine de près de 5 % de la mortalité et de la morbidité. La PNA précise que le secteur d'assainissement, au Burundi en général et en Mairie de Bujumbura en particulier, est structurellement et quantitativement insuffisant pour faire face aux besoins. Les problèmes principaux viennent du manque d'investissement public, des garanties insuffisantes offertes aux investissements privés et enfin l'absence de mise en place d'une contribution des usagers en proportion des services rendus.

Nous pouvons ajouter qu'au-delà des difficultés techniques et financières qui sont souvent évoquées, la mauvaise connaissance du gisement des déchets et de ses caractéristiques est un handicap important pour la planification de la gestion des déchets.

Ainsi, d'après la PNA, de bons textes de lois sont élaborés et de bons objectifs fixés mais les mesures d'accompagnement manquent crucialement. À titre d'exemple, nous pouvons parler de **la gestion des déchets solides domestiques**. Sur l'ancien site du dépotoir de Buterere (décharge qui est pour le moment fermée), ainsi que sur le site actuel de Mubone, des maisons y sont érigées et les déchets sont devant les portes de ces maisons (*Figure 3*) avec tous les risques surtout sanitaires que cette situation peut engendrer aux occupants (Madinzi *et al.*, 2014; Bangoura 2018; Manirakiza *et al.*, 2020).

II.4. Traitement des déchets solides ménagers.

Le traitement des déchets désigne l'ensemble des opérations qui vont permettre de valoriser ou éliminer des déchets. Ces derniers vont être orientés vers un mode de traitement particulier, en fonction de la nature, de leur mode de collecte et des capacités de traitement des différentes filières. Selon Jung (2013), les déchets triés sont valorisés en fonction de leur nature chimique,

de leurs propriétés mécaniques, physico-chimiques ou de leur pouvoir calorifique (PCI). Dans le cas des déchets solides, lorsqu'ils sont hétérogènes, chaque catégorie de déchets, voire chaque fraction au sein d'une catégorie, doit être envisagée pour effectuer le choix d'une voie de traitement. Il est donc évident qu'un tri préalable de ces déchets s'impose (Jung 2013).

II.4.1. Comment peut-on minimiser la production des déchets solides?

La nouvelle notion à appliquer dans la gestion des déchets est basée sur le principe connu actuellement sous l'appellation des «**3RV-E**» avec, par ordre de priorité (Koledzi *et al.*, 2015; Mbiadjeu-lawou 2019): i) la Réduction à la source; ii) le Réemploi ; iii) le Recyclage ; iv) la Valorisation; v) l'Élimination.

Cette nouvelle conception de la gestion des déchets vise l'économie de ressources, leur mise en valeur avec un impact minimum sur l'environnement et la santé humaine.

1. Réduction à la source.

Elle consiste à générer le moins de déchets lors de la fabrication, de la distribution et de l'utilisation du produit. Le citoyen peut contribuer à cette réduction en diminuant la quantité de déchets produits par l'utilisation de produits en vrac plutôt qu'emballés, des produits durables plutôt que jetables, etc.

2. Réemploi ou réutilisation

On définit maintenant la **réutilisation** ou **réemploi** par «**l'utilisation répétée** du produit sans modification de son apparence ou de ses propriétés»: C'est une méthode qui consiste à prolonger la durée de vie d'un produit en l'utilisant plusieurs fois. Par exemple, les bouteilles consignées qui peuvent être de nouveau utilisées après nettoyage.

3. Recyclage

La notion de recyclage consiste à réintroduire les matériaux provenant de déchets dans un cycle de production ou processus de fabrication en remplacement total ou partiel d'une matière première vierge.

4. Valorisation.

La valorisation des déchets est définie comme un mode de traitement qui consiste dans «le réemploi, le recyclage ou autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'Énergie».

5. Élimination

Toute opération qui n'est pas de la valorisation même lorsque ladite opération a comme conséquence secondaire la récupération de substances, matières ou produits ou énergie.

L'élimination des déchets est un mode de traitement des déchets à éviter le plus possible, il doit être réservé aux déchets «ultimes» pour lesquels aucune autre valorisation n'est possible.

Est «ultime», un déchet résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux (Cheniti 2014; Bennama 2016; Mbiadjeu-lawou 2019).

II.4.2. Les voies de traitement des déchets solides ménagers et assimilés.

La connaissance des caractéristiques du déchet et le triage sont primordiaux si l'on souhaite déterminer le mode de traitement le mieux adapté en tenant compte des circonstances locales et avec l'objectif essentiel d'un développement durable. Ainsi, on distingue les voies de traitement thermique telles: l'incinération, la co-incinération, la calcination, la pyrolyse et la gazéification ainsi que les voies de traitement de types biologiques tels que le compostage et la biométhanisation (Jung, 2013).

1. Traitements thermiques (Koledzi 2011; Topanou 2012; Jung 2013).

La valorisation par traitement thermique comprend l'incinération, la co-incinération, la pyrolyse, gazéification et valorisation du biogaz issu notamment des installations de stockage de déchets non dangereux.

2. L'incinération avec récupération d'énergie consiste à transformer en vapeur sous pression la chaleur dégagée par la combustion des déchets. Cette vapeur peut être utilisée pour produire de l'électricité ou bien pour alimenter un réseau de chaleur.

3. Les Combustibles Solides de Récupération (CSR), issus de refus de tri, permettent de produire de la chaleur et/ou de l'électricité, utilisable notamment dans l'industrie et dans les réseaux de la chaleur. La valorisation énergétique de CSR permet de trouver un exutoire aux déchets non recyclables autre que le stockage.

4. La pyrolyse et la gazéification consistent à chauffer des déchets en l'absence ou manque d'oxygène afin que les substances générées sous l'effet de la température (solides, liquides et gazeuses) ne s'enflamment pas spontanément, ce qui donne la possibilité de les valoriser dans un second temps, sous forme de combustible, d'électricité, de chaleur...

5. Récupération du biogaz: Le biogaz issu de la fermentation organique des déchets dans les installations de **stockage de déchets** non dangereux et dans les installations de méthanisation peut être valorisé, soit dans des moteurs à gaz pour une valorisation en électricité ou en être ajoutée sur le réseau de gaz naturel.

6. Valorisation de la fraction organique (Aloueimine 2006; Koledzi 2011; Jung 2013; Bennama 2016).

La valorisation organique désigne l'ensemble des modes de gestion et de valorisation des déchets biodégradables (déchets alimentaires, déchets verts, boues urbaines, boues industrielles, déchets des industries agro-alimentaires, déchets agricoles...).

Les déchets biodégradables peuvent être valorisés via 2 grands modes de traitements: le compostage et la biométhanisation.

- i) **Le compostage** est un procédé de traitement aérobie (en présence d'oxygène) des déchets fermentescibles par les micro-organismes, dans des conditions contrôlées. Il produit du gaz carbonique, de la chaleur et un résidu organique stable (faible potentiel de biodégradabilité), riche en composés humiques: **le Compost**.
- ii) **La biométhanisation** est un processus de décomposition de la matière organique contenue dans des déchets biodégradables en milieu anaérobie (c.-à-d. en absence d'oxygène). Cette dégradation s'effectue sur une période de 2 - 3 semaines environ, dans des conditions de fonctionnement précises notamment la température.

Ce traitement biologique:

1. Génère une matière humique riche en matière organique partiellement stabilisée, appelée digestat qui est soit retourné au sol directement (via un plan d'épandage) soit après une phase de compostage
2. S'accompagne de la production de biogaz riche en méthane qui est valorisé énergétiquement.

Les voies de traitement de déchets solides ménagers et assimilés (DSMA) peuvent être résumées par le schéma de l'organigramme de la chaîne de gestion des déchets ménagers et assimilés présenté à la **Figure 4**

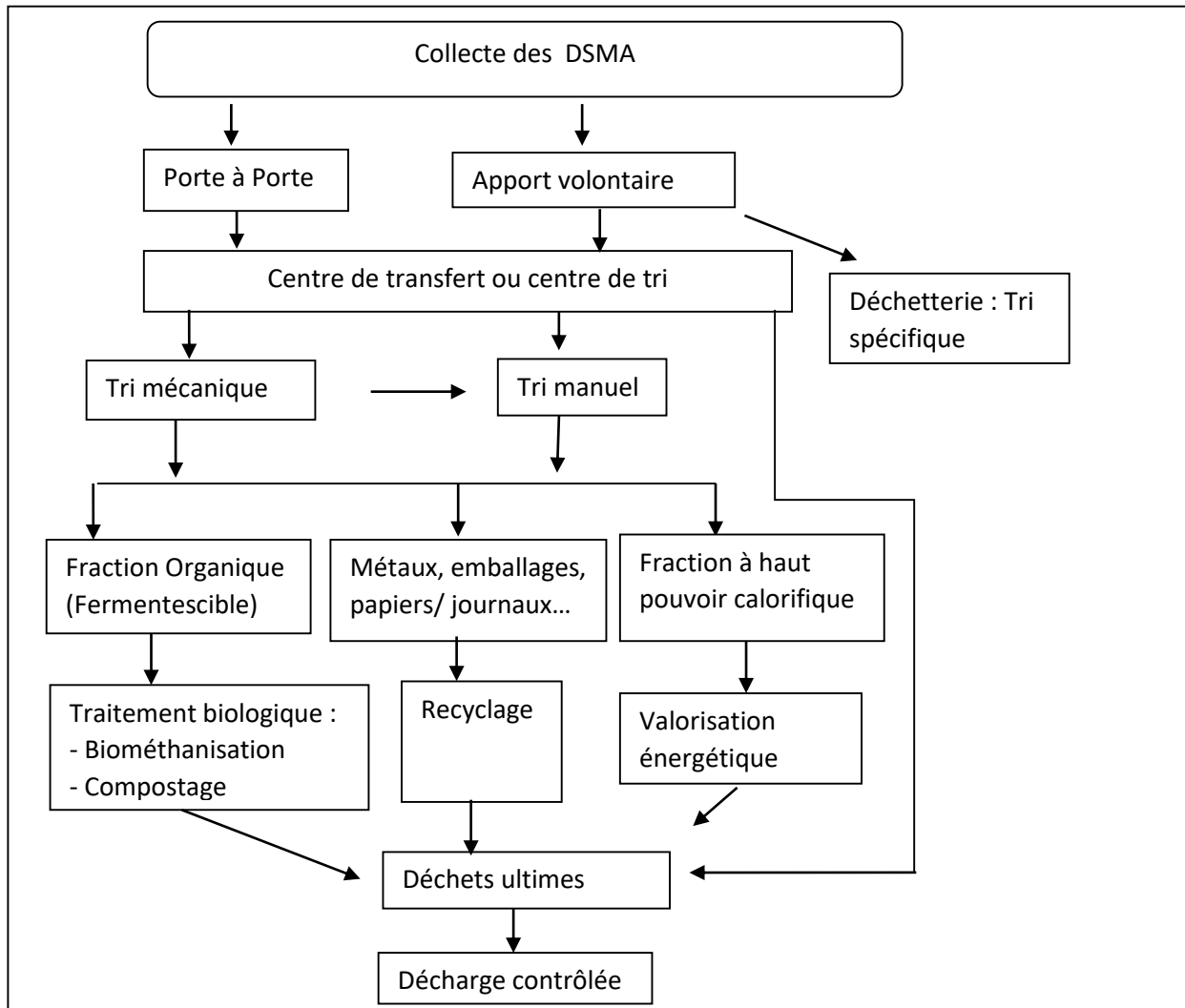


Figure 4: Schéma de l'organigramme de la chaîne de gestion des déchets ménagers et assimilés

Sources: (Bennama 2016; Sotamenou 2017).

La hiérarchie européenne des modes de traitement positionne le recyclage après la prévention et la préparation en vue du réemploi mais avant les autres formes de valorisation énergétique et élimination.

La valorisation matière regroupe des activités diverses et complémentaires: le tri, le recyclage, la valorisation biologique. Les centres de tri peuvent aussi préparer des CSR, à partir des refus de tri, destinés à être utilisés dans des installations dédiées de valorisation énergétique.

II.4.3. Traitement des déchets solides ménagers dans la ville de Bujumbura.

Pour le cas du Burundi en général, et la ville de Bujumbura en particulier, nous pouvons confirmer, sans aucun risque de se tromper que, la gestion des déchets solides ménagers ne suit aucune des étapes qui entrent dans le processus du cycle de vie d'un déchet à savoir: la collecte, le transfert et le traitement (**Figure 4**).

Dans la ville de Bujumbura, la production journalière de déchets par habitant ne trouve pas de compromis. Elle a été estimée à 0,6 kg/j/hab en 2015 (Mizero 2015) alors qu'elle était à 0,30 kg/j/hab en 2008 (Citeretse 2008). L'écart est très énorme et ne trouve pas d'explication pour un intervalle de 7 ans seulement. Dans le travail de Mizero (2015), la quantification a été conduite en mesurant le volume utile des véhicules assurant la collecte, le transport et l'évacuation des déchets vers la décharge publique de Mubone (Buterere), et le travail de Citegeste (2008) a porté sur les données fournies par les SETEMU. Les mêmes divergences sont observées au niveau de la quantification par typologies. Mizero (2015) trouve que les déchets fermentescibles de la ville de Bujumbura représentent **57 %** du total, alors que pour Citegetse, la part des fermentescibles est de **80 %**. Toutefois, les résultats de Mizero (2015) sur la production journalière d'un habitant de la ville de Bujumbura (0,60 kg déchets/ jour/hab.) convergent avec ceux de l'OBPE (2021) (Mizero *et al.*, 2015; OBPE 2021). **Des investigations poussées permettraient de trancher sur le cas.** Or, selon Ngahane (2015), les déchets ménagers sont de véritables bombes bactériologiques à fortes concentrations en microorganismes potentiellement dangereux susceptibles de mettre à mal la santé humaine et l'environnement (CICR 2011; Ngahane 2015). Connaître la typologie de ces déchets et leurs quantités permettra de mieux prédire leurs comportements en rapport avec les conditions du milieu, les pratiques locales de gestion et d'évaluer les risques qui en découlent afin de prendre des mesures idoines pour les limiter. Ainsi, d'autres études sont indispensables, afin de quantifier, caractériser et choisir des filières beaucoup plus respectueuses et protectrices de l'environnement, de la population en général et du personnel en particulier. Quoi qu'il en soit, dans la ville de Bujumbura, la production de déchets continuera d'augmenter en raison de la croissance économique et démographique. Jusqu'en 2010, les services techniques municipaux (SETEMU), services qui se chargeaient de l'assainissement de la ville, ne collectaient que 8 % des DHR. Après cette période, les responsabilités ont été cédées aux opérateurs privés et la collecte s'est nettement améliorée en passant de 8 % à 46 %, restant toutefois loin du seuil minimum de collecte qui est estimé à 75 % (Sotamenou 2012; Tahraoui 2013; Debornes 2017). Certains déchets non collectés, constitués en grande partie par la fraction fermentescible, sont entassés et brûlés sur les berges des rivières qui traversent la ville de Bujumbura et affluent vers les eaux du Lac Tanganyika. Les risques sanitaires pour les populations riveraines et les risques environnementaux pour l'écosystème du lac Tanganyika sont évidents.

II.5. Conclusion.

En analysant les informations de ce chapitre, le constat est que la gestion des déchets solides n'a pas beaucoup évolué en Afrique avec le temps. En effet, les modèles de gestion qui existent dans la plupart des villes africaines sont incompatibles avec les enjeux actuels en matière de développement durable. Ainsi, la mise en place et l'exploitation des systèmes de collecte et de traitements simples et adaptés s'avèrent plus qu'urgentes. À la faveur de l'urbanisation croissante et galopante que connaissent les villes africaines en général et de la ville de Bujumbura en particulier, il devient donc indispensable d'institutionnaliser la réduction des déchets à la source, le tri sélectif, la pré-collecte/collecte dans tous les quartiers, recyclage et valorisation de certaines catégories de déchets et d'opérer un stockage éco-compatible des déchets ultimes. Ces activités ont l'avantage de favoriser le développement économique (création des richesses suite à la vente d'objets récupérés lors de la pré-collecte et vente du compost par exemple), social (emplois jeunes et implication directe des ménages dans la gestion des déchets) et environnemental (réductions des pollutions dues aux déchets). La ville de Bujumbura n'est pas épargnée d'une démographie galopante, d'une urbanisation incontrôlée, d'une intensification des activités économiques, d'une gouvernance environnementale inadaptée, de faibles capacités techniques et financières dans la gestion des déchets solides municipaux. Comme d'autres nombreuses villes africaines à faibles revenus, la ville de Bujumbura devrait déléguer la gestion des déchets solides ménagers à des entreprises du secteur privé dans le cadre d'un Partenariat Public Privé (3 P). Au cœur des 3 P se trouve un contrat dont le renouvellement ne peut se faire qu'après une évaluation multicritère. Eu égard des résultats des deux auteurs (Mizero et Citegetse) sur le pourcentage dominant des fermentescibles, et sur base des données des autres villes africaines quant au pourcentage de la fraction organique fermentescible, il est évident que la valorisation par compostage prime sur les autres modes de traitement (Recyclage, valorisation énergétique...).

Chapitre 3: Compostage.

III.1. Introduction.

L'urbanisation en Afrique est souvent associée d'un côté à un accroissement des besoins alimentaires dont la satisfaction devrait passer par l'intensification des activités agricoles et de l'autre côté, à l'augmentation de déchets dont la gestion n'a plus fait objet de planification (Sotamenou 2010; Tshala *et al.*, 2017). En outre, pour faire face à la demande alimentaire croissante, la plupart des agriculteurs des zones tropicales font recours aux fertilisants chimiques qui d'ailleurs restent très coûteux (Tshala *et al.*, 2017). Or, pour les sols sableux et sablo-argileux des zones semi arides tropicales d'Afrique Subsaharienne, il a été mis en évidence par plusieurs auteurs que les systèmes culturaux intensifs n'impliquant pas des niveaux élevés de restitutions organiques au sol, conduisaient à leur dégradation et par conséquent une diminution de la productivité végétale (Omotayo et Chukwuka 2009; Tshala *et al.*, 2017).

Le choix de la filière de traitements des déchets dans les pays en voie de développement (PED) a été un problème majeur. L'expérience a montré que l'importation de technologies occidentales «*clé en main*», sans aucune maîtrise des bases de conception et de fonctionnement des systèmes de traitement et sans démarche préalable d'adaptation et de choix comparatif des filières a toujours été un échec (Biekre *et al.*, 2018).

La fraction fermentescible des déchets solides ménagers peut faire l'objet d'une valorisation matière organique par leur transformation en compost, dont les atouts environnementaux sont importants notamment dans un pays agricole comme le Burundi (ISTEEBU 2016).

III.2. Définitions du compostage

Le compostage correspond à une transformation des matières fermentescibles (d'origine végétale et animale) par des micro-organismes évoluant en conditions aérobies, entraînant une montée en température et conduisant à l'élaboration d'une matière organique humifiée et stabilisée en présence d'oxygène et d'eau. Il en résulte un dégagement de gaz carbonique et la minéralisation d'une partie de la matière organique (**Figure 5**). Le produit ainsi obtenu est appelé compost (Naquin et Ngnikam 2012; Bennama 2016).

Ainsi, tous les compostages sont basés sur l'équation globale de la bioxydation des matières organiques (MO) par les microorganismes aérobies suivante (Francou 2004; Outéndé 2017):

$MO + \text{Micro-organismes} + O_2 \rightarrow \text{Produit oxydé (compost)} + CO_2 + H_2O + H_v \text{ (chaleur)}$ (éq.1)
La **Figure 5** présente le résumé du principe de compostage

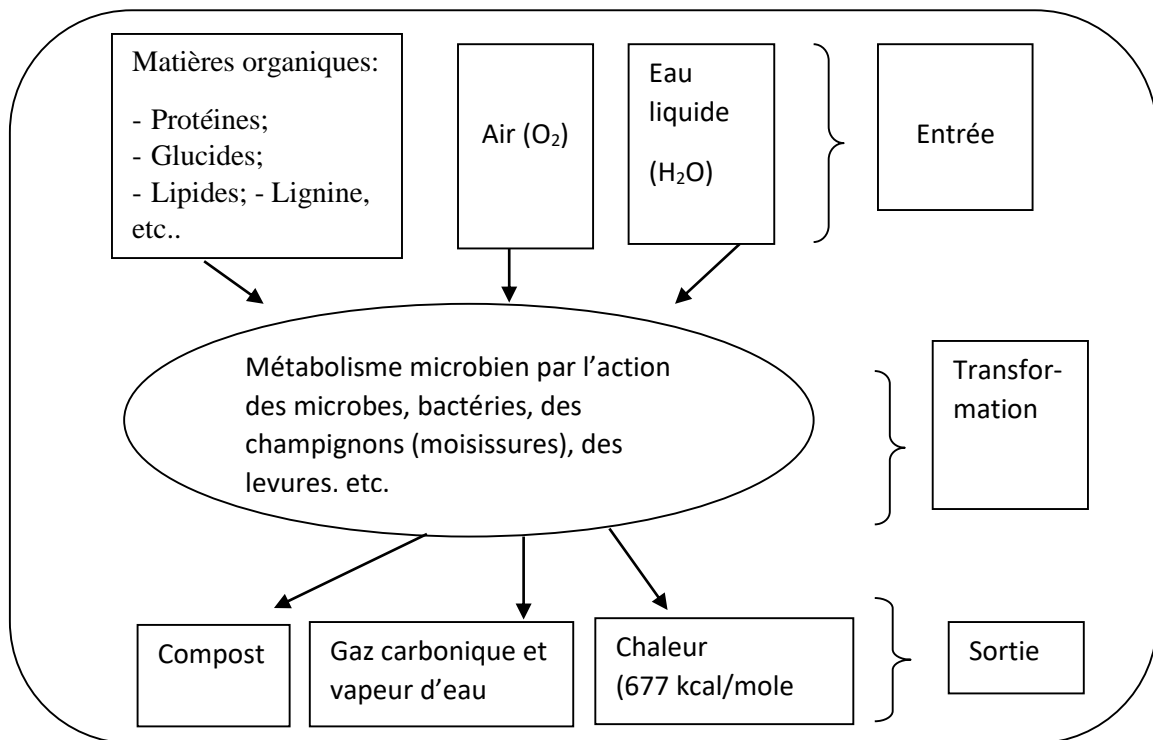


Figure 5: Schéma descriptif du principe de compostage

Source: (CEFREPADE 2012; Bennama 2016).

Le compost est un amendement organique qui vise d'abord à améliorer la structure et la porosité du sol ainsi que sa capacité de rétention d'eau.

Il apporte de façon secondaire des nutriments aux sols pour les plantes [par exemple Azote (N), Phosphore (P), Potassium (K) et autres éléments majeurs : Soufre (S), Calcium (Ca), Magnésium (Mg), et des oligoéléments (Bore-B, Cuivre-Cu, Fer-Fe, Manganèse-Mn, Molybdène-Mo, Zinc-Zn)]. Le compost et sa matière organique stabilisée et hygiénisée sous forme d'humus, favorise la mise à disposition progressive des éléments minéraux en fonction des besoins des plantes cultivées. Au contraire, des engrais chimiques sont rapidement lessivés par les pluies, acidifient et appauvrissent les sols (Mustin 2015; Ngahane *et al.*, 2021)

De plus, les MO stabilisées du sol constituant les humus ont des effets protecteurs des parasites et maladies des plantes et en plus de leurs rôles importants de stimulation de la croissance des plantes, la capacité de certains composts et de leurs extraits à combattre les maladies telluriques (du sol) ou foliaires (des feuilles) n'est plus à démontrer (Btissam *et al.*, 2013; Jaouadi *et al.*, 2010).

III.3. Déchets acceptés dans les unités de compostage.

Les principaux déchets traités par compostage sont classés en trois catégories qui sont présentées dans le *Tableau 6* (Jung 2013).

Tableau 6: Classement des déchets en fonction de la source d'approvisionnement

Compostables	Non compostables non dangereux	Non compostables dangereux
Déchets des ménages		
Reste de repas, papiers, cartons, déchets végétaux, textiles naturels (coton, etc.), déchets hygiéniques	Textiles synthétiques, plastiques, ferrailles, bois, inertes (verre, cailloux, sable), emballages souillés, ...	Déchets de soin (seringues, médicaments, ...), piles, Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE), bombes aérosols, pots de peinture, ...
Déchets de la ville		
Déchets verts des espaces publics, feuilles issues du balayage des rues, plantes aquatiques non chargées en métaux lourds (ex : jacinthe d'eau), déchets organiques des marchés, ...	Gravats, terres, emballages souillés, ...	Bombes aérosols, pots de peinture, ...
Déchets des entreprises, services de l'Etat et des centres de santé.		
Résidus organiques des entreprises agro-alimentaires (ex : déchets de fruits, drêches de brasseries, ...), déchets organiques des restaurants, papiers, cartons, ...	Textiles synthétiques, plastiques, ferrailles, bois, inertes, verre, gravats, ...	Déchets de soin (seringues, médicaments, ...), bombes aérosols, pots de peinture, emballages souillés, ...
Déchets agricoles et d'abattoirs		
Résidus de cultures (ex : coques de soja, paille, ...), déjections animales (ex ; fumier, fientes, bouses, ...), rumen (contenu des panses d'animaux), ...	Plastiques, ...	Cadavres d'animaux, emballages de produits phytosanitaires, ...

Source : (Re-sources 2015)

III.4. Les principaux paramètres à contrôler lors du compostage.

Les principaux facteurs régissant le compostage concernent particulièrement la phase de fermentation (chaude). Pour vérifier les conditions optimales les plus propices au développement de la flore bactérienne, les principaux paramètres à suivre pendant le procédé sont les suivants:

1. Le pH des suspensions des solides (déchets en phase de dégradation aérobie, compost mûr) varie entre 5 et 8 et peut atteindre 9 (Koledzi 2011; Pujol 2012).

i) Une phase acidogène se produit au début du processus de dégradation par les bactéries acidogènes; *ii) La seconde phase* correspond à **une alcalinisation**: hydrolyse bactérienne de l'azote avec production d'ammoniac (NH_3) associée à la dégradation de protéines et à la décomposition d'acides organiques. Le pH optimal se situe donc vers la neutralité en fonction de la nature du substrat (Compaore *et al* 2010; Koledzi 2011; Toundou *et al.*, 2015; Bennama 2016).

2. La température: Quatre grandes phases sont généralement définies dans le processus de décomposition de la matière organique par compostage (CEFREPADE 2012; Toundou 2016): les phases mésophile, thermophile, de refroidissement et de maturation.

i) La phase mésophile correspond à la phase initiale de compostage. Les microorganismes mésophiles dont la température de croissance optimale est comprise entre 20 et 45°C se multiplient rapidement grâce à la présence des matières organiques facilement décomposables telles que les sucres, l'amidon et les graisses (Chennaoui *et al.*, 2016). Ces microorganismes mésophiles produisent de la chaleur par leur propre métabolisme et élèvent la température à un point tel que leurs propres activités sont inhibées et ces mésophiles sont remplacés par des thermophiles (Garba *et al.*, 2020).

ii) La phase thermophile: phase qui est caractérisée par une montée de température allant de 60°C à 70°C (plage de température idéale) résultant de la décomposition de 46 à 62% (voire même plus) de la matière organique sous forme de CO_2 et de H_2O par les microorganismes thermophiles (Mustin 2015; Bennama 2016).

iii) La phase de refroidissement: Elle est caractérisée par un ralentissement de l'activité microbienne dû à l'épuisement des matières organiques facilement dégradables (Temgoua *et al.*, 2014). La température du tas diminue jusqu'à des valeurs avoisinantes à la température ambiante (proche de 30°C) (Koledzi 2011; Temgoua *et al.*, 2014).

iv) La phase de maturation: Elle constitue la phase finale du processus et se caractérise par une température presque ambiante (la température atteint celle du sol soit 20 à 30°C) des tas et présente peu d'activité microbiologique (recolonisation par des champignons), mais est adaptée à la colonisation par la macrofaune, en particulier les lombrics lorsque ceux-ci sont présents dans l'environnement du tas. Des processus d'humification prédominent ainsi que la dégradation lente des composés résistants et le pH s'équilibre vers la neutralité (Compaoré et Nanéma 2010; Chantou *et al.*, 2012). Les deux premières phases qui sont des phases de

dégradation intensive des matières organiques sont regroupées sous le nom de fermentation chaude (**Figure 6**) (Compaoré *et al.*, 2010; Rafolisy *et al.*, 2015; Bennama 2016).

Le suivi de la température est par ailleurs une mesure indirecte de l'intensité de la biodégradation lorsque le processus n'est pas terminé. Pour obtenir l'hygiénisation du compost (destruction des germes pathogènes et des graines d'adventices présents dans les déchets) en compostage à l'air libre, une température de 55°C pendant 5 jours est nécessaire (Charnay 2005; Bromblet et Somaroo 2015). Une température voisine de 20°C ou supérieure à 82°C inhibe, voire arrête cette activité microbienne (Albrecht 2006; Koledzi 2011; Loubna 2014).

La **Figure 6** résume l'évolution de la température et du pH au cours du compostage

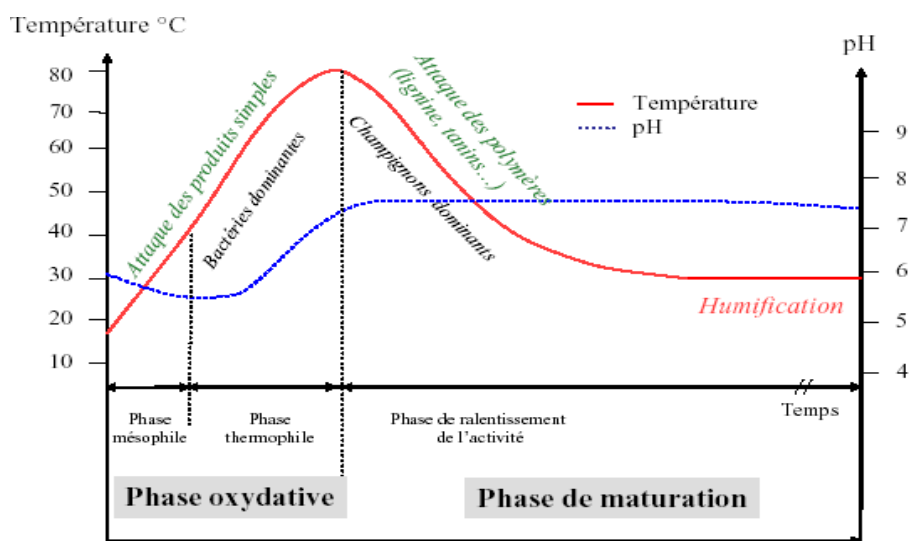


Figure 6: Courbe théorique d'évolution de température et du pH au cours du compostage
Source: (Toundou 2016)

3. **La Teneur en eau ou humidité (H en %)** des déchets mis à composter conditionne l'activité des micro-organismes. L'humidité optimale pour le compostage est généralement 50 – 60 % (Oteng-Ababio *et al.*, 2013; Re-sources 2015; Silpa Kaza *et al.*, 2018). Si la teneur en eau baisse en dessous de 30 % (40 %), la décomposition de la matière organique est inhibée, car les microorganismes meurent. Si elle dépasse 70 %, l'eau commence à remplir les espaces lacunaires des déchets et empêche les échanges d'oxygène, provoquant des conditions défavorables au compostage et la prolifération d'organismes anaérobies
4. **Le taux d'oxygène:** L'apport d'air est indispensable pour maintenir un milieu aérobie nécessaire à une décomposition rapide et inodore. Une carence en oxygène conduira à la mise en place de conditions anaérobies, avec la production de biogaz et d'odeurs désagréables. Le niveau minimum souhaité d'oxygène est de 5 – 10 % (contre 21 % dans l'air ambiant) dans le compost en décomposition (Puyuelo 2010). Les systèmes d'aération possibles sont les retournements manuels ou mécaniques, l'aération passive ou forcée

(Mustin 2015). L'apport d'oxygène réduit aussi l'humidité initiale (si elle est trop forte), améliore l'homogénéité du substrat et diminue une possible élévation de température (Koledzi *et al.*, 2015).

- 5. La granulométrie:** La dimension moyenne des déchets - la granulométrie - est un facteur qui détermine la vitesse de biodégradabilité et elle peut être modifiée par l'emploi de cribleur. Plus la surface de contact entre les déchets et les micro-organismes (surface spécifique) est élevée, plus la fermentation sera meilleure. La granulométrie du substrat évolue au cours du processus de dégradation par fragmentation des agrégats vers des éléments fins (Koledzi *et al.*, 2012^a).
- 6. La matière organique:** La teneur moyenne globale en matière organique doit être supérieure à 40% (par rapport à la matière sèche). Au cours du compostage, la minéralisation importante de la matière organique entraîne sa diminution. Les composts se caractérisent donc par des teneurs en matière organique inférieure à celles des déchets bruts. La diminution relative de la matière organique (rapport entre la masse de matière perdue et la masse de matière initiale) est variable et dépend des conditions de compostage et de sa durée. Les pertes peuvent atteindre 20 à 60 % (voire même 46 à 62 %) de matières organiques initiales (Francou 2004; Toundou 2017).
- 7. Le rapport carbone/azote (C/N):** Selon de nombreux auteurs, la valeur optimale du rapport C/N pouvant garantir un bon démarrage et un bon déroulement se situe entre 25 et 35 (Compaoré and Nanéma 2010; Faverial 2016; Bokobana *et al.*, 2017). Toutefois, nous pouvons dire que le rapport C/N idéal pour le compostage est de 30/1, si ces éléments sont biodisponibles. La valeur 35 ne doit pas être dépassée pour les déchets urbains, sinon les microorganismes passent par plus de cycle d'oxydation pour atteindre la valeur optimale dans le compost. Les micro-organismes utilisent le carbone pour leur production d'énergie et l'azote est utilisé pour leur production d'acides aminés et de protéines. La consommation microbienne de l'azote et du carbone entraîne une diminution du rapport C/N lors de la décomposition des déchets (Bromblet et Somaroo 2015).

N.B : Il reste très difficile de définir avec précision les valeurs optimales pour chaque paramètre. Ces paramètres s'équilibrent au cours du procédé: le dépassement de la valeur de l'un sera compensé par la valeur de l'autre. En pratique, il est nécessaire de trouver un compromis entre la théorie et les contraintes de terrain. Dans la pratique, les conditions de dégradation rapides et contrôlées dépendent du système de fermentation employé.

Le **Tableau 7** présente ces caractéristiques pour un système classique en andain avec retournement mécanique.

Tableau 7: Paramètres de contrôle et de suivi du procédé de compostage

Paramètres	Phase initiale	Compost mûr
Rapport C/N	20 à 40	10-15
Humidité (%)	40 à 65	35-45
Température (0C)		< 40
pH	5-8	7-8,5
Structurants (%)	> 15	
MO (% MS)	40-70	20-40
Granulométrie (cm)	~1en aération forcée 3-10 sans aération forcée	Dépend du criblage

Sources: (Leclerc 2014; Bromblet et Somaroo 2015; Mustin 2015; Bokobana *et al.*, 2017).

III.5. Les principaux procédés de compostage.

Des études menées par de nombreux auteurs ont montré que la solution la plus sûre de traitement des ordures ménagères dans la plupart des PED reste le tri-compostage avec valorisation des matériaux recyclables (Koledzi *et al.*, 2012). Les procédés de compostage se distinguent essentiellement au niveau des phases de latence et de fermentation chaude, de par le mode d'aération et le niveau de contrôle des différents facteurs. Nous distinguerons trois (3) procédés de compostage (Farinet 2013):

i) Le compostage extensif en andains retournés; ii) Le compostage intensif à aération forcée et, iii) Le compostage industriel en réacteur fermé et iv) le lombricompostage (ou vermicompostage) (Bennama 2016).

III.5.1. Compostage extensif en andains retournés.

C'est la technique souvent utilisée, car l'oxygénation la plus efficace d'une masse en fermentation est obtenue par retournement périodique qui assure une fermentation homogène. Les déchets sont rassemblés en tas/andains (superposition de couches) de longueur variable (fonction de la demande et pouvant faire plusieurs dizaines de mètres), une hauteur allant jusqu'à 2m, une largeur de 2,5 m à 3m, et ces andains peuvent être de forme trapézoïdale, triangulaire ou encore tabulaire. Le retournement des andains peut s'effectuer manuellement ou mécaniquement à l'aide d'équipements agricoles tels que le retourneur d'andains ou l'épandeur à fumier (Koledzi 2011; Bokobana *et al.*, 2017). Après chaque retournement, on constate une brusque élévation de la température, qui peut atteindre 75⁰C, provoquée par une accélération de l'activité des bactéries aérobies thermophiles. En fonction des conditions locales et du débit de déchets à composter, dans les deux cas, il faut prévoir un espace suffisant entre les andains

pour leur déplacement ou pour le passage du tracteur, ce qui demande des investissements élevés (Mustin 2015; Bennama 2016).

III.5.2. Compostage intensif en aération forcée.

L'aération active (forcée) des andains demande des efforts de conception plus grands et s'assortit généralement de coûts très élevés que le système de retournement des andains. Le plus souvent, des tuyaux d'aération sont disposés bout à bout sous toute la longueur de l'andain, les trous devant être assez gros pour assurer une bonne circulation d'air. L'aération forcée est réalisée par des drains d'injection d'air disposés sous les déchets et alimentés par un ventilateur extérieur qui aspire ou souffle l'air dans l'andain (Albrecht 2006; Koledzi *et al.*, 2011). La ventilation peut être régulée par la température de la masse en fermentation. Certains procédés cumulent l'aération forcée avec un retournement périodique des andains, ce qui permet de réduire à 2 à 3 semaines la phase de fermentation chaude. Par rapport au compostage extensif en andains retournés, le compostage intensif à aération forcée a l'avantage de réduire l'emprise foncière du dispositif et la main d'œuvre nécessaire pour un coût d'investissement et un niveau de technicité cependant élevé. Il nécessite par ailleurs une alimentation électrique du site et engendre une consommation électrique élevée pour la ventilation (Farinet 2009; Bahers 2012; Guardia 2018).

III.5.3. Compostage industriel en réacteur.

Pour mieux contrôler et guider le processus de compostage, les produits broyés sont stockés dans des tours fermés (réacteurs biologiques). Il existe de nombreux types de réacteurs permettant un brassage (retournement) continu ou discontinu des produits. Le réacteur est équipé d'une isolation, de dispositifs mécaniques de chargement/déchargement, d'une injection d'air ou d'oxygène et d'une régulation de la température et de l'humidité de leur contenu. L'ensemble permet de maintenir en permanence le produit dans les conditions idéales de fermentation. Le compostage en bioréacteur présente des avantages multiples:

1. Favorise l'Oxydation des composés organiques;
2. Constitue une fermentation contrôlée (diminue les risques de nuisances): odeurs et production de lixiviats inexistantes ou réduites au minimum;
3. Procédé clos (pas de contact avec l'extérieur: oiseaux, mouches ou rongeurs);
4. Destruction plus complète des germes pathogènes ;
5. Température plus régulièrement maintenue (Farinet 2009; Bahers 2012; Bennama 2016);
6. Plus rapides et d'une emprise foncière réduite;

7. Ces usines garantissent l'homogénéité du compost final. Dans tous les cas, une maturation finale du compost est nécessaire, d'une durée équivalente à celle des autres procédés (Znaïdi 2002; Bachelart 2021).

N.B: Les inconvénients de ces systèmes de compostage tiennent aux coûts initiaux élevés et à la gestion constante qu'ils réclament. Toutefois, il existe des systèmes de compostage en contenant les plus simples qui utilisent de petites cellules de bois ou parfois de béton qui permettent de retourner le compost de temps à autre et qui utilisent l'aération passive provenant des côtés ou du fond de la cellule. Ces systèmes peuvent être abrités par une structure dotée d'un toit (Sema *et al.*, 2021).

III.5.4. Lombricompostage (ou vermicompostage).

Le lombricompostage, ou vermicompostage est une méthode d'utilisation de vers de terre (**lombrics**) en vue de transformer des résidus organiques en une matière très semblable à l'humus ou au terreau connu sous le nom de lombricompost ou vermicompost (Misra, 2005). Les vers se nourrissent des déchets qu'on leur apporte et ce sont les déjections de ces vers de terre qui sont utilisées (Bennama 2016). Les excréments (turricules) des vers de terre sont riches en nitrates, et en formes disponibles de P, K, Ca et Mg (Misra, 2005).

L'introduction de vers de terre dans un tas de compost permet de mélanger les matières, aérer le tas et accélérer la décomposition (Misra, 2005; Koledzi, 2011). Si des vers de terre sont présents, le tas peut ne pas être retourné car ceux-ci se chargent de mélanger et d'aérer (Misra, 2005; Koledzi, 2011). L'environnement favorable pour les vers de terre est une fosse peu profonde, dont la température, l'humidité et le pH sont compris entre 15°C - 25°C ; 75 - 85% ; 8 ; et ces vers n'aiment ni la lumière ni le bruit [(Misra, 2005; Koledzi, 2011);

https://www.agrireseau.net/document/Document_96310.pdf

Lumbricus rubellus (ver rouge) et *Eisenia foetida* tolèrent la chaleur et sont donc particulièrement utiles (Misra 2005). L'inconvénient est que le lombricompostage est un mini-écosystème fragile, il convient de le surveiller scrupuleusement et d'éviter certaines erreurs qui pourraient tuer les vers ou apporter des insectes nuisibles (Misra, 2005; Koledzi, 2011).

III.6. Ajout d'Adjuvants de compostages.

Les composts de déchets d'ordures ménagères restent insuffisamment riches en éléments minéraux essentiels tels que l'azote, le phosphore et le potassium (Albrecht 2006; Bodjona *et al.*, 2012). Afin d'augmenter leur potentiel fertilisant, certains auteurs ont entrepris l'élaboration de nouveaux types de fertilisants par ajout d'adjuvants naturels avant compostage:

fraction organique biodégradable de déchets ménagers, des biomasses végétales, des sous-produits minéraux comme les phosphates naturels (source de phosphore), les calcaires et les fumiers, les cendres (source de potassium) (Ihihi *et al.*, 2014). Par ajout de phosphates naturels, Compaoré (2010) et Koldezi (2011) ont respectivement multiplié par 5 et 3 les teneurs en phosphore total pour atteindre des teneurs maximales de 4 571 mg P/Kg M.S et 9 700 mg P/Kg M.S dans les composts produits au Togo et Burkina-Faso (Bokobana *et al.*, 2017; Compaoré et Nanéma 2010; Koledzi 2011). Les teneurs en Azote dans les composts peuvent également être améliorées par utilisation de fumier comme adjuvant de compostage, soit au taux d'amélioration en moyenne de 36 % par rapport au compost sans fumier (Compaoré *et al.*, 2010; Toundou *et al.*, 2015). Selon Bokobana (2017), le co-compostage des déchets ménagers avec la biomasse de *Cassia occidentalis*, le fumier, le phosphate naturel brut et la cendre, améliorerait de façon significative la composition du produit fini en éléments fertilisants majeurs et en acides humiques (Bokobana *et al.*, 2017).

III.7. Équilibre entre matières azotées et carbonées du compost: choix des matières de compostage.

Le secret d'un compost réussi réside dans le bon équilibre entre matières azotées et carbonées. Ainsi, chimiquement, pour des raisons de qualité finale du compost, et pour maintenir en toutes circonstances les éventuelles odeurs, l'équilibre entre les deux types de matière doit être respecté. En effet, le carbone piégeant l'azote grâce à ses liaisons chimiques, il permet de bloquer les effets néfastes de la transformation de l'azote libre et d'autre part, il permet au compost de diffuser plus tard lentement et régulièrement l'azote nécessaire à la croissance des végétaux. Le compost est donc en même temps un puits de carbone et une réserve d'azote (Taillefer 2010). Le rapport du mélange initial des deux catégories de matières doit se situer entre 20-30 (d'autres auteurs proposent 25-35 voire même 20- 40) pour finir entre 10-15 en fin de mûrissement (Mustin 2015; Faverial 2016; Ntalani *et al.*, 2020).

1. Si le C/N du compost est élevé (15-20), la matière organique évoluera lentement dans le sol et la libération des minéraux sera faible. Par contre, le compost donnera des substrats durables qui contribueront au renforcement de la structure du sol. Un C/N important caractérise donc un compost stable à haut pouvoir amendant.
2. Si le C/N du compost est faible (<10): la matière organique évoluera rapidement dans le sol et la minéralisation et l'ammonification seront optimales. Un C/N faible caractérise donc un compost instable et pauvre en composés humifères (Charnay 2005; Misra *et al.*, 2005; Rafolisy *et al.*, 2015). Il peut être assimilé à ce que les agronomes qualifient d'engrais verts

Le choix des substrats pour notre compostage a été fait de manière qu'il réponde aux exigences d'équilibre du tas du compost. Ainsi, nous avons associé les matières végétales carbonées «les pailles de brousses»- aux matières organiques azotées-«tontes de gazon, les épluchures de légumes (manioc, pomme de terre, carotte, goyave) et les restes de choux. De plus, pour enrichir et activer le processus, un petit coup de pouce a été donné par ajout de déjections d'élevage – «la bouse de vache et les fientes de poule» qui jouent le rôle de bio-activateur (chaque déjection agissait séparément par rapport à l'autre). Nous n'avons pas oublié l'élément important pour l'équilibre du tas «l'eau». Sans elle, les micro-organismes ne peuvent pas agir et ainsi assurer une bonne fermentation.

III.8. Les critères de qualité des composts.

III.8.1. Maturité et stabilité du compost.

La stabilité et la maturité du compost sont essentielles pour une utilisation optimale du compost comme amendement du sol et source de nutriments pour les plantes (Abdelhamid *et al.*, 2004; Garba *et al.*, 2020). Différents paramètres sont couramment définis pour déterminer la stabilité et la maturité du compost. Selon pas mal d'auteurs, la stabilité du compost est estimée par l'activité microbienne (taux de respiration ou libération d'énergie) et sa maturité par la détermination de son odeur/aspect/auto-échauffement, évaluation de sa composition chimique et de sa réactivité phytotoxique (tests de germination des plantes) (Tremier *et al.*, 2007; Aylaj et Lhadi 2008; Loubna 2014). Les détails des principaux paramètres de la stabilité et de la maturité d'un compost sont résumés dans le **Tableau 8**.

Un seul de ces paramètres ne peut à lui seul évaluer la qualité du compost. C'est l'ensemble de ces paramètres qui peuvent être utilisés pour évaluer et pour contrôler la stabilité et la maturité d'un compost (Tahraoui 2013).

Tableau 8: Paramètres de stabilité et de maturité [en % d'apparition dans la littérature]

Stabilité	%	Maturité	%
Activité biologique ou respiratoire	36	Effet sur les plantes	45
Degré ou stade de décomposition	20	Degré de décomposition	20
Mauvaises odeurs	14	Activité biologique ou respiratoire	11
Consommation de l'azote	8	Bénéfice agraire (texture, rétention d'eau	9
Disponibilité des nutriments	6	Odeurs	9
Phytotoxicité	4	Pathogène	4
Carbone disponible ou autre source	2	Couleur	2
Couleur	2	-	-
Dissolution des métaux lourds	2	-	-
Humidité	2	-	-
Risques environnementaux pour la santé	2	-	-
Texture	2	-	-
	100		100

Source : (Tahraoui 2013)

III.8.2. Indicateurs physiques de maturité d'un compost.

De très nombreuses méthodes d'évaluation de la maturité existent allant des plus simples aux plus sophistiquées. Une première approche sensorielle permet de juger de son stade de maturité. Il doit ressembler à du terreau tant par la **couleur** «noire foncée» que par son absence d'**odeur** désagréable (Charnay 2005; Tirichine *et al.*, 2017). Sa **température** en fin de processus doit être stable et voisine de la température ambiante extérieure sans excéder 35⁰C et au toucher sa structure doit être friable (Francou 2004; Charnay 2005; Tirichine *et al.*, 2017; Garba *et al.*, 2020). Néanmoins, il n'existe pas de critère de maturité unique et universel, il est souvent nécessaire d'utiliser simultanément plusieurs critères pour s'assurer de la maturité d'un compost. Ainsi, ces méthodes rapides et simples doivent être complétées par des analyses plus précises en laboratoire. Il s'agit notamment:

1. La **densité optique** après la mise en solution dans l'eau (extrait du compost) qui permet de détecter la présence de différents composés comme les substances humiques à 280 nm (Loubna 2014), ou le taux d'humification en fonction du rapport d'absorbance obtenu à 465 nm et 665 nm [E465/E665] (Abaker 2019).
2. L'**infrarouge** à transformée de Fourier (FTIR) qui permet de caractériser les principaux groupes fonctionnels de matrices complexes (Castaldi *et al.*, 2011 Alomar 2016; Abaker 2019),
3. La granulométrie est aussi un paramètre pertinent de caractérisation physique des composts et elle permet d'apprécier le degré de décomposition physique de la matière. Ainsi, le taux d'éléments fins augmentent lors du processus de décomposition - dégradation et un taux fort témoigne d'une bonne qualité du compost (Compaoré et Nanéma 2010; Toundou *et al.*, 2015).

III.8.3. Indicateurs chimiques.

La majorité des études, relative au degré de maturité des composts, se base sur l'évolution des paramètres physico-chimiques globaux: pH, rapport C/N, rapport $N_{-NH_4^+}/N_{-NO_3^-}$; matière organique, etc. (Charnay 2005; Compaoré *et al.*, 2010).

1. Le **pH**: La valeur du pH d'un compost mûr se situe normalement entre 7 et 8 (Dieng *et al.*, 2019; M'Sadak et Ben M'Barek. 2015; Mokhtaria *et al.*, 2007) ou entre 7 et 9 (Compaoré *et al.*, 2010; Mustin 2015). A pH acide, le compost est considéré comme immature (M'Sadak et Ben M'Barek 2013; M'Sadak et Ben M'Barek 2015; Garba *et al.*, 2020). Toutefois, M'Sadak et Ben M'Barak (2015) considèrent que le pH n'est pas une mesure très précise de la maturité du compost (M'Sadak et Ben M'Barak 2015).

2. **Le rapport C/N:** Le rapport C/N est un indicateur de la qualité des composts. Il est fréquemment utilisé pour évaluer le processus de minéralisation de la matière organique est comme indicateur de la maturité des composts (Compaoré et Nanéma 2010). La norme NFU 44-051 situe les valeurs C/N des composts mûrs entre 15 et 20 (Compaoré et Nanéma 2010; Konate *et al.*, 2018; Kaboré *et al.*, 2021). Selon M'Sadak et M'Barak. (2015), le rapport C/N décroît constamment au cours du compostage pour se stabiliser vers 10 (8 à 15) dans un compost mûr (M'Sadak et Ben M'Barak. 2015). Il a été établi qu'un rapport C/N compris entre 10-15 correspond à un compost stable et mûr bien que le ratio final dépend des matières initiales utilisées (Bokobana *et al.*, 2017; Compaoré *et al.*, 2010). Mais ce rapport seul n'est pas suffisant pour estimer la maturité d'un compost, il est donc nécessaire de le combiner avec d'autres paramètres physico-chimiques (Compaoré *et al.*, 2010).
3. **Le rapport $N_{-NH_4^+}/N_{-NO_3^-}$:** L'apparition des nitrates dans le compost peut, en effet, être un indicateur de maturité. Les micro-organismes nitrifiants induisent une diminution de la concentration en ammonium (NH_4^+) et une apparition d'ions nitrate NO_3^- (Francou 2004; Aicha *et al.*, 2014). L'étude de Koledzi (2011) a conclu que la perte d'azote dans un compost d'ordures ménagères est proche de 40% et qu'un rapport $N_{-NH_4^+}/N_{-NO_3^-}$ inférieur ou égal à 0,11% correspond à un indicateur de maturité pour ce type de compost (Koledzi 2011). D'autres auteurs limitent le rapport $[NH_4^+/NO_3^-]$ à une valeur inférieure à 0,16 pour un compost mature. Cependant, ce rapport est peu utilisé et les résultats sont très différents (Bernal *et al.*, 1998; Loubna 2014; Herihajaniavo *et al.*, 2016).
4. **Décomposition de la matière organique:** La teneur en MO est considérée par certains auteurs comme un paramètre de qualité et de maturité des composts (M'Sadak et Ben M'Barek. 2015; Mehdi *et al.*, 2007). Pour de nombreux auteurs, un compost de qualité (du point de vue stabilité et maturité), la teneur en MO devrait être comprise entre 35 et 45 % de MS (Amir 2005; Youssef *et al.*, 2012; Dieng *et al.*, 2019). Signalons également qu'il est possible de suivre la dégradation de la matière organique au cours du processus du compostage grâce à la quantification des fractions organiques telles que les acides de type humique (AH), les substances de type fulvique (AF). Des études montrent notamment une augmentation significative du rapport acide humique sur l'acide fulvique (AH/AF) au cours du compostage (Pujol 2012; Temgoua *et al.*, 2014; Toundou 2017; Bachelart 2021). Les résultats trouvés dans la littérature sont assez concordants avec des

valeurs inférieures à 1 pour des composts immatures, et supérieures à 1 ou 3 pour les composts mûrs (Francou 2004; Toundou 2016; Bachelart 2021).

III.8.4. Activités biologiques.

1. Test respirométrique

Il repose sur la mesure de l'activité respiratoire des micro-organismes présents dans le compost dans les conditions spécifiques d'incubation (humidité, température). Un compost non mûr a une demande en O₂ et un taux de production de CO₂ importants, dus à une intense activité microbienne provoquée par la biodégradabilité du substrat. Un bon nombre d'auteurs ont proposé une simple technique pour établir le degré de maturité du compost par la détermination de la demande chimique en Oxygène (DCO) en oxydant les matériels avec le dichromate de potassium et puis titrage avec le sel de Mohr [(NH₄)₂Fe(SO₄)₂.6H₂O]. Selon ces auteurs, le compost est suffisamment mature quand la demande chimique en oxygène est inférieure à 700 mg/g de compost sec (Puyuelo 210; Somé *et al.*, 2014; Mejraoua et Zine 2017; Toundou 2017).

2. Test d'auto-échauffement.

Il est possible de mesurer le degré de décomposition de la matière organique d'un compost par évaluation de son aptitude à remonter en température après réhumification (Mehdi *et al.*, 2007; Toundou 2017) (auto-échauffement). Ce test d'auto-échauffement est surtout recommandé en Europe et aux Etats-Unis (Koledzi 2011)

Le compost est placé dans des conditions spécifiques de température, d'humidité et en enceinte thermostatée à 20 ± 1°C à l'intérieur d'un vase de Dewar. La température est suivie pendant 10 jours. L'indice de maturité est fonction de la plus haute température atteinte lors du test. Ce dernier est qualifié de:

- i) **mûr** pour un degré de maturité de V (température < 30°C) ou un degré de IV (T < 40°C),
 - ii) **compost frais** pour un degré de maturation III (température < 50°C) ou degré II (T < 60°C)
- (Koledzi 2011; Loubna 2014).

3. Test de phyto-toxicité.

Les analyses physico-chimiques et bactériologiques seules ne peuvent en aucun cas suffire pour évaluer le degré de toxicité d'un polluant (Faverial 2016; Debornes 2017). Par conséquent, l'approche biologique est considérée comme un paramètre incontournable de la «fiche signalétique» d'un polluant et les tests de phytotoxicité sont utilisés pour évaluer la toxicité des composts liée à leur incorporation au sol (Loubna 2014; Faverial 2016; Bokobana *et al.*, 2017). En effet, les composts mûrs ne doivent pas présenter de substance empêchant la germination des graines et la croissance des plantes (Dixit *et al.*, 2002; Kabil *et al.*, 2016). Par conséquent,

la phytotoxicité est souvent évaluée par l'étude de la germination ou par des tests de croissance et un indice de germination (IG) doit être calculé pour l'évaluation des effets de composts sur différentes espèces de graines (Bokobana *et al.*, 2017). L'acide acétique est probablement l'acide organique, libéré par les composts immatures, le plus préjudiciable bien qu'il existe également d'autres composés (acétaldéhyde, éthanol, acétone, éthylène...) contribuant aux effets phytotoxiques (Achour 2008; Loubna 2014; Faverial 2016). De plus, en fonction de la nature et de l'origine des amendements et/ou de substrats de départ de compostage, les pratiques agricoles, à long terme, peuvent induire une accumulation de composés toxiques comme des éléments traces métalliques (ayant du pouvoir phytotoxique et génotoxique), des contaminants organiques ou d'autres types de substances toxiques qui par voie de conséquence présentent un risque environnemental (Dixit *et al.*, 2002; Kabil *et al.*, 2016). D'après la revue de la littérature, appuyée par les résultats rapportés par plusieurs auteurs; l'effet dépressif du compost n'est pas lié uniquement aux caractéristiques des composts, mais il est aussi en fonction des doses appliquées et du type de culture (Bokobana *et al.* 2017; Dieng *et al.*, 2019). En conséquence, en plus de la recherche de mise en évidence de l'effet des polluants éventuels présents dans le compost, le calcul de l'indice de germination s'avère également nécessaire afin de déterminer la concentration optimale du compost qu'il faut incorporer au champ sans effet de phytotoxicité. Un indice de germination (GI) ≥ 50 % est reconnu comme étant celui d'un compost sans effet phytotoxiques (Chennaoui *et al.*, 2016; Herihajaniavo *et al.*, 2016; Kabil *et al.*, 2016; Kaboré *et al.*, 2020).

III.9. Avantages du compost.

Le compostage permet, non seulement à réduire la quantité des déchets organiques fermentescibles collectés, mais aussi permet de faire des économies en évitant les transports jusqu'à la déchetterie (ou décharge) pour s'en débarrasser et en achetant moins ou même pas d'engrais chimiques qui par ailleurs coûtent chers. L'utilisation du compost comporte plusieurs avantages parmi lesquels nous pouvons citer:

- i) **Teneurs élevées en matière organique et en nutriments:** Le compost apporte non seulement de la matière organique au sol mais aussi favorise la mise à disposition progressive des éléments minéraux en fonction des besoins des plantes cultivées aux sols pour les plantes.
- ii) **Amélioration de la porosité du sol:** Le compost étant composé de particules de tailles différentes, son incorporation au sol s'avère nécessaire pour lutter contre la dégradation de la surface du sol et offrir ainsi une structure poreuse très utile (Albrecht 2006; Herihajaniavo *et al.*, 2016; Toundou 2017). Il est montré aussi que les amendements en

matière organique stable augmentent le pouvoir tampon et la capacité d'échange cationiques, deux paramètres qui conditionnent la nutrition minérale des plantes (CEFREPADE 2008; Herihajaniavo *et al.* 2016; Benjamin 2019).

- iii) **Amélioration de la capacité de rétention d'eau:** Les composts ayant un pouvoir de rétention en eau supérieure au sol, l'incorporation de composts au sol augmente la capacité de rétention du sol proportionnellement à la dose apportée (Benjamin 2019; Somé *et al.*, 2014). Ainsi, en augmentant le taux d'humus du sol de 0,2 %, la quantité d'eau disponible pour la plante croît de 0,5 % et la porosité du sol de 1 % (Francou 2004; Koledzi 2011; Bareau 2012; Maha 2013).
- iv) **Abondance et diversité microbienne:** L'une des caractéristiques uniques du compost est son abondance et sa diversité microbienne. Etant donné que les microorganismes sont les principaux acteurs du processus de compostage, le compost contient une gamme de bactéries, d'archées, de protozoaires etc. ces derniers stimulent l'activité microbienne des sols amendés avec le compost. Ils jouent aussi un rôle très important en soutenant les plantes, en leur fournissant des nutriments, mais aussi en retenant mieux les éléments toxiques (ex. les métaux lourds : Processus de bio-remédiation par chélation) (Kaboneka) et en éliminant les maladies du sol. Beaucoup de composts ont la capacité de réprimer l'activité des agents pathogènes (Mehdi *et al.*, 2007; Koledzi *et al.*, 2012; Naquin et Ngnikam 2012; Ngom *et al.*, 2017; Toundou 2017; Dieng *et al.*, 2019).
- v) **Amélioration de la structure:** Le compost améliore la structure du sol par l'augmentation des agrégats (pénétration des racines, facilitée et exploitation du sol favorisées), la meilleure perméabilité à l'air et à l'eau, la réduction importante de l'érosion, la diminution de la dessiccation par ventilation et l'augmentation de l'absorption des rayons solaires (Koledzi 2011; Ngom *et al.*, 2017). L'ajout de compost retient l'érosion causée par l'eau mais aussi par le vent, les nutriments sont alors plus accessibles aux végétaux, ce qui améliore leur qualité dans les régions exposées à l'érosion (Albrecht 2006; Koledzi 2011).

Conclusion de l'étude bibliographique.

La gestion des déchets solides ménagers et assimilés, dans les PED en général et au Burundi en particulier, demeure une problématique qui prend de plus en plus de l'ampleur face aux taux élevés de croissance des populations, à l'urbanisation galopante et à la diversification des déchets émis. Cette revue bibliographique met en exergue dans un premier temps le contexte général de gestion des déchets au Burundi, et globalement dans les PED, et vise à justifier le

choix d'un mode de traitements des déchets par compostage dans un double enjeu de valorisation des déchets et de restauration des sols dégradés via l'utilisation du compost en agriculture. Les résultats de la recherche bibliographique montrent qu'il existe une littérature de plus en plus fouillée sur la connaissance des déchets dans les PED, mais les travaux similaires à la situation au Burundi sont peu nombreux. La collecte et le traitement efficace de ces déchets restent confrontés aux réalités socio-économiques de notre ville (Bujumbura) couplées à une volonté politique mitigée. Au niveau des populations, la conscience environnementale en matière de responsabilité individuelle et collective de préservation de l'environnement n'est pas encore ancrée dans les habitudes. La méconnaissance des textes et leur violation quotidienne sont d'une évidence notoire et sont renforcées par la quasi-inexistence ou la non application des mesures répressives malgré l'existence de la police chargée de la protection de l'environnement. Aussi, le tri à la source (en amont), ou à la limite, la séparation en amont des déchets biodégradables et non biodégradables devrait déjà connaître tout au moins un début de mise en œuvre. La pollution de l'environnement (eaux, sol et air) et les impacts sur l'homme, en sont les conséquences de cette mauvaise gestion des déchets solides dont les effets, malheureusement, se multiplient au quotidien surtout sur les couches les plus vulnérables.

Par méconnaissance ou négligence, nous ignorons que nous avons **«Une mine d'or biologique qui gît dans les ordures en poubelles»**. D'après la revue bibliographique, les données sur le gisement de leurs déchets montrent qu'une grande part de déchets valorisables, est réutilisable et recyclable, mais aussi compostable.

De plus, cette partie de revue bibliographique présente les solutions technologiques les plus adaptées pour les PED. Le compostage en andains aérés est une première solution tout en ciblant les déchets biodégradables. Les différents paramètres de suivi du procédé de composts pour obtenir un compost de qualité (notamment la stabilité et la maturité), et les normes de qualité chimique, biologique et agronomique des composts produits ont été identifiés. La voie naturelle de valorisation par compostage comporte de nombreux avantages notamment la réduction des masses et des volumes de déchets (jusqu'à plus ou moins 60 %), l'hygiénisation et la stabilisation de la matière organique. L'incorporation de compost aux sols s'avère efficace pour lutter contre la dégradation de la surface des sols, améliore sa porosité et sa structure, l'accroissement de la productivité agricole par le renouvellement des éléments nutritifs des sols. Les applications de compost dans les sols permettent également une alternative à l'utilisation des engrais minéraux chers sur les marchés et lixiviables, sans oublier la contribution de certains composts à l'amélioration de la résistance des végétaux vis-à-vis de certaines maladies. Les

procédés de compostage ont été étudiés. Chaque pays, selon son niveau de vie, la composition de ces déchets...choisira un procédé. La recherche de la qualité du compost qu'elle soit physique, chimique, biologique a été étudiée. De telles études s'avèrent nécessaires afin de garantir un produit compétitif par rapport aux fertilisants locaux. Aucune entreprise ou usine ne peut être pérenne sans étudier au préalable tous les aspects de son projet et effectuer les démarches indispensables pour la prise en compte de la filière de compostage.

Avant de s'engager dans l'installation ou le développement d'une activité conséquente de compostage des déchets solides municipaux, il est essentiel de s'assurer que les conditions sont favorables. Le type d'installation ainsi que le choix du procédé de compostage choisi déterminent les matières qu'il est possible de composter. Une évaluation périodique de la plateforme est nécessaire et devra porter sur la qualité des intrants, sur leur composition et leur teneur en matière organique, sur leur rapport C/N et autres analyses nécessaires pouvant aider à établir la réputation du produit et la confiance envers ce dernier.

DEUXIEME PARTIE: EXPERIMENTATIONS

Chapitre 1: Matériel et méthodes.

I.1.Introduction.

Pour garantir un bon état sanitaire et environnemental, des alternatives de valorisation des déchets solides ménagers doivent être entreprises. Il s'agit principalement du compostage, de la méthanisation et de l'incinération. De toutes ces technologies, le compostage paraît comme une écotecnologie et en même temps une technologie à faible coût.

Le choix de traitement des déchets solides ménagers (DSM) par compostage présente un grand intérêt particulièrement pour les pays en développement (PED) du fait que, la fraction fermentescible dans les ordures ménagères des déchets des villes africaines (y compris Bujumbura-Burundi) varie entre 50 % et 70 % (voir même plus). Ainsi, après valorisation de ces quantités de matières organiques fermentescibles en compostage, ce dernier pourra être utilisé comme amendements organiques.

Pour produire un compost de qualité, deux principaux types d'outils sont nécessaires: le premier type d'outils concerne l'expertise en matière de compostage, c'est-à-dire être capable de discerner quoi et comment évaluer un compostage en processus. Le deuxième type d'outils concerne l'appui matériel et technique. Ce sont les deux types d'outils qui justifient la raison d'être du premier essai du compostage et d'analyses des paramètres de suivi de compostage dans les laboratoires de l'Ecole Supérieure Polytechnique (ESP) de l'Université Cheik Anta Diop de Dakar (UCAD) (Sénégal). Au lieu d'avoir «*la clé en main*», les connaissances et les techniques de base acquises pour installer et suivre un compostage ont été transférées et appliquées en conditions réelles avec les DSM et adjuvants recueillis à Bujumbura (Burundi), ce qui a constitué le deuxième essai de compostage.

Ainsi, les deux essais de compostage ont été conduits dans deux pays différents à conditions climatiques différentes, mais les matières premières et les techniques de compostage sont similaires.

I.2. Caractérisation des régions d' expérimentation.

I.2.1. Caractérisation de la ville de Dakar (Sénégal).

La région de Dakar (Capitale du Sénégal) est située dans la presqu'île du Cap Vert et s'étend sur une superficie de 550 km², soit 0,28 % du territoire National. Elle est comprise entre les 17°10 et 17°32 de longitude Ouest et les 14°53 et 14°35 de latitude Nord. Elle est limitée à l'Est par la région de Thiès et par l'océan Atlantique dans ses parties Nord, Ouest et Sud (Herihajaniavo *et al.* 2016). Depuis le début de l'année 2020, c'est au mois de janvier qu'on a

observé des précipitations totales moyennes de 1 mm/mois, tandis que de février jusqu'au mois d'avril, période d'expérimentation des andains, les précipitations sont de 0 mm.

Au cours du même intervalle de temps (janvier – avril), la température moyenne mensuelle varie entre 24°C et 26°C (www.historique-meteo.net/afrique/senegal/dakar/2020)

1.2.2. Caractérisation de la ville de Bujumbura (Burundi).

La ville de Bujumbura, capitale économique du Burundi, compte aujourd'hui 3 communes: Muha, Mukaza et Ntakangwa. Elle se trouve dans l'Ouest du Burundi dans la région naturelle de l'Imbo, sur les rives du lac Tanganyika et les autres côtés sont entourés par la province de Bujumbura Rural: au Nord par la commune Mutimbuzi, à l'Est par les communes Isale et Muhuta et au Sud par la commune Kabezi. Son altitude, comprise entre 800 et 1000 m, un niveau relativement bas par rapport à l'ensemble du pays dont l'altitude moyenne est supérieure à 1500 m. La ville s'étend sur une superficie d'environ 11000 ha (110 km²) avec une aire urbanisée d'environ 6500 ha (ONU-Habitat 2012). La population de la ville de Bujumbura était estimée mi 2015 à 760 000 habitants, à environ un million vers 2020 et pourrait atteindre 1,5 million vers 2030. En 2050, la population de la ville de Bujumbura se situerait entre 2,5 et 4,2 millions, soit entre 3 et 5 fois sa population de 2015. Dans le second cas, la population de Bujumbura Mairie représenterait environ 70 % de la population urbaine de tout le pays, soit 10 points de plus qu'en 2015 (ISTEEBU 2017). Le climat, de type tropical, offre un ensoleillement dominant toute l'année et une température moyenne annuelle de 23°C. Bujumbura, comme l'ensemble du pays, connaît 2 saisons (saison sèche et saison des pluies) ayant chacune deux variantes: la grande saison sèche (de juin à mi-septembre), petite saison sèche (de mi-décembre à mi-février), la grande saison des pluies (de mi-février à mai) et petite saison pluvieuse (mi-septembre à mi-décembre) (Ministère de l'aménagement du territoire du tourisme et de l'environnement 2007; ONU-Habitat 2012; Bigumandondera 2014; Ministère de l'environnement, de l'agriculture et de l'élevage, 2019).

I.3. Les déchets compostés.

1.3. 1. Les déchets compostés à Dakar.

Deux différents composts sont réalisés par mélange de différents types de déchets putrescibles produits dans les enceintes et dans les restaurants universitaires de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD) et des adjuvants de déjections d'animaux. Les déchets ménagers et assimilés étaient constitués des pelures de manioc, de pomme de terre, de carotte, de goyave, des restes (ou pertes) de choux, de la paille de brousse et des tontes de gazon. Pour ces ordures

ménagères, le tri a été réalisé à la source par des femmes qui assuraient le service d'épluchage et ces déchets triés étaient emballés dans des sacs séparément et acheminés (par nous-mêmes à l'aide d'un véhicule) sur le lieu de compostage.

Les tontes de gazon et les pailles sont issues des espaces verts de l'UCAD. Comme adjuvants de déjections des animaux, nous en avons utilisés deux: les bouses de vache qui sont issues «*du marché de bétail de Yarakh, quartier de Dakar*» et les fientes de poule sont prélevées dans «*un poulailler à Keur Massar, département de Pikine, en Banlieue dakaroise*». Ces adjuvants sont ajoutés afin d'accélérer la décomposition et par la suite, de raccourcir la durée de compostage.

1.3. 2. Les déchets compostés à Bujumbura.

Quatre différents composts sont préparés par un mélange de différents types de déchets putrescibles produits à Bujumbura et deux sortes d'adjuvants naturels.

Les déchets solides ménagers et assimilés compostés sont constitués des épluchures de patate douce; de manioc; de pomme de terre; de banane; des pailles de brousse, des tontes de gazon et des restes de choux. Le choix de ces déchets putrescibles est guidé par leur similarité avec ceux de Dakar, mais aussi par leurs abondances dans la ville de Bujumbura. Afin d'éviter leur décomposition avant le montage des andains, les déchets ont été collectés tout au plus 2 jours avant le lancement du processus. Ces pelures ont été collectées sélectivement dans différents restaurants du village des enfants SOS et du quartier Nyakabiga, tandis qu'une grande partie des restes de choux utilisée a été collectée au marché communément appelé COTEBU. Les pailles de brousse et les tontes de gazon ont été collectées dans les enceintes (espace vert) du campus Mutanga de l'Université du Burundi (U-B). Deux types d'adjuvants de déjections d'élevage, ajoutés pour accélérer le processus, sont utilisés pour le co-compostage : les bouses de vache issues du marché de l'abattoir de Bujumbura et les fientes de poules sont prélevées dans un poulailler à Gasenyi (quartier de la commune Ntakangwa de la ville de Bujumbura).

I.4. Détermination des proportions des substrats et adjuvants utilisés et choix des outils.

Parmi les différents types de compostage évoqués dans l'étude bibliographique, le compostage en andain aéré a été retenu comme étant le plus adapté compte tenu du matériel à notre portée. Pour réaliser un compostage, il est important de savoir quelles associations de matières il faut privilégier, et en quelles proportions. Il faut également que l'équilibre de matières, autant physique que chimique soit établi. Du côté chimique, le rapport C/N du mélange de départ pouvant garantir un bon démarrage et déroulement du compostage se situe entre 25 et 35 selon plusieurs auteurs (Yulipriyanto 2001; Compaoré et Nanéma 2010; Faverial 2016; Ntalani *et al.*, 2020). Du côté physique, en plus du respect d'autres facteurs, le mélange doit rester aéré pour se composter dans de bonnes conditions. En fin de compostage, si l'équilibre matières azotées-matières carbonées n'est pas respecté, deux situations non satisfaisantes peuvent se présenter:

- Un compost possède un rapport C/N trop élevé: cela signifie qu'il rendra trop captif l'azote, et ne servira pas à libérer suffisamment d'azote pour les besoins de la plante;
- Un compost a un rapport C/N trop faible: il aura tendance à libérer trop et trop vite les différentes composantes chimiques, et ne sera pas non plus très utile, provoquant les arrivées massives d'azote perdues pour les plantes qui en auront besoin tout au long de leur végétation (Tahraoui 2013).

Le rapport C/N du mélange des substrats de départ doit être fixé conformément à ce qui a été annoncé précédemment et pour déterminer les proportions des intrants, la Formule (1) ci-après a servi de base de calcul (Compaoré et Nanéma 2010):

$$R_m = \frac{\sum_{i=1}^j n_i x R_i}{\sum_{i=1}^j n_i} \quad (1)$$

R_m = rapport C/N du mélange; n_i = quantité de composant i ;

R_i = rapport C/N du composant i

Exemple de calcul pour le cas des composts fabriqués à Dakar:

Le rapport C/N (R_m) du mélange de départ a été fixé à 30 pour les deux composts, les inconnues des masses (en kg) des intrants sur 100 kg de matières sèches sont: quantité de gazon = quantité d'ordures ménagères: x ; paille: y ; adjuvant (8 kg): z (Dieng *et al.*, 2019).

Pour déterminer les inconnues de l'équation (1), un système d'équation (2) a été utilisé:

$$\begin{cases} Rm = \frac{40,39 * y + 46,43 * x + 18,27 * z}{100} = 30 \\ 2x + y + z = 100 \end{cases} \quad (2)$$

Avec: 40,39; 22,63; 23,80; 18,27 (13,51) qui sont respectivement les rapports C/N de paille, tontes de gazon, mélange d'ordures ménagères et de la bouse de vache (fiente de poule) déterminés préalablement au laboratoire. Le système d'équations a été résolu et les proportions des intrants sont présentées dans les **Tableaux 9 et 10** respectivement pour les composts de Dakar et ceux de Bujumbura. La masse réelle est donnée par la **Formule 3**:

$$M. \text{ réelle (en \%)} = \frac{m}{\% MS} \times 100 \quad (3);$$

m= masse de la matière sèche (à utiliser) ; % MS = teneur en % de la matière sèche.

Tableau 9: Proportions des différents substrats et adjuvants intrants à Dakar

Paramètres	Andain	Paille	TG	E+PC	Adjuvants		Total (%)	Moyenne C/N (Rm)
					Bv	Fp		
Masse(kg en % MS)	Andain 1	42	25	25	8	-	100	
	Andain 2	44	24	24	-	8	100	
Rapport C/N	Andain 1 & 2	40,4	22,6	23,8	18,3	13,5	-	30

Où TG=Tontes de gazon; E+PC= Epluchures + Pertes de choux; Bv= Bouses de vache; Fp= Fientes de poule

Tableau 10: Proportions des différents substrats et adjuvants intrants à Bujumbura

Paramètres	Andain	Paille	TG	E+PC	Adjuvant		Total (%)	Moyenne C/N (Rm)
					Bv	Fp		
Masse en kg (% MS)	C ₁	38	27	27	8	-	100	30
	C ₂	40	26	26	-	8	100	30
	C ₃	63,6	14,2	14,2	8	-	-	35
	C ₄	12,4	39,8	39,8	8	-	-	25
C/N	C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₄	42,4	21,6	24,1	19,4	14,5	-	-

Moyenne C /N = Moyenne du rapport C/N du mélange des intrants (Rm)

Le matériel et outils ci-après ont été utilisé pour l'installation des andains: un hangar couvert de tôles, des briques ou blocs de ciment pour la délimitation des dispositifs (un total de 4 dispositifs à Dakar et de 8 dispositifs à Bujumbura), d'un râteau, charriot-brouette, d'une pelle, d'une fourche, des bâches, d'un seau, d'un arrosoir, des bidons (de 20 litres de capacité), d'un tuyau d'arrosage, d'une balance, d'une latte et d'une sonde de température.

Chapitre 2. Méthode de compostage et méthodes d'analyses des paramètres de compostage.

Comme il a été dit dans la partie bibliographique, plusieurs méthodes de compostage sont généralement employées pour la fabrication du compost. Au cours de notre étude, c'est la méthode de compostage en andain aéré par couches successives avec alternances des fractions compostables qui a été utilisée pour les deux régions.

II.1. Méthodes de compostage.

II.1.1. Méthode de compostage à Dakar.

À Dakar, les travaux d'expérimentation ont été réalisés dans un espace libre proche du Département de Génie chimique et Biologie Appliquée (GCBA) de l'Ecole Supérieure Polytechnique (ESP) de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD) (Sénégal). Le milieu était mi- ombragé, car sous les branches et feuilles d'arbres. Comme deux andains sont prévus pour y être érigés, en plus des deux dispositifs qui étaient sur place, deux autres ont été construits à côté des deux préexistants pour faire un total de quatre dispositifs de même dimensions. La construction est dédoublée parce qu'on doit prévoir deux dispositifs pour chaque andain: un dispositif pour recevoir le compostage de départ et un autre dispositif prévu pour le retournement. Chaque dispositif est un carré de 1,5m de côté soit une surface de 2,25m² et il est délimité par des bétons cylindriques. Les matières à composter sont pesées à l'aide d'un carton préalablement taré avec une balance. La proportion de chaque matière est calculée suivant les pourcentages indiqués dans les **Tableaux 9 & 10**.

Du bas vers le haut, on commence à mettre une fraction de paille, suivie de celle des tontes de gazon, suivie d'un mélange d'épluchures (et pertes de choux) et enfin d'une part de déjections (de vache pour le premier andain et de poule pour le deuxième andain). Le tout est arrosé avec un volume d'eau en quantité proportionnelle aux matières solides, soit 28 litres pour notre cas (Dieng *et al.* 2019) et la première couche est ainsi constituée. Le même procédé est répété pour toutes les couches tout en respectant les alternances des matières organiques compostées sauf pour le volume d'arrosage qui a changé pour les troisième et quatrième couches où le volume d'eau ajouté est passé à 56 litres/couche.

Les quatre couches ainsi constituées, la hauteur maximale obtenue est d'environ 80 cm, soit une moyenne de 20 cm par couche. Après la construction de l'andain, ce dernier est couvert de bâches pour éviter un éventuel excès d'évapotranspiration occasionnée par la chaleur du soleil

combinée à celle produite par les activités des microorganismes. Le dispositif expérimental est présenté aux **Figures 7** (a₁, a₂, a₃, a₄ et a₅):



(a₁): Mise en place de la 1^{ère} couche



(a₂): Mise en place de la 2^{ème} couche



(a₃): Fin de mise en place de l'andain



(a₄): andain couvert



(a₅): Les deux andains sur place

Figure 7: Étapes de mise en place des andains à Dakar

II.1.2. Méthode de compostage à Bujumbura.

Comme on l'a fait à Dakar, la technique adoptée fut le compostage en andain aéré naturellement par couches successives avec alternances des fractions compostables. Construit sous un hangar de toiture en tôles ondulées galvanisées, le pilote expérimental est constitué de deux blocs parallèles, distant d'1m d'intervalle, et chaque bloc compte 4 compartiments.

Au total, 8 composteurs (deux par andain) ont été construits et chaque dispositif avait une forme d'un parallélépipède de base carré avec 1,5 m de côté et au bas, le composteur a une maçonnerie en briques cuites jusqu'à une hauteur de 40 cm. Chaque mur du bas du bâtiment disposait de 3 morceaux de tuyaux en p.v.c de 40 cm faisant un total de 3 morceaux x 8 compartiments = 24 morceaux de tuyaux servant d'évacuer le lixiviat excédentaire d'eau d'arrosage. Toute la maçonnerie des deux blocs est crépissée (de l'intérieur comme de l'extérieur) et des trous d'aération ont été placés aux côtés non adjacents des dispositifs. Lors de la mise en andain, les matières compostables sont ajoutées par couches successives à raison de 20 kg (%MS). De bas en haut, chaque couche est constituée comme suit : fraction de pailles, tontes de gazon, mélange d'épluchures et de choux, déjections d'élevage. Au total, 4 couches ont été constituées. On a arrosé avec 28 l d'eau de robinet pour la première et la deuxième couches chacune, pour la troisième et la quatrième couche, on a utilisé 56 l chacune (Dieng *et al.*, 2019). Chaque andain est couvert de bâches pour éviter un excès d'évaporation (voir *Figures 8 a, b, c et d*). Des retournements hebdomadaires sont effectués.



(a): Étapes de la mise en place de l'andain



(b): Mise en place de la 1^{ère} couche; (c): Fin de mise en place de l'andain; (d) Andains couverts

Figure 8: Processus de construction des andains à Bujumbura

II.2. Paramètres et période de suivi du compostage.

Définition : Le compostage est défini comme un procédé biologique aérobie contrôlé, qui permet l'hygiénisation et la stabilité par dégradation de matière organique, et conduit à un amendement ou engrais organique (Tahraoui 2013).

Les paramètres physico-chimiques des intrants et des composts fabriqués, l'évaluation de quelques critères d'innocuité des adjuvants et composts produits ainsi que les essais agronomiques des composts obtenus qui ont été suivis sont récapitulés dans le **Tableau 11** ci-après:

Tableau 11: Paramètres et période de suivi

Activités ou paramètres suivis	Période de suivi			Observations
	Début du processus de compostage	Au cours du processus du compostage	Fin du processus du compostage	
Température	X	X	X	Journellement
Hauteur	X	X		
Humidité	X	X	X	Journellement
Arrosage	X	X		À chaque retournement
retournement	X	X		Hebdomadaire
Masse volumique (μ)	X		x	Au début μ directe A la fin μ sèche
M.S	X		x	
MO	X	x	x	
COT	X		x	
NTK	X		x	
C/N	X		x	
P total	X		x	
K total			x	Sur les composts de Bujumbura
pH			x	
Quelques métaux lourds			x	Sur les composts de Bujumbura
Analyses microbiologiques	x		x	Au début : sur les adjuvants; et à la fin sur les composts mûrs
Test de phytotoxicité			x	Sur les composts mûrs
Essais agronomiques			x	Sur composts mûrs de Bujumbura

II.3. Méthodes d'analyses des paramètres de compostages.

Que ce soit sur les déchets intrants ou au cours du processus de compostage, la méthode d'échantillonnage pour avoir un échantillon représentatif était la même:

Afin de s'assurer de l'homogénéité de l'échantillon, les prélèvements sont effectués selon la méthode de quartage (Guermoud et Addou 2014; Rafolisy *et al.*, 2015; Maléki 2018). Chaque échantillon composite est réalisé à partir de différents prélèvements effectués sur les différents endroits et profondeurs des andains qui sont ensuite mélangés, et un échantillon représentatif, selon l'analyse à réaliser, est prélevé. Pour les analyses microbiologiques, les échantillons représentatifs ont été conservés dans le congélateur en attendant le jour d'analyse. Les

principaux paramètres : physiques (Masse volumique, hauteur, humidité, température) ; chimiques (pH, MOT, NTK, COT, P, K) ont été mesurés et des retournements effectués.

II.3.1 Caractérisation physique.

II.3.1.1. Masse volumique ($\mu = \text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$ ou $\text{T} \cdot \text{m}^{-3}$) des intrants et du compost mûr.

Introduction.

La densité d'un corps solide ou liquide est définie comme étant le rapport de sa masse volumique à la masse volumique de l'eau sachant que la masse volumique de l'eau est égale à 1 kg/dm^3 (1 kg/L) ou 1 T/m^3 ou 1000 kg/m^3 . Le plus souvent, volontairement si pas par erreur, certains auteurs confondent les deux paramètres: densité et masse volumique. En réalité, la masse volumique est exprimée en kg/dm^3 (T/m^3) alors que la densité représente son nombre abstrait. Ainsi, ce facteur est important, car il met en évidence la relation qui existe entre la masse des déchets solides ménagers et les volumes qu'ils occupent. Nous avons déterminé la masse volumique relative des entrants des deux andains ainsi que la masse volumique sèche du compost mûr.

a) Masse volumique des intrants (kg/dm^3) :

La détermination de la masse volumique a été effectuée par pesée manuelle des matières compostées dans un seau étalonné de contenu 20 litres. La paille est d'abord grossièrement hachée afin de pouvoir la mélanger facilement avec les autres ordures et l'introduire dans le récipient de mesure sans gêne. Le mélange ainsi établi, sur base des proportions en pourcent des matières compostées, est introduit dans un seau jusqu'à ras-bord tout en tassant légèrement. Parfois, le passage d'une latte au bord du seau était nécessaire afin d'enlever les matières débordantes. Au total, cinq mesures ont été réalisées et la valeur retenue représente leur moyenne. La densité est alors estimée de la même façon qu'en b)

b) Masse volumique sèche (kg/dm^3) sur le compost mûr.

L'échantillon est d'abord étuvé à 105°C pendant 24 heures puis pesé et il est transvasé (en prenant soin de commencer par les particules relativement de grandes tailles pour terminer par celles de petites tailles) dans une éprouvette graduée pour mesurer le volume qu'il occupe (Koledzi *et al.*, 2012^b; Rafolisy *et al.*, 2015). La masse volumique est calculée alors comme suit:

$$\mu = m/v \quad (4);$$

Avec: μ = masse volumique sèche (en kg/L ou T/m^3); m = masse du compost sec (en kg);

v = volume occupé par cette masse du compost sec (en dm^3 ou en litre)

II.3.1.2. Mesure de la variation de la hauteur du compost.

Bien que la variation de la hauteur des tas d'un compost puisse être considérée comme un phénomène purement physique, on constate en réalité qu'elle est fortement liée aux phénomènes physico-chimiques et microbiologiques qui se déroulent au sein du compost en activité; la *Figure 9* en dit mieux (Pujol 2012).

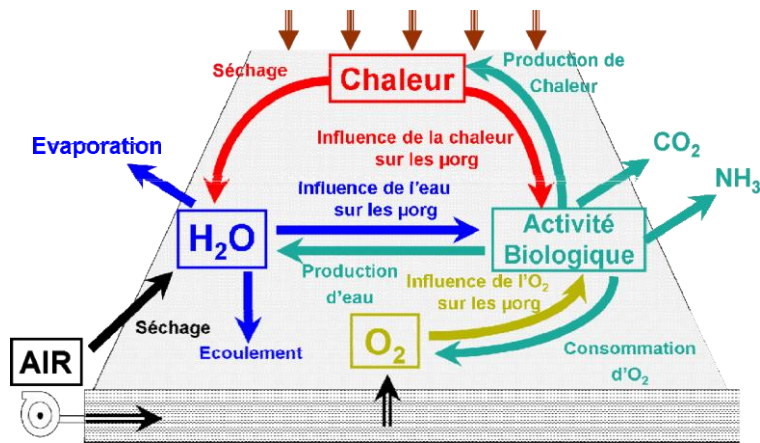


Figure 9: Activité et tassement de l'andain au cours du processus de compostage

Afin de déterminer l'évolution de la hauteur de chaque andain, deux tiges de bois ont été placées dans deux coins du carré formant l'andain concerné. À partir du sommet opposé au coin considéré, une latte suffisamment longue est placée suivant le sens de la diagonale de telle façon que l'autre extrémité touche la tige visée. Le point de contact entre la tige de bois et la partie inférieure de la latte a été marqué. À l'aide d'une latte graduée (précision de ± 1 mm), une mesure de la distance entre ce point marqué et le bout de la tige (bout en contact avec le sol) a été effectuée ce qui constitue la hauteur initiale de l'andain. La relevée de la hauteur au cours du compostage a été réalisée suivant les deux diagonales et la valeur retenue est la moyenne des deux mesures. L'évolution de la hauteur est mesurée en prenant comme repère le point marqué (sur la tige).

II.3.1.3. Détermination de l'humidité (H en %).

L'humidité doit être déterminée le plus rapidement possible afin de limiter les pertes par évaporation. Le taux d'humidité est obtenu par la méthode normée AFNOR NF U 44-171 (1996) (Bodjona *et al.*, 2012). Une masse d'échantillon supérieure ou égale à $100,0 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$ est prélevée et mise à l'étuve à $105 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à une masse constante pendant approximativement 24 heures (Yobouet *et al.* 2010; Aloueimine *et al.*, 2021; Charnay 2005). Le taux d'humidité (H en %) est calculé par la différence de masse avant et après séchage et

s'exprime en % par rapport à la masse humide initialement prélevée. Certains auteurs préfèrent appliquer des températures plus basses, de l'ordre de 40°C - 80°C, afin de ne pas dégrader les composés organiques (Tahraoui 2013; Rafolisy *et al.*, 2015; Ukondalemba 2016).

- a) Dans cette étude, l'humidité des matières premières et composts mûrs est déterminée directement sur des échantillons de 100 g obtenus après quartage et cette masse est portée à l'étuve à $105 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à une masse constante et le taux d'humidité est calculé suivant la **Formule 5**:

$$H(\%) = \frac{(M_f - M_s)}{M_f} \times 100 \quad (5);$$

Il est à remarquer que la matière sèche (MS%) est le taux complémentaire du degré d'humidité.

Avec: M_f = Masse de l'échantillon frais ; M_s = Masse de l'échantillon après séchage

- b) Au cours du processus du compostage, la détermination de l'humidité a été effectuée par presse d'une poignée de compost (test de la poignée) (Francou 2004; Koledzi *et al.*, 2012^b):
- i) Si un fin filet d'eau s'en échappe, il est trop humide (il doit être séché);
 - ii) Si quelques gouttes perlent entre les doigts et que le matériau ne se disperse pas quand on ouvre la main, le compost a une bonne humidité;
 - iii) Si l'échantillon s'effrite de lui-même lorsque le manipulateur ouvre la main, le compost est trop sec et doit être humidifié (Francou 2004; Bromblet et Somaroo 2015). Des arrosages ont été effectués chaque fois qu'il était nécessaire afin de maintenir le taux d'humidité des andains à des valeurs comprises entre 60 % à 70 %.

Remarque: Si plusieurs composants sont utilisés pour construire l'andain, l'humidité globale de l'échantillon est donnée par la relation ci-après:

$$H_{gl} = \frac{\sum H_{C_i} \times \% C_i}{100} \quad (6);$$

où: H_{gl} = humidité globale; H_{C_i} = Humidité du composant i; $\% C_i$ = proportion du composant i

Avec la valeur d'humidité globale trouvée, il devient plus aisé de calculer le volume d'eau d'arrosage connaissant l'humidité initiale et celle qu'on veut atteindre.

EX: Posons que M soit la masse totale des substances compostées à X % de teneur globale en eau, et on veut porter M du compost à Y % de teneur en eau; la relation qui donne ce volume est obtenue comme suit:

Soit M_x = masse d'eau dans les substances (ou compost) de départ: $M_x = \frac{M \times X}{100}$ (7);

M_y = masse d'eau dans les substances (ou compost) final(es): $M_y = \frac{M \times Y}{100}$ (8);

La masse d'eau (M_w) ajoutée devient : $M_w = M_y - M_x = \frac{M \times Y}{100} - \frac{M \times X}{100}$

$$\longrightarrow M_w = \frac{M}{100} (Y - X) \quad (9);$$

Comme $\mu_w = \frac{1g}{cm^3} = \frac{1kg}{dm^3}$ et que $1dm^3 = 1L \dots > \mu_w = \frac{1kg}{L}$

Alors, le volume d'eau ajoutée sera égale à: $V_w = \frac{M_w}{\mu_w}$

II.3.1.4. Température.

Nous sommes partis de l'une des définitions du compostage qui stipule que le compostage est considéré comme une bio-oxydation, c'est-à-dire, un processus microbiologique de dégradation de la matière organique en présence d'oxygène (Yulipriyanto 2001). Or, nous savons que de par la thermodynamique chimique, toute réaction d'oxydation s'accompagne par une libération d'énergie (chaleur) mesurable par la variation de la température. Ainsi, le suivi de la température est un moyen indirect de contrôler l'activité de dégradation microbienne, mais aussi de suivre les différentes phases de compostage: mésophile, thermophile, refroidissement et de maturation (Koledzi *et al.*, 2011). Au cours du processus de compostage, la température de chaque andain a été mesurée journalièrement par un thermomètre à sonde (**Figure 10**) durant tout le processus du compostage. La valeur retenue est la moyenne de 9 mesures effectuées suivant tous les coins de l'andain et dans différentes profondeurs de l'andain (3 mesures à 3 niveaux de chaque endroit) (Koledzi 2011; Tahraoui 2013).

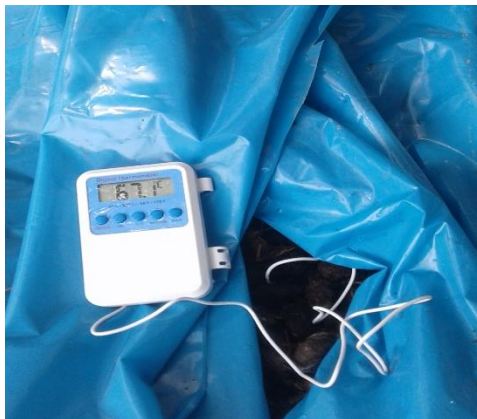


Figure 10: Relevé in situ de la température de l'andain après un jour de compostage (à Dakar)

II.3.1.5. Retournement des andains.

Lors du compostage en tas ou andain, la pénétration de l'oxygène au sein de l'andain est liée à sa taille. Une bonne structuration du compost résulte du mélange initial (Faverial 2016). Le retournement est une tâche indispensable au suivi de l'évolution du compostage. Le retournement assure en plus d'une aération suffisante au sein du tas, d'autres fonctions durant la phase oxydative du processus telles que l'homogénéité de la masse compostée (Rafolisy *et al.*, 2015; Faverial 2016; Abaker 2019). C'est à ce même moment qu'on en profite pour casser et disperser les éventuelles mottes de substrats qui se seraient formées et ainsi diminuer leur

compaction. Après le retournement, l'activité microbienne est relancée permettant ainsi une montée de température. Pendant nos travaux de recherche, les retournements des andains étaient réalisés de façon hebdomadaire et cette activité a été réalisée manuellement à l'aide de râteau, fourche et pelle. Ce suivi régulier avait un objectif double: maintenir optimales les conditions de compostage, mais aussi, accélérer le processus de dégradation afin de raccourcir le temps de compostage.

II.3.2. Composition chimique.

II.3.2.1. pH.

La mesure du pH a été réalisée selon la norme internationale ISO 10390 (NF EN ISO 10390, 2021; Bokobana *et al.*, 2017). La méthode consiste à préparer une suspension de compost dans 5 fois son volume d'eau (Bokobana *et al.* 2017). Ainsi, dans notre travail, une masse de 20g de matière sèche du compost a été mise dans une éprouvette graduée, puis de l'eau distillée a été ajoutée jusqu'à 5 fois le volume occupé par le solide. Le mélange a été transvasé dans un bécher et homogénéisé par agitation magnétique pendant 30 minutes. Après 2 heures de repos, le surnageant a été décanté dans un autre bécher puis soumis à une agitation magnétique et la valeur de pH a été mesurée à l'aide d'un pH-mètre de marque HANNA Instruments, modèle HI 223 muni d'une électrode combinée (*Figure 11*).



Figure 11: photo de mesure du pH de la suspension du compost

II.3.2.2. Matière organique totale (MOT).

Après séchage à l'étuve, l'échantillon n'est plus constitué que de la matière organique et de matière minérale qui ne se consomme pas à 500°C (Loubna 2014; Bokobana *et al.*, 2017).

Avant les analyses, les échantillons préalablement étuvés à 105°C sont broyés puis tamisés à 800µm. La teneur en matière organique totale a été déterminée par la perte en masse lors de la calcination de l'échantillon sec à 550°C (Pouya *et al.*, 2020; Sema *et al.*, 2021) dans un four à moufle de marque DENTSPLY VULCAN 3-550. L'augmentation de la température se fait par paliers thermiques dans les gammes de températures: ambiante à 200°C, puis de 200 - 450°C et enfin de 450 - 550°C, la durée totale de calcination est de 3 heures (Toundou 2016). Cette montée de température d'une façon progressive permet d'éviter la perte de l'échantillon due à la projection par suite à sa brusque combustion. La teneur en matière organique totale, exprimée en pourcentage par rapport à la matière sèche, est obtenue par différence de pesée entre la masse du déchet sec (M_s) et la masse du déchet calciné (M_c). Les photos de l'appareil utilisé sont présentées en **annexe I**

$$\%MOT = \frac{M_s - M_c}{M_s} \times 100 \quad (10);$$

Avec: % MOT = pourcentage de matière organique totale dans l'échantillon sec;

M_s = masse de l'échantillon étuvé à 105°C

M_c = masse de l'échantillon après calcination (à 550°C).

II.3.2.3. Azote total Kjeldahl (NTK).

L'azote total Kjeldahl (NTK), somme de l'azote ammoniacal et de l'azote organique, est mesuré selon la norme AFNOR ISO 11261 (Koledzi *et al.*, 2011; Koledzi, 2011; Ratsimbazafy *et al.*, 2021). Les échantillons séchés à 105°C sont finement broyés et tamisés (tamis de 800 µm de mailles). 1 g de chaque échantillon est pesé sur un papier filtre sans cendre puis introduit dans un matras et minéralisé à 180°C pendant 1heure puis à 360°C pendant 2 heures en milieu acide (Acide sulfurique concentré à 96 %: 15 ml d'acide ajoutés à la manette) et en présence d'un catalyseur composé de K_2SO_4 -Se- $CuSO_4$ (1 ou 2 comprimé(s) de 5 g au total). Le minéralisât est transvasé dans une fiole de 250 ml, rincer trois fois le matras et ajuster au volume avec de l'eau distillée. Le minéralisât (25 ml prélevés de la solution diluée) est ensuite distillé après neutralisation de l'excès d'acide par la lessive de soude à 33 % (40 ml). Le distillat est recueilli dans un erlenmeyer contenant de l'acide borique (10ml) dans lequel on a mis un indicateur mixte et ensuite titré avec de l'acide (sulfurique ou chlorhydrique 0,1N). L'équivalence est visible par le virage de l'indicateur coloré du vert au rose. Pour le blanc, l'échantillon est remplacé par une même masse de sable. Les étapes et le mode opératoire détaillés sont présentés en **annexe II**.

La formule (10) permet de calculer la teneur en azote total Kjeldahl:

$$\%N - NTK = \frac{(V_{eq} - V_{bl}) \times C_{H_2SO_4} \times 14}{m} \quad (11);$$

V_{eq} = volume équivalent de H_2SO_4 (ou HCl) pour l'échantillon;

V_{bl} = volume équivalent de H_2SO_4 (ou HCl) pour le blanc;

$C_{H_2SO_4}$ = Concentration de H_2SO_4 utilisé lors du titrage (0,1N);

m = masse de la prise d'essai (g); 14 = masse d'un at-gr de N (qui sera exprimée en g)

N.B: Le traitement des résultats doit tenir compte du facteur de dilution (ce facteur = 10)

II.3.2.4. Carbone organique total (COT).

La mesure du COT est effectuée, sur les fractions finement broyées (passant à travers un tamis de 800 μm de maille pour notre cas), sur les déchets entrants et sur les composts mûrs. La méthode utilisée pour déterminer la teneur en carbone organique total dans les déchets (solides) est celle de Walkley-Black (1934) (Temgoua *et al.*, 2014; Bromblet et Somaroo 2015). Le mode opératoire comprend deux phases: l'Oxydation de la matière organique et le dosage en retour de l'excès de l'oxydation. Ainsi, le COT est oxydé par le bichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$), l'excès de bichromate est détruit par un excès de sel de Mohr [$Fe(SO_4)_2(NH_4)_2 \cdot 6H_2O$] dont l'excès est lui-même titré par le permanganate de potassium ($KMnO_4$).

La réaction d'oxydation de la matière organique par le bichromate de potassium n'est pas complète, mais correspond sensiblement à 77 % du carbone présent. On corrige donc les résultats par le facteur $100/77 = 1,2987$. Ce qui entraîne par approximation que 1 ml de solution de bichromate normal correspond à 3,8961 mg (3 mg x 1,2987) soit 3,9 mg de carbone par excès. Les détails du mode opératoire et les équations de réactions sont reprises en *annexe III*. La teneur en carbone organique mesuré dans les déchets est déterminée par la Formule (12) suivante:

$$C^0 /_{00}(\text{solide}) = \frac{(v - V) \times N \times 3,9}{p} \quad (12)$$

Avec: v = quantité de $KMnO_4$ (en ml) utilisée, de normalité N pour les échantillons;

V = quantité de $KMnO_4$ (en ml) utilisée, de normalité N pour les témoins;

N = Normalité de la solution de $KMnO_4$; Généralement 0,2N;

P = poids de la prise d'essai (g).

N.B: Le protocole indique des prises d'échantillon faible tel que la quantité de carbone présent soit voisine de 20 mg et inférieure à 25 mg.

II.3.2.5. Détermination du phosphore total (PT).

La détermination du phosphore total s'effectue en deux étapes (Temgoua *et al.*, 2014; Bromblet et Somaroo 2015). La première étape est la digestion en milieu acide qui transforme tout le phosphore présent en orthophosphates. Dans la seconde étape, les ions phosphates sont dosés en présence de molybdate d'ammonium, les orthophosphates donnent un complexe phosphomolybdique qui, réduit par l'acide ascorbique développe une coloration bleue susceptible d'un dosage par spectrométrie et dont l'absorbance entre 700-800 nm est proportionnelle à la concentration de l'ion orthophosphate (Temgoua *et al.*, 2014; Bromblet et Somaroo 2015). Le développement de la couleur est accéléré par l'utilisation d'un catalyseur, le tartrate double d'antimoine et de potassium. Le phosphore total est l'ensemble du phosphore présent dans un échantillon sous forme de phosphates (orthophosphate et polyphosphate) ou de composés organophosphorés. À l'aide de dilutions, une série de solutions étalons ayant des concentrations détaillées au **Tableau 12** a été préparée et une courbe d'étalonnage (**Figure 12**) établie à priori, après minéralisation sèche, permet de convertir les absorbances mesurées en concentration. La mesure au spectrophotomètre a été faite à la longueur d'onde de 700 nm. Le mode opératoire détaillé et le schéma de l'analyseur utilisé sont montrés en **annexe IV**.

Tableau 22: Étalonnage pour le dosage du phosphore

Numéro des fioles	T	1	2	3	4	5
Solution étalon de P en [(ppm) ou (1 mg/l)] (ml)	0	1	5	10	15	20
Eau distillée (ml)	20	19	15	10	5	0
Correspondance en (mg/l) de P	0	0,05	0,25	0,5	0,75	1
Réactif sulfomolybdique en (ml)	4	4	4	4	4	4
Acide ascorbique en (ml) ou (0,02 g)	1	1	1	1	1	1
Densité optique lue	0	0,02	0,123	0,278	0,429	0,565

La droite d'étalonnage reprise à la **Figure 12** s'obtient en portant les absorbances en fonction de la concentration.

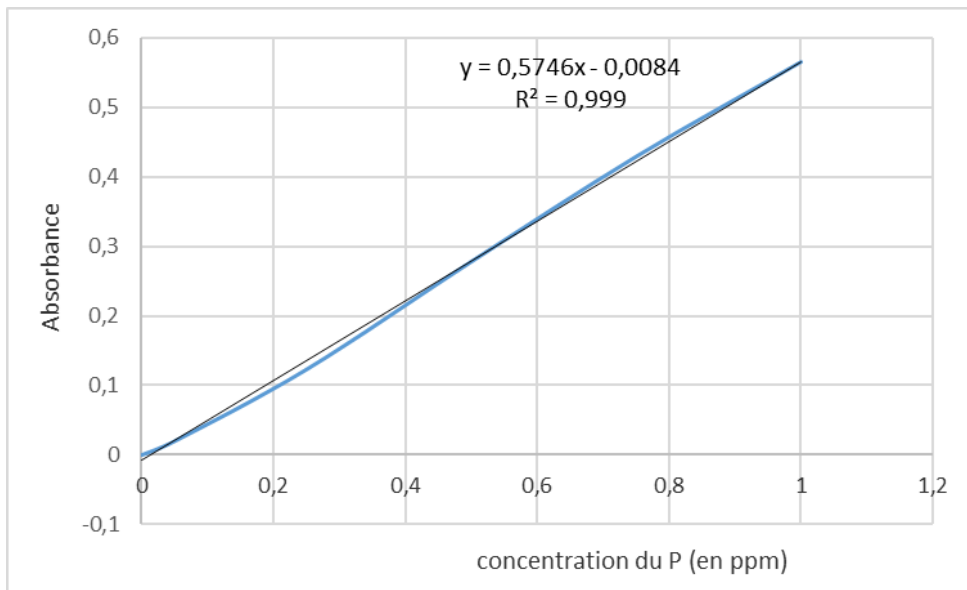


Figure 12: Courbe d'étalonnage du Phosphore (P).

Les concentrations des échantillons, considérées comme concentrations des inconnues, sont calculées à partir de l'équation de la droite de la courbe d'étalonnage:

$$Y = 0,5746X - 0,0084 \quad (13);$$

Se servant de cette droite d'étalonnage, nous avons chaque fois mesuré l'absorbance à $\lambda = 700 \text{ nm}$ et avons calculé la concentration $X =$ concentration en P de la manière suivante:

$$X = (Y + 0,0084) / 0,5746$$

Les résultats obtenus sont consignés dans les **Tableaux 14 & 16** pour les intrants, et dans les **Tableaux 18 & 19** pour la valeur moyenne de P dans les composts finis.

II.3.2.6. Mesure de la teneur en Potassium (K).

Le dosage du potassium est réalisé suivant le protocole de la méthode d'analyse ISO 11460 (Tahraoui 2013). L'échantillon de compost est d'abord mis en solution par attaque acide (minéralisation): après séchage et broyage des composts produits, une masse de 0,5 g de composts est introduite dans des matras avec 30 ml d'eau régale (1/3 HNO₃ concentré + 2/3 HCl concentré) (mélange fortement oxydant). Les solutions sont chauffées à 100°C pendant une heure puis à 135°C jusqu'à évaporation partielle d'acide pendant 3 heures. Après minéralisation et refroidissement, les solutions sont placées dans des fioles jaugées de 50 ml avec ajout d'eau distillée jusqu'au trait de Jauge. Ensuite, les solutions sont filtrées sur membrane de fibre de verre de diamètre de pore 0,45 μm . Les concentrations en potassium sont mesurées par spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA), dans une flamme air-acétylène.

N.B. Pour convertir une valeur de K₂O en K, on la multiplie par le facteur 0,83.

Chapitre 3. Méthodes d'évaluation des critères d'innocuité.

III.1. Teneurs en éléments traces métalliques (ETM).

Les ETM recherchés sont: Pb, Cd, Zn, Mn, Cu, Ni, Cr, Co et déterminés par spectrophotométrie (AFNOR 2006; Seraj *et al.*, 2018; Hermeline *et al.*, 2020). Les analyses ont été effectuées par spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA) à flamme dans le Laboratoire d'Analyse des Sols et Produits Agro-alimentaires (LASPA) de l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU).

a) Minéralisation

Des quantités de 1,5g d'échantillons (de composts) finement broyés ont été pesées dans des creusets en porcelaine puis mises au four de type CARBOLITE RF à 450 °C. Après refroidissement, 5 ml d'acide nitrique 1M sont ajoutés à la cendre obtenue puis porté à l'évaporation totale sur un bain de sable. Au nouveau résidu on ajoute 5 ml d'acide chlorhydrique 0,1M puis remis au four à 400°C pendant 30 min. Le résidu final est récupéré avec 10 ml d'acide chlorhydrique 1M puis versé dans une fiole de 50 ml. Le creuset est rincé deux fois avec 10 ml d'acide chlorhydrique 1M et on complète la fiole jusqu'au trait de Jauge avec l'acide chlorhydrique 1M. Dans les mêmes conditions, un essai à blanc est réalisé (AFNOR 2006; Hermeline *et al.*, 2020).

b) Dosage par spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA)

Le spectrophotomètre d'absorption atomique qui a été utilisé est le spectrophotomètre d'absorption atomique SAA-Flamme de type PERKIN-ELMER ANALYST 400 et le logiciel d'intégration des résultats était WINLAB 32AA FLAM.

b.1) Principe

Un faisceau de lumière monochromatique de fréquence telle qu'il soit absorbable par l'élément à doser est envoyé dans une vapeur atomique de cet élément. La mesure de l'intensité lumineuse avant et après le passage dans la vapeur permet de déterminer le pourcentage de l'absorption. Dans des conditions bien déterminées, celui-ci est fonction non seulement de la concentration en atomes de la vapeur atomique, qui n'a pas grand intérêt, mais surtout de la concentration de la solution ou du produit initial que l'on cherche à déterminer. Pour obtenir ce résultat, il faut produire un faisceau incident suffisamment intense. Mais, il est nécessaire également que le mode de production de la vapeur atomique soit bien précisé.

b.2) Mode opératoire

Lors du dosage des éléments minéraux, les longueurs d'onde, le débit d'acétylène et d'air pour chaque type d'élément minéral étaient déjà définies sur le spectrophotomètre d'absorption atomique (SAA). Après avoir constaté que la courbe d'étalonnage est linéaire et que la lampe correspondant de l'élément à doser a atteint son énergie maximale, les solutions contenant les cendres des échantillons ont été amenées afin de lire leur concentration en cet élément minéral.

III.2. Analyse microbiologique des adjuvants et composts.

Les méthodes d'analyses microbiologiques et dénombrement des microorganismes sont conformes aux normes NF EN ISO 4833-1 et NF 08-14 (Dieng *et al.*, 2019) et ces analyses microbiologiques ont été menées à Dakar et à Bujumbura et, chaque fois sur les adjuvants (bouses de vache et fientes de poule) utilisés et sur les composts produits. Pour créer les conditions aseptiques nécessaires, la pincette servant de prélèvement a été stérilisée sur le lieu du prélèvement (passée sur une flamme allumée à l'alcool éthylique). Les échantillons prélevés étaient directement emballés dans des sachets stériles et fermés à l'aide des attaches-tout puis acheminés au laboratoire de microbiologie où ils étaient conservés à une température de 4°C en attendant d'être analysés. Au jour des analyses, la préparation de l'extrait aqueux, faisant objet de l'étude, a été effectuée comme suit:

1. Dans un bécher, on y place un sachet stérile muni d'un filtre et le tout est taré sur une balance analytique. Une masse de chaque échantillon qui équivaut à 15 g est introduit dans le sachet puis on ajoute de l'eau distillée jusqu'à une masse totale de 150 g (échantillon + eau). Afin de libérer le maximum de la charge microbienne, le mélange est pressé légèrement, puis agité manuellement et on le laisse macérer pendant au moins 6 heures de temps. La suspension obtenue est considérée comme étant la suspension mère à la concentration de 10^1 (dilution au 1/10).
2. Tous les échantillons préparés ont été dilués en cascade de 10^{-2} à 10^{-9} . C'est à partir du prélèvement du surnageant de la suspension au 1/10 (suspension mère) qu'on prépare les autres dilutions.
3. Ainsi, pour préparer une dilution au centième (10^{-2}), on pipette 1 ml de la suspension mère et on la transvase dans un tube à essai contenant 9ml d'eau physiologique stérile. Afin d'avoir la dilution au millième (10^{-3}), on prélève 1 ml de la suspension au 1/100, préalablement homogénéisée, puis, on la transvase dans un tube à essai contenant 9 ml d'eau physiologique. Les mêmes opérations (1 ml de suspension de concentration précédente dans

9 ml d'eau physiologique) sont répétées jusqu'à la suspension de concentration 10^{-9} . Après avoir introduit les milieux de culture dans les boîtes de pétri (ou dans les tubes à essai), des ensemencements en duplicata ont suivi pour chaque dilution. Les boîtes de pétri (et tubes) sont incubés aux températures requises pour permettre la croissance des microorganismes recherchés après l'étalement.

N.B: Toutes les manipulations: pesée, prélèvements, dilutions et ensemencement, ont été faits près d'une flamme d'un bec bunsen afin de respecter la stérilité et éviter une éventuelle contamination par des cops étrangers à nos échantillons. Les opérations comme: le mode et le volume ensemencé, le milieu de culture, la température d'incubation, la durée d'incubation et les caractéristiques (coloration attendue des résultats des tests) sont résumées dans le **Tableau 13** ci-après:

Tableau 33: Procédure suivie pour l'identification des microorganismes.

Types de microorganismes	Milieu de culture + initial	Type d'ensemencement	Température d'incubation	Durée d'incubation	Caractéristique (coloration attendue)
Flore mésophile aérobie totale (FMAT)	PCA (1ml)	En profondeur (boîte de pétri)	30°C	48h	Blanc-cassé (au jaune-orangé)
Coliformes fécaux.	VRBL (1 ml)	En profondeur (boîte de pétri)	44°C	24h	Rouge
Anaérobies-sulfite-réducteurs (ARS)	TSN (1 ml)	Dans la masse (tube à essai)	37°C	24h	Noir
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Cétrimide (0,1 ml)	En surface (boîte de pétri)	37°C	24h	Verdâtre
<i>Escherichia coli</i>	TBX (0,1 ml)	En surface (boîte de pétri)	44°C	24h	Bleue/verte
<i>Staphylococcus aureus</i>	BP (0,1 ml)	En surface (boîte de pétri)	37°C	48h	Noir (brillant dans le clair)

PCA: plate count agar; **VRBL:** lactose bilié au cristal violet et au rouge neutre;

TSN: Tryptone Sulfite Néomycine; **TBX:** Tryptone Bile X Glucuronide ; **BP** = Baird-Parker

Au moment de l'incubation, les boîtes de pétri sont mises à l'étuve en position retournée afin d'éviter que les vapeurs d'eau qui se condensent sur le couvercle tombent à l'intérieur de la boîte de culture et gêner à la lecture des colonies formées. Pour le dénombrement des colonies (en UFC: unité formant colonie), la formule mathématique suivante a été utilisée:

$$N = \frac{\sum \text{Colonies}}{V_{ml} \times (n_1 + 0,1 n_2) \times d_1} \quad (14);$$

Avec: N= nombre d'UFC par gramme (ou par ml) de l'échantillon; V_{ml} = volume de suspension déposée (ml) ; $\sum \text{Colonies}$ = somme des colonies des boîtes interprétées

n_1 = nombre de boîtes considérées à la première dilution retenue;

n_2 = nombre de boîtes considérées à la deuxième dilution retenue;

d_1 = facteur de la première dilution retenue

Les colonies sont dénombrables si: $30 \leq N \leq 300$

N.B : Les abattements sont calculés à base de la fonction logarithme décimale (\log_{10}).

Les modes opératoires détaillés de recherche et dénombrements des microorganismes recherchés sont en **annexe V**.

III.3. Tests de phytotoxicité des composts.

La phytotoxicité est l'un des derniers phénomènes qui permet de distinguer facilement un compost mûr d'un compost immature (Aylaj et Lhadi 2008). Ce test vient en complément aux propriétés physico-chimiques et bactériologiques comme test de maturité d'un compost produit fini. Dans cette étude, pour évaluer la maturité des composts obtenus, deux tests de phytotoxicité ont été utilisés: l'émergence des graines et la croissance des radicules des graines de deux cultures: arachides (pour les composts produits à Dakar et ceux de Bujumbura) et maïs (composts produits à Bujumbura), lesquelles graines sont choisies en raison de la sensibilité (et facile à s'enquérir) de ces espèces de cultures.

L'extrait du compost est préparé selon la méthode (DI.VA.P.R.A, 1998), citée (Koledzi *et al.*, 2012^a). Une proportion de 1/5,7 (M/V) (compost (g de matière sèche)/eau distillée (ml)) est préparée pour chaque test de compost. Le compost/eau distillée est laissé en contact pendant 2 heures –sous agitation à l'aide d'un agitateur magnétique. Ce mélange est ensuite centrifugé à 600 tpm pendant 20 mn. Le surnageant est filtré 2 fois sur papier filtre de diamètre 0,8 μ m. Ensuite, différentes doses d'extraits hydrosolubles de compost sont obtenues par dilution du filtrat final avec de l'eau distillée et les rapports obtenus sont les suivants : 100% E; 75% E + 25% EC; 50% E + 50% EC ; 25% E + 75% EC; 100% EC (E= eau ; EC = extrait de compost). Les graines sont trempées dans l'eau distillée pendant 12 heures et mises à germer dans des boîtes de pétri contenant du papier filtre (10graines par boîte constitue une répétition). Chaque boîte de pétri est imbibée avec 5 ml de l'extrait aqueux du compost en raison de 2 boîtes pour chaque dilution et par compost. Chacune des deux boîtes témoins reçoit 5ml d'eau distillée.

Les essais sont conduits à l'obscurité et à température ambiante ($\pm 25^\circ\text{C}$), durant 48 heures (Loubna 2014). En fin de la germination, les graines sont comptées et les longueurs des racines sont mesurées. Le pourcentage de germination (G%) et l'indice de germination (IG en %) sont calculés par les Formules (12) et (13) ci-après (Koledzi 2011; Chennaoui *et al.*, 2016; Salama *et al.*, 2016; Bokobana *et al.*, 2017):

$$G (\text{en } \%) = 100x \frac{N_{GG}}{N_{GS}} \quad (15);$$

Où N_{GG} : Nombre de graines germées; N_{GS} : Nombre de graines semées.

$$IG \text{ (en \%)} = \frac{N_{ggc} \times L_{rc}}{N_{ggt} \times L_{rt}} \times 100 \quad (16);$$

N_{ggc} : Nombre de graines germées dans le cas de l'apport du compost; L_{rc} : Longueur moyenne de la racine dans le cas de l'apport du compost; N_{ggt} : Nombre de graines germées du témoin; L_{rt} : Longueur moyenne de la racine du témoin.

Remarque: On désigne par IG50 et IG75, les indices de germination des graines imbibées avec l'extrait aqueux du compost correspondant respectivement aux dilutions 50 et 75 %.

L'indice de germination global pour chaque compost est calculé pour nos essais comme la moyenne: $IG = (IG50 + IG75)/2$ (Znaïdi 2002; Bokobana *et al.*, 2017; Loubna 2014).

Un compost est considéré comme non toxique lorsque son indice de germination global (IG) est supérieur ou égal à 50 % (Chikae *et al.*, 2007; Aylaj et Lhadi, 2008).

III.4. Effet de l'ajout du compost sur le développement de l'amarante (*Amaranthus hybridus*).

III.4. 1. Matériel végétal.

Les jeunes plants d'amarante sont produits par semis direct à la volée sur une parcelle située près de l'endroit où les quatre composts sous expérimentation ont été fabriqués. Au total, 153 jeunes plants âgés de trois semaines ont été arrachés soigneusement afin de ne pas les détruire et ces plants sont rendus disponibles à la transplantation dans des pots disposés suivant un dispositif en blocs aléatoires complètement randomisés (DBAC) avec trois répétitions pour chaque spéculation (Ngom *et al.*, 2017).

III.4. 2. Dispositif expérimental.

Les expériences sont menées sous serre dans des pots en plastique de dimension 17,8 cm de hauteur, 20 cm de diamètre supérieur et de 18 cm de diamètre inférieur. Les échantillons de sol ont été prélevés sur une profondeur comprise entre 0 – 20 cm (Bokobana *et al.*, 2017; Christian *et al.*, 2020; Pouya *et al.*, 2020). Le sol et composts sont séchés pendant 14 jours à la température ambiante puis broyés et fractionnés à l'aide d'un tamis de 2 mm de maille (Bokobana *et al.*, 2017; Kaboneka *et al.*, 2020). Avant la mise en pots, des mélanges en volume/volume à différentes proportions de sol et composts ont été faits sur les bâches. Le fond de chaque pot d'expérimentation a été perforé et un total de 5 trous a été pratiqué (quatre suivant les quatre coins et un autre au centre). Ces trous ont pour rôle de permettre une éventuelle évacuation d'eau excédentaire lors de l'arrosage et pour récupérer ce lixiviat et le remettre dans le pot, le couvercle du pot est placé en dessous de ce dernier. Ainsi, 5 types de traitements

ont été effectués pour cette étude et par compost. Les pots ont reçu respectivement des doses de composts de 0 % (*témoin= sol seul sans apport organique*), 25 %, 50 %, 75 % et 100 % (*compost seul*) et, en se servant d'une boîte en NIDO, chaque pot était rempli jusqu'au trois-quarts (3/4) avec le mélange de chaque traitement. Trois plants d'amarantes ont été repiqués dans chaque pot à l'équidistance avec trois répétitions pour chaque dose et chaque compost faisant un total de **51 pots** $\{(4 \text{ doses} \times 4 \text{ composts}) \times 3 \text{ répétitions}\} + 3 \text{ témoins}$. Ces pots ont été disposés en quatre rangées suivant un dispositif en blocs aléatoires complètement randomisés (DBAC) avec trois répétitions pour chaque spéculation (Ngom *et al.*, 2017) et, pour mettre les plants dans les mêmes conditions, nous avons opéré des translations des pots chaque semaine. L'arrosage avec l'eau du robinet était pratiqué chaque fois que de besoin (en général, une fois les deux jours). L'évolution de la croissance des plants d'amarantes dans chaque pot était relevée chaque semaine, en mesurant la hauteur de chaque plant d'amarante depuis le collet jusqu'au bourgeon apical (Zraibi *et al.*, 2015). La mesure est effectuée à l'aide d'une latte flexible de 30 cm et pendant une période de 28 jours. Après cette période (de 28 jours), les amarantes de chaque pot ont été récoltées en totalité et séparément et elles ont été placées dans des enveloppes qui ont été étiquetées. Les biomasses végétales totales sont séchées à l'étuve réglée à une température de $65 \pm 2^\circ\text{C}$, pendant au moins 48 heures, jusqu'au poids constant (Rafolisy *et al.*, 2015; Zraibi *et al.*, 2015; Kaboneka *et al.*, 2020). Après séchage, les masses totales des plantes entières et celles des parties aériennes ont été déterminées par pesée à l'aide d'une balance analytique (de 0,0001g de précision). La masse de la partie racinaire était obtenue par différence des deux autres mesurées et par la suite, les proportions des biomasses racinaires par rapport aux biomasses aériennes sont exprimées par les rapports: phytomasse hypogée sur phytomasse aérienne (M.P.R/M.P.A).

Analyses statistiques.

Les bases de données ont été conçues et traitées à l'aide du logiciel Microsoft Excel 2013. Le traitement statistiques a été effectué, grâce au logiciel IBM SPSS statistics 20 au seuil de probabilité de 5%, selon une analyse de la variance (terme souvent abrégé par le terme anglais ANOVA: *analysis of variance*) et le test de Duncan. L'analyse **de la variance** est une formule statistique utilisée pour vérifier si les moyennes de trois groupes ou plus sont égales (ou différentes). Le test de Duncan est un **test post-hoc (c-à-dire analyser les données après coup ou fin de l'étude)** qui est utilisé pour déterminer les différences significatives entre les moyennes des groupes dans une analyse de variance [P-value < 0,05: moyennes significativement différentes ; P-value > 0,05 : valeurs non significativement différentes] (Topanou, 2012).

TROISIEME PARTIE: RÉSULTATS ET DISCUSSION.

Introduction.

La filière de gestion des déchets solides ménagers par compostage est une parmi tant d'autres filières existantes de gestion des déchets solides. Le choix de ce mode de traitement des déchets par compostage se justifie par un triple enjeu: l'assainissement, la valorisation des déchets à moindre coût et la restauration des sols dégradés via l'utilisation du compost produit en agriculture. Pour produire un compost de qualité, deux principaux outils sont nécessaires : le premier type d'outils concerne l'expertise en matière de compostage, c'est-à-dire être capable de discerner quoi et comment évaluer un compostage en processus. Le deuxième type d'outils concerne l'appui matériel et technique. Ce sont les deux types d'outils qui justifient la raison de mener nos premiers travaux de compostage et suivi dans les Laboratoires de l'Ecole Supérieure Polytechnique (ESP) de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD) (Sénégal) et les connaissances acquises ont été facilement adaptées au Burundi au lieu d'avoir «*la clé en main*». L'étude bibliographique effectuée dans les chapitres y relatifs a permis de choisir les indicateurs physico-chimiques, microbiologiques et biologiques permettant la caractérisation des déchets solides à composter.

Cette partie est articulée sur trois chapitres qui reprennent ce qui est de l'essentiel dans la filière de compostage et de certaines propriétés du compost produit.

Le premier chapitre présente les résultats relatifs à «l'Influence du rapport C/N des intrants sur la qualité du compost produit». Le second chapitre traite «l'effet (Impact) de la variabilité climatique sur la qualité du compost produit». Enfin, le troisième chapitre est consacré à «l'évaluation de quelques critères d'innocuité des composts produits».

Chapitre I: Influence du rapport C/N des intrants sur la qualité du compost produit.

Introduction.

Ce chapitre a pour objectif d'analyser l'influence du rapport C/N des intrants sur la qualité du compost produit. Nous allons d'abord présenter les résultats des analyses physico-chimiques des substrats de départ et, sur base d'une formule mathématique, calculer les proportions, en matières sèches, de chaque ratio d'intrant constituant le mélange optimal. Ensuite, le suivi du processus de compostage ainsi que la mise en évidence de la maturité du compost sont effectués par analyse de quelques paramètres physico-chimiques de compostage, microbiologiques et biologiques. C'est un chapitre qui est également consacré à la détermination du meilleur adjuvant parmi les deux utilisés: les bouses de vaches et fientes de poules.

I.1. Caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques des intrants.

Les résultats des caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques réalisées sur les intrants dans le processus du compostage sont présentés dans les **Tableaux 14** et **15** pour la ville de Dakar (Sénégal) et dans les **Tableaux 16** et **17** pour la ville de Bujumbura (Burundi).

Tableau 44: Caractéristiques physico-chimiques des substrats de départ (à Dakar)

	μ (ou ρ) (Kg/dm ³)	M.S (%)	M.O.T (%)	M.M (%)	C.O.T (%)	N (%)	P(ppm ou mg/kg)	C/N
Paille		92*	86,7	13,3	45,2	1,1	546	40,4
tontes de gazon		19,9	81,1	18,9	44,4	2	1439	22,6
Epluchures pomme de terre		19,9	90,3	9,7	50,1	1,80	1241	27,8
épluchures de manioc		17,5	94,1	5,9	51,9	1,7	436	29,8
Epluchures de goyave		7	78,3	21,7	40,1	2,2	1831	17,9
Epluchures de carotte		14,2	80,1	19,9	43,9	1,5	1876	28,7
Reste de Choux		6,0	85,5	14,6	41,4	2,8	1807	14,8
Bouses de vache	0,30 ^a	75,0* (18.8) [!]	68,9	31,1	40,9	2,2	2377	18,3
Fientes de poule	0,28 ^b	85,0* (25 %) [!]	76,7	23,7	37,6	2,8	2404	13,5
Moyenne globale			83,6 (1) 84,4 (2)		44,7 (1) 44,5 (2)	1,7 (1) 1,7 (2)	1139 (1) 1123 (2)	30 (1-2)

*= valeur de l'échantillon sur place; != teneur réelle; (1) et (2) = andains 1 et 2

a et b: les masses volumiques des andains avec adjuvants bouses de vache, fientes de poule

Les résultats du **Tableau 14** montrent que les masses volumiques des intrants sont faibles car il y a la présence des pailles et tontes de gazon de faibles poids mais occupent un volume

important. Les matières comme, les pailles, fientes de poule et bouses de vaches ont des valeurs de matières sèches très élevées car elles avaient déjà perdues une grande quantité d'eau au moment de la collecte. Les DSM utilisés au cours du compostage à Dakar renferment un taux d'humidité moyenne de 63 %. Cette valeur se situe dans l'intervalle caractéristique des PED qui est comprise entre 40-80 % (Topanou 2012) et elle est comparable à celle trouvée par Koledzi (2011) à Lomé (Togo) [64-69 % MS] (Koledzi 2011). La plage d'humidité idéale pour les matières qui entrent dans les systèmes de compostage classique étant de 50-60 % (CEFREPARE 2012; Plateforme Re-sources 2015). D'autres auteurs comme Lo *et al.* (2019) ont noté que l'humidité dans les andains devrait être autour de 40 à 60 % pour un compostage optimal (Lo *et al.*, 2019) . Pour notre travail, cette valeur moyenne d'humidité légèrement élevée devrait être équilibrée par les pailles de faibles teneurs d'humidité (8 %) et qui devraient être ajoutée en grande quantité car étant source principale en matière carbonée. L'intrant le plus riche en matière organique est celui des épiluchures de manioc (94,1 %) tandis que les épiluchures de goyave présentent des teneurs relativement faibles (78,3 %). Toutefois, cette dernière valeur est faible par rapport à la catégorie présentée, mais c'est une valeur qui reste acceptable pour le compostage (Koledzi *et al.*, 2012^b).

Ces résultats sont comparables à ceux trouvés par Kouassi (2014) où la teneur maximale en MO arrive à 93 %, à ceux de Herihajaniavo (2016), où la teneur en MO des déchets varie entre 88,4 et 91,2 %, à ceux de Favérial (2016), où la matière organique des déchets varie entre 58% à 89,6 % (Favérial 2016; Herihajaniavo *et al.*, 2016; Silue *et al.*, 2017). Les teneurs en COT évoluent dans le même sens que les matières organiques. De même, les valeurs moyennes de teneurs en matière organique des déchets compostés de 83,6 % et de 84,3 % sont comparables à ceux obtenus par Denès (2017) qui a trouvé une moyenne en MO des déchets compostés de 84,2 %; Naïma (2013), où la teneur en MO des déchets est de 85 % et à ceux de Tanzanie, où la teneur en matière organique est de 80 % (Denes 2017; Mbuligwe et Kassenga 2004; Tahraoui 2013). Ces valeurs des MO sont supérieures à celles obtenues par Koledzi (2012) 52-65 % et Souabi *et al.* (2011) 74 %; Lo *et al.* (2019), où la teneur en matière organique représente 70 % du poids des matières sèches (Souabi *et al.*, 2011; Koledzi *et al.*, 2012; Lo *et al.*, 2019).

Les teneurs en COT évoluent dans le même sens que les matières organiques. Les valeurs moyennes de teneurs en matière organique des déchets compostés (de 83,6 % et de 84,3 %) sont comparables à celles obtenues par Biekre *et al.* (2018) qui ont trouvé une moyenne en MO des déchets compostés de 84,2 %; Tahraoui (2013), où la teneur en MO des déchets est de 85 % et à celles trouvées par Lo *et al.* (2019), où la teneur en matière organique est de 70 % (Tahraoui 2013; Biekre *et al.* 2018; Lo *et al.*, 2019;).

Tableau 55: Caractéristiques microbiologiques des adjuvants (à Dakar)

Type d'adjuvant	Types de microorganismes (en Unité Format Colonie : UFC/g)					
	Flore mésophile aérobie totale/g	Coliformes fécaux/g	Anaérobie sulfito-réducteur/g	Pseudomonas aeruginosa/g	Escherichia coli/g	Staphylococcus aureus/g
Bouses de vache	158.10 ⁷	111.10 ⁶	100	Ind à 10 ⁻¹	108.10 ⁴	<10
Fientes de poule	49.10 ⁷	460	600	<10	<10	<10

Ind= indénombrable

Les résultats du **Tableau 15** montrent que les microorganismes présents dans chaque adjuvant peuvent épauler ceux préexistants dans les DSM et ainsi renforcer leur rôle de bio-activateur. Ils sont beaucoup plus importants dans les bouses que dans les fientes de poule. Les Flores Mésophile Aérobie Totale (FMAT) sont les plus abondantes par rapport aux autres microorganismes identifiés et cela dans chacun des deux adjuvants. Après les FMAT, viennent les *Coliformes fécaux* 1110.10⁵ et *Escherichia coli* (108.10⁴) qui sont surtout abondants dans les bouses de vaches, tandis que les *Staphylococcus aureus* sont absents dans les deux adjuvants (<10).

Tableau 6: Caractéristiques physico-chimiques des substrats de départ (à Bujumbura)

Nature d'intrant	H (%)	M.S. (%)	M.O.T (%)	C.O.T (%)	M.O.T/ C.O.T	N (%)	C/N	P. (mg/kg)
Paille	9,2	90,8	91	49,6	1,8	1,2	42,4	665
Tonte de gazon	9,6	90,4	82,7	44,3	1,9	2,1	21,6	1360
Reste des choux	89,8	10,2	85,8	48,1	1,8	2,7	17,7	1863
Epl. de Patate douce	75	25	90,5	47,3	1,9	1,6	30,3	1157
Epl. de Manioc	69,9	30,1	91,8	45,8	2,0	1,7	27,4	507
Epl. de Pomme de terre	81,6	18,4	90,2	48,5	1,9	1,7	28,4	1296
Epl. de Banane	84,5	15,5	91	49,1	1,9	2,2	21,9	1423
Bouse de vache	76,8	23,2	67,1	42,0	1,6	2,2	19,2	2551
Fiente de poule	12	88	65,3	39,4	1,7	2,7	14,5	2353
Moyenne globale	62 (1) 54 (2)	38 (1) 46,1 (2)	86,3(1) 86,0(2)	46,8 (1) 46,5 (2)	1,8 (1) 1,8 (2)	2,0 (1) 2,0 (2)	26,1 (1) 25,5 (2)	1353 1328
Moyenne en tenant compte des proportions	33,9 (1) 28 (2)	66,1(1) 72 (2)	86,5 (1) 86,5 (2)	47,1 (1) 46,9 (2)	1,8 (1) 1,8 (2)	1,8 (1) 2,0 (2)	30 (1) 30 (2)	1162 (1) 1133 (2)

N(%) du mélange de (E+ R.Choux)= 2; C/N du mélange de (E+ R.Choux) = 24.1

P (mg/kg) du mélange de (E+ R.Choux) = 1249

Les résultats des analyses physico-chimiques des déchets solides ménagers collectés à Bujumbura sont regroupés dans le **Tableau 16**. La détermination du taux d'humidité des DSM est indispensable du fait qu'elle permet d'apprécier et d'orienter la recherche vers un mode de traitement approprié. L'examen des résultats du **Tableau 16** montre que le taux moyen d'humidité des ordures ménagères de la ville de Bujumbura demeure élevé, il varie de 54 à 62 % environ. On peut attribuer cette variation aux conditions climatiques et à la composition

élémentaire de la matière putrescible qui pourrait affecter la teneur en eau des déchets ménagers. Ainsi, les valeurs moyennes de taux d'humidité observées pour la ville de Bujumbura de 64 % (compost avec comme *adjuvant* bouses de vaches) et 52 % (compost avec comme adjuvant fientes de poules) se situe dans l'intervalle caractéristique des PED qui est comprise entre 40-80 % (Topanou 2012). Dans l'ensemble, le taux d'humidité des déchets solides ménagers est élevé, ce qui réduit les possibilités de valorisation énergétique par combustion (Ngnikam *et al.*, 2017). Ces déchets présentent également des quantités importantes en matières organiques (autour de 86 % de moyenne) et minérales (autour de 14% de moyenne), ce qui favoriserait le choix d'une technique de traitement biologique et plus particulièrement le compostage. Les pourcentages des matières organiques trouvés dans ce travail sont comparables à ceux d'autres auteurs: par Dieng (2019) qui a trouvé une moyenne en MO des déchets compostés de 84,5 %; de Denès (2017) qui a trouvé une moyenne en MO des déchets compostés de 84,2 %; Rafolisy (2015), où la teneur en MO des déchets est de 86,6 %. Le **Tableau 16** montre que ce sont les restes de choux qui sont plus riches en azote (2,7 %) et, pour le phosphore, ce sont les bouses de vaches qui ont une teneur moyenne élevée (0,26 %) (Rafolisy *et al.*, 2015; Denès, 2017; Dieng *et al.*, 2019). Concernant le rapport C/N, ce sont les pailles de brousses qui possèdent une valeur élevée par rapport aux autres types de substrats utilisés (42,4 %) (**Tableau 16**).

Tableau 67: Caractéristiques microbiologiques des adjuvants (à Bujumbura)

Echantillons	Types de microorganismes (en Unité Format Colonie : UFC/g)			
	<i>Flore mésophile aérobie totale (FMAT)</i>	<i>Coliformes Fécaux</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>Escherichia coli</i>
Bouses de vache	213.10 ⁷	113.10 ⁶	64	< 10
Fientes de poule	80.10 ⁷	280	< 10	< 10

Les résultats consignés dans le **Tableau 17** montrent que les Flores mésophiles aérobies totales (*FMAT*) sont les plus abondantes par rapport aux autres microorganismes analysés et cela dans les deux adjuvants. En abondance, ces microorganismes sont suivis par les *Coliformes fécaux* dans les bouses de vache. Les *Escherichia coli* sont en quantités inférieures aux valeurs limites de détection (< 10 UFC/g) dans chacun des deux adjuvants. On remarque également que les *Pseudomonas aeruginosa* sont absents dans les fientes de poules et

présents en moindres quantités dans les bouses de vaches (64 UFC/g). Par manque de réactifs, les *Staphylococcus aureus* n'ont pas été recherchés lors des essais conduits à Bujumbura.

I.2. Suivi du Processus de compostage.

Les *Tableaux 18 & 19* et *20 & 21* représentent les comparaisons des paramètres physico-chimiques obtenus avec les valeurs de références et/ou de la littérature ainsi que la comparaison statistique des paramètres physico-chimiques respectivement pour les 2 composts produits à Dakar et les 4 composts produits à Bujumbura.

Tableau 78: Comparaison des valeurs physico-chimiques (des 2 composts produits à Dakar) aux valeurs obtenues par d'autres auteurs et quelques normes internationales.

Paramètres	Andain1i	Andain1f	Andain2i	Andain2f	Valeurs seuils ou références
μ (ou ρ) (en kg/dm ³)	0,3 ± 0,0	0,7 ± 0,0	0,3 ± 0,0	0,6 ± 0,0	
M.S. (%)		80,3 ± 0,7		81,8 ± 0,6	> 30% [b ; c]
Hauteur (%)	100 ± 0,2	38,1 ± 0,1	100 ± 0,2	55,0 ± 0,1	
MOT (en % MS)	83,6 ± 4	32,8 ± 0,1	84,3 ± 3,8	35,3 ± 0,1	≥ 20 % MB [c; e; f]
COT (%)	44,7 ± 2,6	16,4 ± 0,3	44,5 ± 2,7	17,7 ± 0,3	
MOT/COT	1,9 ± 0,0	2	1,9 ± 0,0	2	1,724 ^[d] ; 1,9 ^(d) ; 2 ^[a, d, e]
NTK (%)	1,7 ± 0,5	1,12 ± 0,05	1,7 ± 0,5	1,4 ± 0,1	< 3 % MB [c; e; f]
P (en ppm)	1139 ± 66	1159 ± 3	1123 ± 67	1097 ± 3	< 3 % MB [c; e; f]
pH	-	9,5 ± 0,0	-	9,6 ± 0,0	7,5 – 9,3 [d; f]
C/N	30 ± 0,0	14,6 ± 0,1	30 ± 0,0	12,6 ± 0,1	> 8MB ^[a; f] ; 8-15 ^[a; e]

Où, *i*= initial; *f*=final; *a*= (Temgoua *et al.*, 2014); *b*= (Compaoré *et al.*, 2010); *c*= (Rafolisy *et al.*, 2015); *d*= (Leclerc 2014); *e*= (Konate *et al.*, 2018); *f*= (Mustin 2015).

Tableau 19: Comparaison statistique des caractéristiques physico-physiques des 2 composts produits à Dakar

Compost	Paramètres								
	μ (kg/ dm ³)	M.S. (%)	pH	MOT(%MS)	COT (%MS)	MOT/ COT	N (%)	P (ppm)	C/N
C1	0,7 ± 0,0	80,3 ± 0,7	9,5 ± 0,0	32,8 ± 0,1	16,4 ± 0,3	2	1,12 ± 0,05	1159 ± 3	14,6 ± 0,1
C2	0,6 ± 0,0	81,8 ± 0,6	9,6 ± 0,0	35,3 ± 0,1	17,7 ± 0,3	2	1,4 ± 0,1	1097 ± 3	12,6 ± 0,1
P-value	0,154	0,079	0,094	0,014	0,01		0,00	0,48	0,04

ESSAI D'OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DU COMPOST À PARTIR DU CO-COMPOSTAGE DES DÉCHETS SOLIDES MÉNAGERS ORGANIQUES AVEC LES DÉJECTIONS D'ÉLEVAGE.

Tableau 20: Comparaison des valeurs physico-chimiques (des 4 composts produits à Bujumbura) aux valeurs obtenues par d'autres auteurs et quelques normes internationales

Paramètres	C1iB	C1fB	C2iB	C2fB	C3iB	C3fB	C4iB	C4fB	Normes et références
μ (kg/dm ³)	0,2 ± 0,0	0,4 ± 0,1	0,2 ± 0,0	0,5 ± 0,0	0,10 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,13 ± 0,01	0,3 ± 0,0	
Hauteur (%)	100 ± 0,1	38,6 ± 1,3	100 ± 0,1	36,8 ± 0,7	100 ± 0,38	51,1 ± 0,8	100 ± 0,3	44,1 ± 0,7	
M.S. (%)	66,1 ± 1,2	79,8 ± 2,3	72,3 ± 2	83,2 ± 0,2	75,3 ± 1	81,5 ± 1,2	56,9 ± 0,6	87,1 ± 1,9	> 30% [b, c]
pH	-	8,8 ± 0,3	-	8,4 ± 0,2	-	8,5 ± 0,2	-	7,9 ± 0,3	7,5-9,3 [i, l]
MOT (% MS)	86,5 ± 1,7	33,6 ± 1,3	86,5 ± 1	37,6 ± 1	87,8 ± 1,5	46,5 ± 0,5	86,4 ± 0,8	45 ± 1	> 20% [b, c]
COT (% MS)	47,1 ± 1,8	15,2 ± 0,2	46,9 ± 1,6	15,9 ± 0,2	48 ± 2	17,1 ± 0,7	46,2 ± 1	15,9 ± 0,2	> 0,25% [g]
NTK (%)	1,6 ± 0,1	1,2 ± 0,1	1,6 ± 0,0	1,1 ± 0,0	1,6 ± 0,1	1,0 ± 0,0	1,6 ± 0,1	1,1 ± 0,0	< 3% [b, c]
P (en %)	0,12 ± 0,01	0,12 ± 0,00	0,11 ± 0,00	0,12 ± 0,00	0,10 ± 0,00	0,11 ± 0,00	0,13 ± 0,00	0,13 ± 0,00	< 3% [b, c]
K (%)	-	1,4 ± 0,1	-	1,5 ± 0,1	-	1,7 ± 0,0	-	1,5 ± 0,0	< 3% [b, c]; > 1% [g, j]
N+P+K (%)	-	2,7 ± 0,0	-	2,7 ± 0,1	-	2,8 ± 0,1	-	2,8 ± 0,1	< 7% [b, i]
C/N	30,0 ± 1,3	12,8 ± 0,7	30,1 ± 0,2	14,3 ± 0,5	35,0 ± 0,1	16,5 ± 0,3	25,0 ± 0,1	14,0 ± 0,3	10-15 ^[h, k] ; > 8 ^[b, g] ; 15-20 ^[m]

Où i= initial; f= final ; b= (Compaoré et al., 2010); c= (Rafolisy et al., 2015); g= (Rhouma et al., 2019); h= (Kaza et al., 2018); i= (Bangoura 2018); J= (Gnimassoun et al., 2020); k= (Koledzi et al., 2012); l= (Ngom et al., 2017); m= (AFNOR 2006; Compaoré et Nanéma 2010; Konate et al., 2018; Kaboré et al., 2020)

Tableau 81: Comparaison statistique des caractéristiques physico-physiques des 4 composts produits à Bujumbura

Paramètres	C1	C2	C3	C4	P-value
μ (kg/dm ³)	0,4±0,1b	0,5±0,0c	0,2±0,0a	0,3±0,0a	0
Hauteur (%)	38,6±1,3b	36,8±0,7a	51,1±0,1d	44,1±0,7c	0
M.S. (%)	79,8±2,3a	83,2±0,2b	81,5±1,2ab	87,1±1,9c	0,003
pH	8,8±0,3b	8,4±0,2b	8,5±0,2b	7,9±0,3a	0,01
MOT (%MS)	33,6±1,3a	37,6±1b	46,5±0,5c	45,0±1,1c	0
COT (%MS)	15,2±0,2a	15,9±0,2a	17,1±0,7b	15,8±0,2a	0,002
NTK (%)	1,2±0,1c	1,11±0,02b	1,0±0,0a	1,13±0,01bc	0,003
P (ppm)	1181±51,7b	1150±46,5ab	1089±0,3a	1334±0,4c	0
K (%)	1,4±0,1a	1,5±0,1ab	1,60±0,0c	1,5±0,0b	0,001
N+P+K	3,7±0,00a	3,7±0,1a	2,8±0,1a	2,8±0,1a	0,16
C/N	12,8±0,7a	14,3±0,5b	16,5±0,3c	14,0±0,3b	0

Horizontalement, les valeurs moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement

différentes et celles portant des lettres différentes sont significativement différentes (Duncan, $p \leq 0,05$)

Dans l'ensemble, les caractéristiques physico-chimiques des composts produits à Dakar et ceux produits à Bujumbura sont similaires (**Tableaux 18 & 20**). Les valeurs trouvées sont toutes conformes aux valeurs des normes internationales et/ou aux résultats d'autres chercheurs, ce qui témoigne la bonne stabilité et maturité des composts fabriqués dans les deux différentes villes. À la lecture des résultats du **Tableau 19**, nous remarquons que les valeurs des MOT, COT, N et C/N sont significativement différentes ($p < 0,05$), alors que celles de μ ; MS; pH et P ne le sont pas. De plus, l'observation des résultats du **Tableau 21** nous révèle que toutes les valeurs à l'intérieur de chaque paramètre sont sensiblement proches entre elles, l'exception étant faite pour la somme N + P + K où p-value = 0,16 ($>0,05$), donc, pour cette somme, leurs valeurs pour les différents composts ne sont pas significativement différentes.

Ainsi, les interprétations détaillées de ces résultats consignés dans les **Tableaux 18 - 21**, paramètre par paramètre, sont présentées dans les points qui suivent.

1.2.1. Caractéristiques physiques.

Quelques paramètres physiques globaux ont été mesurés, il s'agit notamment de la densité, de la variation de la hauteur, de l'humidité et de la température.

1.2.1.1. Masse volumique (en Kg/dm³ ou T/m³).

a) Masses volumiques des intrants et des deux composts mûrs produits à Dakar

Les résultats des mesures des masses volumiques des composts produits à partir des andains montés et suivis dans les deux régions différentes (Dakar et Bujumbura) sont présentés dans

les tableaux 5 et 7. Ces mesures ont porté sur les déchets entrants pour les μ apparentes au moment de mise en place des andains et sur les composts mûrs pour les densités sèches. Bien que faibles, ces masses volumiques (ou densité) passent du simple au double pour l'andain 2 et à plus du double pour l'andain 1, mais respectent tout de même les proportions d'augmentation. Selon Yulipriyanto (2001), qui a suivi l'évolution de la densité des andains tout au long du processus de compostage, il a remarqué que les densités augmentent pendant les deux premières périodes de compostage (phases mésophile et thermophile), puis décroissent pour remonter et finir par se stabiliser après l'évaporation d'une importante quantité d'eau (Yulipriyanto 2001). Les valeurs trouvées rentrent dans les gammes de densités des déchets urbains d'un bon nombre de PED; à titre d'exemple en Algérie [0,23- 0,32]; Malaisie [0,24- 0,8] (Tahraoui 2013). D'après ce dernier auteur, la masse volumique en poubelle oscille entre 0,20 et 0,30 T/m³; dans les bennes et les remorques agricoles, elle varie entre 0,30 et 0,40 T/m³. D'une façon générale, dans certains PED, la masse volumique varie de 0,30 à 0,50 T/m³, fortement supérieure à celle des pays développés (comprise entre 0,1 et 0,2 T/m³) pour les ordures riches en emballage et pauvres en matières putrescibles (Tahraoui 2013). La connaissance de la densité ou masse volumique des déchets est très importante pour plusieurs raisons: choix des moyens de pré-collecte, collecte et transport; dimensionnement du milieu de transit; et même le choix du mode de traitement de ces déchets. De plus, la densité peut également permettre de prédire les risques de pollutions de l'environnement (au niveau sanitaire, olfactive, écologique, etc...).

b) Masses volumiques des intrants et des quatre composts mûrs produits à Bujumbura

Les résultats des *Tableaux 16 & 20* montrent que les masses volumiques des intrants sont faibles pour tous les quatre andains montés à Bujumbura. Ces valeurs faibles de ce paramètre peuvent être attribuées surtout à la présence des pailles et tontes de gazon, qui au moment de l'installation des andains, avaient déjà perdu une grande partie de leur teneur en eau. Ainsi, les proportions dans les andains des pailles et des tontes de gazon variaient respectivement de 12,4 à 63,6 % (sur MS) et de 14,2 à 39,8 % (sur MS) alors que leurs taux d'humidité étaient respectivement de 9,2% (pour les pailles) et 9,60 % (pour les tontes de gazon). Les deux substrats (pailles et tontes de gazon) occupent un volume important pour un poids bas et par conséquent influencent ces faibles densités. L'andain 3 (C/N=35), qui est de plus faible masse volumique (0,10 kg/dm³) par rapport aux trois autres andains, vient confirmer cette hypothèse des proportions des deux substrats, car leurs proportions sont de 63,6 % et 14,2 % respectivement pour les pailles et pour les tontes de gazon totalisant à eux seuls un pourcentage

de 77,8 %. Toutefois, au cours du processus de compostage, la densité de chaque andain passe au moins du simple au double soit de $0,2 \pm 0,0$ à $0,40 \pm 0,1$ pour l'andain 1; $0,20 \pm 0,0$ à $0,5 \pm 0,0$ pour l'andain 2; $0,10 \pm 0,0$ à $0,23 \pm 0,01$ pour l'andain 3; $0,13 \pm 0,0$ à $0,26 \pm 0,0$ pour l'andain 4 ce qui témoigne d'une bonne progression du processus de compostage (Loubna 2014). Ces résultats rentrent dans la logique de la littérature en ce qui concerne l'évolution des densités au cours du processus de compostage. Selon les résultats trouvés par Znaïdi (2002), il stipule qu'après le démarrage du processus de compostage, la courbe de densité reste constante pendant la phase mésophile, puis entame une descente pour atteindre une densité minimale. Cette diminution de la densité s'explique par la prise de volume de la paille suite à sa décomposition par les microorganismes (Znaïdi 2002). Après cette phase mésophile, la densité commence une remontée pour atteindre vers la fin une densité maximale. D'après Mustin (1987) cité par Znaïdi (2002), cette augmentation de la densité est obtenue suite à la perte de volume par libération de carbone des composés organiques sous forme de CO_2 . Ce dernier auteur ajoute que plus l'andain est riche en carbone, plus il perd en volume lors du processus du compostage (Znaïdi 2002). Ainsi, les résultats trouvés dans notre travail sont corroborés par ceux des chercheurs précités ci-dessous.

I.2.1.2. Evolution de la hauteur des andains en fonction du temps de compostage.

Les variations des hauteurs en fonction du temps de compostage des deux andains montés à Dakar et des 4 andains montés à Bujumbura ont été suivies et les *Figures 13* et *14* présentent leur évolution.

a) Évolution de la hauteur des andains en fonction du temps de compostage (à Dakar)

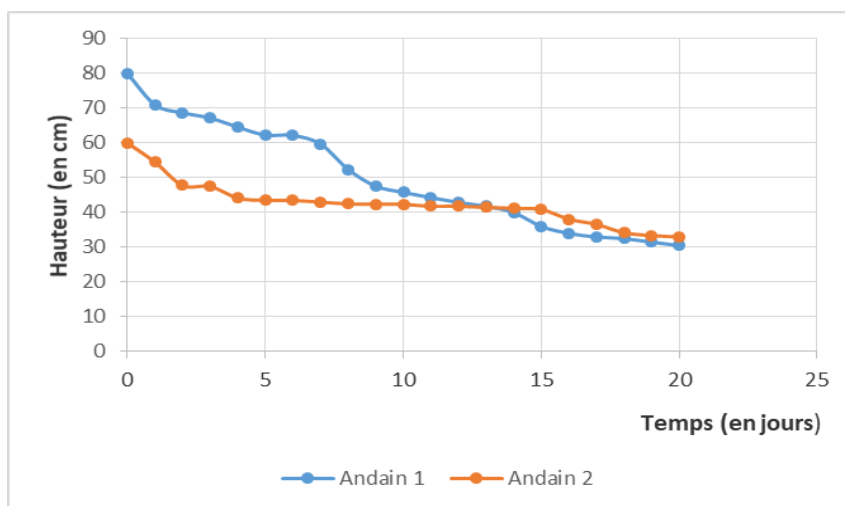


Figure 13: Évolution de la hauteur des andains en fonction du temps de compostage (à Dakar)

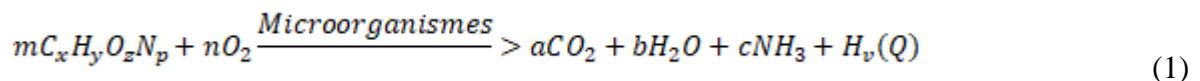
D'après ce graphique, nous remarquons que la hauteur des deux andains diminue au cours du temps. Cette diminution est très accentuée tout au début du compostage: on assiste qu'à deux

jours seulement de compostage, les hauteurs avaient déjà diminué de 14,1 % et 20,3 % respectivement pour l'andain 1 (avec comme adjuvant les bouses de vaches) et l'andain 2 (avec comme adjuvant les fientes de poule) et c'est à cette même période de compostage que les températures atteignent les maxima pour les deux andains: 69,3°C pour l'andain 1 et 66,6°C pour l'andain 2. La diminution suit une allure presque exponentielle pendant les 5 premiers jours de compostage et tend à se stabiliser vers le 17^{ème} jour. Au vingtième jour de compostage, les deux andains sont aux diminutions de 61,9 % pour andain 1 et à 45 % pour l'andain 2. Les résultats obtenus sont en accord avec les explications données par Bowders (2000); relayé par Pujol (2012) quant aux motifs du tassement (diminution de la hauteur) des andains en compostage:

Le tassement comprend deux étapes (Pujol, 2012). La première est la compression physique du système, tassement gravitaire (ou primaire et correspond à la réorganisation des particules), qui a lieu lors des premiers jours de compostage: c'est l'étape durant laquelle se crée une distribution de masse volumique.

La seconde étape concerne le tassement par perte de matière due à la dégradation de la matière organique et à l'évaporation de l'eau, ainsi que le fluage, i.e. la déformation des particules due aux contraintes constantes qu'elles subissent.

Le tout peut aussi être résumé par l'équation chimique (1) de la bioxydation des matières organiques par les microorganismes aérobies:



Cette réaction étant réalisée dans un système ouvert et non fermé, la perte de masse et d'énergie (et par conséquent perte de volume) au cours du compostage n'est qu'une évidence triviale. Tous ces dégagements: de dioxyde de carbone (CO₂), d'eau (H₂O) sous forme de vapeurs, de gaz d'ammoniac (NH₃) et de chaleur (Q) concourent tous à la diminution de volume (hauteur).

b) Évolution de la hauteur des andains en fonction du temps de compostage (à Bujumbura)

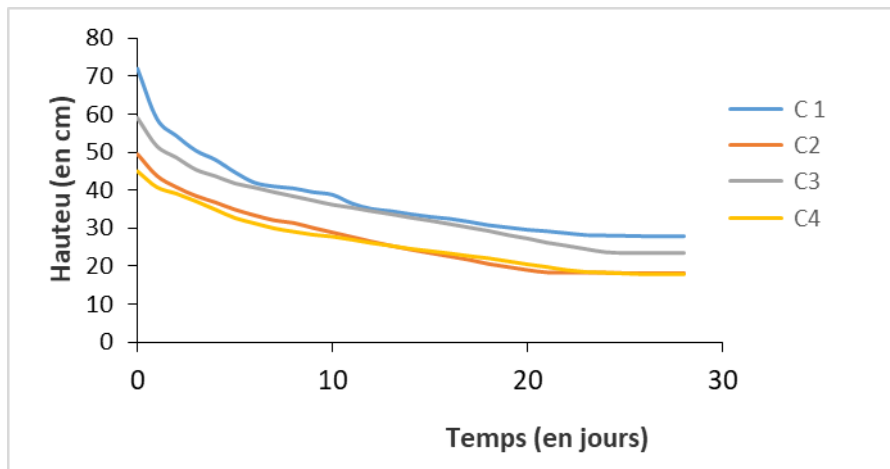


Figure 14: Évolution de la hauteur en fonction du temps de compostage à Bujumbura

C1: compost résultant de l'andain 1 (C/N=30, avec adjuvant les bouses de vaches);

C2: compost résultant de l'andain 2 (C/N=30, avec adjuvant les fientes de poules);

C3: compost résultant de l'andain 3 (C/N=35, avec adjuvant les bouses de vaches);

C4: compost résultant de l'andain 4 (C/N=25, avec adjuvant les bouses de vaches).

L'évolution de la hauteur des 4 andains a été suivie quotidiennement durant les 28 premiers jours du compostage. La diminution des hauteurs des 4 andains est très considérable pendant les premiers jours de compostage. Ainsi, au troisième jour de compostage, les hauteurs des 4 andains avaient déjà diminué respectivement de 30 % (C1), 22 % (C2), 23 % (C3), 17,5 % (C4). À partir de ces résultats, nous remarquons que la vitesse de dégradation (engendrant la diminution de hauteur) dépend des proportions des différentes catégories de substrats entrants. C'est ainsi qu'au 7^{ème} jour de compostage, les hauteurs avaient diminué de 43 %; 35 %; 19,5 % et 33,3 % respectivement pour les andains 1, 2, 3 et 4. L'andain 3, de grande proportion en pailles (63,6 % sur MS) connaît une diminution faible aux premiers 7 jours de compostage car, les pailles sont difficilement biodégradables et en conséquence, la multiplication des microorganismes décomposeurs est retardée. Par contre, les andains 1 et 2 de rapport C/N=30 connaissent une diminution forte probablement parce que les microorganismes décomposeurs trouvent une alimentation bien équilibrée en carbone et azote et se multiplient rapidement et jouant aisément leur rôle. Nous observons également que l'andain 4, de proportion faible en paille (12,4 % sur MS) et donc de grande proportion en matières facilement biodégradables, connaît une diminution en hauteur proche des deux premiers andains. Au bout de 28 jours de compostage, les diminutions des hauteurs des 4 andains sont de 61,4 %; 63 %; 60 % et 60,2 %

respectivement pour les andains 1, 2, 3 et 4. Ces évolutions de hauteurs sont en accord avec les explications données par (Pujol 2012) quant à l'allure des courbes de variations de hauteurs des andains en fonction du temps du processus de compostage.

I.2.1.3. Evolution de la température des andains en fonction du temps de compostage et des retournements.

La température est souvent retenue comme un indicateur majeur, mais non exclusif, de l'hygiénisation des composts (Loubna 2014; Rafolisy *et al.*, 2015). En conséquence, la surveillance de la température permet une mesure indirecte de l'intensité de la dégradation aérobie (Chennaoui 2016). Les variations des moyennes de température quotidiennement enregistrées pour les différents andains sont présentées par les graphiques des *Figures 15, 16, 17 et 18*

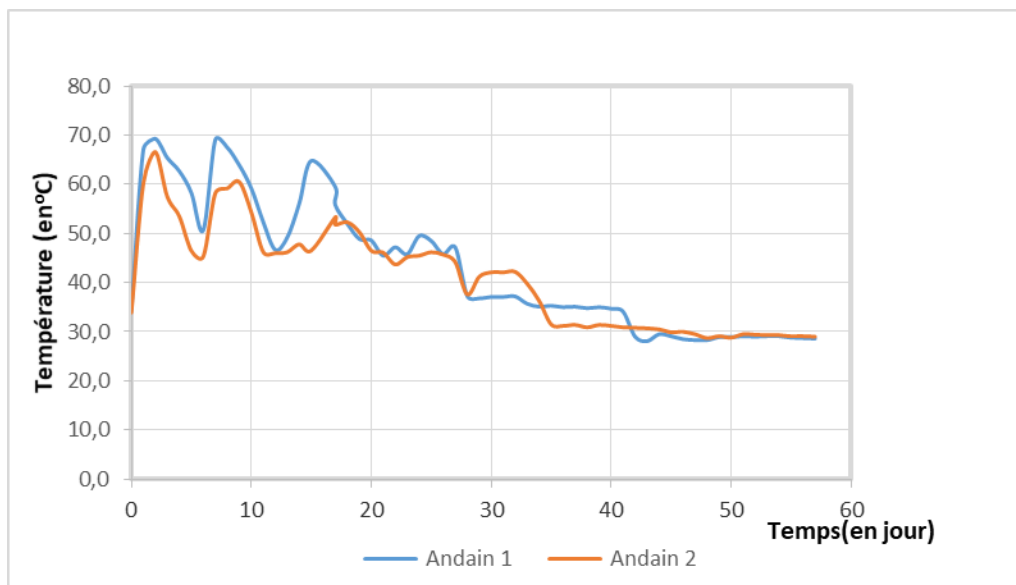


Figure 15: Évolution de la température des andains montés à Dakar au cours du compostage.

Deux heures après la mise en place des deux andains montés à Dakar, temps considéré comme point de départ (t_0), les températures sont initialement égales à 34,5 °C pour l'andain 1 et 33,9 °C pour l'andain 2. Ces températures augmentent très rapidement et au deuxième jour du processus de compostage, elles avaient déjà atteint les maxima de 69,3 °C et 66,6 °C respectivement pour l'andain 1 et 2.

L'augmentation de la température des andains au-dessus de la température ambiante est un signe non trompeur du démarrage de la bioxydation des substrats par les microorganismes. Après ce deuxième jour, les températures diminuent régulièrement jusqu'au premier jour du retournement. Après chaque retournement, les températures des deux andains remontent jusqu'aux nouveaux pics, puis diminuent lentement jusqu'au retournement suivant.

D'une façon générale, après chaque retournement, les températures remontent pour atteindre des pics dont les intensités sont de plus en plus moins marquées que les précédentes.

Le suivi de l'évolution de la température des composts en processus a permis d'identifier les quatre principales phases de compostage (Rafolisy *et al.*, 2015; Bokobana *et al.*, 2017): # **La phase oxydative** (ou décomposition) débute avec des températures mésophiles c'est-à-dire inférieures à 45°C ($T_{\text{ambiante}} < T < 45^{\circ}\text{C}$); Cette phase mésophile a duré 15 jours et 19 jours respectivement pour l'andain 1 et l'andain 2; # **La phase thermophile** ($45^{\circ}\text{C} < T < 80^{\circ}\text{C}$): L'activité des populations microbiennes mésophiles est inhibée à des températures trop élevées, il leur succède alors d'autres populations microbiennes et fongiques dites thermophiles, qui effectuent à très haute température une importante minéralisation de la matière organique (Garba *et al.*, 2020). Cette phase thermophile a duré 27 jours et 26 jours respectivement pour l'andain 1 et l'andain 2;

Phase de refroidissement et phase de maturation: À cette phase thermophile succède, une phase de maturation qui débute par un refroidissement (retour à la température ambiante) du compost marqué par un net ralentissement de l'activité microbienne (*Figure 2*). Il est à noter qu'au-delà de 70°C, seules les enzymes sécrétées dans les phases précédentes concourent encore à la dégradation (Yulipriyanto, 2001).

L'augmentation de la température pour différents andains pendant les premiers jours de compostage serait attribuée à une forte activité microbienne induite par la présence de matières organiques facilement biodégradables (protéines, sucres, etc.) (Oudart, 2013; Rafolisy *et al.*, 2015; Bokobana *et al.*, 2017). Ces températures élevées pourraient entraîner la réduction des pathogènes et l'élimination des graines d'adventices en cas de leur présence (Compaoré et Nanéma 2010). Il convient de signaler qu'après chaque retournement, la température remontait et cette augmentation a été beaucoup plus importante après le premier retournement. À la fin du processus, les températures chutent pour atteindre la température ambiante (température inférieure à 30°C). Cette baisse de température est due notamment à l'épuisement des matières organiques facilement biodégradables (Bangoura 2018; Bokobana *et al.*, 2017; Salama *et al.*, 2016). Les processus d'humification (réactions secondaires de condensation et polymérisation) s'installent et aboutissent à la formation d'humus dont les acides humiques, composés très résistants à la dégradation. L'humus est le produit final du compostage et se compose de substances stables peu dégradables. Les résultats obtenus sur l'évolution de la température durant le processus de compostage corroborent avec ceux trouvés par d'autres auteurs (Koledzi 2011; Loubna 2014; Herihajaniavo *et al.*, 2016; Dieng *et al.*, 2019).

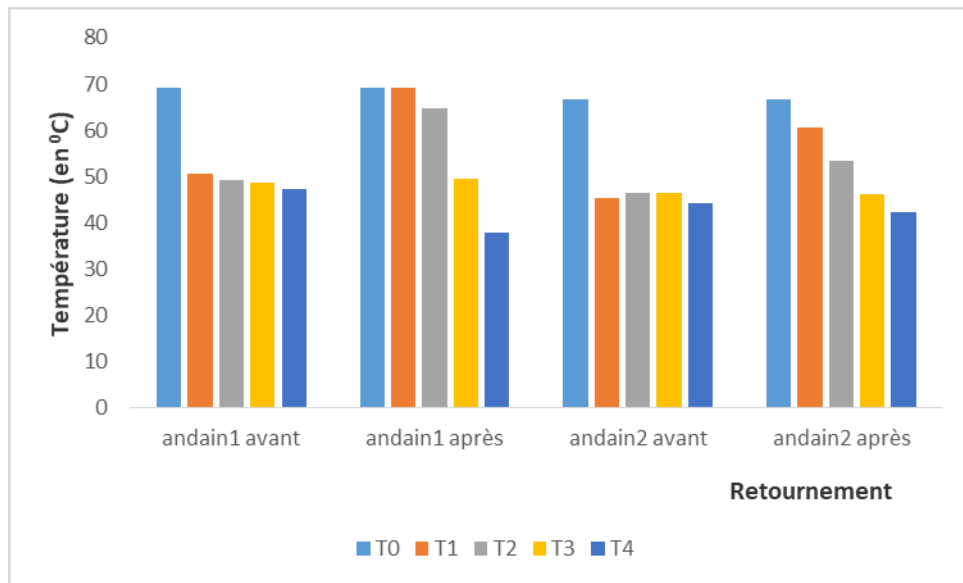


Figure 16: Évolution de la température d'avant et après les retournements des deux andains montés à Dakar.

To= La température maximale de départ atteinte pour chaque andain ; 1, 2, 3, 4 représentent les retournements ; T= température

Au total, sept retournements ont été effectués, mais seulement quatre rentrent dans la phase thermophile de compostage. Le graphique de la **Figure 16** ci-dessus présente les variations de températures maximales enregistrées avant et après les retournements. La montée de la température après le premier retournement est très importante: soit 69,1°C pour l'andain 1 et 60,5°C pour l'andain 2. Après le premier retournement de l'andain 1, la montée de la température maximale est proche de la température maximale atteinte (69,3°C). Ce phénomène de remontée de température est la conséquence du renouvellement de quelques facteurs: l'oxygénation, l'arrosage et les substrats qui relancent l'activité microbienne. Au moment du retournement, les substrats qui occupaient les parties de la surface externe des andains sont placés à l'intérieur et ainsi mis à la disposition des microorganismes. Au fur et à mesure que les jours de compostage avancent, les substrats facilement biodégradables deviennent de plus en plus rares et par conséquent, l'auto-échauffement diminue au fil du temps jusqu'à ce que les retournements n'aient plus d'effet remarquable sur la variation de la température.

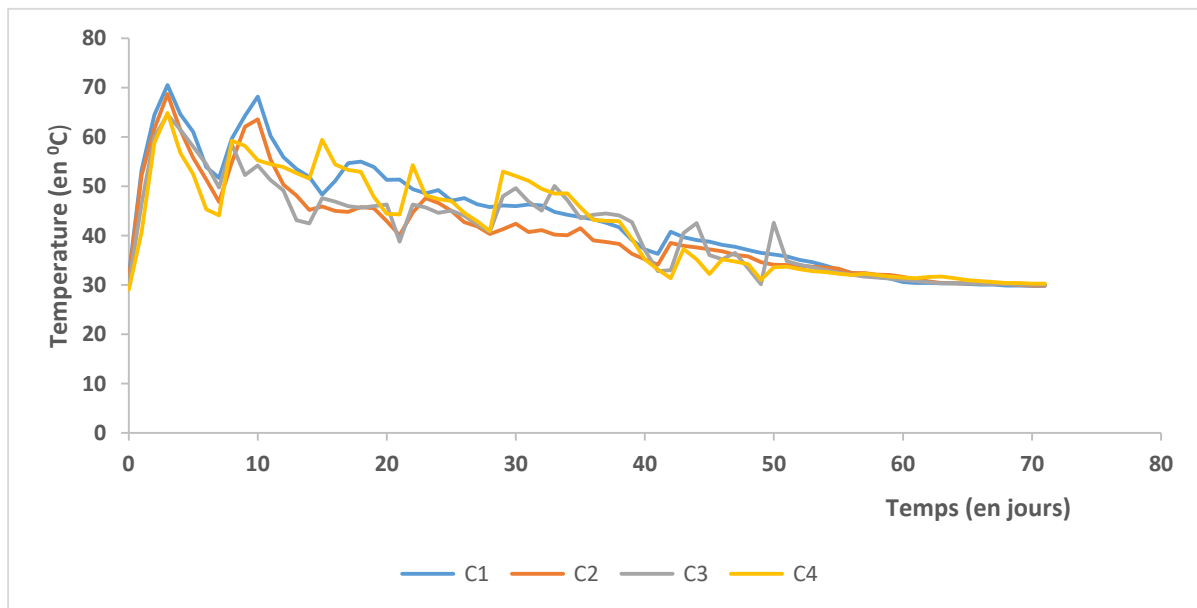


Figure 17: Évolution de la température des andains montés à Bujumbura au cours du compostage.

C1: compost résultant de l'andain 1 (C/N=30, avec adjuvant les bouses de vaches);

C2: compost résultant de l'andain 2 (C/N=30, avec adjuvant les fientes de poules);

C3: compost résultant de l'andain 3 (C/N=35, avec adjuvant les bouses de vaches);

C4: compost résultant de l'andain 4 (C/N=25, avec adjuvant les bouses de vaches).

La surveillance de la température permet une mesure indirecte de l'intensité de la dégradation aérobie (Biekre *et al.*, 2018). L'observation de la **Figure 17** révèle que les températures des quatre andains ont augmenté très rapidement pour atteindre les maxima de 70,5°C; 68,7°C; 64,5°C et 64,9°C respectivement pour C1, C2, C3 et C4 après le troisième jour de compostage. Les températures élevées caractérisent les processus de compostage aérobie et sont les indicateurs d'une activité microbienne importante (Compaoré *et al.*, 2010). Au cours du processus de compostage, les montées de températures des quatre andains ont évolué pratiquement de la même manière avec des valeurs élevées atteintes respectivement pour C1 (70,5°C) et C2 (68,7°C). Après le troisième jour, les températures diminuent graduellement jusqu'au jour du retournement. La fréquence de retournement a été fixée à une fois par semaine. À chaque retournement, il s'observait une montée de température dans les andains. Au début du compostage, l'activité biologique s'installe à travers des microorganismes mésophiles ($T_{\text{ambiante}} < T < 45^{\circ}\text{C}$) qui attaquent très rapidement les composés facilement dégradables (les sucres, l'amidon et les graisses) (Biekre *et al.*, 2018). La forte élévation de température induit le remplacement des germes mésophiles par des thermophiles (Temgoua *et al.*, 2014; Biekre *et al.*, 2018). La création des conditions optimales dans le tas (aération par retournement, taux d'humidité, ...) ont permis de maintenir la phase thermophile ($45 < T < 80^{\circ}\text{C}$) à 32 jours;

19 jours; 27 jours et 28 jours respectivement pour C1, C2, C3 et C4. En effet, Lo *et al.* (2019) ont montré qu'une élévation de température à des niveaux supérieurs à 45°C, permet d'inactiver toutes les espèces de parasites (ex : les œufs d'ascaris) au bout de 6 jours (Lo *et al.* 2019). Dans notre travail, nous avons largement dépassé la période mentionnée avec des températures de loin supérieures à cette température limite inférieure, ce qui nous permet de prédire de la destruction des germes pathogènes et des parasites, s'ils sont présents, et d'obtenir des composts bien hygiénisés. La phase de maturation, les pertes de chaleur par échange avec le milieu extérieur, la diminution des éléments nutritifs et la mort de micro-organismes décomposeurs engendrent une chute de température progressive pour se rapprocher de la température initiale (30°C) après 60 jours (pour C1), 62 jours (pour C2), 64 jours (pour C3) et 68 jours (pour C4) de compostage (**Figure 17**). En effet, le suivi de la température moyenne des quatre andains a montré que le pic le plus élevé est obtenu pour l'andain 1 (C/N=30 avec adjuvant bouses de vache), suivi de l'andain 2 (C/N=30 avec adjuvant fientes de poules). Ce sont les mêmes andains (1&2) qui atteignent en premier lieu la maturation (après 60 jours pour C1 et 62 jours pour C2). Cette réduction du temps peut être attribuée aux deux facteurs principaux: le rapport C/N (de 30 pour les deux andains) et la présence des adjuvants (bouses de vache pour l'andain 1 et fientes de poules pour l'andain 2). Toutefois, nos résultats pour tous les quatre andains sont beaucoup meilleurs par rapport à ceux de Guedira *et al.* (2012). Ces derniers auteurs ont travaillé sur le compostage de quatre types de matières végétales: les résidus de cônes de cèdre, de pin d'Alp, *Acacia mollissima* et de chêne vert. Le suivi quotidien de la température moyenne des quatre andains a montré des pics allant de 65°C (pour matière organique à base d'*Acacia mollissima*), 60°C (pour matière organique de chêne vert), 59°C (pour matière organique de pin d'Alp) et 48°C pour matière organique de cônes de cèdre). La durée de compostage a été de 3; 3,5; 4 et 6 mois respectivement pour le pin d'Alp; le chêne vert; l'*Acacia mollissima* et les résidus de cônes de cèdre. Les résultats sur l'évolution des températures des andains (**Figure 17**) sont conformes à ceux obtenus par d'autres chercheurs (Koledzi 2011; Loubna 2014; Herihajaniavo *et al.*, 2016; Dieng *et al.*, 2019).

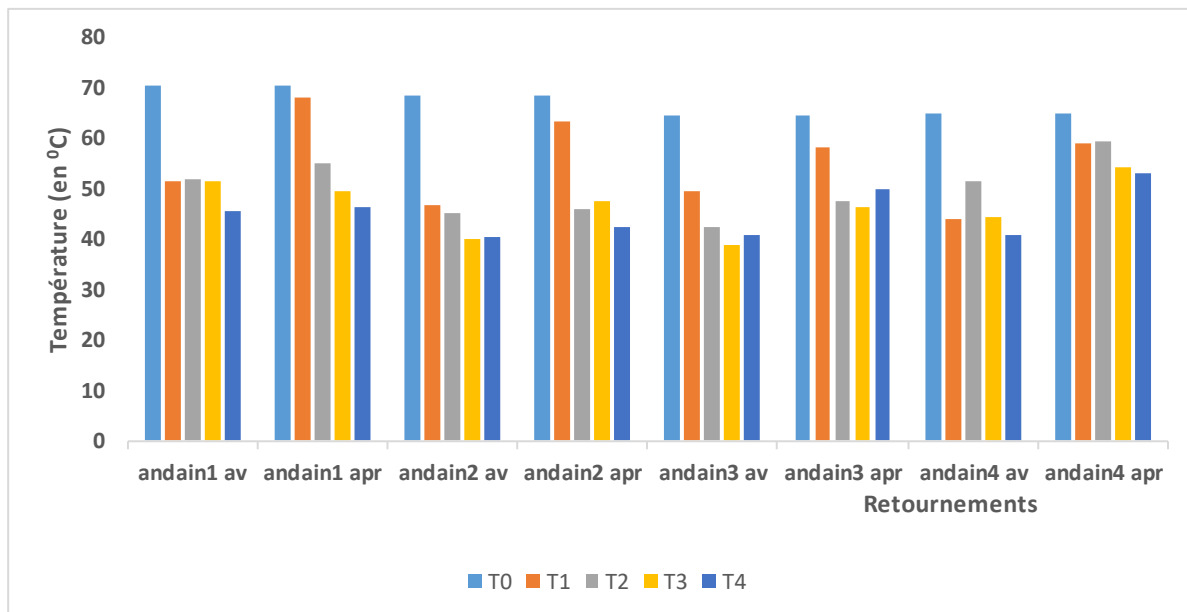


Figure 18: Évolution de la température d'avant et après les retournements des quatre andains montés à Bujumbura.

To = température maximale de départ atteinte pour chaque andain.

T1, T2, T3 et T4 : températures maximales atteintes par chaque andain après retournement 1, 2, 3 & 4

Des différents retournements réalisés, sur base de la plage des températures thermopiles, il a été retenu quatre retournements qui ont répondu convenablement à ce critère de choix. C'est après le premier retournement que les quatre andains ont atteint des températures maximales les plus élevées de 68,2°C; 63,6°C; 58,4°C et 59,2°C respectivement pour les andains 1; 2; 3 et 4. Les andains 1 et 2 se réservent la première et la deuxième place dans le classement quant à l'augmentation en température après retournement (constat qui vaut pour les autres retournements des deux composts). Outre l'avantage d'une bonne oxygénation et le contrôle de l'humidité, les retournements permettent les reprises des matières organiques présentes en bordures (ou en surfaces) afin que ces dernières soient placées à l'intérieur et ainsi mises à la disposition de microorganismes responsables de la biodégradation, ce qui permet d'assurer l'amélioration de l'homogénéité du substrat de compostage et du produit fini. Cependant, suite à la diminution ou épuisement des substrats facilement biodégradables, les températures atteintes en phase thermophile sont de moins en moins élevées au fur et à mesure des retournements.

Nous observons également qu'après les 4 retournements retenus, les montées de températures des andains 3 et 4 [andains de rapport C/N= 35 et C/N= 25) restent dans la plage de la phase thermophile (50,1°C pour C3 et 53°C pour C4), ce qui laisse supposer que les micro-organismes thermophiles sont toujours actifs probablement parce que la densité microbienne n'a pas été

suffisamment élevée par manque de matières organiques équilibrées en Carbone-azote tout au début du processus. De plus, cette faible population microbienne peut aussi être à l'origine du retard enregistré au niveau du début de la période de maturation.

I.2.2. Caractéristiques chimiques.

A côté des paramètres physiques suivis, quelques paramètres chimiques des plus importants ont été étudiés tels que: la matière organique, le carbone organique total, l'azote total Kjeldahl, le phosphore et le pH sur les produits finis. Pour chercher les moyennes globales (ou rapport global): C/N, M.O etc., nous nous sommes servis de la formule mathématique (voir matériel et méthode), ce qui nous a permis de calculer le rapport global moyen de C/N des épluchures et les pertes de choux présenté dans les Tableaux 1a et 1b.

I.2.2.1. Matière organique.

L'évolution de la MO est l'un des paramètres qui indiquent le degré de minéralisation de la matière organique au cours du processus du compostage

A) Évolution de matière organique des andains montés et suivis à Dakar.

La **Figure 19** présente l'évolution de la matière organique des deux andains montés et suivi à Dakar.

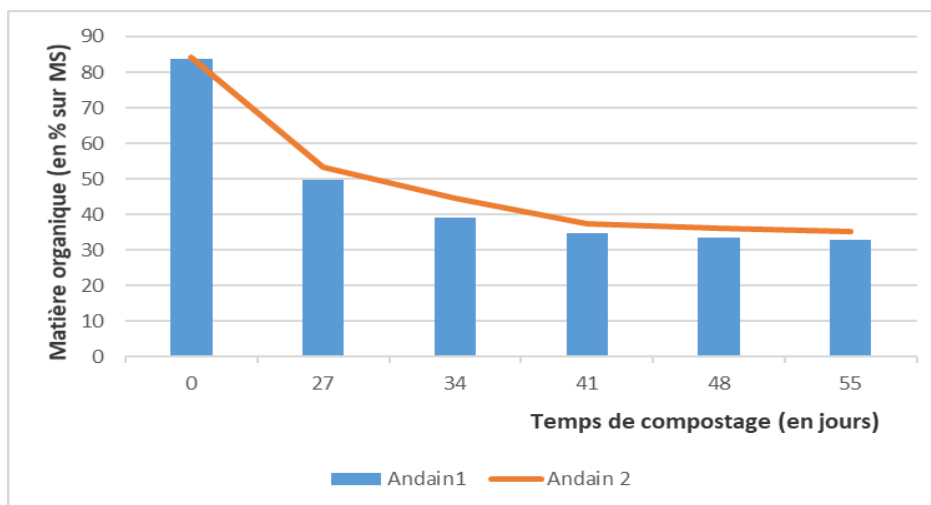


Figure 19: Évolution de la matière organique (% sur MS) en fonction du temps de compostage.

Le taux de matière organique diminue au cours du processus du compostage. Nous observons que ce taux passe de 83,6 % à 32,8 % et de 84,3 % à 35,3 % respectivement pour l'andain 1 et l'andain 2 et cela pour une période de compostage de 55 jours. Ces diminutions sont dans l'ordre de 60,8 % et 58,1 % respectivement pour l'andain 1 et l'andain 2. Ces valeurs sont comprises dans la gamme de 40 à 60 % données par la littérature (Rafolisy *et al.*, 2015; Bokobana *et al.*, 2017; Gnimassoun *et al.*, 2020). Cette tendance n'est pas linéaire, mais présente trois périodes distinctes. Une première période est comprise entre le premier jour

jusqu'au 21^{ème} jour, la décroissance suit une pente très forte comme le montre l'histogramme de la **Figure 19**. À partir du 21^{ème} jour, la diminution change d'allure jusqu'au 41^{ème}. Du début jusqu'au 41^{ème} jour, la diminution du taux de MO est rapportée à la minéralisation des matières organiques par les microorganismes (Tahraoui, 2013; Temgoua *et al.*, 2014; Abaker, 2019). Après le 41^e jour, une stabilisation de la teneur en matière organique s'observe, signe d'un épuisement de la matière organique facilement biodégradable et qui marque aussi un début de la phase de maturation du compost.

Il convient de signaler que la teneur en COT (en %) suit la même allure que l'évolution des MOT. Le rapport MOT/COT, obtenu sur base des moyennes globales, est de $1,87 \pm 0,02$ et $1,90 \pm 0,02$ respectivement pour le compost 1 et le compost 2 et ces valeurs coïncident avec une des valeurs les plus utilisées dans la littérature (Leclerc 2014; Temgoua *et al.*, 2014; Aharchaou 2017). Toutefois, une bonne précision analytique a été obtenue pour les engrais et amendements organiques analysés en utilisant le facteur 2,0 (D. W. Pribyl 2010: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>). Ce facteur est également utilisé par la norme NF U44-051: 2014 pour calculer le COT par rapport à la teneur en MOT sur les amendements organiques (Leclerc 2014; Temgoua *et al.*, 2014). Pour le sol, ce facteur est de 1,724 considérant que le C constitue 58 % de la MO du sol (Kaboneka, 2023).

B) Evolution de matière organique des andains montés et suivis à Bujumbura.

La fraction organique du substrat a été minéralisée en composés stables par les activités microbiennes, ce qui explique sa diminution au cours du processus de compostage (Dieng *et al.*, 2019; Pouya 2020). La **Figure 20** présente l'évolution des matières organiques des quatre andains installés et suivis à Bujumbura.

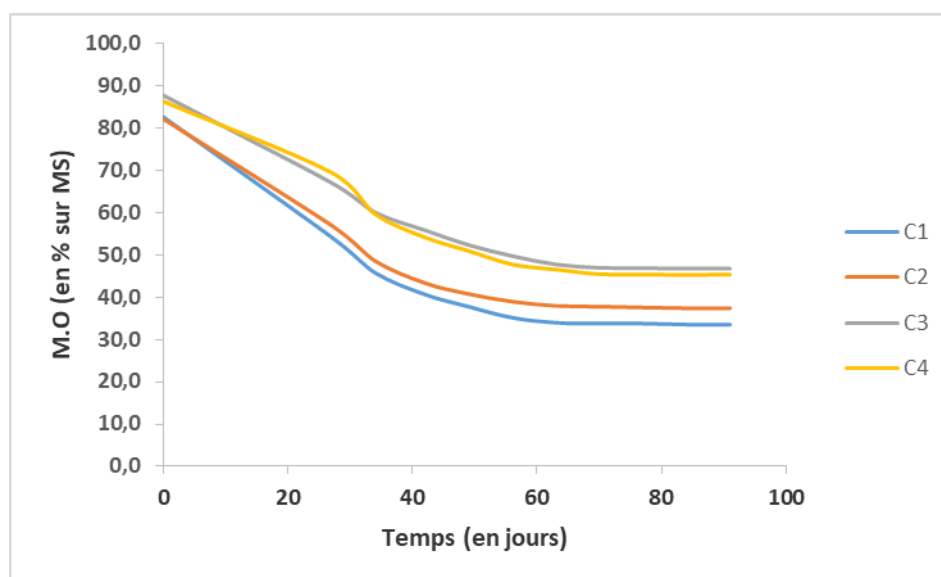


Figure 20: Évolution de la matière organique en fonction du temps de compostage à Bujumbura

La lecture de la **Figure 20** montre que la tendance des courbes de cette figure peut être décomposée en trois phases principales. i) la première qui va du début jusqu'au 27^{ème} jour pour C4 et jusqu'au 34^{ème} jour pour C1, C2 et C3; ii) la deuxième phase va du 27^{ème} jour jusqu'au 68^{ème} jour pour C4 et du 34^{ème} jour jusqu'au 60^{ème} jour pour C1; jusqu'au 62^{ème} pour C2 et jusqu'au 64^{ème} pour C3 ; iii) la troisième correspondant à celle de variation constante débute aux 60^{ème} ; 62^{ème}; 64^{ème} et 68^{ème} jours respectivement pour les composts C1, C2, C3 et C4. Ces deux premières phases peuvent être rapportées et assimilées à la minéralisation des matières organiques facilement biodégradables par les microorganismes. La troisième phase correspond quant à elle à l'épuisement des matières facilement biodégradables. Les composts C1 et C2, qui ont connu les températures les plus élevées [70,5°C (C1) et (68,7°C (C2), semblent être de cinétique et de degré de minéralisation beaucoup plus élevés avec des teneurs en matières organiques résiduelles plus basses (33,6 et 37,6 %) comparativement à celles des composts C3 et C4 (46,5 et 45,0 %), soient des taux de diminution de 59,40 %, 54,5 %, 46,7 et 47,5 % respectivement pour les composts 1, 2, 3 et 4. Cette différence de minéralisation serait attribuable à la différence des rapports C/N des substrats de départ des 4 composts qui étaient de 30 pour C1 et C2; de 35 et 25 respectivement pour C3 et C4. Pour les composts C3 et C4, bien que l'équilibre qualitatif est établi entre les matières carbonées/matières azotées, on remarque un déséquilibre quantitatif entre les proportions de ces deux catégories de matières, lequel déséquilibre serait à l'origine du ralentissement de leur minéralisation comparée à celle des deux premiers. Cette hypothèse est plus plausible étant donné que les valeurs des pertes en MO des composts produits à Dakar sont proches de celles des deux premiers composts produits à Bujumbura (dont C/N de départ = 30). Toutefois, la diminution en MO des quatre composts produits à Bujumbura sont comprises entre 40 – 60 %, valeurs qui rentrent dans la gamme de celles rapportées par la littérature (Dieng *et al.*, 2019; Pouya *et al.*, 2020; Sema *et al.*, 2021).

I.2.2.2. Evolution du rapport C/N des composts produits à Dakar et à Bujumbura.

Les microorganismes utilisent le carbone pour leur production d'énergie et l'azote est utilisé pour leur production d'acides aminés et protéines. La consommation microbienne de l'azote et du carbone entraîne une diminution du rapport C/N lors de la décomposition des déchets (substrats) (Plateforme Re-Sources 2015). Le rapport C/N est fréquemment utilisé pour évaluer le processus de minéralisation de la MO et comme indicateur de maturité des composts (Dieng *et al.*, 2019). La littérature parle du rapport C/N (des intrants) qui se situe entre 25-35 pour finir

entre 10-15 à la fin du compostage (Ntalani *et al.*, 2020); (Roger, 2012: www.guidescomposteurs.com).

Les résultats sur la détermination de la variation des rapports C/N des composts dans notre travail révèlent que les composts C1 et C2 produits à Dakar partent de C/N= 30 à 14,6 (pour C1) et 12,6 (pour C2); pour les composts produits à Bujumbura C1, C2, C3, C4 partent de: C/N=30 (pour C1 et C2); C/N=35 (pour C3) et C/N= 25 (pour C4) pour aboutir respectivement à 12,8 (pour C1); 14,8 (pour C2); 16,54 (pour C3) et 14,0 (pour C4). À l'exception du rapport du compost C3 produit à Bujumbura, tous les autres rapports de C/N des composts produits tombent dans l'intervalle indiqué dans la littérature pour un compost mûr soit un rapport compris entre 10-15. Cependant, le compost C3 (de rapport C/N des intrants =35) tend à présenter un rapport C/N (de 16,5) légèrement supérieur à ceux des 3 autres composts; mais; cette valeur est toutefois conforme à la norme AFNOR [entre 15-20] (Konate *et al.*, 2018). Cette différence au niveau du rapport C/N peut être attribuée à la présence d'un grand pourcentage en paille riche en carbone et difficilement biodégradable. Les rapports C/N des composts produits étant tous inférieurs à 20; on conclut donc que ces composts sont matures et peuvent être utilisés en agriculture à dose acceptable (Toundou *et al.*, 2015). Nos résultats n'entrent pas en accord avec ceux de M'Sadak et Ben M'Barek (2013), rapportés par Dieng *et al.* (2019), qui stipulent que le rapport C/N varie largement selon l'origine des déchets compostés et il est influencé directement par la teneur relative en azote du substrat (Dieng *et al.*, 2019; M'sadak et M'Barek 2013). Par contre, la comparaison des résultats sur les rapports C/N des deux composts produits à Dakar avec les composts C1 et C2 produits à Bujumbura; donc composts de même rapport C/N=30 des substrats de départ, nous laisse conclure que les résultats des rapports C/N des composts dépendent du rapport C/N des intrants et ce rapport doit être calculé sur les intrants avec une formule mathématique avant de procéder au compostage. Juste *et al.* (1995), rapporté par Tremier (2007) ont proposé le rapport du C/N final et du C/N initial $[(C/N)_f / (C/N)_i]$ comme indicateur de stabilité, lorsque ce rapport devient inférieur à 0,75 (Tremier *et al.*, 2007); (<https://side.developpement-durable.gouv.fr/HDFR/doc/SYRACUSE/57220/mise-au-point-de-tests-agronomiques-legers-permettant-de-determiner-simultanement-la-phytotoxicite-g>).

Ce critère de Juste *et al.* (1995), est satisfait pour tous les composts produits, car leurs rapports de $[(C/N)_f / (C/N)_i]$ sont compris entre 0,4 - 0,5; donc, ils sont tous stables. Ces résultats nous permettent de conclure que pour produire un compost mûr et stable, le calcul du rapport C/N du mélange des intrants est un préalable avant de procéder au compostage et C/N= 30 donne de bons résultats indépendamment de l'origine des substrats compostés.

I.2.2.3. Evolution des éléments fertilisants des composts produits à Dakar et à Bujumbura.

Outre les paramètres chimiques mentionnés ci-haut, nous avons également déterminé le pH, les teneurs en NTK; COT; P; K (pour les composts produits à Bujumbura). Les valeurs de ces différents paramètres sont consignées dans les **Tableaux [14 – 17]**.

➤ **pH:** Le pH est un facteur important qui influence la plupart des réactions biochimiques catalysées par des enzymes, ce qui permet la biodisponibilité des nutriments et la solubilité des éléments minéraux pour les microorganismes (Chennaoui 2016).

Les valeurs de pH des deux composts mûrs produits à Dakar sont respectivement de $9,5 \pm 0,0$ (pour le compost 1) et $9,6 \pm 0,0$ (pour le compost 2) pour un intervalle de valeur seuil de 7,5 – 9,3 (Leclerc 2014; Mustin 2015). Le pH pour les deux composts est alcalin et est légèrement supérieur aux valeurs de référence (Gnimassoun *et al.*, 2020; Rafolisy *et al.*, 2015; Tahraoui 2013); (D. W. Pribyl, 2010: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>) (17 septembre 2020). Toutefois, des tests de phytotoxicité réalisés en utilisant des composts ayant des valeurs élevées de pH n'ont pas montré d'effets négatifs sur la germination des plantes testées (Tahraoui 2013).

L'observation des résultats consignés dans les **Tableaux 6 & 7** indiquent que les valeurs moyennes de pH des composts produits à Bujumbura sont de $8,8 \pm 0,3$; $8,4 \pm 0,2$; $8,5 \pm 0,2$; $8,8 \pm 0,3$ respectivement pour les composts, C1; C2; C3 et C4. Nous trouvons que toutes ces valeurs de pH sont dans les fourchettes souhaitables par les normes de qualité du compost et les valeurs des trois premiers composts ne sont pas significativement différentes au seuil de confiance de 95 %. (**Tableau 21**). Selon Tchanate *et al.* (2017) cités par Sema *et al.* (2021), la valeur de pH atteignant 9 est liée à une mobilisation importante d'ammonium à partir de l'azote organique des déchets et à la présence de cendre dans les ordures ménagères (Sema *et al.*, 2021). Selon d'autres auteurs, un compost à pH basique offrirait des conditions favorables à l'amélioration des propriétés biologiques et à la disponibilité des cations du sol. Il aiderait également à relever le pH des sols acides (Temgoua *et al.*, 2014). Par contre, au cours du processus de compostage, un pH acide pourrait entraîner la lyse des microorganismes alors qu'un milieu de pH basique favoriserait une production d'ammoniac (perte d'azote par volatilisation) qui est toxique (Dieng *et al.*, 2019).

➤ **COT:** La minéralisation de la MO conduit à une diminution des teneurs en MO et par conséquent la teneur en COT suit la même allure que l'évolution des MO. Ainsi, pour les composts produits à Dakar, les teneurs en COT sont passées de 44,7 % à 16,4 % et 44,5 à 17,7 % respectivement pour le C1 et le C2.

Pour les composts produits à Bujumbura, les teneurs en COT au début du co-compostage sont de l'ordre de $47,1 \pm 1,8$ %; $46,9 \pm 1,6$ %; 48 ± 2 % et $46,2 \pm 1$ % respectivement pour les composts C1, C2, C3 et C4; ces valeurs montrent que les intrants sont riches en carbone. Au cours du compostage, on constate une diminution de la teneur en C, qui s'explique par la minéralisation continue des composés organiques. En fin de compostage, les taux de diminution en COT des 4 composts sont respectivement de 67,6 %; 66,2 %; 64,4 % et 65,6 % respectivement pour les composts C1, C2, C3 et C4. Ces taux de diminution nous révèlent que les composts C1 et C2 (de rapport C/N=30 des intrants) sont de valeurs élevées en minéralisation.

➤ **NTK**: L'azote est un élément minéral très abondant dans la nature et il est, d'ailleurs, considéré comme le troisième élément le plus abondant dans les tissus des végétaux, après le carbone et l'hydrogène. La mesure de l'azote NTK n'évalue que les formes réduites de l'azote; c'est-à-dire l'azote organique et l'azote ammoniacal, et reflète la décomposition des déchets organiques (Koledzi 2011). Pour les deux composts produits à Dakar, la teneur en azote diminue respectivement de $1,7 \pm 0,5$ % à $1,12 \pm 0,1$ % et $1,7 \pm 0,5$ % à $1,4 \pm 0,1$ % pour l'andain 1 et l'andain 2. Ces résultats sont en accord avec la norme française pour les amendements organiques (Chennaoui *et al.*, 2016). Pour les composts produits à Bujumbura, les teneurs en NTK des quatre composts connaissent une diminution de $1,6 \pm 0,13$ % à $1,2 \pm 0,1$ %; $1,6 \pm 0,0$ % à $1,11 \pm 0,0$ %; $1,6 \pm 0,13$ % à $1,0 \pm 0,02$ %; $1,6 \pm 0,1$ % à $1,13 \pm 0,0$ % respectivement pour les composts C1, C2, C3 et C4. Ces valeurs sont en accord avec la valeur préconisée par la norme NFU 44 – 051 (AFNOR 2006; Konaté *et al.*, 2018; Rafolisy *et al.*, 2015; U44-051/A2 2018).

➤ **P (total)**: Le phosphore constitue également un élément essentiel dans la nutrition des plantes. Il agit comme transporteur d'énergie aussi bien dans la photosynthèse que dans la dégradation des carbohydrates. Il favorise notamment le **développement racinaire** et intervient dans d'autres processus comme la **maturation**, la mobilisation des réserves nutritives et la transmission des caractères héréditaires (Tcheguani *et al.*, 2012). Pour les composts produits à Dakar, les résultats pour le P sur les entrants et les composts finis nous montrent que la concentration en cet élément a faiblement variée (variation de ± 2 %), et pour l'andain 1, il a subit plutôt une légère augmentation suite éventuellement à la mort et décomposition des microorganismes. Pour les composts produits à Bujumbura, les teneurs en P (total) sont de 0,11 %; 0,12 %; 0,11 % et 0,13 % respectivement pour les composts C1, C2, C3 et C4.

➤ **K**: Chez une plante, le potassium est nécessaire aux mouvements cellulaires (ex. ouverture et fermeture des stomates dans les feuilles) et aux transferts de certains solutés (nutriments,

métabolites, phytohormones). Il participe à la synthèse de protéines (ex. synthèse d'ATP, de NADPH,...) et polysaccharides et joue un rôle d'activateur enzymatique (Albrecht 2006; Bachelart 2021; Francou 2004). Le Potassium a été déterminé uniquement dans les composts produits à Bujumbura. Les résultats des **Tableaux 7** et **8** nous révèlent que le K est présent dans les quatre composts dans des concentrations non négligeables. Ainsi, ses teneurs sont de 1,4 %; 1,50 %; 1,60 %; 1,50 % respectivement pour les composts C1, C2, C3 et C4. Il est de teneurs plus élevées comparativement aux deux autres éléments fertilisants majeurs (N et P). Les résultats d'analyses statiques (**Tableau 21**) nous montrent que les valeurs de N, P, K ne sont pas significativement différentes au seuil de confiance de 95 %. Les teneurs en ces trois éléments (N+P+K) de chacun des quatre composts corroborent avec ceux trouvés par d'autres auteurs et sont conformes à la norme française NFU 44-051 (< 7 %) (AFNOR 2006; Ramdani 2014; Rafolisy *et al.*, 2015).

I.3. Caractéristiques des composts.

La qualité du compost est souvent identifiée comme un des problèmes les plus importants de son utilisation comme amendement. Le degré de maturité est une indication du degré d'humification, ou de conversion de la matière organique en substances humiques résistantes à la décomposition microbienne (Compaoré *et al.*, 2010).

I.3.1. calcul du rendement et caractéristiques des composts finis.

I.3.1.1. Rendement et caractéristiques physiques des composts produits à Dakar.

Le processus du compostage des composts montés à Dakar a duré 55 jours, mais à partir du 41^{ème} jour, on peut considérer que les deux composts commençaient la période de maturation au vu de la variation de certains paramètres indicateurs de maturité (comme T, MOT, C/N...). Les produits des composts mûrs sont d'abord séchés à l'air afin de diminuer la teneur en eau. Le séchage est suivi par un tamisage à l'aide d'un tamis de maille 12 mm (Dieng *et al.*, 2019) et c'est sur le passant à travers ce tamis qu'on calcule le rendement. Le rendement, en pourcent, est donné par le rapport entre la masse du passant du compost par rapport à la masse de matière initiale compostée dont la relation mathématique est donnée par la formule (17):

$$R = \frac{M_c}{M_i} \quad (17);$$

R= Rendement du compostage; M_i= masse initiale des matières compostées (en pourcent sec);

M_c= masse du passant à travers le tamis de 12 mm

En application de cette formule (17), les rendements des composts obtenus, après séchage à l'air libre et tamisage à l'aide d'un tamis de maille 12 mm (Dieng *et al.*, 2019), sont de 59,8 %

et 57,6 % respectivement pour l'andain 1 et l'andain 2 et ces ratios sont proches des valeurs trouvées dans la littérature (60 %) (Tahraoui 2013). La **Figure 21** (C1 et C2) illustrent les aspects physiques des deux composts mûrs obtenus.



(C₁): Photo du compost mûr de l'andain 1 (C₂): Photo du compost mûr de l'andain 2
Figure 21: Aspects physiques des deux composts mûrs obtenus à Dakar

Les deux composts sont de texture granuleuse (granulaire); de couleur noire (acide humique) pour l'andain 1 et de couleur brune-noirâtre (acide fulvique) pour l'andain 2; les deux sont d'odeur de terre, la température pour les deux andains sont similaires à la température ambiante. À la fin du processus de compostage, les matières initiales constituantes des deux andains n'étaient plus reconnaissables à l'œil nu. Ces différentes propriétés physiques constituent donc certaines de caractéristiques d'un compost mûr (Toundou 2016; Bokobana *et al.*, 2017).

I.3.1.2. Rendement et caractéristiques physiques des composts produits à Bujumbura.

Les quatre composts produits à Bujumbura sont arrivés à stabilité à différentes dates soient au 60^{ème} jour, 62^{ème} jour, 64^{ème} jour et 68^{ème} jour respectivement pour les composts C1, C2, C4 et C3. Pour déterminer les rendements de ces composts, nous avons appliqué la même méthode et formule que celles utilisées pour cas des composts produits à Dakar. Ainsi, les rendements obtenus sont de: 60,7 % (C1); 58,9 % (C2); 54,8 % (C3) et de 52,6 % (C4), valeurs semblables à celles de Dieng *et al.* (2019) (Dieng *et al.* 2019). La **Figure 22** (C1, C2, C3 et C4) présentent les aspects physiques des quatre composts mûrs obtenus.

ESSAI D'OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DU COMPOST À PARTIR DU CO-COMPOSTAGE DES DÉCHETS SOLIDES MÉNAGERS ORGANIQUES AVEC LES DÉJECTIONS D'ÉLEVAGE.



(C₁): Photo du Compost mûr de l'andain 1



(C₂): Photo du Compost mûr de l'andain 2



(C₃): Photo du Compost mûr de l'andain 3



(C₄): Photo du Compost mûr de l'andain 4

Figure 22: Aspects physiques des quatre composts mûrs obtenus à Bujumbura

Remarques: les composts C1 et C2 sont bruts tandis que les composts C3 et C4 sont tamisés. Les composts trouvés sont eux aussi de texture granulaire/grumeuleuse (plus prononcées pour les composts C1, C2 et C3), couleur noire (acide humique) pour les Composts 1; 2; 3 et brunâtre (acide fulvique) pour C4, odeur de terre, d'une température similaire à la température ambiante et chacun est d'un mélange homogène solide. Ces caractéristiques sont celles d'un compost mûr [Toundou, (2016)], voir les **Figures 22 C1; 23 C2; 22C3 et 22 C4.**

1.3.2. Taux de cendres des composts produits à Bujumbura.

Le taux en cendres sur les 4 composts produits a été déterminé par la relation (18) suivante et les résultats sont présentés dans le **Tableau 22:**

$$\text{Taux de cendres (\%)} = \frac{(M_{cc} - M_{cv}) \times 100}{(M_c - M_{cv})} \quad (18);$$

Avec: M_{cc} = masse de creuset + cendre (en g); M_{cv} = masse de creuset vide (en g);

$$M_c = \text{masse de creuset} + \text{échantillon (en g)}$$

Tableau 92: Taux de cendres des composts produits à Bujumbura

Composts	C1	C2	C3	C4
Taux de cendres (en % sur MS)	67,2	63,7	54	54,6

Sachant que le taux de cendres est obtenu après destruction de la matière organique par calcination, il est bien évident que les taux de cendres soient inversement proportionnels au degré de minéralisation de la matière organique.

Ainsi les composts C1 et C2 qui sont plus minéralisés par rapport aux deux autres (C3 et C4) et par conséquent possèdent des valeurs élevées en cendres. C'est le compost C1 de matière organique résiduelle faible (33,6 %) qui possède une valeur élevée en taux de cendres (67,2 %) et inversement, le C3 de grande valeur en MO résiduelle (46,5 %) est de faible teneur en cendres (54 %). Nos résultats rentrent dans la logique des résultats trouvés par Amir (2005) qui conduisait ses recherches doctorales dans le cadre du compostage. Au cours de son expérimentation, il a pris l'évolution du taux de cendres en fonction du temps de compostage comme l'un des critères d'évaluation de la maturité et stabilité du compost produit (Amir 2005). Selon les résultats trouvés par ce chercheur, le taux de cendres augmentait avec le temps de compostage et, par conséquent, avec la diminution de la teneur en matière organique du compost en processus. Après 9 mois de compostage, période considérée comme temps de maturité de son compost, il a trouvé que le taux de cendres évoluait très faiblement.

I.4. Conclusion.

Le compostage est un procédé aérobie de transformation de matériaux biodégradables pour former, après maturation, un compost stable et riche en humus. Ce premier chapitre a pour but de présenter les caractéristiques physico-chimiques classiquement mesurées sur les intrants et sur les composts, au cours du processus du compostage. Pour produire un compost de qualité, un bon nombre de paramètres physico-chimiques doivent être tenu en compte avant et durant le processus de compostage. De ces paramètres, le rapport C/N paraît être l'un des paramètres importants du fait qu'il permet d'apprécier l'aptitude du substrat au traitement par compostage et renseigne sur la qualité du compost obtenu. Selon plusieurs auteurs, le rapport optimal du rapport C/N des substrats compostés se situe entre 25-35 et, il a été établi qu'un rapport de 10-15 correspond à un compost mature et de bonne qualité. Dans le but de contribuer à l'optimisation du rapport C/N, dans notre travail, des mélanges de substrats ont été effectués afin d'obtenir des rapports C/N des intrants de 25; 35 (avec adjuvant bouses de vaches : C3 et C4) et 30 [avec adjuvant bouses de vaches (C1) et Fientes de poule (C2)]. On observe des différences importantes des caractéristiques physico-chimiques des substrats de départ et les composts finis. Ces caractéristiques évoluent rapidement au démarrage du compostage et se stabilisent progressivement au cours du compostage. En effet, les résultats obtenus nous ont montré que le compostage s'est effectué en conditions aérobies satisfaisantes: les températures maximales atteintes varient de 64,5⁰C à 70,5⁰C; les teneurs résiduelles de matières organiques sont entre 33,6 % - 46,5 %; rapport C/N varie de 12,8 à 16,5; les valeurs de pH légèrement basiques varient de 7,9 à 9,6; les valeurs fertilisantes NPK sont dans la gamme de valeurs préconisées par la norme française. Au cours du processus du compostage, l'influence des

retournements a également retenu notre attention, ce qui nous permettait de réajuster certains facteurs: humidité (par arrosage), aération; renouvellement des substrats (Homogénéisation : les substrats externes placés au milieu du compost en processus). Ainsi, il s'est avéré que le traitement de rapport $C/N=30$ des intrants, mis à part qu'il est monté le plus en température, favorisant ainsi la minéralisation (fort degré de dégradation) et l'hygiénisation du mélange; il vient en tête de classement au niveau de tous les autres paramètres sans oublier les aspects physiques (textures, couleurs, odeurs...) et le rendement. Ainsi, des mêmes caractéristiques, c'est ce rapport ($C/N=30$) qui peut être retenu comme rapport optimal pour un bon compostage. D'autres caractérisations s'avèrent indispensables afin d'obtenir plus de données pouvant nous permettre de procéder clairement au classement de ces composts en tenant compte de leur rapport de C/N . Les deux chapitres suivants sont consacrés à ces caractérisations complémentaires.

Chapitre 2: Effet de la variabilité climatique sur la qualité du compost produit.

Introduction.

La qualité du compost dépend de la qualité du flux entrant dans l'unité de traitement, de sa composition initiale et de l'aptitude de l'exploitant à surveiller son évolution et y réagir au fur à mesure (Grissa 2017). L'obtention d'un compost conforme aux normes de qualité requiert la maîtrise du procédé de compostage et, cette qualité est définie entre autres par les critères agronomiques (teneurs en C, MO, en éléments fertilisants: azote, potassium, phosphore; etc.) Certains chercheurs stipulent que la qualité des composts dépend d'une multitude de paramètres dont trois principaux d'entre eux sont: les déchets compostés; le procédé de compostage et les caractéristiques du climat (Sierra et Favérial 2017). Dans notre travail, certains de ces critères de compostage peuvent être vérifiés, car nous avons monté et suivi deux andains similaires dans deux régions différentes Dakar (Sénégal) et Bujumbura (Burundi). Les andains ont été élaborés à partir d'un même type de substrats de départ: pailles de brousses + tontes de gazon + épiluchures et restes de choux + adjuvants (bouses de vaches pour l'andain 1 et Fiente de poules pour l'andain 2); et la technique de compostage mise en œuvre a été le compostage aérobie avec retournements. Les proportions des mélanges des intrants ont été calculées sur base d'une même formule mathématique. Ce chapitre se donne comme objectif de déterminer «l'effet de la variabilité climatique sur la qualité du compost produit». Ainsi, la comparaison des résultats d'analyses des substrats initiaux et des composts produits dans les deux régions nous permettrons d'obtenir des informations nécessaires pouvant nous servir de base pour prendre position quant à l'influence du climat sur la qualité du compost produit.

II.1. Caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques des intrants.

Les proportions des intrants, déterminées sur base des résultats de leurs caractéristiques physico-chimiques ainsi que les caractéristiques microbiologiques réalisées sur les intrants dans le processus de compostage à Dakar et à Bujumbura sont présentés dans les *Tableaux 23* et *24*.

Tableau 103: Proportion des masses sèches des différents substrats de départ et adjuvants de Bujumbura et de Dakar

Paramètre	Andain	paille	TG	E+PC	Adjuvant		Total	Moyenne
					B _V	F _P		
Masse en kg(% MS)	A _{1B}	38	27	27	8	-	100	-
	A _{1D}	42	25	25	8	-	100	-
	A _{2B}	40	26	26	-	8	100	-
	A _{2D}	44	24	24	-	8	100	-
C/N	A _{1B} & A _{2B}	42,4	21,6	24,1	19,4	14,5	-	30
	A _{1D} & A _{2D}	40,4	22,6	23,8	18,3	13,5	-	30

A_{1B}: Andain 1 de Bujumbura; A_{1D}: Andain 1 de Dakar; A_{2B}: Andain 2 de Bujumbura; A_{2D}: Andain 2 de Dakar

Les résultats d'analyse montrent que les valeurs moyennes des mêmes substrats compostés sont proches les unes des autres pour les deux régions y compris les rapports C/N des différents substrats entrants. À l'intérieur d'une même catégorie, les caractéristiques des intrants et les proportions des substrats de départ possèdent des valeurs très proches les unes des autres et le rapport moyen de C/N du mélange des intrants est de 30 pour tous les quatre andains (de Bujumbura et de Dakar). Pour toutes les deux régions, concernant les rapports C/N, ce sont les pailles qui viennent en tête (42,4 pour A_{1B} & A_{2B} et 40,39 pour A_{1D} & A_{2D}); elles sont suivies par les mélanges des épluchures + tontes de gazon (24,1 pour A_{1B} & A_{2B} et 23,8 pour A_{1D} & A_{2D}), tandis que les fientes de poules se classent dernières (14,5 pour A_{1B} & A_{2B} et 13,5 pour A_{1D} & A_{2D}). Toutefois, nous trouvons qu'à l'exception des tontes de gazon de Bujumbura qui possèdent une valeur moyenne relativement supérieure par rapport à celles de Dakar, pour les autres paramètres, ce sont les valeurs moyennes de Dakar qui sont légèrement supérieures en comparaison à celles de Bujumbura. Les valeurs moyennes des rapports de C/N trouvés pour les pailles des deux régions (Bujumbura et Dakar) sont supérieures à celles trouvées par d'autres auteurs: Dieng *et al* (2019) ont trouvé un rapport moyen C/N de 24,6; et Ngom *et al* (2017) ont trouvé une valeur moyenne de 25,5 ce qui implique que les pailles que nous avons utilisées pour réaliser le compostage sont plus riches en carbone par rapport à celles utilisées par ces autres auteurs (Ngom *et al.*, 2017; Dieng *et al.* 2019).

Tableau 114: Caractéristiques microbiologiques des adjuvants

Echantillons	Types de microorganismes (en Unité Format Colonie : UFC/g)							
	Flore mésophile aérobie (FMAT)		Coliformes Fécaux		Pseudomonas aeruginosa		Escherichia coli	
	Bujumbura	Dakar	Bujumbura	Dakar	Bujumbura	Dakar	Bujumbura	Dakar
Bouses de vache	213.10 ⁷	158.10 ⁷	113.10 ⁶	111.10 ⁶	64	Ind à 10 ⁻¹	< 10	108.10 ⁴
Fientes de poule	80.10 ⁷	49.10 ⁷	280	460	< 10	< 10	< 10	<10

Ind= indénombrable

L'analyse des résultats du **Tableau 24** montre que pour les deux sortes d'adjuvants utilisés au cours du processus de compostage dans les deux régions d'expérimentation, ce sont les FMAT qui sont les plus abondantes et sont suivies par les *Coliformes fécaux*. En effet, à l'exception des bouses de vaches de Dakar qui renferment des *Escherichia coli* (bouses probablement contaminées), ce sont les mêmes types de microorganismes qui sont absents dans les différents adjuvants des deux régions. D'une façon générale, indistinctement des régions, les bouses de vaches sont de densités microbiennes plus fortes par rapport aux fientes de poules.

II.2. Comparaison des paramètres physico-chimiques de suivi du processus du compostage.

Des analyses physico-chimiques au laboratoire ont permis de caractériser les intrants et les composts finis, et les résultats trouvés comparés aux valeurs obtenues par d'autres auteurs et quelques normes internationales, sont consignés dans le **Tableau 25**. Les résultats d'une comparaison statistique des paramètres physico-chimiques des composts obtenus à Bujumbura et à Dakar sont présentés dans le **Tableau 26**

Tableau 125: Comparaison des valeurs physico-chimiques des intrants et composts finis aux valeurs obtenues par d'autres auteurs et quelques normes internationales

Paramètres	C1iD	C1fD	C1iB	C1fB	C2iD	C2fD	C2iB	C2fB	Normes et références
μ (kg/dm ³)	0,3 ± 0,0	0,7 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,4 ± 0,1	0,3 ± 0,0	0,6 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,5 ± 0,0	
Hauteur (%)	100 ± 0,2	38,1 ± 0,1	100 ± 0,1	38,6 ± 1,3	100 ± 0,2	55,0 ± 0,1	100 ± 0,1	36,8 ± 0,7	
M.S. (%)	52,9 ± 33,5	73,5 ± 16,2	66,1 ± 1,2	79,8 ± 2,3	53,6 ± 32,4	76,9 ± 2,2	72,3 ± 2	83,2 ± 0,2	> 30% [b, c]
pH	-	9,5 ± 0,0	-	8,8 ± 0,3	-	9,6 ± 0,0	-	8,4 ± 0,2	7,5-9,3 [i ; l]
MOT (% MS)	83,6 ± 4	32,8 ± 0,1	86,5 ± 1,7	33,6 ± 1,3	84,3 ± 3,8	35,3 ± 0,1	86,5 ± 0,9	37,6 ± 1	> 20% [b, c]
COT (% MS)	44,7 ± 2,6	16,4 ± 0,3	47,1 ± 1,8	15,2 ± 0,2	44,5 ± 2,7	17,7 ± 0,3	46,9 ± 1,6	15,9 ± 0,2	> 0,25% [g]
NTK (%)	1,7 ± 0,5	1,12 ± 0,1	1,6 ± 0,1	1,2 ± 0,1	1,7 ± 0,5	1,4 ± 0,1	1,6 ± 0,04	1,11 ± 0,03	< 3% [b, c]
P (en %)	0,14 ± 0,00	0,12 ± 0,00	0,12 ± 0,01	0,12 ± 0,00	0,11 ± 0,00	0,11 ± 0,00	0,11 ± 0,00	0,12 ± 0,00	< 3% [b, c]
K (%)	-	-	-	1,4 ± 0,1	-	-	-	1,5 ± 0,1	< 3% [b, c]; > 1% [g ; j]
N+P+K (%)	-	-	-	2,7 ± 0,0	-	-	-	2,7 ± 0,1	< 7% [i ; b]
C/N	30,0 ± 0,0	14,6 ± 0,1	30,0 ± 1,3	12,8 ± 0,7	30,0 ± 0,0	12,6 ± 0,1	30,1 ± 0,2	14,3 ± 0,5	10-15 [h ; k] ; > 8 [a, b ; g]

Où, i= initial; f=final; a= (Temgoua et al., 2014); b= (Compaoré et al., 2010); c= (Rafolisy et al., 2015); g= (Rhouma et al., 2019); h= (Kaza et al. 2018); i= (Bangoura 2018); J= (Gnimassoun et al., 2020); k= (Koledzi et al., 2012); l= (Ngom et al., 2017). OÙ

Tableau 136: Comparaison statistique des paramètres physico-chimiques des composts obtenus à Bujumbura et à Dakar

Paramètres	C1f _D	C1f _B	C2f _D	C2f _B	P-value
μ (kg/dm ³)	0,7 ± 0,0 ^c	0,4 ± 0,1 ^a	0,6 ± 0,0 ^b	0,5 ± 0,0 ^a	0.000
Hauteur (%)	38,1 ± 0,1 ^{ab}	38,6 ± 1,3 ^b	55,0 ± 0,1 ^c	36,8 ± 0,7 ^a	0.000
M.S. (%)	73,5 ± 16,2 ^a	79,8 ± 2,3 ^a	76,9 ± 2,2 ^a	83,2 ± 0,2 ^a	0.559
pH	9,5 ± 0,0 ^c	8,8 ± 0,3 ^b	9,6 ± 0,0 ^c	8,4 ± 0,2 ^a	0.000
MOT (% MS)	32,8 ± 0,1 ^a	33,6 ± 1,3 ^a	35,3 ± 0,1 ^b	37,6 ± 1 ^c	0.001
COT (% MS)	16,4 ± 0,3 ^c	15,2 ± 0,2 ^a	17,7 ± 0,3 ^d	15,9 ± 0,2 ^b	0.000
NTK (%)	1,12 ± 0,1 ^a	1,2 ± 0,1 ^a	1,4 ± 0,1 ^b	1,11 ± 0,03 ^a	0.000
P (en %)	0,12 ± 0,00 ^a	0,12 ± 0,00 ^a	0,11 ± 0,00 ^a	0,12 ± 0,00 ^a	0.085
C/N	14,6 ± 0,1 ^c	12,8 ± 0,7 ^{ab}	12,6 ± 0,1 ^a	14,3 ± 0,5 ^{bc}	0.011

Les points donnés ci- dessous sont consacrés aux interprétations d'une façon détaillée des résultats des analyses de caractérisation physico-chimique des intrants et les composts produits; la comparaison de ces résultats aux valeurs obtenues par d'autres auteurs et quelques normes internationales (*Tableau 26*), sans oublier les observations sur les résultats d'une comparaison statistique de ces mêmes paramètres physico-chimiques des composts obtenus à Bujumbura et à Dakar (*Tableau 27*).

II.2.1. Comparaison des caractéristiques physiques.

II.2.1.1. Masse volumique (en kg/dm³ ou T/m³) et les matières sèches (MS).

a) Masse volumique (en kg/dm³ ou T/m³)

Les résultats du *Tableau 25* nous montrent que les masses volumiques des intrants pour les andains de Bujumbura sont plus faibles par rapport à celles des andains élaborés à Dakar, ce qui peut avoir entre autres comme cause la teneur élevée en matière sèche des intrants de Bujumbura. Au cours du processus du compostage, les masses volumiques ont connu une augmentation très remarquable pour les deux différentes régions. En fin de compostage, les masses volumiques ont connu une augmentation très significative de valeurs 123,3 %; 115 %;

100 % et 123,8 % respectivement pour C_{1D}, C_{1B}, C_{2D} et C_{2B}, avec une progression semblable pour les quatre composts. Les valeurs trouvées rentrent dans les gammes de densités des déchets urbains d'un bon nombre de PED comme le cas de l'Algérie [0,2- 0,3]; Malaisie [0,24- 0,8] (Tahraoui 2013) et d'après ce dernier auteur, la densité en poubelle oscille entre 0,20 et 0,30T/m³. Ces valeurs témoignent d'une bonne progression du processus de compostage (Loubna 2014).

b) Les matières sèches (MS)

Le **Tableau 27** présente la récapitulation de la comparaison des valeurs moyennes des teneurs en matières sèches des composts obtenus à Dakar avec ceux obtenus à Bujumbura.

Tableau 147: Comparaison statistique des teneurs en matières sèches des composts produits à Dakar avec ceux de Bujumbura

Paramètres	MS	MS	M.S. (%)
C _{1D}	73,5± 16,2		73,5± 16,2 ^a
C _{1B}	79,8 ± 2,3		79,8 ± 2,3 ^a
C _{2D}		76,9± 2,2	76,9± 2,2 ^a
C _{2B}		83,2 ± 0,2	83,2 ± 0,2 ^a
P-value	0.556	0.008	0.559

Verticalement, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes (Duncan, $p \leq 0,05$)

Bien que les tests de comparaison des moyennes ne peuvent pas être effectués pour moins de trois groupes, sur base de p-value, nous trouvons que les teneurs en matières sèches des composts C_{1D} et C_{1B} ne sont pas significativement différentes ($0,556 \geq 0,05$); tandis que les teneurs en MS des composts C_{2D} et C_{2B} sont significativement différentes (p-value = 0,008). Le traitement statistique des résultats nous montre que la p-value des quatre composts (C_{1D}; C_{1B}; C_{2D} C_{2B}) est supérieure à 0,05 (soit égale à 0,559), avec comme conséquence que les matières sèches de ces différents composts ne soient pas significativement différentes, nous observons que ces teneurs en MS se retrouvent dans un même sous-ensemble, ce qui est peut-être dû aux écarts-types très variables. Les teneurs moyennes en matières sèches des quatre composts sont de 73,5 ± 16,2 79,8 ± 2,3; 76,9 ± 2,2 et 83,2 ± 0,2 respectivement pour C_{1D}; C_{1B}; C_{2D} et C_{2B}. Ces résultats sont semblables à ceux trouvés par Ntalani *et al.* (2020) (81,7 %); légèrement supérieurs à ceux de Temgoua *et al.* (2014) (71,6 – 75,9 %); et sont dans la marge des valeurs limites acceptables par la norme NFU 44-051(≥ 30 %) Rafolisy *et al.* (2015). Les résultats des **Tableaux 26** et **27** révèlent que les composts avec comme adjuvant bouse de

vache ont des teneurs élevées en MS comparativement à ceux d'adjuvant fientes de poule. D'une façon générale, pour les mêmes adjuvants, nous trouvons que les deux composts produits à Bujumbura sont de teneurs élevées en MS, si on les compare aux deux autres produits à Dakar.

Etant donné que l'humidité évolue dans le sens contraire de celle de la teneur en matières sèches, nos résultats sur la teneur en matières sèches évoluent dans le sens tel qu'il est décrit par les observations de Chennaoui *et al* (2016). Selon les résultats de ces auteurs, le taux d'humidité diminue significativement au cours du temps de compostage: de 70 % (dans le compost jeune) à 10 % (dans un compost mûr). Et cette diminution du taux d'humidité, donc de l'augmentation de la teneur en matières sèches, est attribuée à la lixiviation et à l'évaporation due à l'élévation de la température due à l'activité microbienne intense lors du compostage (Chennaoui *et al.*, 2016).

II.2.1.2. Évolution de la hauteur.

Les variations des hauteurs en fonction du temps de compostage des quatre andains (deux de Dakar et deux de Bujumbura) ont été suivies et la **Figure 23** présente leur évolution.

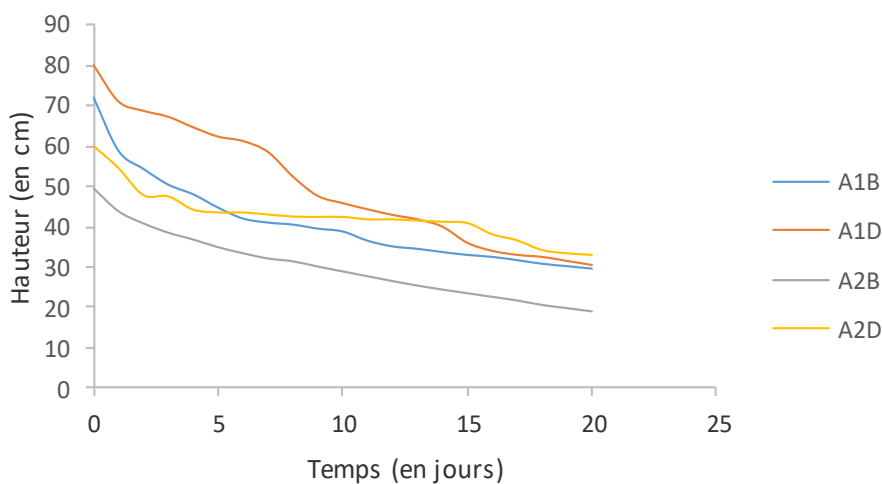


Figure 23: Courbes d'évolution de la hauteur en fonction du temps de compostage (Bujumbura-Dakar)

A_{1B} : Andain 1 monté à Bujumbura; A_{1D} : Andain 1 monté à Dakar;

A_{2B} : Andain 2 monté à Bujumbura; A_{2D} : Andain 2 monté à Dakar

N.B : C/N des intrants = 30, adjuvant : bouses de vaches (1) et fientes de poules (2);

Les courbes d'évolution de la hauteur en fonction de la durée de compostage ont présenté une dynamique similaire pour les différents types de composts montés à Dakar et ceux montés à Bujumbura. Au cours des premiers jours de compostage, la variation des hauteurs des quatre andains (deux élaborés à Dakar et deux autres à Bujumbura) est très forte,

Pour les andains installés à Dakar, a deux jours de compostage, les hauteurs avaient déjà diminué de 14,1 % et 20,3 % respectivement pour l'andain 1 (andain avec comme adjuvant bouses de vaches) et l'andain 2 (andain comme adjuvant les fientes de poiles) et c'est après ce deuxième jour de compostage que la température atteint le pic pour les deux andains (69,3°C pour l'andain 1 et 66,6°C pour l'andain 2).

Au troisième jour de compostage des andains montés à Bujumbura, les diminutions de hauteurs étaient de 30 % et 22 % respectivement pour l'andain 1 (andain avec comme adjuvant bouses de vaches) et l'andain 2 (andain comme adjuvant les fientes de poules) et c'est à cette même période que les températures atteignent les maxima pour les deux andains (70,5°C pour l'andain 1 et 68,7°C pour l'andain 2). Au 20^{ème} jour de compostage, les hauteurs des quatre andains avaient déjà diminué de 61,4; 61,9 %; 63,2 % et 45 % respectivement pour les andains A_{1B}, A_{1D}; A_{2B} et A_{2D}. À l'exception de l'andain 2 de Dakar (A_{2D}), les autres andains suivent la même évolution indistinctement des régions.

Ces résultats sont en accord avec les explications données par Pujol (2012). Selon cet auteur, le tassement des andains comprend deux étapes: i) La première qui correspond à la compression physique des substrats compostés et à la réorganisation des particules; ii) la seconde correspond à la biodégradation de la matière organique; à l'évaporation de l'eau et à la déformation des particules due aux contraintes qu'elles subissent (Pujol 2012; Toundou 2016).

II.2.1.3. Évolution de la température en fonction du temps.

Le compostage étant un processus aérobie, le suivi de la température est un indicateur pertinent de l'activité microbienne et les températures élevées sont caractéristiques d'une activité microbienne importante (Garba *et al.*, 2020). Le **Tableau 28** contient le résumé des données du climat et les moyennes météorologiques à Dakar et à Bujumbura pendant la période de compostage, alors que le **Tableau 29** renferme le résumé du nombre de jours par mois de la période de compostage. Les **Figures 24, 25 et 26** illustrent l'évolution de la température au cours du processus de compostage et l'effet des retournements sur la variation de la température.

ESSAI D'OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DU COMPOST À PARTIR DU CO-COMPOSTAGE DES DÉCHETS SOLIDES MÉNAGERS ORGANIQUES AVEC LES DÉJECTIONS D'ÉLEVAGE.

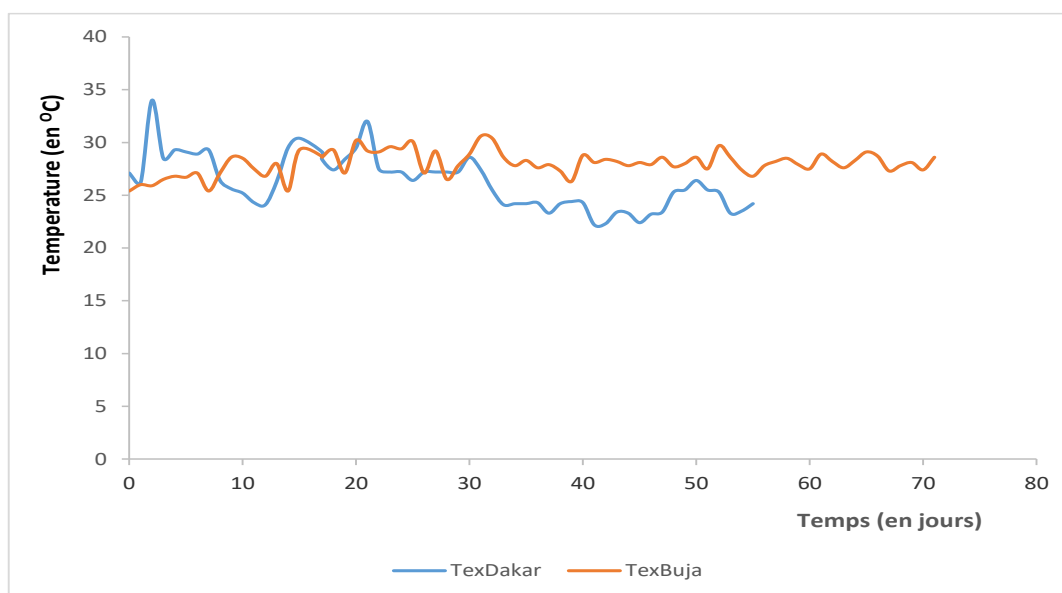


Figure 24: Température moyenne quotidienne à Dakar et à Bujumbura au cours de la période de compostage

TexDakar = température ambiante à Dakar; TexBuja = température ambiante à Bujumbura

Tableau 158: Conditions météorologiques à Dakar et à Bujumbura au cours de la période de Compostage

Paramètre	Premier mois de compostage		Deuxième mois de compostage		Troisième mois de compostage	
	Bujumbura	Dakar	Bujumbura	Dakar	Bujumbura	Dakar
Température moyenne	25 ^{0C}	26 ^{0C}	27 ^{0C}	24 ^{0C}	27 ^{0C}	23 ^{0C}
Température maximale	27 ^{0C}	28 ^{0C}	30 ^{0C}	26 ^{0C}	32 ^{0C}	25 ^{0C}
Température minimale	22 ^{0C}	23 ^{0C}	23 ^{0C}	23 ^{0C}	22 ^{0C}	22 ^{0C}
Température maximale maximum	29 ^{0C}	34 ^{0C}	34 ^{0C}	32 ^{0C}	34 ^{0C}	27 ^{0C}
Température minimale maximum	23 ^{0C}	25 ^{0C}	25 ^{0C}	24 ^{0C}	23 ^{0C}	23 ^{0C}
Température minimale minimum	19 ^{0C}	22 ^{0C}	20 ^{0C}	20 ^{0C}	20 ^{0C}	20 ^{0C}
Vitesse du vent	15 km/h	27 km/h	15 km/h	29 km/h	16 km/h	30 km
Température de l'air	22 ^{0C}	23 ^{0C}	23 ^{0C}	23 ^{0C}	22 ^{0C}	22 ^{0C}
Précipitations totales sur le mois	1 mm	1 mm	1 mm	0 mm	1 mm	0 mm
Humidité	55 %	61 %	49 %	73 %	54 %	79 %

<https://www.historique-meteo.net/afrique/burundi/bujumbura/2021/>

<https://www.historique-meteo.net/afrique/senegal/dakar/2020/>

N.B : Ces différentes valeurs présentées dans le **Tableau 28** ont été condensées à partir des données recueillies sur ces deux sites internet ci-haut mentionnés.

ESSAI D'OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DU COMPOST À PARTIR DU CO-COMPOSTAGE DES DÉCHETS SOLIDES MÉNAGERS ORGANIQUES AVEC LES DÉJECTIONS D'ÉLEVAGE.

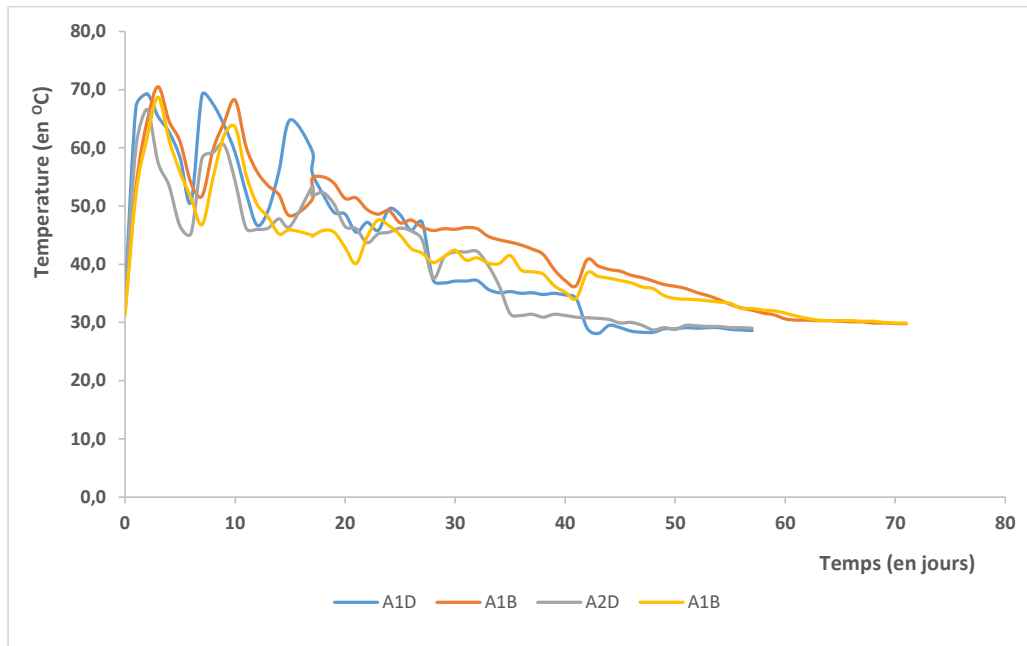


Figure 25: Évolution de la température durant le compostage

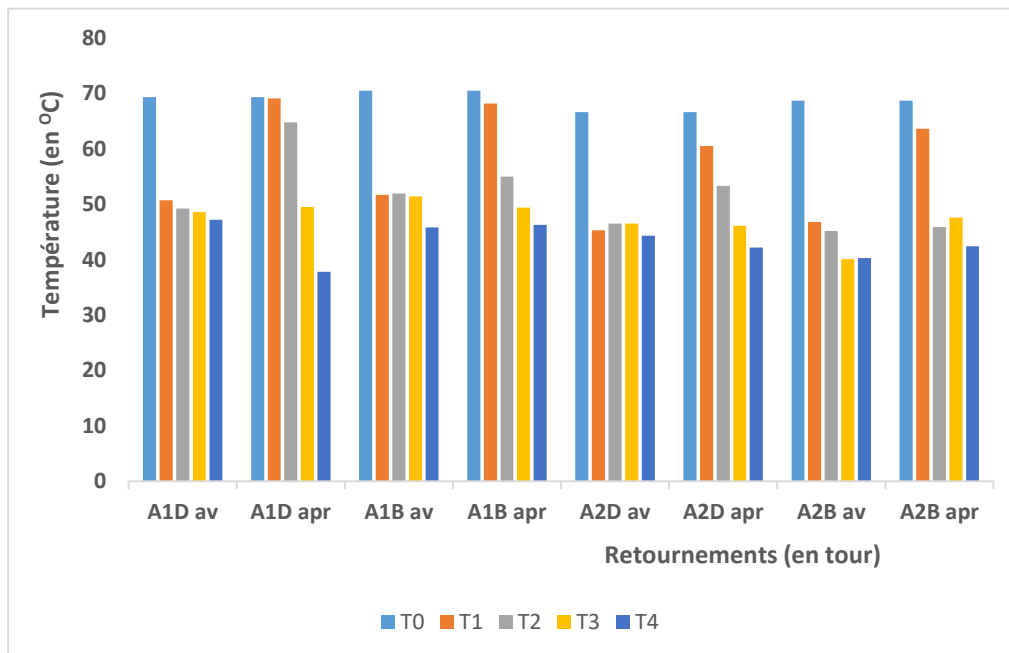


Figure 26: Évolution de la température avant et après les retournements des andains à Dakar et à Bujumbura

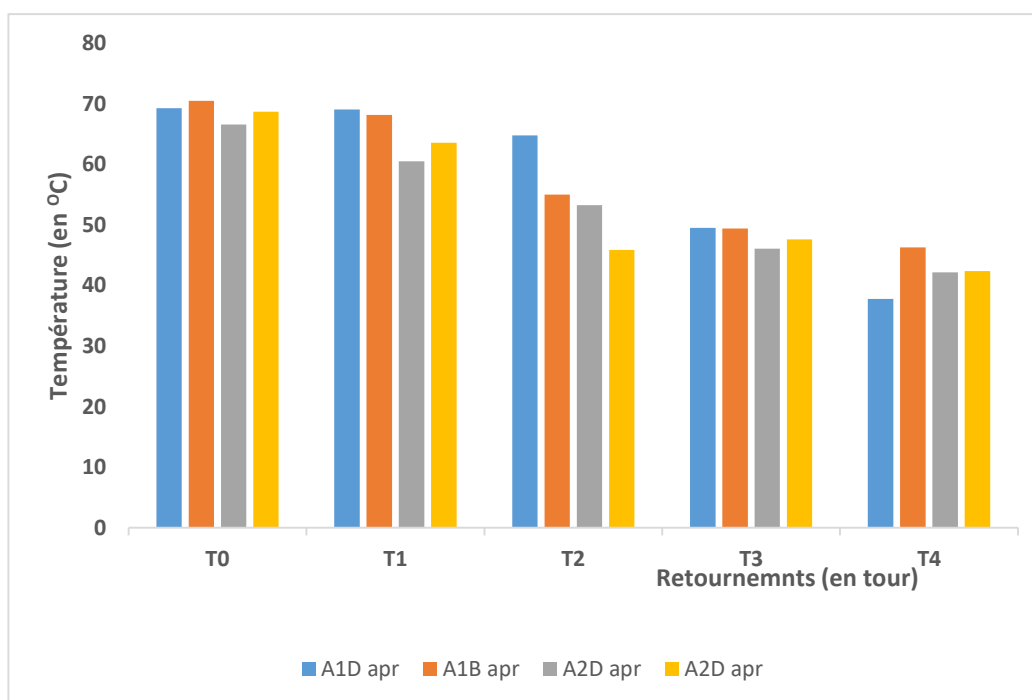


Figure 27: Évolution de la température maximale après les retournements des quatre andains (2 de Dakar et 2 de Bujumbura)

Tableau 169: Durée de compostage mois par mois à Dakar et à Bujumbura

Ville	Nombre de jours de compostage par mois						
	Premier mois		Deuxième mois		Troisième mois		Total
Dakar	Février	18	Mars	31	Avril	6	55 jrs (C1&C2D)
Bujumbura	Juillet	17	Août	31	septembre	12 (C1B) et 14 (C2B)	60 jrs (C1B) 62 jrs (C2B)

La période du processus du compostage a été du 11 février 2020 au 06 avril 2020 pour les andains montés à Dakar, et du 14 juillet 2020 au 20 septembre 2021 pour ceux de Bujumbura; soit une durée totale de compostage de 55 jours pour les deux andains montés à Dakar ; 60 et 62 jours respectivement pour l'andain 1 et l'andain 2 installés à Bujumbura. Au cours du premier mois de compostage, le nombre de jours de compostage est presque le même (17 jours à Dakar et 18 jours à Bujumbura) et la différence se situe au courant du troisième mois (**Tableau 29**). Les courbes de la **Figure 24** nous montrent qu'au cours des premiers jours du processus du compostage, la température moyenne à Dakar est plus élevée comparativement à celle de Bujumbura; la température maximale atteinte à Dakar est de 34°C (contre 29°C à Bujumbura) avec une moyenne mensuelle de 26°C à Dakar et

25°C à Bujumbura (**Tableau 28**). Pour les deux autres mois de compostage, c'est la température moyenne mensuelle à Bujumbura qui est supérieure à celle de Dakar. Concernant toujours le climat et météo des deux villes (Dakar et Bujumbura) au cours de la période de compostage, la précipitation est très négligeable: 1 mm/ chaque mois de compostage à Bujumbura et 1 mm/mois uniquement pour le premier mois de compostage et 0 mm/mois pour les deux suivants à Dakar. Pendant toute la période de compostage, l'humidité moyenne mensuelle à Dakar est partout supérieure à celle de Bujumbura; la vitesse du vent à Dakar est presque toujours le double à celle de Bujumbura.

La **Figure 25** montre que la température des différents andains de composts est initialement presque la même au premier jour de compostage (variant entre 31,2 - 34,5°C). Les températures moyennes de tous les quatre andains ont crû très rapidement pendant les premiers jours de compostage pour atteindre les pics thermiques de 69,3°C (C_{1D}) et 66,6°C (C_{2D}) au deuxième jour de compostage, et de 70,5°C (C_{1B}) et 68,7°C (C_{2B}) au troisième jour de compostage.

Ces températures sont proches les unes des autres, mais les andains C_{1D} et C_{1B} ayant comme adjuvant bouses de vache affichent une évolution de température légèrement plus accentuée comparativement aux deux autres d'adjuvant de fientes de poule (C_{2D} et C_{2B}). La fréquence de retournement a été arrêtée à une fois par semaine et l'arrosage quand le besoin est posé pendant cette période de retournement. Ces retournements sont matérialisés par une remontée de la température (les **Figures 26** et **27**). Les effets des retournements sur les propriétés des andains diminuaient progressivement avec le temps jusqu'à leur suspension. Ces effets sont plus prononcés après le premier retournement où les températures maximales atteintes sont de 68,2°C; 63,6°C; 69,1°C & 64,8°C respectivement pour C_{1D}; C_{2D}; C_{1B} & C_{2B}. Ces températures élevées provoquent une élimination de la majeure partie des microorganismes pathogènes ainsi que les graines d'adventices. Elles caractérisent aussi les processus de compostage aérobie et sont un indicateur d'une activité microbienne importante (Temgoua *et al.*, 2014). L'élévation de la température pendant les premiers jours du processus, serait la conséquence d'une forte activité microbienne induite par la présence des matières organiques facilement biodégradables (Garba *et al.*, 2020). L'abaissement de la température subséquent s'explique par une diminution de la matière organique biodégradable et la mort de microorganismes décomposeurs sous l'effet de la chaleur (Bokobana *et al.*, 2017). Ainsi, le suivi de la température des tas a permis de retrouver les quatre principales phases de compostage: la **phase mésophile** ($T_{\text{ambiante}} < T < 45^{\circ}\text{C}$) qui a duré 15 jours; 19 jours; 28 jours et 41 jours

pour les andains C1D; C2D; C1B et C2B; la **phase thermophile** ou oxydative ($45^{\circ}\text{C} < T < 80^{\circ}\text{C}$) a été maintenue pendant 27 jours; 26 jours; 32 jours et 19 jours respectivement pour les andains C1D; C2D; C1B et C2B; le refroidissement et la phase de maturation (**Figure 23**). Les andains C1D; C2D; C1B et C2B présentent une évolution de température similaire jusqu'à la maturation. La phase de maturation commence au 41^{ème} jour pour les deux andains suivis à Dakar, et débute au 60^{ème} et 62^{ème} pour ceux de Bujumbura, soit une différence de 19 jours (C1B) et 21 jours (C2B) (**Figure 25**). Cet écart de période de maturation peut trouver comme explication principale la différence de conditions climatiques entre ces deux régions. En effet, les différences climatiques majeures des deux villes se situent au niveau de l'humidité et la vitesse du vent. La vitesse de ventilation à Dakar est presque à tout instant le double de celle qui est observée à Bujumbura (**Tableau 28**). Bien que ces deux villes soient généralement caractérisées par un climat tropical, le vent rapide et humide à Dakar apporte un complément d'oxygénation à celle amenée par les retournements, et favorisent dès le démarrage du processus une multiplication rapide des micro-organismes et ces derniers induisent une forte activité d'où la durée de compostage raccourcis pour les deux andains montés dans ville de Dakar. Nos résultats rentrent dans la logique de ceux trouvés par Sierra et Favérial (2017) qui, lors de leur recherche sur le compostage, ont effectué un travail bibliographique sous forme de méta-analyse portant sur une étude comparative de (442) composts issus de milieux tempérés et tropicaux. Les résultats trouvés par ces auteurs montrent que la durée de compostage est variable et dépend d'une multitude de paramètres biotiques et abiotiques dont certains ne peuvent être pleinement contrôlés (Sierra et Favérial 2017). Pour des procédures similaires de compostage, les durées de compostage varient considérablement selon le climat. Certains auteurs retrouvent qu'en milieu tropical les durées de compostage peuvent aller de 90 à 180 jours, alors qu'en milieu tempéré, les durées de compostage peuvent excéder 300 jours voir même plus de 500 (Favérial 2016; Sierra et Favérial 2017). Pour maîtriser le procédé de compostage, la connaissance des certains facteurs du milieu comme la température ambiante, l'humidité, la vitesse du vent se révèle importante.

II.2.2. Comparaison des caractéristiques chimiques.

La caractérisation chimique des composts produits a consisté à déterminer la teneur en carbone, la teneur en azote, le rapport C/N, la teneur en matière organique (MO), la teneur en phosphore et en potassium et enfin, la mesure du pH (**Tableaux 25 & 26**).

II.2.2.1. Évolution de la matière organique.

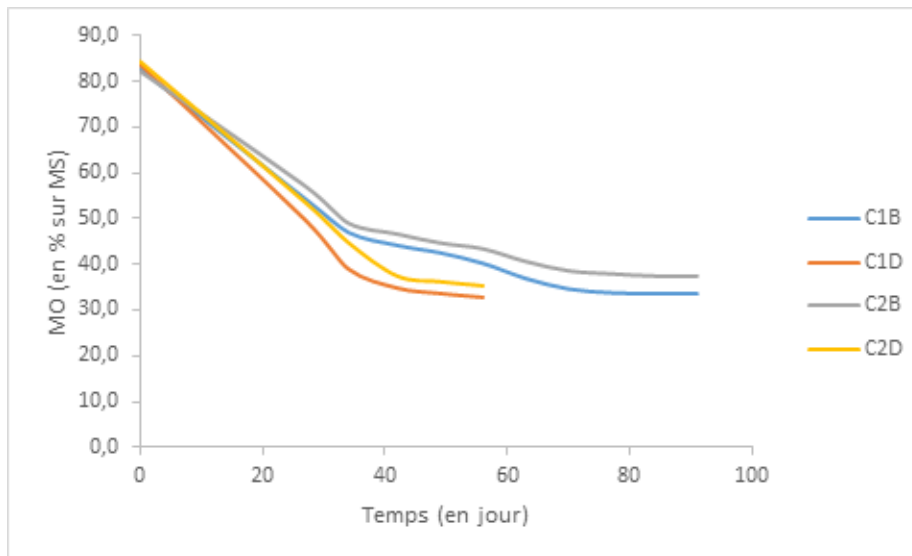


Figure 28: Courbes d'évolution de MO en fonction du temps de compostage (Buja-Dakar)

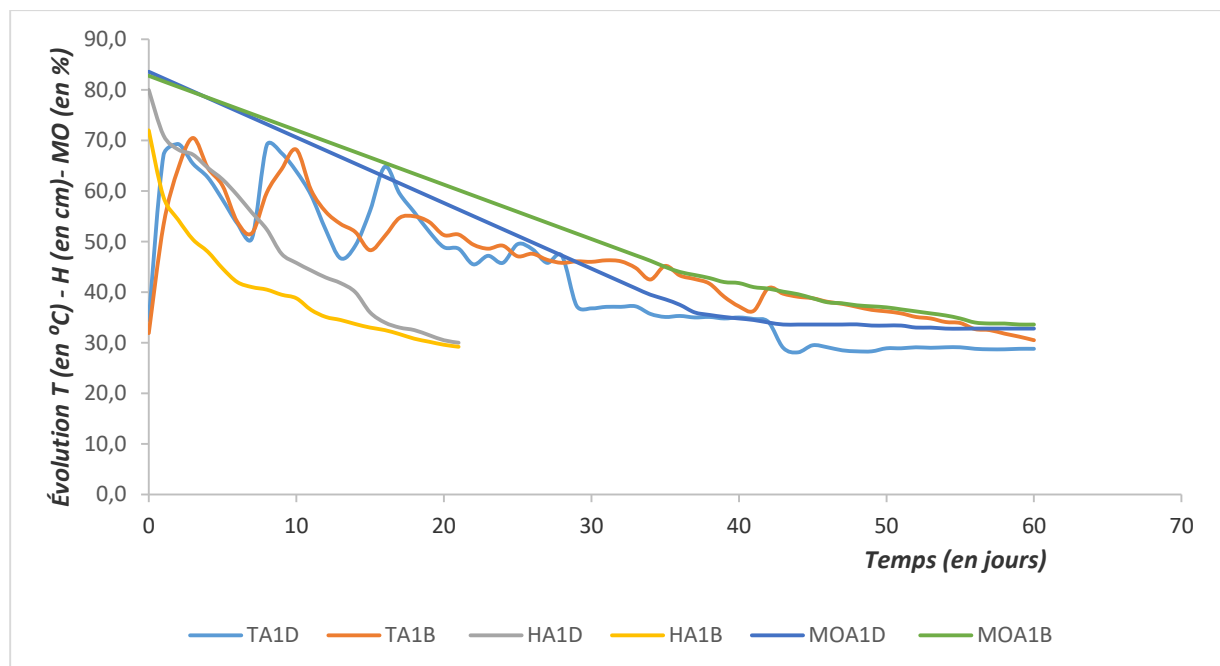
Les valeurs moyennes globales en matière organique des déchets compostés sont de $83,6 \pm 4$ %; $86,5 \pm 1,7$ %; $84,3 \pm 3,8$ % et $86,5 \pm 0,9$ % respectivement pour C1iD; C1iB; C2iD et C2iB. A la fin du processus de compostage (à maturité), les matières organiques ont diminué respectivement de 59,4 % (C1B); 60,8 % (C1D); 54,4 % (C2B) et 58,1 % (C2D). Ces résultats trouvés au niveau de la diminution (en % MS) en MO pour tous les 4 composts confirment la littérature, car ces pertes peuvent atteindre 20 à 60 % de la matière organique initiale (Krou *et al.*, 2019). Les teneurs résiduelles en MO par perte au feu en fin du processus sont de $32,8 \pm 0,1$ %; $33,6 \pm 1,3$ %; $35,3 \pm 0,1$ % et $37,6 \pm 1$ % respectivement pour C1fD; C1fB; C2fD et C2fB. Ces teneurs sont toutes dans la fourchette rencontrée dans la littérature soit entre 20 – 40 % pour un compost mûr (Koledzi 2011). Ces taux de diminution et teneurs résiduelles en MO marquent une importante minéralisation de la matière organique initiale aboutissant à l'obtention d'un compost qualifié de bonne qualité. Notons également que ces teneurs en MO (teneurs initiales et teneurs résiduelles) des 2 composts (C1fD et C1fB) des deux régions géographiques ne sont pas significativement différentes au seuil de confiance de 95 % ($p = 0,001$, donc $< 0,05$) et, celles de C2fD et C2fB sont faiblement différentes (**Tableau 26**). Les courbes de la **Figure 28** nous révèlent que les 4 composts (2 de Dakar et 2 de Bujumbura) manifestent une progression d'allure semblable mais à des vitesses différentes. Les courbes des 2 composts produits à Dakar affichent une allure presque exponentielle sur une longue période ce qui dénote que les microorganismes de ce milieu sont dans des conditions plus favorables pour se multiplier et assurer la dégradation rapide par rapport à la population microbienne des

tas de Bujumbura. Ces meilleures conditions, surtout climatiques, se manifestent par un raccourcissement de la durée de compostage.

Indépendamment des régions de compostage, nous trouvons que la minéralisation de matières organiques du co-compostage des déchets solides ménagers avec l'adjuvant bouse de vache est plus importante que dans le co-compostage avec les fientes de poule.

II.2.2.2. Interrelations entre les différents paramètres du compostage

La comparaison a porté sur les deux andains A1D et A1B (de Dakar et de Bujumbura) car, non seulement qu'ils ont été installés dans deux régions différentes mais, ils sont également d'un même rapport C/N= 30 des instants. De plus, les caractérisations des composts qui résultent de ces andains les classent premiers par rapport aux propriétés des autres composts produits ensemble. Les résultats de comparaison de trois paramètres : Température, hauteur et MO sont présentés à la **Figure 29**.



T : Température (en °C) ; H : Hauteur (en cm) ; MO : Matière organiques (en %) ; A : Andain ; D : Dakar ; B : Bujumbura

Figure 29: Interrelations entre les différents paramètres (T – H- MO) de compostage

Il ressort de l'analyse des courbes de tendances de diminutions de la hauteur et des matières organiques que les deux paramètres sont positivement corrélés entre eux. Des diminutions très fortes s'observent pendant les premiers jours de compostage ce qui témoigne une forte minéralisation des matières organiques facilement biodégradables induite par les microorganismes. C'est à cette même période d'intenses activités microbiennes que la température monte à l'intérieur des andains jusqu'au pic maximal. Après chaque pic, la

température diminue progressivement jusqu'au jour du retournement (endroits où les concavités sont tournées vers le haut sur les courbes de température). Après chaque retournement, la température monte jusqu'à ce que le retournement n'ait plus d'effet sur la variation de la température. Dans l'ensemble, nous remarquons que les deux andains des deux régions sont de tendances similaires pour les trois paramètres comparés.

II.2.2.3. Comparaison des rapports Carbone-azote (C/N).

Les rapports C/N ont été calculés à partir des résultats d'analyses distincts du carbone et de l'azote pour les 4 différents composts finis. Au début du compostage, le rapport C/N qui était de 30 pour les tous les quatre andains, diminue et en fin du processus, il est égal à $14,6 \pm 0,1$; $12,8 \pm 0,7$; $12,6 \pm 0,1$ et $14,3 \pm 0,5$ respectivement pour C1fD; C1fB; C2fD et C2fB (**Tableaux 26 & 27**). Ces rapports C/N des composts produits dans le présent travail se situent dans le domaine indiqué dans la littérature pour un compost mûr soit un rapport C/N compris entre 10-15 (Sema *et al.*, 2021). Donc, les composts obtenus sont mûrs et ils peuvent être qualifiés comme étant des composts de bonne qualité agronomique pouvant être appliqués dans les terres agricoles. Cette diminution de rapport C/N au cours du compostage s'explique par le fait que les microorganismes consomment plus de carbone que d'azote tout en restant dans la gamme préconisée (**10-15**) (Bokobana *et al.*, 2017) à cause de l'équilibre préétabli entre les matières carbonées –matières azotées des substrats de départ. Selon les résultats du **Tableau 26**, les valeurs des rapports C/N sont inter-semblables et se trouvent dans l'intervalle de 12,6 - 14,6. Nos résultats sont situés dans la gamme des valeurs préconisées par les normes AFNOR qui stipulent que pour un compost de qualité, un rapport C/N inférieur à 20 est souhaitable (Compaoré et Nanéma 2010; Chennaoui *et al.*, 2016), mais cet intervalle est très vaste pour rentrer en compatibilité avec un pourcentage de minéralisation compris entre 40-60 % d'un bon compostage.

II.2.2.4. pH et teneurs en éléments fertilisants majeurs des composts finis.

Nous avons également contrôlé le pH, la teneur en azote, la teneur en phosphore et en potassium (K a été analysé uniquement pour les composts produits à Bujumbura).

- **Le pH** est un facteur important qui influence la plupart des réactions biochimiques catalysées par des enzymes, ce qui permet la biodisponibilité des nutriments et la diminution des éléments minéraux pour les micro-organismes (Temgoua *et al.*, 2014).

Dans ce travail, l'analyse de ce paramètre a montré des valeurs légèrement basiques [pH: 8,8 – 9,6) pour l'ensemble des 4 andains et nos résultats corroborent avec ceux d'autres auteurs. Par exemple, Bokobana *et al.* (2017), Hermeline *et al.* (2016) ont trouvé que l'évolution

du pH au cours du processus de compostage peut être décomposée en trois phases. Le compostage passe par une phase acidogène où les fermentations aérobies tendent à rendre le milieu acide (pH tournant autour de 5,4). Ils expliquent qu'au départ, le pH diminue légèrement pour devenir acide à cause de la production d'acide organique (acide acétique, acide propionique, acide butylique, etc.) (Salama *et al.*, 2016; Bokobana *et al.*, 2017; Hermeline *et al.*, 2020;). Après une certaine période du processus (14-20 jours pour ces auteurs), le pH augmente de quelques unités et cette alcalinisation est associée d'une part à la production d'ammoniac à partir de la dégradation des amines protéiques lors du processus d'ammonification, et d'autre part à la libération des bases intégrées auparavant à la matière organique et l'ammoniac généré neutraliserait en partie les substances acides (Francou, 2004; Bokobana *et al.*, 2017). La phase d'alcalinisation est suivie de la phase de stabilité du pH à la fin du processus de compostage, qui est attribuée à l'oxydation de l'ammoniac par les bactéries et la précipitation du carbonate de calcium, car les ions Ca^{2+} augmentent au cours du compostage suite à l'humification. Ainsi, nos composts produits offrent des conditions favorables à l'amélioration des propriétés biologiques et à la disponibilité des cations du sol. Ils aideraient également à relever le pH des sols de la localité qui sont acides (Chaulage biologique) (Ntalani *et al.*, 2020). Les résultats de notre travail sont en accord avec la variation du pH décrite par de nombreux auteurs (Chennaoui *et al.*, 2016; Garba *et al.*, 2020; Hermeline *et al.*, 2020); etc.

➤ **Le carbone et l'azote:** Les teneurs moyennes en carbone et azote sont consignées dans les **Tableaux 24 & 25**. La teneur en carbone organique totale diminue au cours du compostage comme la matière organique. La principale raison de cette diminution est l'utilisation par les micro-organismes du milieu des substances organiques indispensables à leur métabolisme, conduisant à la minéralisation en dioxyde de carbone (CO_2) (Sema *et al.*, 2021). Ainsi, les taux de COT dans les composts ont diminué de 63,4 %; 67,6 %; 60,3% et 66,2 % respectivement pour les composts C1D; C1B; C2D et C2B. Les teneurs en COT des quatre composts sont significativement plus élevées ($P < 0,000$) (**Tableau 26**).

Les résultats du **Tableau 26** nous révèlent que les teneurs en azote diminuent au cours du compostage. Les taux de diminution sont de 32,1 %; 24,7 %; 16,2 % et 31,1 % respectivement pour les composts C1D; C1B; C2D et C2B. Les résultats de cette recherche viennent appuyer ceux de la littérature prévoyant une diminution beaucoup plus importante en carbone qu'en azote ce qui signifie que les microorganismes responsables de la dégradation de la matière organique utilisent plus de carbone que d'azote (Bokobana *et al.*, 2017). La teneur en azote est significativement plus importante pour le compost C2D que pour les trois autres composts qui

ne sont pas significativement différents entre-eux. Il est à noter que ces teneurs en carbone et en azote se répercutent sur les rapports de C/N.

➤ **Le P (phosphore) et K (potassium):** Les teneurs en phosphore et en potassium font partie des éléments qui permettent d'évaluer la qualité agronomique des composts. Les résultats des **Tableaux 25 et 26** nous montrent que les teneurs en phosphore des 4 différents composts sont de 0,12 % (C1D; C1B et C2B) et 0,11 % (C2D); c'est-à-dire valeur comprise entre 0,11 - 0,12 % ce qui nous permet de conclure que les concentrations en P des 4 composts sont similaires, hypothèse qui est confirmée par le traitement statistique tel qu'il est indiqué dans le **Tableau 27**. Ces résultats sont comparables aux résultats d'autres auteurs: Dieng *et al.* (2019) [0,117 % P), et ils sont conformes à la norme NFU 44-051 (< 3 %) (**Tableau 25**) (Dieng *et al.*, 2019). Les teneurs en potassium ont été analysées uniquement aux 2 composts produits à Bujumbura. Les valeurs trouvées sont de $1,4 \pm 0,1$ et $1,5 \pm 0,1$ respectivement pour C1B et C2B. Ces teneurs sont comparables à celles des composts préparés à partir des ordures ménagères dans la ville de Dschang (Cameroun) de l'étude de Temgoua *et al.* (2014) et rentrent dans les limites des normes internationales (**Tableau 25**) (Temgoua *et al.*, 2014).

II.3. Conclusion.

L'objectif dans ce chapitre est d'étudier l'effet de la variabilité climatique sur la qualité du compost produit. Sur ce, des comparaisons portant sur des résultats d'analyses physico-chimiques des composts de deux régions à caractères climatiques différents ont été effectuées. L'ensemble de ces paramètres sont notamment, la hauteur, le pH, la température, la matière organique (MO), le Carbone (COT), les éléments fertilisant majeurs (N, P,K), le rapport C/N ont permis d'obtenir les indications qui définissent la qualité du compost fini. Sur le plan de la réglementation, les composts obtenus sont tous de bonne qualité et sont comparables aux résultats obtenus par d'autres auteurs et sont également conformes à la norme française NFU 55-051 (amendement organique). La seule différence ayant été constatée au niveau de la durée de compostage (ou cinétique de minéralisation de la matière compostée). Les composts montés à Dakar arrivent à la maturité en même temps et les écarts de début de maturation entre ces premiers composts avec ceux de Bujumbura sont de 19 jours et 21 jours respectivement pour C1B et C2B. Sur base des résultats obtenus au terme de cette analyse comparative de qualité des composts produits dans les deux régions géographiques, il ressort que les composts élaborés aussi bien à partir des matières premières similaires et surtout à partir d'un même rapport des matières carbonées/matières azotées du mélange des substrats de départ, ici dans notre travail ce rapport est de C/N=30, en utilisant des méthodes similaires de compostage tout en assurant les conditions optimales, les conditions climatiques influent sur la vitesse de minéralisation

c'est-à-dire sur la durée de compostage et cette influence ne manifeste aucun effet sur la qualité du compost produit. Un climat chaud et humide étant plus favorable au compostage, surtout pour la cinétique de minéralisation de la fraction organique biodégradable.

Même les rendements sont proches surtout pour les composts ayant été montés sur base des intrants d'un rapport de C/N = 30: 59,8 %; 57,6 %; 60,7 % et 58,9 % respectivement pour les composts C1D, C2D, C1B et C2B.

Chapitre 3. Évaluation des critères d'innocuité des composts produits.

Introduction

La stabilité et la maturité du compost sont essentielles pour une utilisation optimale comme amendement et source de nutriments pour les plantes. Le degré de maturité du compost est estimé d'une part par le degré d'humification de la matière organique et d'autre part par l'absence de préjudice pour les plantes suite à l'utilisation du compost (Bokobana *et al.*, 2017). Les critères d'innocuité fixés par les «amendements organiques» sont basés sur les valeurs limites, notamment en composés traces organiques [CTO: produits de la chimie, résidus de combustion,...], en éléments traces métalliques (ETM), en germes pathogènes et indicateurs d'efficacité du traitement biologique, en inertes et impuretés (verre, plastique, etc.) (Sierra et Favérial 2017). Ces critères d'innocuité sont à respecter pour tous les amendements organiques, y compris ceux issus d'effluents d'élevage (Houot *et al.*, 2020). L'estimation des critères d'innocuité sera vue dans ce chapitre afin de vérifier d'une part que les composts produits sont conformes aux normes de qualité et d'autre part le degré de maîtrise du procédé de compostage utilisé.

III.1. Composition en éléments traces métalliques des composts produits.

Les résultats des analyses des éléments traces métalliques (Cd, Zn, Cu, Mn, Pb, Ni, Co) effectuées sur les composts produits à Bujumbura sont présentés dans le **Tableau 30**.

Tableau 30: Teneurs en éléments traces métalliques des composts produits en comparaison avec quelques normes et résultats d'autres auteurs.

Source	Cd (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)	Pb (ppm)	Ni (ppm)	Co (ppm)
Cette étude	0,3	35,2	4,3	138	< 4	3,6	3,6
Normes Françaises ^(S)	< 3	< 300	< 100	-	< 100	< 50	-
Normes Suisses ^(S)	< 2	< 400	< 100	-	< 120	< 30	-
NFU 44-051 ^(Y)	< 3	< 600	< 300	-	< 180	< 60	-
(Rafolisy <i>et al.</i> 2015)	1	40	8	-	3	5	-
(Compaoré <i>et al.</i> 2010)		130	15	-	37,5	13,7	-
(Temgoua <i>et al.</i> 2014)	12,6	52,4	55,8	-	29,2	43,8	-
(Bokobana <i>et al.</i> 2017)	0,5	127,2	15,6	-	378,3	41,5	-
(O Toundou <i>et al.</i> 2015)	-	149,3	5	266	640	72,5	-

S= (Compaoré *et al.* 2010; U44-051/A2 2018); y= (Rafolisy *et al.* 2015; AFNOR: NF U44-051/A2 2018)

Certains éléments traces métalliques, sont à la fois des **oligo-éléments** essentiels ou bénéfiques (à faibles concentrations) et des éléments **toxiques** (en cas de présence excessive) aussi bien

pour le règne animal que végétal. D'autres (Cd, Hg et Pb) sont des xénobiotiques, c-à-dire contaminants stricts, même à faible quantité (Topanou 2012).

Les résultats des analyses des ETM: Cadmium (Cd), zinc (Zn), cuivre (Cu), manganèse (Mn), plomb (Pb), nickel (Ni) et cobalt (Co) effectuées sur les composts obtenus sont respectivement de 0,3; 35,2; 4,3; 138; < 4; 3,6; 3,6. Toutes les concentrations trouvées sont inférieures aux valeurs limites admises par différentes normes. Ces faibles teneurs en ETM sont notamment liées à la collecte sélective des déchets compostés, ce qui constitue une preuve que le tri à la source des DSM est un passage obligé pour une gestion optimale des déchets solides et l'obtention d'un compost de qualité. Ainsi, nous pouvons signaler que le choix du traitement par **compostage** doit être **précédé du tri**, comme premier procédé de gestion des DSM. Évidemment, le tri devrait être en couplage avec le recyclage (création des unités de recyclage) des autres types de DSM issus du tri. La séparation de la fraction fermentescible des DSM est à réaliser juste à l'endroit de la production de ces déchets, sinon, si l'on attend effectuer ce tri hors de la source, c'est-à-dire au niveau des centres de tri, centre de transit ou à l'entrée des décharges, il y a un risque élevé de contamination avec des polluants présents dans ces déchets. Pour avoir un compost de qualité, exempt d'ETM, il importe donc, d'avoir des unités de récupération et de valorisation des matières recyclables et parallèlement, une politique de sensibilisation des ménages par les autorités locales s'avère incontournable. L'autre point à signaler est que l'emploi des deux adjuvants (bouses de vaches et fientes de poules) n'ont aucun impact négatif quant aux teneurs en ETM contrairement à ceux qui sont rencontrés dans les boues de station d'épuration des eaux usées employées également en co-compostage. Les boues de station d'épuration sont des résidus du traitement des eaux usées. Ces eaux renferment une charge importante de micropolluants métalliques (Bouallegue 2010). À l'issue des différentes phases de traitement des eaux usées, la grande partie des micropolluants métalliques s'accumule dans les boues résiduelles (Bouallegue 2010). En effet, en moyenne, 70 à 90 % des microéléments sont retenues par les boues. Même après compostage, les teneurs en ETM des composts obtenus sont relativement élevées par rapport aux normes internationales (**Tableau 30**); Conférence atelier international par Pulchérie Matsodoum Nguemete *et al.*, 2014: https://moselle.chambreagriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Gra nd-Est/44_compostage_des_boues_d_epuration_guide_pour_utilisateurs.pdf./].

Selon les résultats de ces derniers auteurs qui avaient composté une fraction fermentescible triée à partir d'un mélange des DSM provenant directement des foyers, le taux des ETM contenus dans les composts est toujours supérieur aux normes admises car, les teneurs en Cd et en Cu passent respectivement de 5,8 à 1,3 ppm et de 600 à 270,8 ppm.

III.2. Évaluation de la qualité sanitaire des composts produits.

Le compostage est un traitement très efficace des déchets bruts qui détruit presque tous les agents pathogènes (Btissam *et al.*, 2013). L'environnement physique de ces microorganismes change en raison de l'accumulation de leurs propres sous-produits métaboliques et de la chaleur qu'ils dégagent, ce qui peut affecter considérablement leur capacité de se développer, de se métaboliser et de survivre (Yulipriyanto 2001). Toutefois, l'inventaire de la microflore du compost est une étape préliminaire nécessaire avant toute approche de valorisation et d'utilisation de ce compost comme amendement du sol et source de nutriments pour les plantes (Btissam *et al.*, 2013).

Ainsi, la qualité sanitaire a été déterminée à travers les analyses et dénombrements bactériologiques sur les bioactivateurs (bouses de vaches et fientes de poules) et sur les composts produits. Ces analyses ont été effectuées sur six principaux types de microorganismes à savoir: Flore mésophile aérobie totale (FMAT), *Coliformes fécaux*, les *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, Anaérobies-sulfite-réducteurs (ASR), *Staphylococcus aureus*. Nous signalons que par manque de réactifs appropriés, les deux derniers types de microorganismes (Anaérobies-sulfite-réducteurs (ASR) et *Staphylococcus aureus*), n'ont pas été analysés à Bujumbura. Les résultats sont présentés dans le **Tableau 31**

Tableau 171: Micro-organismes présents dans les adjuvants intrants et composts mûrs obtenus

Echantillon		Bouses de vache (Bv)		Fientes de poule (Fp)		Compost avec Bv		Compost avec Fp	
		Buja	Dakar	Buja	Dakar	Buja	Dakar	Buja	Dakar
Types de microorganismes (en Unité Format Colonie : UFC/g)	Flore mésophile aérobie totale (FMAT / g)	213.10 ⁷	158.10 ⁷	80.10 ⁷	49.10 ⁷	4.10 ⁵	5.10 ⁵	3.10 ⁵	3.10 ⁵
	Coliformes fécaux / g	113.10 ⁶	111.10 ⁶	280	460	54	3600	< 10	2100
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> / g	64	Ind à 10 ⁻¹	< 10	< 10	109.10 ²	50.000	26.10 ³	16090
	<i>Escherichia coli</i> / g	< 10	108.10 ⁴	< 10	<10	< 10	<10	< 10	<10
	anaérobie sulfite-réducteur/g	-	100	-	600	-	4500	-	6000
	<i>Staphylococcus aureus</i> /g	-	< 10	-	< 10	-	< 10	-	< 10

Ind : indénombrable

Les résultats de l'analyse bactériologique (*Tableau 31*) montrent que la *FMAT* est la plus abondante dans les deux types d'adjuvant des deux régions (Dakar et Bujumbura) et elle est suivie par les *Coliformes fécaux* dans les bouses de vache. Les *Pseudomonas aeruginosa* et *Staphylococcus aureus* sont les moins abondants dans les deux adjuvants. Les *Escherichia coli* / *g* sont présents uniquement dans l'adjuvant bouse de vache de Dakar. Les analyses microbiologiques des composts obtenus montrent des abattements de la densité microbienne variant de $3,2 \log_{10}$ à $6 \log_{10}$ et de $3,14 \log_{10}$ à $8,05 \log_{10}$ respectivement pour le processus de Dakar et de Bujumbura. Le maximum d'abattement est observé du côté des composts produits à Bujumbura ce qui peut être la conséquence de la longue durée du processus de compostage enregistrée dans cette région. Ces différents abattements témoignent une bonne hygiénisation. En effet, étant donné qu'un compost est un produit utilisé en toute liberté, le produit final doit avoir une concentration très basse en micro-organismes pathogènes; il est également important de le garantir contre leur recroissance. Si le compostage est correctement effectué, en d'autres termes si, dans tout le tas, la température de 70°C pendant 30 mn, 65°C pendant plusieurs heures ou 55°C pendant plusieurs jours est atteinte, le produit final obtenu sera suffisamment hygiénisé car, il se produit une destruction efficace des agents pathogènes (Yulipriyanto 2001; Compaoré *et al.*, 2010).

Les résultats obtenus sur les analyses bactériologiques montrent que l'ensemble des densités de la microflore identifiées a connu un déclin au cours du processus de compostage, exception faite pour les *Pseudomonas aeruginosa* qui ont connu une faible augmentation. Les *Escherichia coli* ont quant à eux disparu complètement. Les résultats obtenus sont en accord avec ceux d'autres auteurs comme Dieng *et al.* (2019), Herijianova *et al.* (2016), Soulama *et al.* (2020), qui ont trouvé des disparitions partielles ou complètes des microflores à la fin de la phase thermophile (Herihajaniavo *et al.*, 2016; Dieng *et al.*, 2019; Kaboré *et al.*, 2020). En plus de l'épuisement (ou diminution) de substrats faciles à dégrader, plusieurs autres facteurs, à savoir le taux d'oxygène, d'humidité, de pH et la température peuvent affecter la succession de la communauté microbienne au cours du compostage (Charnay 2005; Loubna 2014). Ces derniers auteurs ont montré que le changement rapide en conditions physico-chimiques au cours du compostage est un facteur sélectif de la succession microbienne. Ainsi, les résultats d'analyses obtenus sur ces types de microorganismes classent nos quatre composts dans la catégorie de bonne qualité, ils sont sans danger pour la santé de l'homme (ou animaux), environnement et les plantes et par conséquent, sur base des critères microbiologiques, ils peuvent être utilisés comme fertilisants organiques.

III.3. Tests biologiques de phytotoxicité des composts produits.

Les tests de phytotoxicité sont utilisés pour évaluer l'impact des composts sur la végétation dans l'optique de la valorisation agronomique (Pouya *et al.*, 2020). Ainsi, pour évaluer la phytotoxicité des composts produits, des effets des différentes concentrations des extraits hydrosolubles des composts sur la germination et croissance des semences ont été étudiés.

III.3.1. Étude de la phytotoxicité des composts produits à Dakar.

La phytotoxicité des extraits aqueux des deux composts vis-à-vis des semences de graines d'arachides a été évaluée par des essais à court terme permettant la détermination des paramètres de germination [taux de germination (TG)] et d'élongation de radicule [indice de germination (IG)] (Kabil *et al.*, 2016). Ces tests sont indispensables et sont parmi les plus communément utilisés pour étudier la toxicité des composts et permettant en même temps d'évaluer le degré de maturité de ces composts testés (Said-Pullicino *et al.*, 2010).

a) Tests du Taux de Germination

Les **Figures 30 a & b** présentent les résultats des tests de phytotoxicité d'avant et après la germination, le **Tableau 32** présente le taux de germination (TG) et l'histogramme de la **Figure 31** présente l'évolution des facteurs biologiques de toxicité en fonction des différentes concentrations des extraits aqueux des deux composts produits.

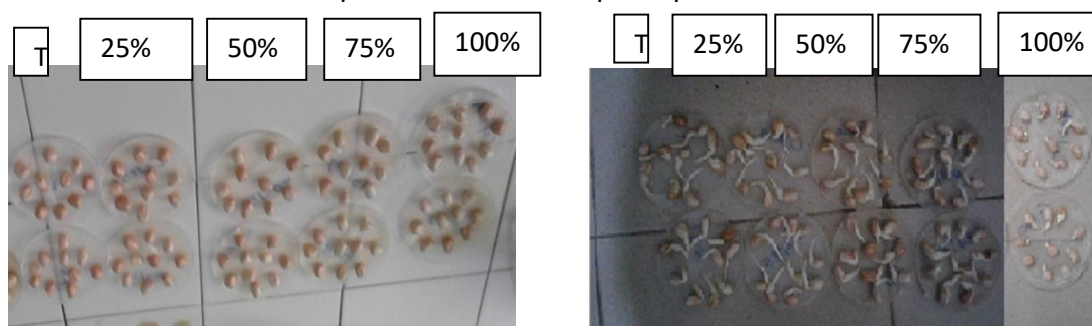


Figure 30.a: Graines avant germination

Figure 30.b: Graines après germination

Figure 30: Aspects des graines d'arachides d'avant et après germination

Tableau 182: Résultats du taux de germination (TG) des composts sur les graines d'arachide

concentrations des différents extraits des composts	Taux de germination de C1D	Taux de germination de C2D
E₀% (=témoin= eau)	100	100
E₂₅%	100	90
E₅₀%	90	85
E₇₅%	100	90
E₁₀₀%	85	85

C1D: compost 1 produit à Dakar avec comme adjuvant les bouses de vache;

C2D: compost 2 produit à Dakar avec comme adjuvant les fientes de poule

Le taux de germination sur le témoin (sol seul) est de 100 % ce qui permet de déduire qu'il s'agit des graines ayant une bonne faculté germinative.

Les résultats obtenus montrent que les taux de germination varient de 85 % à 100 % pour toutes les doses de composts testées. Les extraits à 25 % et 75 % donnent des valeurs très satisfaisantes de taux de germination de 100 % et 90 % respectivement pour C1D et C2D. Se basant sur ces résultats, quelle que soit la dose de compost testée, les taux de germination des composts obtenus sont supérieurs à 50 % et confirment la maturité telle que décrite par (Lo *et al.*, 2019). Au regard de ces mêmes résultats, la rentabilité de l'emploi du compost est excellente pour la faible dose de 25 %, démontrant que la rentabilité n'est pas fonction de la dose appliquée.

b) Détermination de l'indice de germination (IG)

En plus du taux de germination, pour évaluer la phytotoxicité des composts produits, nous avons également testé les effets des extraits hydrosolubles à différentes concentrations des composts sur les graines d'arachide en mesurant les indices de germination (IG). Les valeurs moyennes des résultats trouvés sont consignées dans le **Tableau 33** et la **Figure 31** présente leur évolution.

Tableau 193: Valeur moyenne de l'indice de germination (IG) induit par les composts

[des extraits]	L.R ₁ (en mm)	L.R ₂ (en mm)	IG ₁ (%)	IG ₂ (%)
E _{0%}	26,5	26,5	100	100
E _{25%}	28,7	18,9	108,3	64,1
E _{50%}	24,9	17,9	84,7	57,4
E _{75%}	22,6	12,8	76,8	43,5
E _{100%}	13,4	11,2	43	35,9
(IG ₅₀ + IG ₇₅)/2			80,7	50,5

L.R: Valeurs moyennes des longueurs des racines (en mm), **IG:** indices de germination

Les chiffres 1 et 2 représentent respectivement compost 1 et compost 2.

IG₅₀ et IG₇₅ désignent les indices de germination aux concentrations de compost de 50 % et 75 %

Ces résultats montrent que les facteurs mesurés sont inversement proportionnelles aux doses appliquées. Les valeurs moyennes des longueurs varient de 28,7mm à 13,4 mm et de 18,9 mm à 11,2 mm et les indices de germination variant de 108,3 à 43 % et de 64,1 à 35,9 % respectivement pour le compost 1 et le compost 2. L'histogramme de la **Figure 31** présente l'évolution des facteurs biologiques de toxicité en fonction des différentes concentrations des extraits aqueux des deux composts produits.

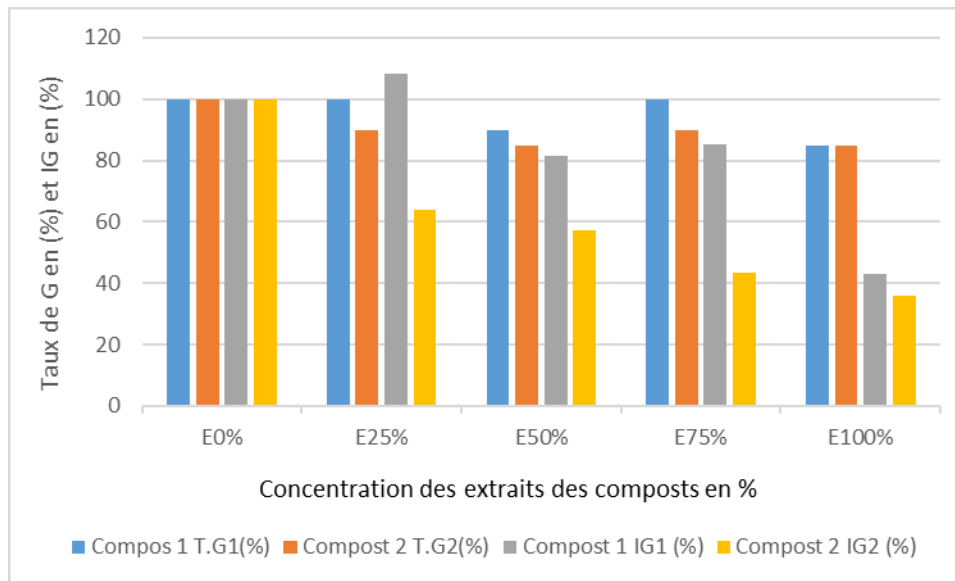


Figure 31: Évolution des indicateurs biologiques de toxicité en fonction des concentrations des extraits des deux composts.

Ces résultats mettent en évidence que l'incorporation d'une dose de 25 % du compost donne des valeurs optimales pour tous les paramètres mesurés: longueurs de racines, taux de germination et les indices de germination. Un indice de germination qui dépasse 100 % est observé pour le compost 1. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par Loubna (2014) lorsqu'il testait l'effet de toxicités des composts sur différentes espèces de cultures (Laitue, Luzerne, Navet) en fonction des stades de compostage (Loubna 2014). Cet auteur rejoint l'idée d'autres auteurs (Larbi 2006; Benjamin 2019) qui ont montré que l'effet stimulateur de la germination et la croissance des racines dont l'IG dépasse 100 % est dû à la teneur en matière organique stable, la richesse en substances humiques et les éléments minéraux durant la phase de maturation. Nos résultats montrent également que les boîtes imbibées des doses de 50 % et 75 % donnent des indices de germination de 84,7 et 76,8 pour le compost 1. Ces valeurs sont conformes à ceux de Koledzi (2011) qui a obtenu des indices de germination variant entre 75 à 87 %. Pour le compost 2, les indices de germination sont relativement faibles en comparaison avec ceux du compost 1 et aux mêmes concentrations (Koledzi 2011). Ceci peut s'expliquer, en dehors de l'action des substances phytotoxiques, par une probable forte charge ionique (salinité) des extraits hydrosolubles et la conductivité électrique. La salinité peut provoquer un éventuel effet osmotique. Cette hypothèse paraît plus plausible, car, les boîtes contenant les extraits de ce compost se desséchaient très rapidement (moins de 24 heures). Cette hypothèse trouve également son fondement dans les travaux d'autres auteurs (Ramdani 2014; Ukondalemba 2016; Souguir *et al.*, 2019) qui signalent que des concentrations trop importantes de certains éléments minéraux tels que le cuivre, le zinc, le manganèse ou le bore, peuvent

générer un effet inhibiteur sur la germination et la croissance des plantes. En revanche, les doses de 100 % (extraits bruts) présentent des effets répressifs sur la germination des graines. Ces résultats sont en accord avec tous les autres travaux antérieurs effectués sur les tests biologiques de phytotoxicité basés sur la germination et la croissance des plantes. Certains auteurs (Compaoré *et al.*, 2010; Chennaoui *et al.*, 2016) ont signalé que l'effet dépressif du compost n'est pas lié uniquement aux caractéristiques des composts, mais il est aussi en fonction des doses appliquées et le type de culture. Par ailleurs, nous pouvons signaler que cette question de doses fortes et/ou seuil peut trouver sa bonne explication dans la citation de l'alchimiste **Paracelse** [Theophrast. B 1493-1541]: «*Tout est poison et rien n'est sans poison, la dose seule fait que quelque chose n'est pas un poison*». À la lumière de cette citation, les tests de phytotoxicité peuvent également être utilisés pour la détermination des doses optimale et/ou seuil de toxicité d'un compost pour chaque culture avant tout amendement organique.

Ainsi, les indices de germination des graines d'arachide dans les deux composts produits excèdent 50 %. Donc, selon Toundou (2016), les deux composts sont non toxiques et par conséquent sont stables et mûrs (Toundou 2016).

III.3.2. Étude de la phytotoxicité des composts produits à Bujumbura.

Les tests de germination permettent d'établir d'une part, une relation entre la dose de compost et le taux de germination, et d'autre part, d'évaluer le degré de maturation du compost produit (Toundou 2016). À cet effet, les tests sont réalisés sur deux espèces de culture: graines d'arachides (A) et les graines de maïs (M) (*Zea mays*) pour cinq différentes concentrations d'extraits de composts [100 % de compost; 75 % de compost + 25 % d'eau (E_{75%}); 50 % de compost + 50 % d'eau (E_{50%}); 25 % de compost + 75 % d'eau (E_{25%}); et témoin = 100 % d'eau seule (E_{0%})].

Les résultats des tests de germination sur les graines d'arachides (A) et graines de maïs (M) (*Zea mays*) sont présentés aux **Figures 32** a, b, c et d. Dans les **Tableaux 34** & **35** sont établis les pourcentages des taux de germination (TG) et indice de germination (IG) après incubation dans un endroit sombre pendant 72 heures et à la température ambiante. L'histogramme de la **Figure 33** présente l'évolution des facteurs biologiques de toxicité en fonction des différentes concentrations des extraits aqueux des quatre composts produits à Bujumbura.

ESSAI D'OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DU COMPOST À PARTIR DU CO-COMPOSTAGE DES DÉCHETS SOLIDES MÉNAGERS ORGANIQUES AVEC LES DÉJECTIONS D'ÉLEVAGE.



(a): Germination avec incorporation des composts C1B et C2B



(b): Germination avec incorporation des composts C3B et C4B



(C1B & C2B)



(C3B & C4B)

(c): Germination pour les doses de 25 % & 50 % des composts (C1B & C2B) et (C3B & C4B)



(C1B & C2B)



(C3B & C4B)

(d): Germination pour les doses de 50 % & 100 % des composts (C1B & C2B) et (C3B & C4B)

Figure 32: Comparaison des états de germination des graines d'arachide et de maïs en fonction des doses

ESSAI D'OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DU COMPOST À PARTIR DU CO-COMPOSTAGE DES DÉCHETS SOLIDES MÉNAGERS ORGANIQUES AVEC LES DÉJECTIONS D'ÉLEVAGE.

Tableau 204: Taux de germination (TG) des graines d'arachide et graines de maïs

Dose	Compost 1		Compost 2		Compost 3		Compost 4	
	G1M(%)	G1A(%)	G2M(%)	G2A(%)	G3M(%)	G3A(%)	G4M(%)	G4A(%)
E0%	70	80	70	80	70	80	70	80
E25%	80	90	70	80	50	70	60	80
E50%	60	80	50	80	50	60	50	90
E75%	50	70	50	70	60	80	50	80
E100%	30	60	20	70	20	60	20	70

Tableau 35: Indice de germination (IG) des graines d'arachide et graines de maïs

	Compost 1		Compost 2		Compost 3		Compost 4	
	IG1M(%)	IG1A(%)	IG2M(%)	IG2A(%)	IG3M(%)	IG3A(%)	IG4M(%)	IG4A(%)
E _{0%}	100	100	100	100	100	100	100	100
E _{25%}	230,8	123,8	187,7	103,5	177,2	83,4	178,7	92,0
E _{50%}	134,9	90,7	92,5	88,7	88,3	82,7	94,6	84,0
E _{75%}	70,8	78,8	65,9	79,9	57,4	74,0	68,2	84,0
E _{100%}	11,3	71,2	6,8	62,0	3,9	56,5	8,4	69,4

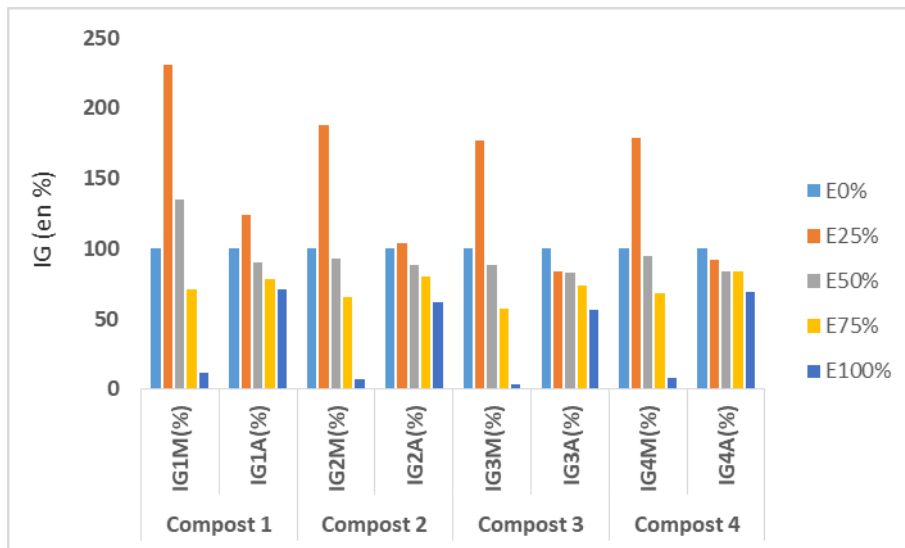


Figure 33: Test de phytotoxicité des composts obtenus avec les graines de maïs et d'arachide

L'analyse des résultats trouvés nous révèle que le taux de germination (TG) varie de 20 % à 80 % et de 60 % à 90 % respectivement pour les graines de maïs et les graines d'arachide (**Tableau 34**). L'indice de germination quant à lui varie de 3,9 % à 230,8 % et de 56,5 à 123,8 % respectivement pour les graines de maïs et celles d'arachides (**Tableau 34**). L'IG des arachides est supérieure à 50 % pour toutes les doses d'extraits aqueux des quatre composts avec

des IG élevées pour les doses de 25 % et 50 % (**Tableau 35**). La lecture des graphiques de la **Figure 33** montre que l'incorporation de la dose de 25 % de compost induit d'excellente rentabilité pour les deux cultures testées avec une sensibilité plus remarquable pour la culture de maïs (*Zea mays* L.) où les maxima d'IG relevés sont de 230,8 % (C_{1B}) et 187,8 % (C_{2B}), 177,2 % (C_{3B}) et 178,7 % (C_{4B}). Par contre, la dose de 100 % de compost se montre répressive et cela chez les deux types de semences. Toutefois, les graines de maïs sont les plus réprimées et plus spécialement pour le compost 3 où l'on enregistre la valeur la plus faible d'indice de germination de 3,9 %. Nous remarquons également que les semences de maïs sont très sensibles à l'apport du compost, car, le maximum de 230,9 % avec la dose de 25 % du compost C_{1B} et le minimum de 3,9 % avec la dose de 100 % du compost C_{3B} sont obtenus avec cette culture. Ainsi, pour la dose de 100 %, l'indice de germination est compris entre 3,9 % et 11,3 % pour le maïs et entre 56,5 % et 71,2 % pour les graines d'arachide, ce qui prouve qu'une forte dose de compost influence donc négativement la germination des graines et la croissance des plantes, et inversement, une faible dose influence positivement l'indice de germination, c'est-à-dire que ce dernier augmente avec la diminution de la dose. De plus, les résultats obtenus lors de ces expériences nous montrent que la culture d'arachide est moins sensible à la phytotoxicité des quatre composts testés. Les valeurs des rapports des IG $[(G75\% + IG 50\%)/2]$ sont toutes supérieures à 50 % ce qui témoigne la maturité et la stabilité des quatre composts testés et par conséquent, ces composts fabriqués ne présentent pas d'effets phytotoxiques aux deux types de semences sous expérimentations (Ntalani *et al.*, 2020; Toundou 2016). D'une façon générale, les indices de germination du compost 1, aux mêmes concentrations, sont relativement élevés par rapport aux trois autres composts. Les résultats des tests de phytotoxicité trouvés dans cette étude sont similaires à ceux obtenus dans d'autres travaux antérieurs (Salama *et al.*, 2016; Dieng *et al.*, 2019; Ntalani *et al.*, 2020).

III.3.3. Comparaison de toxicité des composts des deux villes à conditions climatiques différentes.

Pour évaluer les effets des conditions climatiques sur la phytotoxicité, nous avons comparé la phytotoxicité des composts produits à Dakar avec ceux de Bujumbura qui ont été produits à partir du même rapport de C/N = 30 des intrants. Ainsi, le **Tableau 36** présente la comparaison des taux de germination des quatre composts produits dans les deux régions géographiquement et climatiquement différentes. Le **Tableau 37** et la **Figure 34** présentent respectivement les valeurs et évolutions des indices de germinations des composts obtenus à Dakar et à Bujumbura. Tous ces tests ont porté sur les graines d'arachide.

Tableau 36 : Comparaison des taux de germination sur les graines d'arachide des extraits aqueux des composts produits à Dakar et à Bujumbura (C/N=30 des intrants)

Concentration des extraits	Dakar (D)		Bujumbura (B)	
	TG _{1D} (%)	TG _{1B} (%)	TG _{2D} (%)	TG _{2B} (%)
E0%	100	80	100	80
E25%	100	90	90	80
E50%	90	80	85	80
E75%	100	70	90	70
E100%	85	60	85	70

Tableau 217: Indices de germination sur les graines d'arachide des extraits aqueux des composts produits à Dakar et à Bujumbura (C/N=30 des intrants).

	Arachide			
	D25	D50	D75	D100
C1D	108,3±2,1 ^c	84,7±1	76,8±1,6 ^b	43±1,2 ^a
C1B	123,8 ±2,7 ^d	90,7 ±0,9 ^d	78,8±1,5 ^b	71,2±1,3 ^c
C2D	64,1±1,1 ^a	57,4±0,7 ^a	43,5±3,4 ^a	35,9±4,7 ^a
C2B	103,5±1,3 ^b	88,7 ±1,3 ^c	79,9±7,3 ^b	62,1±7,1 ^b
P-value	0.000	0.000	0.000	0.000

Verticalement, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes (Duncan, $p \leq 0,05$)

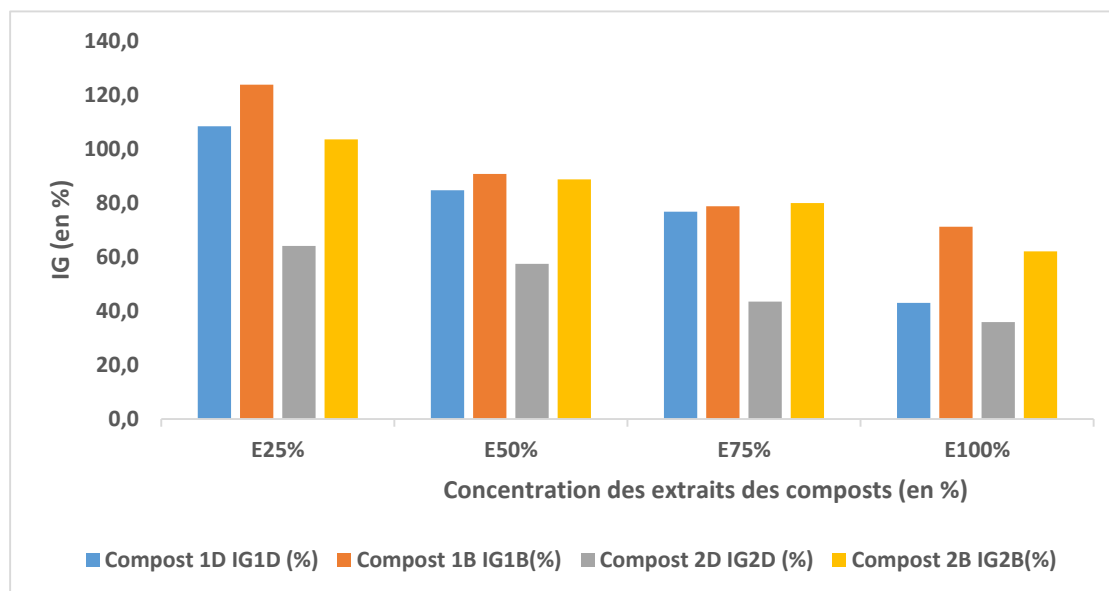


Figure 34: Évolution des indices de germination en fonction des concentrations des extraits des composts produits à Dakar et à Bujumbura

Compost 1 (avec bouses de vaches) et compost 2 (avec fientes de poules) D= Dakar; B= Bujumbura

Les maxima de taux de germination sont de 100; 90; 90 et 80 % respectivement pour les composts 1D; 1B; 2D et 2B; tandis que les minima sont de 85; 60; 85 et 70 % respectivement

pour 1D; 1B; 2D et 2B. Les résultats du **Tableau 37** nous révèlent que tous les quatre composts, indépendamment des régions, manifestent une même tendance de sensibilité quant à la phytotoxicité. En effet, les maxima sont trouvés pour les tests effectués avec la concentration de 25 % d'extraits aqueux des composts; et que les minima sont obtenus avec la concentration de 100 % d'extraits aqueux des composts. Ainsi, les taux et indices de germination les plus élevés sont obtenus aux doses de 25 % de composts chez les quatre composts et les taux et indices de germination les plus faibles sont rencontrés aux doses de 100 % pour tous les quatre composts des deux régions. Ces résultats nous permettent de conclure que l'incorporation d'une dose de 25 % donne les meilleurs taux et indices de germination quel que soit le type et origine de notre compost testé et parallèlement, la dose de 100 % est répressive et que ce phénomène répressif est plus prononcé pour le compost 2 (C2D) produit à Dakar avec comme adjuvant les fientes de poule. Toutefois, l'effet répressif n'est pas uniquement lié aux caractéristiques de celui-ci. Selon certains auteurs, l'acide acétique est probablement l'acide libéré par les composts immatures le plus préjudiciable bien qu'il en existe également d'autres composés (acétaldéhyde, éthanol, acétone, éthylène,...) contribuant aux effets phytotoxiques (Koledzi *et al.*, 2012^a). De plus, des concentrations élevées en sels et la libération d'acides organiques dans un compost sont également corrélés à l'inhibition de la germination et la croissance des plantes (Toundou *et al.*, 2017). Au regard de ces hypothèses précédentes, il ressort que nos composts trouvés étaient mûrs et ne libéraient pas d'acide acétique, car ils sont de caractères légèrement basiques (pH compris entre 8,40 et 9,60). Par contre, lors des essais expérimentaux au niveau du laboratoire, les boîtes contenant les extraits du compost 2 produit à Dakar (C2D) se desséchaient très rapidement ce qui laisse croire que ce compost a probablement une forte salinité qui pouvait induire l'effet osmotique (Bokobana *et al.*, 2017), ce qui prouve par ailleurs les effets répressifs à la dose de 75 %, dose qui est sans effet inhibiteur pour les autres composts. Les rapports $[(IG50\% + IG75\%)/2]$ pour les différents composts sont de 80,7 %; 84,7 %; 50,5 % et 84,3 % respectivement pour les composts C1D; C1B; C2D et C2B, rapport global d'IG est partout supérieur ou égal à 50 % ($\geq 50\%$). Ces résultats témoignent à la fois de la maturité, la stabilité ainsi qu'une faible concentration en substances phytotoxiques des composts expérimentés, car, dans la littérature, on indique que si le rapport $[(IG50\% + IG75\%)/2]$ est supérieur ou égal à 50 %, les composts fabriqués ont atteint la stabilité et la maturité et ne présentent pas d'effets phytotoxiques (Koledzi *et al.*, 2012^b Bokobana *et al.*, 2017; Hermeline *et al.*, 2020). Nos résultats sont conformes à ceux d'autres auteurs: Chennaoui *et al.* (2016) sur les essais de phytotoxicité menés sur les cultures de blé où ils ont révélé que l'incorporation de 25 % du compost aux supports de culture permet un taux de germination de 85 %; Dieng *et al.*

(2019) trouvent que l'incorporation de 25 % du compost au support de culture permet un taux de germination de 90 % pour le maïs contre 72 % pour l'arachide (Chennaoui *et al.*, 2016; Dieng *et al.*, 2019). Ces auteurs précédents ainsi qu'un bon nombre d'autres chercheurs (Compaoré *et al.*, 2010; Chennaoui *et al.*, 2016; Soulama *et al.*, 2020) ont conclu au cours de leurs recherches que la dose de 100 % est toxique (Compaoré *et al.*, 2010; Salama *et al.* 2016; Kaboré *et al.*, 2020). Au vu des résultats du **Tableau 37**, il apparaît que les valeurs des IG à l'intérieur des mêmes doses sont partout significativement différentes ($p < 0,05$) avec la valeur la plus élevée pour l'incorporation de la dose de 25 % du compost C1B. De cette étude, il ressort également que, comparativement aux fientes de poule, l'adjuvant bouse de vache a amélioré de façon significative la qualité et la maturité des composts produits et cela pour les deux régions (**Tableaux 36 & 37; Figure 34**).

III.4. Effets des composts produits à Bujumbura sur les paramètres agronomiques d'amarantes.

Les résultats obtenus dans les deux premiers chapitres et les sous-points précédents de ce chapitre montrent que les composts obtenus des mélanges des déchets solides ménagers et des adjuvants (bouses de vache et fientes de poules) de la ville de Bujumbura sont de bonnes qualités pour l'amendement organique. En effet, ces composts sont à la fois de caractéristiques physico-chimiques favorables et répondent aux exigences d'innocuité.

Or, les manifestations de la phytotoxicité du compost regroupent l'inhibition de la germination, le retard à la levée ou le retard de la croissance (pouvant affecter la partie entière ou seulement une partie de la plante) (M'Sadak et M'Barek. 2015). Selon Bernal *et al.* (2009), les essais de germination fournissent une image instantanée de phytotoxicité, alors qu'ils ne sont pas suffisants pour une meilleure évaluation de la phytotoxicité. Le recours aux essais de croissance affectant en continu les changements de la stabilité ou de maturité des composts examinés et divers autres paramètres indiquant le degré de maturité s'avère indispensable (Bernal *et al.*, 2009; M'Sadak et M'Barek 2013; M'Sadak et M'Barek. 2015).

L'objectif visé dans cette partie est d'établir expérimentalement la valorisation agronomique des composts produits en évaluant leurs effets sur la croissance et sur le rendement de l'amarante. Ainsi, la croissance en hauteur de la partie aérienne de l'amarante sous serre a été mesurée en fonction du temps et le rendement en biomasse (masse de la partie aérienne et masse de la partie racinaire) a été déterminé au 28^{ème} jour après repiquage dans des pots contenant des mélanges (sol + composts) dont les proportions en différents composts sont équivalentes à 0 (témoin = sol seul); 25 %; 50 %; 75 % et 100 %. Les traitements ont été

effectués dans un dispositif en blocs aléatoires complètement randomisés (DBAC) avec trois (3) répétitions pour chaque dose d'un compost et au total, **51 pots** ont été utilisés contenant chacun trois plantules équidistantes (placées aux sommets d'un triangle équilatéral). Les *Figures 35 a, b et c* présentent l'état des plants d'amarantes au repiquage, en développement et à la récolte. La variation de la hauteur de l'amarante (en cm) a été mesurée sur une périodicité de 7 jours et les résultats sont consignés dans les *Tableaux 38; 39, 40 et 41* alors que la *Figure 36* présente l'évolution périodique de la hauteur en fonction du temps. Les biomasses de la partie racinaire et la partie aérienne ainsi que le rapport de ces premières ont été déterminés et les résultats obtenus sont établis dans le *Tableau 42*.



(a): *Amarantes au repiquage*



(b): *Amarantes en développement*



(c): *Amarantes à la récolte (après 28 jours)*

Figure 35: Évolution de l'amarante du repiquage à la récolte

ESSAI D'OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DU COMPOST À PARTIR DU CO-COMPOSTAGE DES DÉCHETS SOLIDES MÉNAGERS ORGANIQUES AVEC LES DÉJECTIONS D'ÉLEVAGE.

Tableau 228: Évolution de la hauteur(en cm) et le taux de croissance de l'amarante en fonction du temps

Doses	Compost	Après 7 jours		Après 14 jours		Après 21 jours		Après 28 jours	
		H.M (cm)	T.C	H.M (cm)	T.C	H.M (cm)	T.C	H.M (cm)	T.C
0%	Témoin	9,6±2,0	1,00	11,7±2,7	1,0	13,7±2,9	1,00	14,75±2,93	1,00
25%	c1	9,4±1,51	1,0	12,1±3,2	1,0	16,6±3,5	1,21	23,45±1,81	1,58
	c2	9±2,1	0,9	11,9±1,2	1,0	15,6±1,9	1,13	20,53±2,01	1,39
	c3	9,0±2,3	0,9	11,9±0,4	1,0	16,3±1,7	1,18	18,20±2,66	1,23
	c4	10,8±1,6	1,1	14,2±2,8	1,2	18,6±3,1	1,35	20,36±2,81	1,38
50%	c1	10,5±0,6	1,1	13,4±1,4	1,1	17,1±1,0	1,24	20,52±0,98	1,39
	c2	9,0±0,8	0,9	10,9±1,6	0,9	16,7±2,3	1,22	20,14±3,46	1,36
	c3	11,0±1,4	1,2	12,3±2,3	1,1	14,9±1,7	1,08	16,86±2,21	1,14
	c4	11,3±2,2	1,2	13,4±2,4	1,1	15,7±2,4	1,14	18,20±3,01	1,23
75%	c1	10,6±1,2	1,1	11,9±0,5	1,0	14,5±1,5	1,05	16,70±2,25	1,13
	c2	8,7±0,6	0,9	9,4±0,6	0,8	10,8±0,5	0,78	11,72±1,32	0,79
	c3	9,5±1,6	1,0	10,6±1,2	0,9	12,3±0,2	0,89	13,67±1,03	0,92
	c4	10,9±1,5	1,2	12,9±2,1	1,1	14,3±1,4	1,04	17,68±1,90	1,19
100%	c1	9,9±2,3	1,0	6,9±6,2	0,6	7,03±6,1	0,51	8,83±7,71	0,60
	c2	6,9±1,1	0,7	8,3±1,3	0,7	9,7±1,8	0,70	10,65±2,88	0,72
	c3	9,6±1,3	1,0	10,7±0,5	0,9	11,4±0,5	0,83	12,05±0,49	0,81
	c4	6,7±5,8	0,7	7,1±6,1	0,6	8,4±7,5	0,67	9,50±8,59	0,64

T0 : Témoin ; H.M : Hauteur moyenne ; T.C : Taux de croissance.

Tableau 239: Tableau récapitulatif du taux moyen de croissance de l'amarante au 28^{ème} jour

Dose	C1	C2	C3	C4
0%	1	1	1	1
25%	1,6	1,4	1,2	1,4
50%	1,4	1,4	1,1	1,2
75%	1,1	0,8	0,9	1,2
100%	0,6	0,7	0,8	0,6

Tableau 40: Traitement statistique de la variation de la hauteur (en cm) en fonction du compost

Compost	C25	C50	C75	C100
C1	23.5±1.8a	20.5±0.98a	16.7±2.3ac	8.8±7.7a
C2	20.5±2.0ab	20.1±3.5a	11.72±1.3b	10.7±2.9a
C3	18.2±2.7b	16.9±2.2a	13.7±1.0bc	12.1±0.5a
C4	20.4±2.8ab	18.2±3.0a	17.7±1.9a	9.5±8.6a
p-value	0,134	0,339	0,09	0,915

ESSAI D'OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DU COMPOST À PARTIR DU CO-COMPOSTAGE DES DÉCHETS SOLIDES MÉNAGERS ORGANIQUES AVEC LES DÉJECTIONS D'ÉLEVAGE.

Tableau 241: Traitement statistique de la variation de la hauteur en fonction de la dose

Dose	C1	C2	C3	C4
D0	14.8±2.9ab	14.8±2.9a	14.8±2.9abc	14.8±2.9ab
D25	22.5±2.3b	20.5±2.0b	18.2±2.7a	20.4±2.8b
D50	20.5±1.0b	20.1±3.5b	16.9±2.2ab	18.2±3.0ab
D75	16.7±2.3b	11.7±1.3a	13.7±1.0bc	17.7±1.9ab
D100	8.8±7.7a	10.7±2.9a	12.1±0.5c	9.5±8.6a
p-value	0,014	0,002	0,031	0,104

NB: Verticalement, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes (Duncan, $p \leq 0,05$)

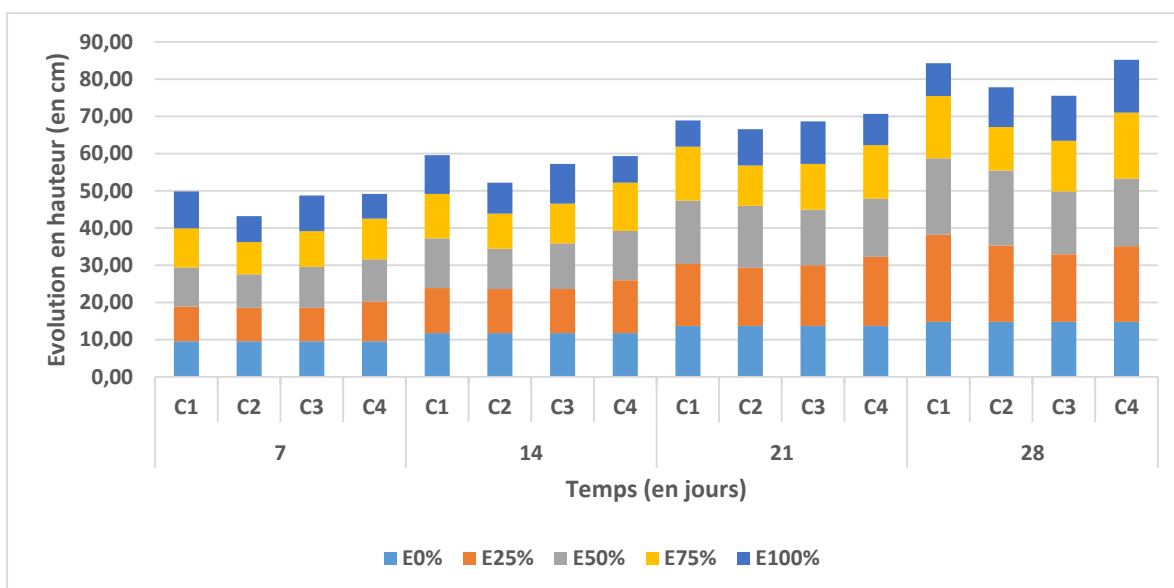


Figure 36: Évolution de la hauteur de l'amarante en fonction du temps (périodicité de 7 jours)

Tableau 252: Résultats de la biomasse végétale en fonction de la dose du compost appliquée

Doses	Compost	M.P.R(en g)	M.P.A (en g)	M.P.R/M.P.A
E0	T0	0,2±0,1	1,2±0,6	0,2±0,0
	C1	0,4±0,3	2,7±2,2	0,2±0,0
	C2	0,4±0,1	2,8±0,4	0,14±0,0
	C3	0,2±0,1	1,4±0,5	0,14±0,0
E25	C4	0,4±0,1	2,7±1,3	0,2±0,0
	C1	0,2±0,2	1,1±0,9	0,2±0,0
	C2	0,4±0,3	1,8±1,2	0,2±0,0
	C3	0,3±0,1	1,2±0,7	0,2±0,5
E50	C4	0,3±0,1	2,1±0,7	0,14±0,02
	C1	0,2±0,1	1,1±0,3	0,2±0,0
	C2	0,15±0,1	0,8±0,5	0,2±0,0
	C3	0,2±0,1	1,0±0,5	0,2±0,1
E75	C4	0,2±0,1	1,5±0,7	0,2±0,0
	C1	0,2±0,14	1,1±0,6	0,2±0,0
	C2	0,3±0,1	1±0,5	0,3±0,1
	C3	0,1±0,1	0,4±0,2	0,2±0,1
E100	C4	0,1±0,1	0,5±0,6	0,2±0,0

La variation de la hauteur des plantules ainsi que le poids de la biomasse sèche des parties aériennes et souterraines sont les paramètres suivis dans cette partie d'étude. Les résultats de l'analyse suggèrent que ces paramètres (hauteur, biomasse) qui témoignent du développement de l'amarante ont été sensibles aux traitements mis en jeu dans cette étude. Il en résulte que la taille des plantes et par conséquent la variation de la biomasse de l'amarante varie aussi bien en fonction de la dose appliquée qu'en fonction du compost concerné. Les photos des **Figures 35 a, b et c** montrent clairement les effets positifs des quatre différents composts sur la croissance de la hauteur de l'amarante, autre que la couleur vive des plantes en présence des quatre composts qui traduit une meilleure disponibilité d'éléments nutritifs (**Figure 35 c**), la biomasse aérienne comme la biomasse racinaire sont significativement plus élevées dans les pots contenant des composts avec un pourcentage plus élevé que les pots qui en sont dépourvus.

Le **Tableau 39** et la **Figure 36** qui représentent l'évolution de la hauteur montrent que cette augmentation est progressive en fonction du temps et l'effet du compost sur la longueur et le rendement de l'amarante est inversement proportionnel à l'augmentation de la dose appliquée. En effet, les résultats illustrés dans la **Figure 36** et les **Tableaux 39-42** permettent de préciser que l'effet du compost sur la croissance de l'amarante est meilleur sur le sol amendé avec les doses de 25 % (E25%) et 50 % (E50%) avec un taux d'accroissement variant jusqu'à 158 % (C1) par rapport au témoin (sol non amendé avec du compost). Par contre, les doses de 75 % et 100 % ont un taux de croissance faible et ce taux est inférieur à celui du témoin. D'une façon générale, c'est la dose de 25 % qui possède un taux de croissance élevé tandis que le plus faible taux est enregistré pour la dose de 100 %.

On constate également que les rendements augmentent de façon croissante avec l'apport de doses faibles du compost. Comme on l'observe, plus on ajoute du compost au sol, plus la croissance est moins marquée pour les deux parties aériennes et racinaires (**Tableau 38-42**).

Le poids sec total des plantes de la partie aérienne est partout supérieur à celui de la partie racinaire sans distinction de composts ni de doses (**Tableau 42**). Toutefois, les rendements en présence du compost à 25 % sont les plus importants comparativement aux autres concentrations et le cas particulier de bon rendement est observé pour la dose de 25 % du compost C1. Ce qui laisse penser que cette dose de 25 % demeure la plus satisfaisante pour améliorer la productivité du sol.

La dose de 100 %, et plus particulièrement pour les composts C3 et C4 enregistre les plus faibles rendements par rapport aux autres concentrations. Ainsi, nous pouvons nous permettre de conclure qu'il existe une nette corrélation entre les tests de phytotoxicité réalisés à partir des graines des deux cultures (graines d'arachides et graines de maïs) et les tests de croissance

réalisés sur les plants d'amarante. La dose de 25 % se montre meilleure pour le taux et indice de germination tandis que la dose de 100 % manifeste un effet répressif vis-à-vis de ces graines, et nous remarquons que ces doses produisent les mêmes effets à la culture d'amarante sous-serre.

À la fin de cette étude, le classement des traitements selon leur influence positive sur le rendement est le suivant: E25% > E50% > E0% > E75% > E100%.

Si l'on considère le traitement statistique de l'augmentation de la hauteur par rapport aux composts utilisés, on note qu'il n'existe pas de différence significative entre ces composts ($p > 0,05$). Des différences très significatives ont été observées par rapport aux doses pour les trois composts C1 ($p= 0,014$); C2 ($p=0,002$) et C3 ($p=0,031$) et par contre, l'augmentation de la hauteur du compost C4 ($p=0,104$) n'est pas significativement différente par rapport à la dose.

En faisant la comparaison des composts C1 et C2 qui ont été fabriqués à partir d'un même rapport de C/N=30 du mélange des intrants, nous observons que la dose de 25 % du compost C1, qui a les bouses de vache comme adjuvant, est d'un grand potentiel pour l'amélioration du taux de croissance par rapport à celui du compost ayant comme adjuvant les fientes de poule à la même dose (C1: 1,6 et C2:1,4). D'après, Longanza *et al.* (2015), les avantages de l'application de composts non phytotoxiques sur un système de plantes du sol sont attribués en grande partie au rapport C/N, la teneur en carbone, en éléments fertilisants présents (N, P, K, Ca, Na et Mg), mais aussi aux composés humiques notamment les acides humiques. Kaho *et al.* (2011) qui avaient mené leur étude sur l'évaluation des effets combinés des feuilles de *Tithonia diversifolia* (FTD) et des engrais inorganiques (NPK et Urée) ont montré que le taux de décomposition de la matière organique et l'augmentation des rendements étaient étroitement liés à la synchronisation entre la libération des nutriments et leur assimilation (Kaho *et al.*, 2011; Longanza *et al.*, 2015). Et selon Kitabala *et al.* (2016) ainsi que Konate *et al.* (2018); l'effet positif du compost sur la croissance végétale est dû principalement à l'amélioration de la qualité physico-chimique et biologique du sol, du rythme de diffusion des nutriments et de la capacité de rétention d'eau du sol. Ils ajoutent qu'une dose élevée du compost inhibe la croissance des plants suite à une quantité d'éléments fertilisants qui va au-delà des besoins de la culture et qui produit par conséquent une baisse de croissance et de rendement liée à l'antagonisme entre les éléments nutritifs (Tshala *et al.*, 2017; Konate *et al.*, 2018). Cet état de décomposition des matières organiques comme préalable afin de manifester des effets positifs sur les cultures a été mis en évidence également par les résultats de recherche de Kaboneka *et al.* (2020). Ces auteurs montrent que, l'application directe de la

biomasse foliaire de trois espèces agroforestières (*Calliandra calothyrsus Meisn*; *Senna siamea L. et Gliricidia sepium (Jacq) Walp*) comme engrais vert sur les graines de maïs et de haricot présente des effets négatifs sur la germination des graines, l'allongement des racines, la croissance des racines et des pousses, la biomasse des racines, des pousses et la biomasse sèche totale. Ils proposent l'alternative du co-compostage de ces espèces avec les feuilles de légumineuses pouvant jouer un effet stimulant sur la décomposition globale, la dissipation allélochimique et la libération de nutriments végétaux (Kaboneka *et al.*, 2020).

Nous pouvons signaler également que les résultats de cette étude corroborent ceux d'autres auteurs tels que: Garba *et al.* (2022); Toundou *et al.* (2020) qui notent que les plantes cultivées sur un compost fabriqué à partir des déchets verts et déchets alimentaires présentent des paramètres de croissance élevées par rapport aux plantes cultivées sur le sol témoin sans amendement. Ils ont attribué aux meilleures performances de croissance obtenues par l'équilibre ionique des nutriments dans le sol amendé avec ce compost (Toundou *et al.*, 2017; Garba *et al.*, 2022). Les résultats détaillés des traitements statistiques des variations de la hauteur et biomasse en fonction des composts et en fonction des doses appliquées sont présentés en **annexe VI**.

Sur base des effets positifs manifestés par les composts obtenus dans notre étude sur les cultures testées et en comparaison avec les résultats recueillis par d'autres auteurs, nous pouvons déduire que nos composts obtenus sont de bonne qualité et, par voie de conséquence, à dose acceptable, ces composts étudiés peuvent être retenus pour la valorisation en agriculture.

III.5. Conclusion.

Dans le but d'avoir une idée sur l'innocuité des composts produits à Dakar et à Bujumbura, quelques différents paramètres indicateurs de pollution ont été identifiés:

- i) *Les analyses des éléments traces métalliques (ETM)* ont été orientées sur sept éléments considérés comme indicateurs de pollution métallique (Cd, Zn, Cu, Mn, Pb, Ni et Co). Les résultats obtenus montrent que les concentrations en ces ETM sont inférieures aux normes limites préconisées par la norme Française NF U44-051. Ces concentrations faibles en ETM peuvent être attribuées en grande partie au tri à la source (juste à la collecte de la matière première) des déchets compostés

- ii) *La caractérisation bactériologique* a été faite sur les adjuvants utilisés et les composts fabriqués à Dakar et à Bujumbura. Les modifications observées au cours du compostage apportent de nombreuses informations qualitatives sur les populations microbiennes présentes,

de leurs profils métaboliques et de leur succession. Les résultats d'analyses microbiologiques montrent que les microorganismes contenus dans les adjuvants étaient en quantité satisfaisante pour booster les déchets compostés et à la maturité, ces microorganismes ont subi des abattements de telle manière qu'ils ont été ramenés à des concentrations estimées faibles et permettant de classer les composts fabriqués dans la catégorie de bonne qualité, c'est-à-dire qu'ils sont sans danger pour la santé des êtres vivants et l'environnement.

- iii) *L'évaluation des caractéristiques biologiques* ont porté sur le taux et l'indice de germination sur les graines d'arachides (Composts de Dakar et de Bujumbura) et les graines de maïs (pour les composts de Bujumbura). Les résultats montrent que le taux et indice de germination varie avec les doses d'extraits de compost et avec le type de culture. Les taux et indices de germination les plus significatifs ont été obtenus avec la dose de 25 %. Les graines de maïs sont les plus sensibles par rapport aux graines d'arachide. En effet, pour cette culture de maïs, une valeur minimale d'IG de 3,9 % est obtenue avec un extrait de 100 % du compost C3 tandis que la valeur maximale de 230,8 % étant remarquée avec la dose d'extrait de 25 % du compost C1. Par contre, les IG pour les graines d'arachide sont partout supérieurs à 60 % avec une valeur maximale de 123,8 % pour la dose de 25 % de l'extrait du compost C1B (compost fabriqué à Bujumbura). Dans la littérature, un IG moyen $((IG_{50\%} + IG_{75\%})/2)$ supérieur ou égal à 50 % est celui d'un compost sans effets phytotoxiques (Loubna 2014; Toundou 2016; Ntalani *et al.*, 2020). Les résultats des tests effectués révèlent que les composts produits n'ont pas d'effets phytotoxiques et peuvent être utilisés comme amendement organique pour la fertilisation des sols.

- iv) *Les tests agronomiques* ont montré que les différents composts produits à Bujumbura (les seuls testés) à différentes proportions agissent comme des amendements organiques améliorant de façon importante la fertilité du sol. Comme pour l'indice de germination, les meilleurs taux de croissance et rendements en biomasse aérienne sont obtenus dans les pots contenant des proportions de 25 % en compost et plus particulièrement pour les composts qui ont comme adjuvants bouses de vache. Ainsi, tous les paramètres analysés montrent que les composts produits militent en faveur de l'amélioration de la fertilité du sol et de l'obtention de bons rendements de cultures et plus spécifiquement une bonne rentabilité de l'amarante.

CONCLUSION GENERALE.

Ce travail de recherche doctorale avait pour objectif général de contribuer à l'amélioration de la qualité sanitaire et environnementale en réduisant les risques associés à la gestion actuelle des DSM dans la ville de Bujumbura par «**Essai d'optimisation de la production du compost à partir du co-compostage des déchets solides ménagers avec les déjections d'élevage**». La recherche bibliographique a été abordé et les résultats de cette recherche nous ont révélés que la gestion des déchets est un problème crucial pour tous les pays et plus particulièrement ceux en voie de développement caractérisés par une croissance démographique galopante et une extension continue (quelquefois de façon anarchique) de l'espace occupé de leurs villes. En effet, à l'instar des grandes villes africaines, Bujumbura est envahie par d'immenses quantités de déchets ménagers produits par sa population. Alors que la gestion des déchets ménagers est un service de proximité dont la responsabilité incombe à la municipalité, à Bujumbura, cette responsabilité a été transférée aux associations privées. Ces dernières, avec leurs moyens rudimentaires, la collecte et l'élimination de ces déchets est accomplie d'une façon partielle. En effet, ces associations collectent (sans tri préalable) et évacuent les déchets générés dans les quartiers des plus nantis (étant capables de payer le service) tout en ignorant les quartiers dits populaires (pauvres) où pourtant les densités élevées de population conduisent à la production de quantités importantes de déchets. Les ménages de ces quartiers non desservis par ces services de collecte, par ignorance et incivisme, déversent leurs déchets dans des endroits non appropriés (les rues, les abords des caniveaux, bordures des rivières, aux alentours, des bâtiments non achevés, ...), et ces montagnes d'immondices visibles partout constituent un ornement déplaisant pour tout passant. Signalons également que ces dépôts des déchets dans ces différents lieux non conventionnels et non officiels provoquent des nuisances de tout genre: dégradation des conditions de vie et de la santé de la population, pollution de l'environnement (eau, sol et air). L'exemple évident de pollution est le cas du Lac Tanganyika, source d'eau potable pour tous les habitants de la ville, qui reçoit une quantité importante et variée de déchets charriés par les rivières qui traversent la ville. Une meilleure gestion des déchets à Bujumbura doit passer par un vrai Partenariat –Public-Privé (PPP), élaboration de textes réglementaires bien clairs avec une mise en application rigoureuse ; tout en abandonnant les méthodes simplistes qui se contentent de la pratique de l'élimination des déchets hors de la vue. Même les collecteurs officiels profitent du laisser-aller actuel pour évacuer les déchets dans des décharges sauvages situées hors de la ville sans se soucier des conséquences néfastes de ces déchets au niveau de l'écosystème. De cette recherche bibliographique, nous avons pu découvrir qu'une bonne

gestion des DSM est synonyme d'exploitation d'une «**mine d'or biologique (précieux minéral) qui gît dans les ordures en poubelles**» et le terme «**ordure**» pouvant être substitué par «**or-dur (biologique)**».

Au vu des résultats d'autres chercheurs et de la caractérisation des DSM, la technique de compostage en andain aéré apparaît comme la plus simple et rentable pour le traitement de la fraction fermentescible des déchets solides ménagers des villes de Bujumbura et Dakar. Par ailleurs, cette technique permet l'optimisation de la production et de la qualité du compost produit. Ainsi, au cours de notre expérimentation, des analyses de caractérisation physico-chimiques des intrants nous ont permis de confirmer que ces déchets sont mieux indiqués au traitement par compostage. Par la suite, les proportions des mélanges de DSM additionnés d'adjuvants de déjection d'élevage (bouses de vache et fiente de poule) ont été calculées sur base des rapports C/N du mélange des intrants. Le suivi du processus de compostage, les caractérisations physico-chimiques, biologiques et agronomiques des composts finaux ont mis en évidence un état de décomposition et de qualité similaires pour tous les composts fabriqués dans les deux régions (villes de Bujumbura et ville de Dakar).

Au cours du processus, les températures maximales atteintes varient entre 64,5°C à 70,5°C pour les quatre composts produits à Bujumbura (au troisième jour) et sont de 66,6°C et 69,3°C pour les deux composts produits à Dakar (après le deuxième jour). Cette élévation de température induit par la forte activité des microorganismes produit une hygiénisation des matières premières, phénomène qui a été favorisé et accéléré par l'ajout d'adjuvants et création des conditions optimales du procédé, notamment les retournements hebdomadaires et réguliers ainsi que l'arrosage. Les résultats d'analyse des composts produits montrent d'une part, que la valeur de MO et C/N ont diminué ce qui témoigne une forte minéralisation des intrants, et d'autre part, une concentration apparente des éléments minéraux (N, P, K,...). Les valeurs de pH en fin du processus, dans les composts sont moyennement basiques : Ces valeurs sont comprises entre 7,9 - 8,8 pour les composts de Bujumbura et entre 9,5 - 9,6 pour ceux de Dakar. On note que les valeurs des paramètres chimiques indicateurs de maturité et de stabilité des six composts (produits à Bujumbura et à Dakar) rentrent toutes dans les gammes préconisées par les normes: M.O (32,8 % - 46,5 %) < 50 %; C/N (12,6 - 16,5) < 20; COT (15,2 – 17,7) et les mêmes observations sont faites pour les valeurs fertilisantes NPK < 7 %. Les résultats d'analyse des ETM (Cd, Zn, Cu, Mn, Pb, Ni et Co) révèlent que leurs teneurs sont largement inférieures aux normes internationales quel que soit le type de compost considéré, ce qui trouve sa justification principale dans le tri à la source des matières compostées. L'utilisation agronomique de composts urbains requiert la validation de leur efficacité agronomique, mais

surtout l'assurance de leur innocuité environnementale et sanitaire. Les analyses microbiologiques ont été réalisées sur les adjuvants et sur tous les composts produits. Les résultats de ces analyses montrent que dans l'ensemble, les microorganismes présents dans les adjuvants ont diminué considérablement en concentration pendant le processus de compostage sous l'effet de la chaleur (phase thermophile) et certains ayant même disparu complètement, ce qui met en exergue une bonne hygiénisation du compost ainsi produit.

La phytotoxicité est une particularité des composts qui permet d'évaluer leur maturité en jugeant de l'absence de préjudices pour la plante. Les tests de germination ont été réalisés sur deux espèces de cultures: les graines d'arachide et celles de maïs. Tous les six composts ont eu un IG [indice moyen ((IG50% + IG75%)/2)] qui excède 50 % pour les deux types de semences, donc, ces résultats témoignent de la maturité des composts et de leur faible concentration en substances phytotoxiques. Signalons l'avantage éminent que la germination est négativement corrélée avec l'augmentation de la dose du compost, avec une répression qui est plus prononcée à la dose de 100 % et plus particulièrement pour la culture de maïs (IG = 3,9 %). Les quatre composts fabriqués à Bujumbura ont en général amélioré les paramètres agronomiques par rapport au témoin. En ce qui concerne la croissance en hauteur de l'amarante, les plantes cultivées sur les composts C1 ; C2 et C4 présentent des valeurs les plus élevées [158 % (C1) ; 139 et 138 % (C2 et C4)] par rapport au témoin. Sans distinction de type de compost, les doses de 25 % (E25%) et 50 % (E50%) manifestent une meilleure performance de croissance, tandis que les doses de 75 % et 100 % ont un taux de croissance faible par rapport au traitement témoin (sol seul). Aux doses acceptables, les plantes cultivées sur le compost C1 enregistrent les meilleures performances en biomasses (aérienne et racinaire) par rapport aux trois autres composts, avec un rendement plus élevé à la dose de 25 %. Nous signalons également que les résultats sur des tests de phytotoxicité (sur les graines d'arachide et celles de maïs) et sur les tests agronomiques (croissance de l'amarante) sont nettement corrélés entre-eux.

À toutes propriétés réunies (physicochimiques, microbiologiques, biologiques et agronomiques), tous les six composts fabriqués sont mûrs et de bonne qualité agronomique.

Toutefois, les composts de rapport C/N = 30 du mélange des intrants (composts C1B-C2B et C1D-C2D) ont donné des résultats supérieurs aux autres de rapports C/N=35 et C/N=25, mais les composts qui ont comme adjuvant bouses de vaches se classent devant ceux ayant comme adjuvant les fientes de poules. De plus, sur base des résultats de caractérisation des composts produits à Dakar et ceux fabriqués à Bujumbura (de même rapport de C/N = 30), nous pouvons nous permettre de tirer la conclusion qu'avec les méthodes similaires et aux mêmes conditions optimales de compostage, les conditions climatiques influent uniquement sur la cinétique de

minéralisation et non sur la qualité du compost produit. Bien qu'elle soit préliminaire, cette étude a prouvé que le compostage pourrait contribuer à la bonne gestion des DSM qui est quasi-inexistante dans la ville de Bujumbura. Dans la région de Dakar, le taux de collecte était de 60%. La taxe d'enlèvement des ordures ménagères est la contrepartie d'une prestation de service rendue par les services communaux aux propriétaires immobiliers, collectée par le trésor au profil des communes. En 2020, le taux maximum de la taxe était fixé à 3,6 % pour la ville de Dakar et 3 % pour les autres communes du Sénégal (Sghaier, 2020). Les composts fabriqués pourraient permettre à la fois à l'amélioration des propriétés physico-chimiques et biologiques des sols (par leur grand potentiel pour l'amélioration de la disponibilité des éléments nutritifs de sols) et par conséquent à l'augmentation durable des productions agricoles. Nous trouvons également que ces composts pourraient constituer une alternative à l'utilisation des engrais chimiques, car, non seulement que ces derniers coûtent chers, mais ne sont généralement efficaces que les premières années d'apports continus, et qu'après quelques années, on constate une baisse de rendement à cause de la dégradation des propriétés des sols.

La connaissance du gisement des déchets solides ménagers de la ville de Bujumbura, leurs caractérisations typologiques et qualitatives (composition élémentaire) en fonction des standing et des saisons, constitue la première étape dans la mise en œuvre d'une filière efficace et pérenne de gestion des déchets générés dans cette ville. Cette étude contribuera, non seulement à la réduction du flux de ces déchets, mais, après un tri à la source, permettra également la valorisation agronomique par compostage de la part organique fermentescible et la récupération et valorisation des recyclables en l'occurrence des briquettes avec les papiers-cartons ou les pavés avec les plastiques.

Le compostage à domicile est aussi une pratique à envisager pour gérer les DSM. En Effet, en plus d'être facile, à condition d'avoir les informations nécessaires, cette technique permet de gérer des économies pour les ménages et leurs municipalités en réduisant les quantités de déchets à collecter et à transporter vers les décharges et les coûts qui y sont associés. Cela doit aider à l'amélioration de la propreté urbaine tout en apportant une plus-value économique à la mise en place des conditions du développement durable.

De même, une étude approfondie de l'impact des déchets solides ménagers sur les eaux du lac Tanganyika s'avère nécessaire.

Références Bibliographiques.

- Abaker M. G., 2019. "Suivi de maturation de composts mixtes par spectrométrie d'absorption et de fluorescence UV-Visible". *Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (France)*: 224 p.
- Abdelhamid M. T., Takatsugu H. et Shinya O., 2004. "Composting of rice straw with oilseed rape cake and poultry manure and its effects on faba bean (*Vicia Faba L.*) growth and soil properties." *Bioresource Technology* 93(2): 183–189.
- Achour F., 2008. "Caractérisation de la matière organique dans les ordures ménagères. recherche d'indicateurs de stabilité. *Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (France)*: 175 p
- ADEME, 1999. "Les installations de stockage de déchets ménagers et assimilés": Techniques et recommandations. ADEME Éditions, Paris, 106 p.
- Adouby K, Trokourey A. et Yao B., 2010. "Cadmium , Copper , Lead and Zinc Speciation in Contaminated Soils." *International Journal of Engineering Science and Technology* 2(4): 802–812.
- AFNOR, 1996. "Dchets: "Caracterisation d'un echantillonde dechets menagers et assimilees." Eds AFNOR, 24 pages.
- AFNOR, 2006. "Amendements organiques-Dénominations, spécifications et marquage." *Nfu44-051*: 1–15.
- AFNOR: NF U44-051/A2, 2018. "Amendements organiques-Dénominations, spécifications et marquage." Association Française de Normalisation (AFNOR): 12 p
- Aharchaou I., 2017. "Écototoxicité et bioaccumulation du Cr (III) et Du Cr (VI) : Spéciation , biodisponibilité et effets biologiques". *Thèse de doctorat ,Université de Lorraine (France)*: 318 p.
- Aina M. P., 2006. "Expertises des centres d'enfouissement techniques de déchets urbains dans les PED: Contribution à l'élaboration d'un guide méthodologique et à sa validation expérimentale sur sites". *Thèse de Doctorat, Université de Limoges (France)*: 236 p.
- Akpo S. K., Yeo E. N., Allali-Mangoua C. L. et Amani R. G., 2021. "Gestion intégrée des ordures ménagères dans le District d' Abidjan en Côte d' Ivoire : Cas des communes de Port-Bouët et Treichville." *International Journal of Innovation and Applied Studies* 31 (2): 249-257.
- Albrecht R., 2006. "Co-Compostage de Boues de Station d'épuration et de déchets verts : Nouvelle méthodologie du suivi des transformations de la matière organique." Thèse de

- doctorat, Université Paul Cézanne (France): 190 p.
- Alomar K., 2016. "Synthèse , caractérisation structurale de complexes de thiosemicarbazones , semicarbazones et oximes mono et bifonctionnelles d ' aldéhydes thiophéniques avec des métaux de transition . Etude de propriétés biologiques" *Thèse de doctorat, Université d'Angers (France): 298 p.*
- Aloueimine S. O., 2006. "Méthodologie de caractérisation des déchets ménagers à Nouakchott (Mauritanie): Contribution à la gestion des déchets et outils d'aide à La décision." *Thèse de doctorat, Université de Limoges (France): 195 p.*
- Aloueimine S., Matejka G., Zurbrugg C. et Mohamed M. S., 2021. "Caractérisation des ordures ménagères à Nouakchott." *dechets-sciences-techniques* 60(44): 1-7.
- Amir S., 2005. "Contribution à la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage : Devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost." *Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (France): 341p.*
- Aylaj M. et Lhadi E. K., 2008. "Evaluation de la stabilité et la maturité des composts obtenus par biodégradation aérobie d'un mélange de déchets ménagers et de déchets de poulets." *Déchets sciences et techniques* (50): 26–32.
- Babalola A., Ishaku H. T, Busu I. et Majid M. R., 2010. "The Practice and Challenges of Solid Waste Management in Damaturu, Yobe State, Nigeria." *Journal of Environmental Protection* 01(04): 384–388.
- Bachelart J., 2021. "Etude De l'étape de Fermentation d'un procede de co-compostage de boues en steu : diagnostic par mesures experimentales et modelisation numerique." *These de Doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour (France): 238 p.*
- Bahers J.B., 2012. "Dynamiques des filières de récupération-recyclage et écologie territoriale : L'exemple de la filière de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) en Midi-Pyrénées." *thèse de doctorat, Université de Toulouse (France): 492 p.*
- Bangoura M. R., 2018. "Gestion des déchets solides ménagers et ségrégation socio-spatiale dans la ville de Conakry." *thèse de doctorat, Université de Toulouse (France): 560 p.*
- Bareau H., 2012. "Faire Son Compost." *Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME)* 7374: 1-13.
- Bello I. A. , Ismail M. N. et Kabbashi N. A., 2016. "Solid Waste Management in Africa: A Review". *International Journal of Waste Ressources.* 6(2): 4–7.
- Ben Ammar S., 2006. "Les enjeux de la caractérisation des déchets ménagers pour le choix de traitements adaptés dans les pays en développement: Résultats de la caractérisation dans le Grand Tunis mise au point d'une méthode adaptée." *Thèse de doctorat, Université de*

Lorraine (France): 324 p

- Ben Ammar S. et Fouilly B., 2008. "Situation des déchets dans les pays en développement et enjeux de leur caractérisation." *Techniques Sciences Methodes* (4): 97–108.
- Benjamin J., 2019. "Effet de trois types de composts et fertilisants chimiques sur la croissance et le rendement de la courgette (*Cucurbita Pepo* L.) dans des sols basaltiques et calcaires à la commune de Kenscoff, Haïti.": 63 p <http://lib.uliege.be> <https://matheo.uliege.be>.
- Bennama T., 2016. "« Les bases de traitement des déchets solides »." *Notes de cours, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran « Mohamed Boudiaf » (Algérie)*: 85 p.
- Bernal P. M., Navarro A. F., Sanchez-Monedero M. A., Roig A. et Cegerra J., 1998. "Influence of sewage sludge compost stability and maturity on carbon and nitrogen mineralization in soil." *Soil Biology and Biochemistry* 30(3): 305–313.
- Bernal P. M., Albuquerque J. A., Moral R., 2009. "composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment." *Bioresource technol.* 100(22): 5444-5453.
- Biaou C. I., Sidonie. H., Rodrigue C. L. et Boko.M., 2019. "Impact des décharges sauvages des déchets solides sur les sols à Cotonou." *European Scientific Journal ESJ* 15(30).
- Biekre A. H., Tie B. T. et Dogbo D. O., 2018. "Caractéristiques physico-chimiques des composts à base de sous-produits de ferme de Songon en Côte d'Ivoire." *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 12(1): 596.
- Bigumandondera P., 2014. "Étude de l' assainissement non collectif en Afrique Subsaharienne : Application à la ville de Bujumbura." *Thèse de doctorat, Université de Liège (Belgique)*: 276.
- Bodjona M. B., Kili K. A, Tchegueni S., Kennou B., Tchangbedji G. et El Meray M. E., 2012. "Évaluation de la quantité des métaux lourds dans la décharge d'Agoè (Lomé-Togo): Cas du Plomb, Cadmium, Cuivre, Nickel et Zinc." *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 6(3): 1368–1380.
- Bokobana A., Toundou O., Kolani L., Amouzouvi A. A., Koledzi E., Tozo K. et Tchangbedji G., 2017. "Traitement de déchets ménagers par co-compostage avec la légumineuse *Cassia Occidentalis* L. et quelques adjuvants de proximité pour améliorer la qualité agronomique de composts." *Déchets sciences et techniques* (73): 14.
- Bouallegue M. M., 2010. "Des métaux dans les boues de stations d'épuration ? Conséquences, origines et prévention." *SYNTHESE TECHNIQUE, AgroParisTech* (33): 1–17.
- Bromblet et Somaroo G., 2015. "Analyse synthétique des retours d'expérience sur les techniques de compostage dans les pays en développement." *Déchets sciences et techniques* (70): 19–28.

- Btissam M., Amina O. T. et Allal D., 2013. " Isolement et identification de la mycoflore du compost des déchets urbains solides." *Nature & Technologie* (09): 1-16
- Castaldi P., Silveti M., Enzo S. et Deiana S., 2011. "X-Ray Diffraction and Thermal Analysis of Bauxite Ore-Processing Waste (Red Mud) Exchanged with Arsenate and Phosphate." *Clays and Clay Minerals* 59(2): 189–199.
- CEFREPADE., 2008. "Compostage des déchets ménagers dans les pays en développement : Modalités de mise en place et de suivi d' installations décentralisées pérennes." *Ouvrage rédigé collectivement par les experts du Centre Francophone de Recherche Partenariale sur l' Assainissement, les Déchets et l' Environnement*: 1–65.
- CEFREPADE., 2012. "Compostage des déchets ménagers dans les pays en développement : Modalités de mise en place et de suivi d'installations décentralisées pérennes". *Ouvrage rédigé collectivement par les experts du Centre Francophone de Recherche Partenariale sur l' Assainissement, les Déchets et l' Environnement*: 57 P.
- Chantou T., 2012. "Identification des indicateurs de stabilisation des déchets solides urbains et validation sur un site de PTMB Français, pour une application en Tunisie." *Thèse de doctorat, Université de Limoges (France) en co-tutelle avec l'École Nationale d'Ingénieurs des SFAX (Tunisie)*: 290 p.
- Charnay F., 2005 "Compostage des déchets urbains dans les pays en développement : Élaboration d'une démarche méthodologique pour une production pérenne de ompost." *Thèse de doctorat, Université de Limoges (France)*: 229 p.
- CHENITI H., 2014. "La gestion des déchets urbains solides : Cas de la ville d'Annaba." *Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba (Algérie)*: 136 p.
- Chennaoui M., Salama Y., Makan. A et Mountadar M., 2016. "Compostage en cuve des déchets ménagers et valorisation agricole du compost obtenu." *Algerian Journal of Arid Environment* 6(2): 53–66.
- Chennaoui M., Salama Y., Makan A. et Mountadar M., 2016. "Valorisation agricole d'un compost produit à partir du compostage en cuve des déchets municipaux." *European Scientific Journal* 12(35): 247-265 p.
- Christian P. R., Ignace R. et Rijalalaina R., 2020. "Effet de l'application du compost d'alambics de brousse sur le rendement du riz pluvial (*Oryza Sp*) cultivé sur le flanc de colline d'Ambohimafaso (Madagascar)." *Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture* 3(4): 69–75.
- CICR., 2011." *Manuel de gestion des déchets médicaux*": 164 p. www.cicr.org.
- Citeretse L., 2008. "Les déchets ménagers solides de la ville de Bujumbura (Burundi): Quelles

- perspectives pour une gestion durable ?” Mémoire de master, *Université libre de Bruxelles, Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire*: 78 p.
- Compaoré E. et Nanéma L. S., 2010. “Compostage et qualité du compost de déchets urbains solides de la ville de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.” *Tropicultura* 28(4): 232–237.
- Compaoré E., S. Nanéma L. S., Bonkougou S. et Sédogo M. P.; 2010. “Évaluation de la qualité de composts de déchets urbains solides de la ville de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso pour une utilisation efficace en agriculture.” *Journal of Applied Biosciences* 33: 2076–2083.
- Cotelle S., 1999. “Etude de la génotoxicité de matrices complexes à l'aide de plantes supérieures.” *Thèse de doctorat, Université de Lorraine, METZ (France)*: 258 p.
<https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>.
- Cucchiella F., Adamo I. et Gastaldi M., 2017. “Sustainable waste management: waste to energy plant as an alternative to landfill.” *Energy Conversion and Management* 131: 18–31.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.012>.
- Dahani I. et Compaoré G., 2021. “Ville durable : Ouagadougou , capitale du Burkina-Faso en Afrique.” *Collection THESE /SYNTHESE, 2021* 1(2): 30.
- Debornes L., Hours V., et Chambolle J., 2017. “L'économie verte au service du développement durable de l'Afrique.” *Afrique Durable 2030-Africa 21*. <Http://Www.Africa21.Org>.
- Denes J., 2017. “Modélisation couplée des phases de traitement par compostage et de recyclage agricole des matières organiques.” *Thèse de doctorat, Université Européenne de Bretagne-Agrocampus Ouest (France)*: 231 p.
- Diarrassouba B., Vei K. N. et Kouakou K. S., 2018. “Assainissement liquide et pluvial en milieu urbain: État des lieux et perspectives à M'Bahiakro (Côte d'Ivoire).” *Revue Ivoirienne de Géographie des Savanes (RIGES)* N° 4: 229-245.
- Dieng M., Diedhiou A. S. et Sambe F. M., 2019. “Valorisation par compostage des déchets solides fermentescibles collectés à l'Ecole Supérieure Polytechnique de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar: Etude de l'effet phytotoxique sur des plants de maïs et d'arachide.” *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 13(3): 1693-1704.
- Dixit V., Pandey V. et Shyam R., 2002. “Chromium ions inactivate electron transport and enhance superoxide generation in vivo in Pea (*Pisum Sativum* L. Cv. Azad) Root Mitochondria.” *Plant, Cell and Environment* 25(5): 687–693
- Effebi K R., Ballet T.G., Koné T., Touré M. et Kouakou A., 2017. “Évaluation de la gestion des déchets solides dans la commune de Treichville , Côte d'Ivoire.” *Afrique Science* 13(3): 206–216.
- Ekmekçioğlu, M., Kaya, T. et Kahraman C., 2010. “Fuzzy Multicriteria Disposal Method and

Site Selection for Municipal Solid Waste.” *Waste Management* 30 (9): 1729–1737.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.02.031>.

- Farinet J. L., 2009. “Fabrication du compost : de l’ industriel à l’ artisanal.” *Atelier de réflexion sur la valorisation agricole des ressources organiques locales, Guadeloupe(France) du 03-09-Déc-2009: 40 p*
- Farinet J. L.; 2013. “Transformation des déchets pour leur valorisation agricole.” *Centre de Coopération en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) (FRANCE): 14 p. https://Agritrop.Cirad.Fr/569909/2/Document_569909.Pdf:*
- Favérial J., 2016. “Compostage et vermicompostage des effluents d'élevage. Une alternative durable pour le recyclage des déchets d'origine animale.” *Thèse de doctorat, Université des Antilles (France): 163 p.*
- Folléa V., Brunet F., Benrabia N., Bourzai M. P. et Patrick F., 2002. “Revue comparative des modes de gestion des déchets urbains adoptés dans différents pays de la ZSP.” *Compte-rendu de la réunion thématique du 27 juin 2002 (France) (33): 1–23.*
- Francou C., 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.” *Thèse de doctorat ,Institut National Agronomique Paris-Grignon (France): 289 p.*
- Garba O., Mella M. T., Addam-Kiari, S., Hamissou M., Grema I. et Zanguina A., 2020. “Valorisation de glume de mil et balle de riz par compostage : Caractérisations physico-chimiques des composts.” *Afrique Science* 17(4): 29–38.
- Garba O., Zanguina A., Mella M. T., Addam Kiari S. et Saidou I. M., 2022. “Etude de l'efficacité agronomique de composts de déchets de récolte sur deux cultures maraichères : la tomate et la laitue.” *IOSR Journal of Applied Chemistry* 15(8): 68–77.
- Gnimassoun E. K., Ettien J. B. et Masse D., 2020. “Caractérisation des propriétés physico-chimiques et chimiques d'un compost issu d'un mélange de rafles de palmier et de fientes de volaille au Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire.” *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 14(1): 289–305.
- Grissa H., 2017. “Gestion organique des sols et compostage.” *Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO): 62 p.*
- Guardia A., 2018. “Compostage et composts. Avancées scientifiques et techniques.” *Lavoisier, Tec & Doc, Paris, ISBN: 978-2-7430-2359-1: 26 p.*
- Guedira A., Lamhamedi M. S., Satrani B., Boulmane M., Serrar M. et Douira A., 2012.

- “Valorisation Des Matières Résiduelles et de La Biomasse Forestière Au Maroc : Compostage et confection de substrats organiques pour la production de plants forestiers.” *Nature et Technologie* (07): 87- 95.
- Guermoud N. et Addou A., 2014. “Étude et caractérisation des déchets ménagers de la ville de Mostaganem (Ouest-Algérie).” *Environnement, Ingénierie & Développement* (66): 45–50.
- Hafidi M., 2015. "L'impact et la gestion des déchets solides". *Région de Marrakech-Safi (Maroc)*: 104 p.
- Herihajaniavo A. M., Sambe F. M., Dieng M., Andrianary P. A. et Mar Diop C., 2016. “ Identification des bactéries du compostage des déchets putrescibles de l'École Supérieure Polytechnique de Dakar. Évolution des Coliformes fécaux (C.F.), *Escherichia coli* (*E. coli*), bactéries anaérobies sulfito-réductrices (ASR), *Pseudomonas aeruginosa* (*Pseudo. a*) au cours de la phase thermophile.” *Afrique Science* 12(6): 130–136.
- Houot S., Cambier P., Deschamps M., Benoit P., Bodineau G., Nicolardot B., Morel C., Lineres M., Bissonnais Y. et Steinberg C., 2020. “Compostage et valorisation par l'agriculture des déchets urbains.” *Innovations Agronomiques* 5: 69-81.
- Ihihi A.; Kitane M.; Lakhtib I.; Bahloul A.; Benqulilou C et El Kacemi K.; 2014. "Fabrication d'un nouveau compost équilibré à partir de la partie fermentescible des ordures ménagères et de la fiente de poulet". *Scientical Editions Mersenne* 1(1312): 1-13
- Ilunga T. H., Banza M. J., Lukusa M. L., Mukunto K. I., Kanyenga L. A. et Nyembo K., 2019. “Influence du moment d'application du NPK sur la croissance et le rendement du maïs (*Zea Mays* L.) installé sur un ferralsol.” *Journal of Applied Biosciences* 127: 12794-12803.
- ISTEEBU., 2016. “Annuaire statistique du Burundi 2015.” *Bujumbura-Burundi* (80): 285 p.
- ISTEEBU., 2017. “Projections démographiques 2010-2050. Niveau national et provincial.” *Bujumbura-Burundi*: 53 p.
- Jaglin S., Debout L. et Salenson I., 2019. "Du rebut à la ressource: Valorisation des déchets dans les villes du Sud. *Agence Française de Développement*: 131 p. <http://editions.afd.fr/>
- Directeur
- Jaouadi W., Hamrouni L., Souayah N. et Khouja L. M., 2010. “Étude de la germination des grains d'Acacia Tortilis sous différentes contraintes abiotiques.” *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment* 14(4): 643–652.
- Jung C G., 2013. “Voies de traitements de déchets solides : Valorisation matière et énergie.” *Bulletin scientifique de l'Institut national pour l'environnement et la conservation de la nature* 12: 50–54.

- Kabil E. M., Semlali L. A., Aajjane A. et Assobhei O., 2016. "Phytotoxicité de composts obtenus par compostage accéléré sur des plantes cultivées dans la région des Doukkala, Maroc." *Journal of Materials and Environmental Science* 7(12): 4828–4838.
- Kaboneka S., Nsavyimana G., Nkurunziza M. et Ntezukwigira G., 2020. "Allelopathic effects of *Calliandra calothyrsus* Meisn, *Senna siamea* L. and *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp leaves on Maize (*Zea Mays* L.) and Bean (*Phaseolus Vulgaris* L.) root and shoot growth." *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering* 06(02): 47–59.
- Kaho F, Yemefack M., Feujoy-Teguefouet P. et Tchanchaouang J C., 2011. "Effet combiné des feuilles de *Tithonia diversifolia* et des engrais inorganiques sur les rendements du maïs et les propriétés d'un sol ferrallitique au centre Cameroun." *Tropicultura* 29(1): 39–45.
- Kanté A., 2019. "Gestion des déchets issus du marché de Banankabougou dans la commune VI du district de Bamako. *Thèse de doctorat, Université des sciences des techniques et des technologies de Bamako* (Mali):88 p."
- Kaza S., Yao L. C., Bhada-Tata P. and Van Woerden F., 2018. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050: 30 p.*
- Koledzi, K. E., 2011. "Valorisation des déchets solides urbains dans les quartiers de Lomé (Togo): Approche méthodologique pour une production durable de compost." *Thèse de doctorat, Université de Limoges (France): 224 p*
- Koledzi K. E, Baba G., Feuillade G. et Matejka G., 2011. "Caractérisation Physique des déchets solides urbains à Lomé au Togo, dans la perspective du compostage décentralisé dans les quartiers." *Déchets Sciences et Techniques* 2851: 10 p.
- Koledzi K. E., Baba G., Segbeaya N., Tchchangbedji G., Kili K., Tozo K., Gnandi K., Amouzouvi A. A., Feuillade G. et Matejka G., 2011. "Valorisation des déchets urbains en agriculture : Étude d'impact écologique de composts." *J. Soc. Ouest-Afr. Chim* 32: 27–42. <http://www.soachim.org>.
- Koledzi K. E, Baba G., Tchakpedeou C., Segbeaya K. N., Koriko M., Tcheguëni S., Matejka G. et Tchchangbedji G., 2012^a. "Dynamique d'activité des composts: cinétique de minéralisation de la matière organique biodégradable." *European Journal of Scientific Research* 81(1): 69–77.
- Koledzi K. E, Baba G., Matejka G., Ludington G., Segbeaya K. N., Tchchangbedji G, Pilabana A. et Morizot G., 2012^b. "Conception, installation et fonctionnement d'une installation décentralisée de tri-compostage de résidus solides urbains dans les quartiers de Lomé." *Déchets, sciences et techniques* (62): 36–41
- Koledzi K. E., Baba G., Agbebavi J., Koffi D. et Matejka G., 2015. "Gestion des déchets dans

- les villes en développement : Transfert , adaptation de schéma et sources de financement.” *Déchets Sciences et Techniques* (68): 1-10
- Konate Z., Abobi H. B., Soko F. D. et Yao-Kouame A., 2018. “Effets de la fertilisation des sols à l’aide des déchets ménagers solides compostés dans les décharges sur le rendement et la qualité chimique de la laitue (*Lactuca Sativa* L.)” *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 12(4): 1611-1625.
- Kondoh E., Bodjona M. B., Aziabile E., Tchegueni, S., Kili K. A. et Tchangbedji G., 2019. “Etat des lieux de la gestion des déchets dans le Grand Lomé.” *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 13(4): 2200-2209.
- Kouassi E., Ahoussi K. E., Koffi Y. B., Kouame I. K., Soro N. et Biemi J., 2014. “Caractérisation physico-chimique du lixiviat d’une décharge de l’Afrique de l’ouest : Cas de La Décharge d’Akouedo (Abidjan-Coté d’ivoire).” *Larhyss Journal* N°19: 63–74. <http://kutarr.lib.kochi-tech.ac.jp/dspace/bitstream/10173/853/1/sms11-7165.pdf>
- Kple M, 2018. “Étude des voies de valorisation des déchets ménagers au Bénin : Cas de la ville d’ Abomey-Calavi.” *Thèse de Doctorat , Université de Lorraine (France)*: 269 p.
- Lacour J., 2013. “Valorisation de la fraction organique de résidus agricoles et autres déchets assimilés à l’ aide de traitements biologiques anaérobies.” *Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (France)*: 218 p.
- Larbi, M. 2006. “Influence de la qualité des composts et de leurs extraits sur la protection des plantes contre les maladies fongiques.” *Thèse de doctorat , Université de Neuchâtel (Suisse)*: 161 p.
- LECLERC B., 2014. “Document de mise à jour du guide des matières organiques.” *Institut Technique de l’Agriculture Biologique (ITAB) (France)*, 1–32.
- Lo M., Sonko H. M., Dieng D., Ndiaye S., Diop C., Seck A. et Gueye A, 2019. “Co-compostage de boues de vidange domestiques avec des déchets maraîchers et des déchets de poissons à Dakar (Sénégal).” *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 13(6): 2914–2929.
- Lohri C. C., Camenzind E. J. et Zurbrügg C.,. 2014. “Financial sustainability in municipal solid waste management - Costs and cevenues in Bahir Dar, Ethiopia.” *Waste Management* 34(2): 542–552. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.014>.
- Longanza L. B., Kidinda L. K., Tamina D. T., Jokob A. T. et Ikatalo M. T, 2015. “Valorisation agricole des déchets comme alternative à leur gestion dans les villes d’Afrique Subsaharienne : Caractérisation des déchets urbains à Lubumbashi et évaluation de leurs effets sur la croissance des cultures vivrières.” *Afrique Science* 11(2): 76–84.
- Loubna E. F., 2014. “Suivi physico-chimique, microbiologique et écotoxicologique du

- compostage de boues de STEP mélangées à des déchets de palmier: Validation de nouveaux indices de maturité." *Thèse de doctorat, Université de Toulouse (France)*: 295 p.
- M'Sadak Y., Ben M'Barek A. et Tayachi L., 2012. "Possibilités d'incorporation du méthacompost avicole dans la confection des substrats de culture à base de compost sylvicole en pépinière forestière." *Nature & Technologie* 59 (6): 59–70.
- M'Sadak Y. et Ben M'Barek A., 2013. "Caractérisation qualitative du digestat solide de la biométhanisation industrielle des fientes avicoles et alternative de son exploitation agronomique hors sol." *Journal of Renewable Energies* 16(1): 33–42.
- M'Sadak Y. et Ben M'Barek A., 2015. "Caractérisation Qualitative d'un digestat avicole liquide issu de la biométhanisation industrielle et valorisation en fertigation des plants de tomate." *Larhyss Journal* 21: 51–67.
- Madinzi A., Aboulhassan M. A., Assou M., Fakidi H., Bahlaoui M. A., Souabi M. et Hafidi M., 2014. "Traitement biologique des lixiviats stabilisés produits par la décharge publique de la ville de Mohammedia (Maroc)." *Scientific Study & Research, Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology Food Industry* 15(2): 155–167.
- Maha C., 2013. "Effet de l'apport de composts sur la dynamique hydrique du sol, la disponibilité de l'azote pour la plante et le lessivage du nitrate : Cas d'un sol limoneux cultivé du bassin parisien." *Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud (France)*: 259 p.
- Maléki B.; Baba G.; Ségbéaya K. N., 2018. "Quantification des déchets solides ménagers de la ville de Kara et scénarisation de la gestion." *European Journal of Scientific Research* 148(2): 179–187.
- Manirakiza N., Ndikumana Th. et Jung C. G., 2020. "Heavy metals impacted soils from dumped municipal solid waste in Buterere - Burundi : Health risk assessment." *International Journal of Innovation and Applied Studies* 30(2): 597–606.
- Mbiadjeu-lawou S. P., 2019. "Quelle économie circulaire spontanée pour une ville moyenne camerounaise ? : Le cas des déchets solides ménagers de Bangangté (Cameroun)" *Thèse de doctorat en Cotutelle internationale de thèse entre Mans Université et l'Université de Yaoundè I*: 313 p.
- Mbuligwe S. E., Gabriel R. et Kassenga G. R., 2004. "Feasibility and strategies for anaerobic digestion of solid waste for energy production in Dar Es Salaam city, Tanzania." *Resources, Conservation and Recycling* 42(2): 183–203.
- MEEATU., 2013. "Politique nationale d'assainissement du Burundi et stratégie opérationnelle horizon 2025." *Bujumbura-Burundi*: 55 p.
- Mehdi M., Djabri L.,Hani A. et Belabed B., 2007. "Impacts de la décharge de la ville de Tiaret

- sur la qualité des eaux souterraines". *Revue Synthèse* (16): 64–73.
- Meilhac C., 2014. "Quels sont les déterminants de la production des déchets municipaux." *Ministère de l'écologie du développement durable et de l'énergie (France)*: 40 p.
- Mejraoua Z. et Zine N. E., 2017. "Caractérisation physico-chimique du lixiviat de la décharge sauvage de Meknes." *European Scientific Journal* 13(33): 154–166.
- Mella M T., Zanguina A., Addam-Kiari S. et Laouali M. M., 2018. "Composting of the urban garbage: Assessment of the nutrient elements for the plants, case of Niamey in Niger." *International Journal of Scientific Engineering and Science* 2(12):12-19.
- Ministère de l'aménagement du territoire, du tourisme et de l'environnement. 2007. "Plan d'action national d'adaptation aux changements climatiques". *Bujumbura-Burundi*: 88 P.
- Ministère de l'intérieur, 2008. "Recensement général de la population et de l'habitat du Burundi 2008." *Bureau Central du Recensement* 3: 88 p. http://www.usaid.gov/sites/default/files/documents/1866/2008_Burundi_Population_Survey_Status_and_Structure_of_Population.pdf.
- Ministère de l'environnement, de l'agriculture et de l'élevage, 2019. "Troisième communication nationale sur les changements climatiques." *Bujumbura-Burundi*: 189 p
- Misra R V, Roy R N. et Hiraoka H., 2005. "Méthode de compostage au niveau de l'exploitation agricole." *Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO 2005), Rome* 2: 48.
- Mizero M., Ndikumana Th. et Jung C., 2015. "Quantification, caractérisation et voies de valorisation des déchets solides municipaux dans la ville de Bujumbura." *Bull.sci.envIRON.biodivers.* 1: 1–7.
- Mustin M., 2015. "Compostage: De l'Afrique à Paris." *Conférence- COMPOSTORY. Maison des acteurs du Paris durable 10-février- 2015*: 27 p.
- Ngahane E. L., 2015. "Gestion technique de l'environnement d'une Ville (Bembereka au Bénin): Caractérisation et quantification des déchets solides émis; connaissance des ressources en eau et approche technique." *Thèse de doctorat, Université de Liège (France)*: 254.p. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/177863>.
- Ngahane E. L., Garnier J., Bromblet H. et Vanié C., 2021. "Axes stratégiques pour la pérennisation d'unités de compostage en Afrique: Cas de Bouaké en Côte-d'Ivoire." *Déchets Sciences et Techniques* N° 76: 43-51.
- Ngambi J. R., 2016. "Déchets solides ménagers de la ville de Yaoundé (Cameroun) : De la gestion linéaire vers une économie circulaire." *Thèse de doctorat, Université du Maine sous le label de l'Université Nantes Angers le Mans (France)*: 492 p.

- Ngnikam E., Naquin P., Oumbe R. et Djietcheu B., 2017. "Évolution des caractéristiques des déchets solides ménagers dans la ville de Yaoundé au Cameroun." *Revue Scientifique et Technique Forêt et Environnement du Bassin du Congo* 8: 45–56.
- Ngnikam E., Naquin P., Oumbe R. et Djietcheu K. B., 2017. "Évolution des caractéristiques des déchets solides ménagers dans la ville de Yaoundé au Cameroun (1995-2015)." *Déchets, sciences et techniques* (74): 1–16.
- Ngom S., Dieye I., Thiam M. B., Sonko A., Diarra R., Diarra K et Diop M., 2017. "Efficacité agronomique du compost à base de la biomasse du "Neem" et de l'Anacarde sur des cultures maraîchères dans la zone des Niayes au Sénégal" *Agronomie Africaine* 29(3): 269–278.
- Norme Internationale ISO 10390, 2021. "Sols, Biodéchets traités et boues - Détermination du pH." *Suisse, Troisième édition*: 10 p.
- Ntalani H., Ngouanou R. D., Makomo H., Elouma-Ndinga A. M., Boungou-Stona G., Loumouamou A. N., Mouloungui Z. et Ouamba J-M., 2020. "Études comparatives de la composition chimique et de l'activité coagulante des graines de *Cucumeropsis Mannii* Naud., *Arachis Hypogaea* L. et *Moringa Oleifera* Lam. dans La clarification des eaux de surface." *Journal of Applied Biosciences* 145: 14974–14984. DOI: 10.35759/jabs.v145.12
- Ntalani H., Ndinga A. E., Ntsatouabaka I. G., Mpolo B., Lilinda A. V. et Ouamba J. M., 2020. "Essais de valorisation des déchets solides ménagers biodégradables par compostage en Milieu urbain au Congo." *Afrique Science* 16(2): 59–69.
- OBPE. 2021. "Rapport de l'atelier de sensibilisation à l'intention des institutions de recherche, académique et d'implémentation sur le bulletin scientifique de l'OBPE (Bujumbura-Burundi)." *bulletin scientifique de l'OBPE*: 17p.
- Omotayo E. O. et Chukwuka K. S.; 2009. "Soil fertility restoration techniques in sub-Saharan Africa using organic resources." *African Journal of Agricultural and Food Security* 7(2): 1-7.
- OMS, 2016. "Santé et environnement." *Bureau Regional du Pacifique Occidental*: 50.
- ONU-Habitat. 2012. "Burundi: Profil urbain de Bujumbura." *Programme des Nations unies pour les établissements humains*: 24 p.
- Oteng-Ababio M., Arguello E. M. et Gabbay O., 2013. "Solid Waste Management in African Cities: Sorting the Facts from the Fads in Accra, Ghana." *Habitat International* 39: 96–104.
- Oudart D., 2013. "Modélisation de la stabilisation de la matière organique et des émissions gazeuses au cours du compostage d'effluents d'élevage." *Thèse de doctorat, Université de Toulouse (France)*: 337 p.
- Parrot L., Sotamenou J. et Dia B. K., 2009. "Municipal solid waste management in Africa:

- strategies and livelihoods in Yaoundé, Cameroon.” *Waste Management* 29(2): 986–995.
- Pesqueux Y., 2021. “Qu’est-ce qu’un déchet ?” *Open Science*. <https://shs.hal.science/halshs-02922383v2>: 1–13.
- Plateforme Re-Sources, 2015. “La caractérisation des déchets ménagers, en Afrique et dans les Caraïbes.” *Reseau pour une gestion durable des déchets solides*: 6 p.
- Plateforme Re-Sources, 2015. “Les techniques de compostage de déchets d’origine naturelle en Afrique et dans les Caraïbes.” *Reseau pour une gestion durable des déchets solides*: 12 p.
- PNUE., 2018. “Avenir de la gestion des déchets en Afrique.” *Programme des Nations Unies pour l’Environnement, Nairobi, Kenya.*: 223 p.
- Pouya M. B., Gnankambary Z., Savadogo O. M., Ouandaogo N., Sedogo M. P. et Lompo F., 2020. “Valorisation agronomique des résidus de *Jatropha Curcas L.* comme fertilisant organique au Burkina Faso.” *Afrique Science* 16(5): 81-92.
- Pujol A., 2012. “Modélisation du procédé de compostage - Impact du phénomène du séchage.” *These de doctorat, Université de Toulouse (France)*: 268 P.
- Puyuelo B., Gea T. et Sánchez A., 2010. “A new control strategy for the composting process based on the oxygen uptake rate.” *Chemical Engineering Journal* 165(1): 161–169.
- Rafolisy T., Thuriès L., Técher P., Moussard G. et Paillat J. M., 2015. “Co-compostage de boues de laiterie et de fumier de bovins à l’Ile de la Réunion : Hygiénisation, pertes de nutriments et homogénéité du compost produit.” *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment* 19(4): 329–337.
- Ramadani N., 2014. “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.” *Thèse de doctorat, Université d’Oran 1 Ahmed Ben Bella (Algérie)*: 248 p.
- Rhouma A., Mougou I. et Rhouma H., 2019. “Croissance urbaine et environnement: déchets urbains (Tome I).” *Éditions universitaires europeennes*: 92 p.
- Rucakumugufi D., Nkurunziza E., Bigumandondera P., Kaboneka S., Diop C. M. et Ntakarutimana V., 2022. “Influence du rapport C / N des intrants sur la qualité du compost produit.” *Afrique Science* 20(6): 14–27.
- Said-Pullicino D., Massaccesi L., Dixon L., Bol R. et Gigliotti G., 2010. “Organic matter dynamics in a compost-amended anthropogenic landfill capping-soil.” *European Journal of Soil Science* 61(1): 35–47.
- Segbeaya K. N., 2012. “Évaluation de l’impact des déchets ménagers de la ville de Kara (Togo) sur la qualité de la rivière Kara.” *Thèse de doctorat, Université de Lomé (Togo) en co-tutelle*

avec l'Université de Limoges(France): 226 p.

- Sema A. M., Koledzi E. K., Krou N. et Tcha-Thom M., 2021. "Étude comparée de la ventilation naturelle et automatique à l'aide de tuyaux perforés et du procédé classique de retournements des andains en compostage." *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 15(1): 354–366.
- Seraj S., Mirzayi B. et Nematollahzadeh A., 2018. "Engineered maghemite nanoparticles with polyrhodanine for efficient removal of Cr(VI) from water." *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management* 10: 94–103.
- Sghaier A., 2020. "Analyse économique de la gestion des déchets à Dakar: Cas de la commune de Medina". *Actes de la deuxième conférence internationale sur la francophonie économique du 2 - 4 Mars 2020, Université Mohammed-V de Rabat (Maroc): 12p*
- Sierra J. et Favérial J., 2017. "La qualité des composts en Guadeloupe". *Rapport d'étude de la FAO, Unité Agrosystèmes Tropicaux (ASTRO), INRA Antilles-Guyane (France) (2): 23 p.*
- Silue P. A., Kouassi K. E., Koffi K. A. et Soro D., 2017. "Qualités germinatives des graines et croissance des plantules de *Isobertia Spp.* en milieu contrôlé (Pépinière)." *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 11(1): 93.
- Somé P.P., Hien E., Tozo K., Zombre G. et Danou D., 2014. "Effets de six composts sur les réponses physiologiques, biochimiques et agronomiques du Niébé *Vigna unguiculata L. Walp* Var. K VX. 61.1. au déficit hydrique." *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 8(1): 31-45
- Sotamenou J., 2010. "Le compostage : Une alternative soutenable de gestion publique des déchets solides au Cameroun." *Thèse de doctorat, Université de Yaoundé II (Cameroun): 364 p.*
- Sotamenou J., 2012. "La Gestion publique des déchets solides à Yaoundé : La pertinence du compostage." *Editions universitaires européennes: 318 p.*
- Sotamenou J., 2017. "La gestion des déchets solides en Afrique cinquante ans après les indépendances : Bilan et perspectives." *Afrique Durable 2030* (3): 21–38. <http://www.africa21.org/wp/wp-content/uploads/2017/07/Revue-afrique-durable-2030-n°3.pdf>.
- Souabi S , Touzare K., Digua K., Chtioui H., Khalil F. et Tahiri M., 2011. "Triage et Valorisation Des Déchets Solides à La Décharge Publique de La Ville de Mohammedia." *Les techniques de Laboratoire* 6(25): 121–130.
- Souguir D., Hörmann G. et Hachicha M., 2019. "Effets génotoxiques de l'irrigation à long-terme par des eaux usées traitées : Cas du périmètre Cebala- Borj Touil." *Journal of Applied Biosciences* 139(1): 14191–14204.

- Soulama S., Kabore W. B., Bambara D., Bembamba M. et Hien E., 2020. "Évaluation de la qualité de composts à base de biomasses feuillées de deux espèces agroforestières à Cassou, Centre-Ouest, Burkina Faso." *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 14(9): 3297–3307.
- SPI., 2015. "Les déchets: définition, gestion, collecte, traitement, responsabilités, police spéciale." *www.spi-vds.org* 50: 1–27.
- Tahraoui D. N., 2013. "Valorisation par compostage des résidus solides urbains de la commune de Chlef, Algérie." *Thèse de doctorat, Université de Limoges (France) en Co-Tutelle avec l'Université de Blida (Algerie)*: 244 p.
- Taillefer S., 2010. "Les matières organiques : Fiches informatives." *Recyc-Québec*: 15 p.
- Tchegueni S., Kili K. A., Bodjona M., Koriko M., Hafidi M., Baba G. et Tchchangbedji G., 2012. "Effets des composts à base de déchets d'agrumes et du tourteau de Karité Sur la disponibilité du phosphore du sol: Une étude en conditions contrôlées." *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 6(3): 1381–1389.
- Tchuikoua L. B. et Elong J. G., 2014. "La gestion des déchets solides ménagers à l'épreuve des pratiques urbaines à Douala (Cameroun)." *Revue Canadienne de Géographie Tropicale* 2(1): 38–46.
- Temgoua E., Ngnikam E., Dameni H. et Kouedou Kameni G. S., 2014. "Valorisation des ordures ménagères par compostage dans la ville de Dschang, Cameroun." *Tropicultura* 32(1): 28-36.
- Tirichine. A., Abid A. F., Dahliz A., Haffouda L., Merouchi W et Khaled H., 2017. "Étude de l'effet de substitution du fumier par Le phragmite (*Phragmites Communis Trin.*) sur la qualité du compost à base de sous produits du palmier dattier." *Algerian Journal of Arid Environment* 7(1): 4–17.
- Thonart P., Diabaté S. I., Hiligsmann S. et Lardinois M., 2005. "Guide pratique sur la gestion des déchets ménagers et des sites d'enfouissement technique dans les pays du Sud". *Institut de l'énergie et de l'environnement de la francophonie*: 146 p. https://www.ifdd.francophonie.org/media/docs/publications/230_IEPFGuideDechets.pdf.
- Topanou K. A.; 2012. "Gestion des déchets solides ménagers dans la ville d'Abomey-Calavi (Bénin): Caractérisation et essais de valorisation par compostage." *Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi (Bénin) en co-tutelle avec l'Université d'Aix Marseille (France)*: 194 p.
- Toundou O., Tozo K., Feuillade G., Pallier V., Tchegueni S. et Dossou K. S., 2015. "Effets de composts de déchets sur les propriétés chimiques du sol et la solubilité d'éléments minéraux

- sous deux régimes hydriques en conditions contrôlées au Togo.” *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 8(4): 1917–1926. DOI: 10.4314/ijbcs.v8i4.51
- Toundou O., 2016. “Evaluation des caractéristiques chimiques et agronomiques de cinq composts de déchets et étude de leurs effets sur les propriétés chimiques du sol, la physiologie et le rendement du maïs (*Zea mays* L. Var. Ikenne) et de la tomate (*Lycopersicon esculentum* L. Var. Tropimech) sous deux régimes hydriques au Togo.” *Thèse de doctorat, Université de Limoges (France) en co-tutelle avec l'Université de Lomé (Togo)*: 214 p
- Toundou O., Agbogban A., Simalou, O., Dossou K.S., Awitazi T. et Tozo K., 2017. “Impact du compostage sur la réhabilitation de la carrière de calcaire de Sika-Kondji (Togo) : effets sur l’attraction des animaux et sur la performance du maïs (*Zea mays* L.)” *Vertigo* 17(3): 17.
- Tremier, A., De Guardia A. et Mallard P., 2007. “Indicateurs de stabilisation de la matière organique au cours du compostage et indicateurs de stabilité des composts : Analyse critique et perspectives d’usage.” *Techniques - Sciences - Méthodes* (10): 105–129.
- Trombert C., 2019. "Accompagner la mise en place d’un service de gestion des déchets en milieu urbain : Retour d’expérience des projets Promaïss et Gicod dans une ville secondaire : Dolisie, République du Congo, 2012-2018". *Groupe de Recherche et d'échange technologique (Gret)*: 57 p.
- Tshala U J., Kitabala M. A., Tunda M. J-P., Mufind K. M., Kalenda M.A., Kapele K. G. et Nyembo K. L., 2017. “ Vers une valorisation des déchets ménagers en agriculture (péri) urbaine à Kolwezi : caractérisation et influence de la saisonnalité.” *Journal of Applied Biosciences* 112(1): 11072-11079.
- Ukondalemba L. M., 2016. “Caractérisation et tests de traitement des déchets ménagers et boues de vidange par voie anaérobie et compostage pour la ville de Kinshasa.” *Thèse de doctorat, Université de Liège (Belgique)*: 313 p.
- Yapi A. C., Tokpa M. D et Coulibaly S., 2021. “Gestion des déchets ménagers et risques sanitaires dans la ville de Dimbokro.” *Revue de Géographie tropicale et d'Environnement* (1): 124–141.
- Yulipriyanto H., 2001. “Emission d’effluents gazeux lors du compostage de substrats organiques en relation avec l’activité microbiologique (nitrification / dénitrification).” *Thèse de doctorat, Université Rennes 1 (France)*: 214 p.
- Zaakour F., Matech F., Moustahfer K. et Chemsî Z., 2014. “Concentrations en éléments traces métalliques dans les sols irrigués par les eaux usées dans l'ouest Merzoug (Casablanca-

Maroc)." *European Scientific Journal* 10(29): 121–138.

Ziraba A. K., Haregu T. N. et Mberu B., 2016. "A review and framework for understanding the potential impact of poor solid waste management on health in developing countries." *Archives of Public Health* 74(1): 1–11. <http://dx.doi.org/10.1186/s13690-016-0166-4>.

Znaïdi A. I., 2002. "Étude et évaluation du compostage de différents types de matières organiques et des effets des jus de composts biologiques sur les maladies des plantes." *Méditerranien Agronomic Institute of Bari, Master degree* (Tunisie): 104 p.

Zraïbi L., Chaabane K., Berrichi A., Sbaa M., Badaoui M., Zarhloule Y. et Georgiadis M., 2015. "Assessment of the agronomic value of the sludge compost for the wastewater treatment plant from Nador city." *J. Mater. Environ. Sci* 6(10): 2975–2985.

Site Internet

Cissé Oumar, 2018: <https://doi.org/10.3917/pour.236.0057>. (Consulté le 20- juin, 2022]

<https://www.uclga.org/news-fr/la-dynamique-durbanisation-de-lafrique-en-2020-un-nouveau-regard-sur-les-realites-urbaines-du-continent/>. (Consulté 17-mars -2022]

Pulchérie Matsodoum Nguemete *et al.*:

[https://moselle.chambreagriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Grand Est/44_compostage_des_boues_d_epuration_guide_pour_utilisateurs.pdf/](https://moselle.chambreagriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Grand_Est/44_compostage_des_boues_d_epuration_guide_pour_utilisateurs.pdf/) Conférence atelier international (consulté 12-Déc. 2020)

<https://www.historique-meteo.net/afrique/burundi/bujumbura/2021/> (consulté- 17 Oct 2021)

D. W. Pribyl, 2010: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003> (consulté- 17 septembre 2020).

<http://www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/05-024.htm>. «Introduction au compostage» (Consulté 20/04/2020)

<https://www.historique-meteo.net/afrique/senegal/dakar/2020> (Consulté le 15-Avr-2020).

Roger, 2012 : www.guidescomposteurs.com (20-Janvier- 2020)

<https://side.developpement-durable.gouv.fr/HDFR/doc/SYRACUSE/57220/mise-au-point-de-tests-agronomiques-legers-permettant-de-determiner-simultanement-la-phytotoxicite-g> (Consulté le 20-janvier-2020)

<http://www.guidescomposteurs.com> (Consulté le 10-janvier-2020)

G. Munroe, 2004 : https://www.agrireseau.net/document/Document_96310.pdf. « Guide du lombricompostage et de la lombriculture à la ferme » (consulté 17-décembre-2019).

<https://www.yagaburundi.com/2017/collecte-immondices-capitale-fiasco/> (consulté 20-juin-2019).

Annexes.

Annexe I: Photos de l'appareil Vulcan en activité (détermination du taux de MO)

Photos du four utilisé pour la détermination du taux de MO et les étapes de chauffage suivies :



Figure I. 1a) : passage de Tamb à 200°C



Figure I. 1b) : T déjà à 200°C



Figure I. 1c) : déjà à T= 450°C



Figure I. 1d) : T vers 550°C



Figure I. 1e) : T déjà à 550°C

Remarques :

&) Temps de passage de la température ambiante à 200°C + le temps de chauffage = 30minutes

&) Temps de passage de 200°C – 450°C = 30mn et la durée de chauffage à 450°C = 30mn

&) Temps de passage de 450°C – 550°C = 30mn et la durée de chauffage à 550°C = 1 heure

&) Temps total de calcination = 3 Heures

Annexe II: Dosage de l'azote par la méthode Kjeldahl

➤ Principe

Transformation de l'azote organique en sulfate d'ammonium par l'acide sulfurique concentré à chaud en présence d'un catalyseur approprié.

Alcalinisation des produits de la réaction et distillation de l'ammoniac libéré et titrage (acido-basique).

➤ Mode opératoire succinct :

a) Minéralisation

4. Prise d'essai : peser 1g d'échantillon sec et finement broyé sur un papier sans cendre qu'on introduit dans le matras ;
5. Ajouter une pastille de catalyseur Kjeldahl : K_2SO_4 -Se- $CuSO_4$ (5g) ;
6. Introduire 15ml de H_2SO_4 concentré à l'aide d'une manette.
7. Placer les matras numérotés dans le bloc de minéralisation qui a été mis sous tension réglé au thermostat à la température voulue, adapter les capteurs de fumées sur les tubes et ouvrir le robinet relié aux capteurs de fumées. Allumer la hotte et mettre en marche la commande.



Figure II.1a) : début de minéralisation



Figure II.1b): A la fin de la minéralisation

b) Distillation

Le minéralisât refroidi est transvasé dans une fiole de 250ml, et on rincer 3 fois le matras tout en récupérant l'eau de lavage, on ajuste au volume et on homogénéise.

Prélever 25ml de solution diluée à doser et le mettre dans un ballon à distiller qui sera placé dans le distillateur. Verser, avec précaution, 40ml de NaOH 33% à l'aide de la manette, puis ajouter 150ml d'eau distillée. On met en place un béccher de récupération de distillat contenant 10ml de solution d'acide borique dans laquelle on a mis un indicateur mixte. Installer convenablement le système de distillation et recueillir 100ml de distillat.



Figure.II.2 a: Au démarrage



Figure II.2 b : arrivée des 1^{ères} gouttes

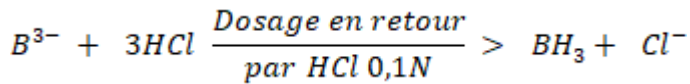
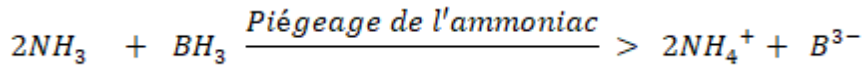
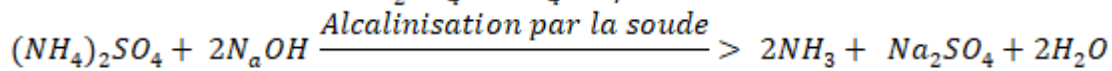
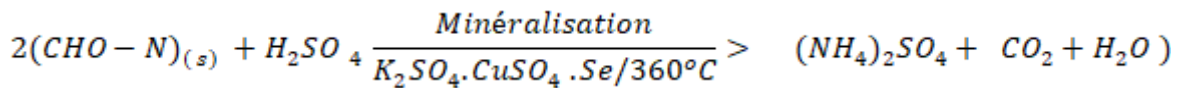


Figure II.2 c: En cours de distillation

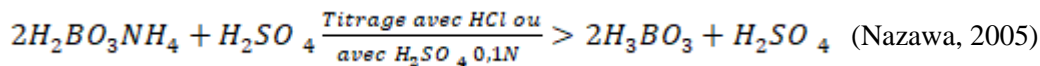
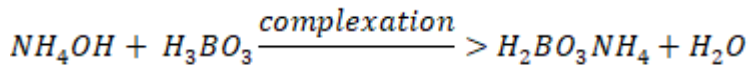
c) Titrage

Lorsque l'ammoniac arrive dans l'acide borique, il alcalinise le milieu qui vire au bleu (voir les figures I.2, a, b, c) L'ammoniac ainsi piégé est neutralisé par une solution d'acide fort (H_2SO_4 ou HCl) 0,1N jusqu'à l'obtention de la coloration rose (coloration de départ). L'acide borique est un acide faible, en présence d'un acide fort, il ne libère pas d'ions H^+ et n'interfère donc pas avec le pH.

Les équations des différentes étapes sont reprises ci-après :



Plus exactement on a :



Calcul de la teneur en azote :

$$\%N - NTK = \frac{(V_{eq} - V_{bl}) \times C_{H_2SO_4} \times 14}{m}$$

Ve_q= volume équivalent de H₂SO₄ (ou HCl) pour l'échantillon (L) ;

V_{bl}= volume équivalent de H₂SO₄ (ou HCl) pour le blanc (L) ;

C_{H₂SO₄}=Concentration de H₂SO₄ utilisé lors du titrage (0,1N) ;

m= masse de la prise d'essai (g) ; 14= masse d'un at-gr de N (qui sera exprimée en g)

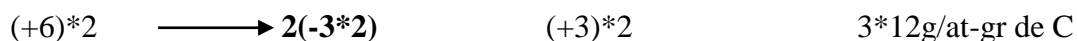
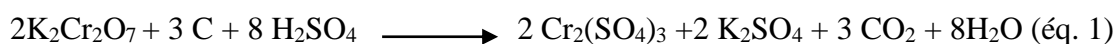
Annexe III: Détermination du carbone organique total (COT) par la méthode de Walkley and Black)

Peser dans un erlenmeyer de 250ml une masse d'échantillon finement broyé d'environ 0,0200mg. Ajouter exactement 10ml de solution de K₂Cr₂O₇ 1N, puis, 20ml de H₂SO₄ concentrée (d=1,83), agiter à l'aide d'un agitateur magnétique (1mn) et laisser se reposer pendant une demi-heure.

Poursuivre la manipulation en ajoutant 200ml d'eau distillée à l'éprouvette graduée, puis 20ml de sel de Mohr 0,6N à la pipette (ou à l'aide d'une poire) pour réduire le bichromate en excès, une coloration verte due aux ions de Cr³⁺ apparaît.

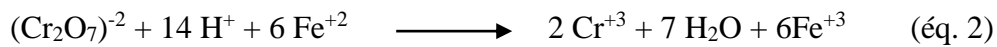
L'excès de sel de Mohr est titré à son tour par le KMnO₄ 0,2N jusqu'à l'apparition d'une teinte bleu-gris caractéristique.

Effectuer pour chaque série d'analyses des témoins sans déchets dont on prendra la moyenne pour les calculs des résultats. Les équations des réactions sont présentées ci-après :

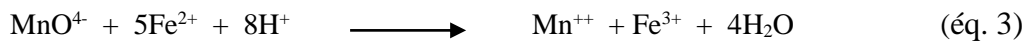


12 équivalents de K₂Cr₂O₇ attaquent 36g de C; donc 1 équivalent de K₂Cr₂O₇ attaque 3g de C.

Le bichromate en excès, non utilisé dans la réaction d'oxydation est titré par une solution de sel de Mohr $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$. La réaction est la suivante :



L'excès de sel de Mohr est titré Par le permanganate de potassium (KMnO_4 , 0,2N)



La teneur en carbone organique mesuré dans les déchets est déterminée par la relation :

$$C^0 /_{00}(\text{solide}) = \frac{(v - V) \times N \times 3,9}{p}$$

Avec: v = quantité de KMnO_4 (en ml) utilisée, de normalité N pour les échantillons;

V = quantité de KMnO_4 (en ml) utilisée, de normalité N pour les témoins ;

N = Normalité de la solution de KMnO_4 ; Généralement 0,2N ;

P = poids de la prise d'essai (g).

Les travaux de Giroux et Audesse (2004, Naïma, 2013), ont montré qu'une précision analytique a été bonne pour les engrais et amendements organiques analysés en utilisant le facteur 2,0.

La proportion de carbone dans la matière organique des composts est déterminée selon l'équation:

$$MO (\%) = C (\%) \times 2$$

Annexe IV: Détermination de la teneur en phosphore total par la méthode spectrophotométrique.

1) Réactifs

- Solution d'acide sulfurique ($d=1,84$) à 15% environ en volume
- Solution de molybdate d'ammonium à 40g/L (Filtrer si nécessaire, à conserver en flacon de polyéthylène à 4°C)
- Solution d'acide Ascorbique à 20g/L: Ac. ascorbique : 20g + 100ml eau permutée (à préparer chaque jour)
- Solution de tartrate double d'antimoine et de potassium à 2,8g/L : 0,28g dans 100ml eau permutée.

2) Réactif :

- solution d'acide Sulfurique : 50ml ; solution de tartrate double d'antimoine et de potassium : 5ml ;

Solution de molybdate d'ammonium : 100ml (conserver le réactif au réfrigérant à 4°C)

- Solution mère étalon à 50mg/L de phosphore : Dihydrogénophosphate de potassium desséché au préalable à l'étuve à 100°C : 219,7mg dans 1litre d'eau permutée ; acidifier la solution par 1ml d'acide Sulfurique 15% avant d'ajuster au volume.
- Solution fille étalon de 1mg/L de phosphore : diluer au 1/50 la solution précédente avec de l'eau permutée au moment de l'emploi.
- Eau distillée

Etablissement de la courbe d'étalonnage

Introduire dans chaque fiole 1ml de solution d'acide ascorbique, agiter puis ajouter 4ml de réactif, mélanger soigneusement, compléter éventuellement le volume à 25ml . Attendre 30 minutes la stabilisation de la coloration et effectuer les mesures au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 700 à 800nm en cuve de 1cm. Construire la courbe d'étalonnage.

Mode opératoire

Vérifier le pH de l'échantillon qui doit être entre 2 et 7, l'ajuster si nécessaire. Introduire 20ml d'échantillon dans une fiole jaugée de 25ml ajouté 1ml de solution d'acide ascorbique puis poursuivre comme pour l'établissement de la courbe d'étalonnage. Le témoin est placé en première position de l'analyseur et l'ajustement se fait automatiquement. Se reporter à la courbe d'étalonnage.



Figures III 1a & b): photos du spectrophotomètre utilisé.

Tableau IV.1 : procédure d'établissement de la Courbe d'étalonnage du Phosphore

Numéro des fioles	T	1	2	3	4	5
Solution étalon de P à (1 mg/l) (ml) 1 ppm	0	1	5	10	15	20
Eau distillée (ml)	20	19	15	10	5	0
Correspondance en (mg/l) de P	0	0,05	0,25	0,5	0,75	1
Réactif sulfomolybdique en (ml)	4	4	4	4	4	4
Acide ascorbique en 1ml ou (0,02g)	1	1	1	1	1	1
Densité optique lue	0	0,02	0,123	0,278	0,429	0,565

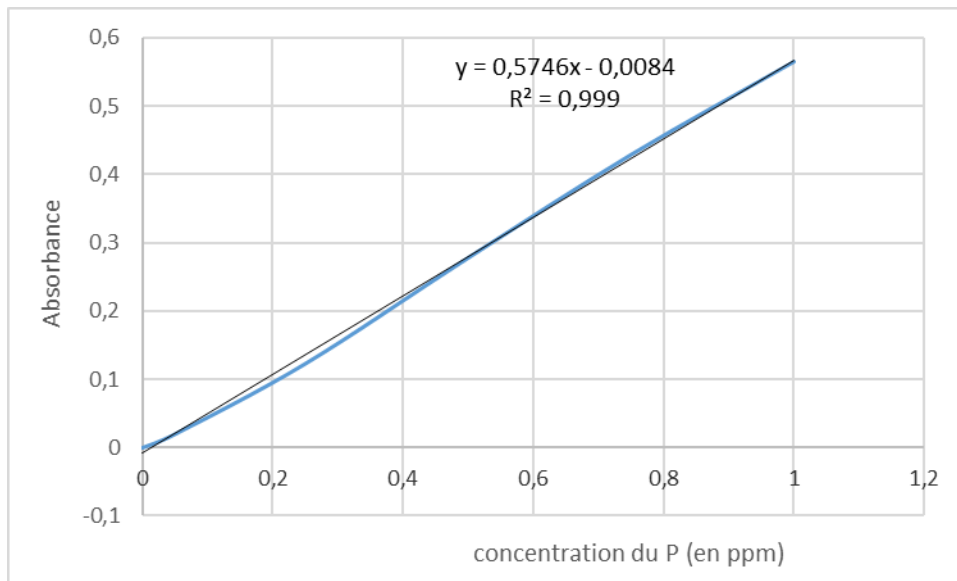


Figure IV. 2 c): courbe d'étalonnage du P

Annexe V: Modes opératoires pour la Recherche et dénombrement des microorganismes.

Dénombrement des microorganismes aérobies à 30 °C (NF EN ISO 4833-1)

Un millilitre de la suspension mère ou de ses dilutions décimales retenues a été porté en double dans les boîtes de Pétri stériles (90 mm de diamètre). Dans chaque boîte, 17 ml de gélose PCA (Plate count agar) préalablement fondue et ramenée à 47 °C (plus ou moins 1 °C) ont été coulés. L'inoculum et le milieu de culture ont été mélangés puis laissés solidifier. L'ensemble de ces opérations n'a pas duré plus de quinze minutes. Les pipettes stériles utilisées ont été changées pour chaque dilution. L'homogénéisation des dilutions se fait à l'aide d'un agitateur pour tubes à essai (vortex). Les boîtes sont ensuite incubées à l'étuve à 30 °C (plus ou moins 1 °C) dans une position retournée pendant soixante-douze heures. Pour le dénombrement, les boîtes contenant plus de 30 colonies et moins de 300 colonies ont été retenues.

Dénombrement des coliformes fécaux

Le principe du milieu repose sur l'aptitude des coliformes à fermenter le lactose. Le milieu est rendu inhibiteur vis-à-vis des bactéries Gram positives et de certaines bactéries Gram négatives par la présence simultanée de cristal violet et de sels biliaires. Le milieu gélosé lactosé bilié au cristal violet et au rouge neutre (V.R.B.L) (Conforme à la norme NF V 08-14) est un milieu sélectif qui a été utilisé pour le dénombrement des coliformes.

Recherche de *Staphylococcus aureus*

Le principe concerne :

- La recherche de *Staphylococcus aureus* dans 0,1g de compost.
- L'ensemencement à la surface d'un milieu sélectif solide coulé en boîte de Pétri de la suspension - mère

- Incubation des boîtes à 37° C pendant 48h
- Repérage des colonies caractéristiques puis confirmation par l'épreuve de la coagulase. Le milieu de culture Baird-Parker est utilisé pour le dénombrement de *Staphylococcus aureus* et le milieu coeur-cervelle ou le bouillon spécial staphylocoagulase pour la recherche de la coagulase.

Le plasma de lapin lyophilisé à reconstituer selon le mode d'emploi préconisé par le fabricant.

Recherche et dénombrement des anaérobies-sulfite-réducteurs

La recherche permet de mettre en évidence un groupe de bactéries anaérobies caractérisées par la possibilité d'exister sous forme sporulée et par un équipement enzymatique réduisant plus ou moins activement les sulfites en sulfure. Dans ce groupe entrent les *clostridium* sulfite-réducteurs en particulier *clostridium perfringens*. Le milieu de dénombrement est la gélose Tryptone Sulfite Néomycine (TSN), réparti en tube à raison de 20 ml par tube. Le milieu TSN a été fondu puis régénéré pendant 20 mn au bain-marie bouillant. Il a ensuite été refroidi jusqu'à 47 °C avant ensemencement.

Dénombrement des Pseudomonas aeruginosa

Le dénombrement de *Pseudomonas aeruginosa* a été effectué sur le milieu de culture gélose au cétrimide. C'est un milieu sélectif, qui permet l'isolement des bactéries du genre *Pseudomonas* et notamment de l'espèce *Pseudomonas aeruginosa*. Ce milieu gélosé contient un antiseptique : le cétrimide (bromure de N-acétyl-N, N, N-triméthylammonium). L'utilisation de ce dérivé d'ammonium quaternaire comme agent sélectif produit une large inhibition des micro-organismes contaminants, inhibe suffisamment la flore d'accompagnement et permet une meilleure croissance de *Pseudomonas*. Ce milieu favorise la production de pigments par *Pseudomonas aeruginosa* (pyoverdine et pyocyanine). Il s'est agi de couler 17 millilitres de gélose cétrimide fondue ensuite d'étaler en surface environ 0,1 ml de l'inoculum et de ses dilutions. Les boîtes (retournées) ont été incubées à l'étuve à 37 °C (plus ou moins 1 °C) pendant vingt-quatre heures (± deux heures). La dernière étape a consisté à dénombrer les colonies verdâtres et à vérifier si l'oxydase était positive.

Dénombrement de Escherichia coli

Le dénombrement de *Escherichia coli* a été réalisé sur milieu TBX. On dépose à cet effet un inoculum de 0,1 ml de la suspension mère et des différentes dilutions a été déposé dans une boîte de Pétri contenant le milieu TBX refroidi. Les boîtes ont été incubées à 44 °C (plus ou moins 1 °C) pendant environ 24 h (±2h). On compte ensuite toutes les colonies bleues-vertes aux dilutions retenues puis on ramène à la concentration de départ en multipliant le nombre de colonies par l'inverse du facteur de dilution de la boîte considérée

Annexe VI: Tableaux des résultats des traitements statistiques des variations de la hauteur et des Biomasses de l'amarante

1. HAUTEUR DU 10 ; VARIABLE COMPOST

Compost	C25	C50	C75	C100
C1	9.37±1.51a	10.46±0.57a	10.55±1.15a	9.85±2.31a
C2	8.99±2.09a	9.03±1.18a	8.67±0.58a	6.90±1.10a
C3	9.02±2.30a	11.03±1.38a	9.53±1.57a	9.61±1.26a
C4	10.77±1.59a	11.30±2.17a	10.94±1.46a	6.66±5.77a

2. HAUTEUR DU 17 ; VARIABLE COMPOST

Compost	C25	C50	C75	C100
C1	12.09±3.20a	13.38±1.42a	11.94±0.52a	6.93±6.21a
C2	11.86±1.24a	10.87±1.59a	9.42±.55b	8.27±1.33a
C3	11.87±0.39a	12.30±2.32a	10.62±1.18ab	10.71±0.48a
C4	14.19±2.80a	13.36±2.42a	12.89±2.08a	7.08±6.14a

3. HAUTEUR DU 24 ; VARIABLE COMPOST

Compost	C25	C50	C75	C100
C1	16.62±3.51a	17.05±0.95a	14.46±1.53a	7.03±6.09a
C2	15.58±1.94a	16.71±2.28a	10.80±0.47c	9.73±1.76a
C3	16.31±1.71a	14.90±1.66a	12.33±.17bc	11.42±0.50a
C4	18.57±3.11a	15.65±2.35a	14.32±1.42ab	8.41±7.45a

4. HAUTEUR DU 31 ; VARIABLE COMPOST

Compost	C25	C50	C75	C100
C1	23.45±1.81a	20.52±0.98a	16.70±2.25ac	8.83±7.71a
C2	20.53±2.01ab	20.14±3.46a	11.72±1.32b	10.65±2.88a
C3	18.20±2.66b	16.86±2.21a	13.67±1.03bc	12.05±0.49a
C4	20.36±2.81ab	18.20±3.01a	17.68±1.90a	9.50±8.59a

5. HAUTEUR DU 10 ; VARIABLE DOSE

Dose	C1	C2	C3	C4
D0	9.56±2.00a	9.56±2.00a	9.56±2.00a	9.56±2.00a
D25	9.37±1.51a	8.99±2.09a	9.02±2.30a	10.77±1.59a
D50	10.46±0.57a	9.03±1.18a	11.03±1.38a	11.30±2.17a
D75	10.55±1.15a	8.67±0.58a	9.53±1.57a	10.94±1.46a
D100	9.85±2.31a	6.89±1.09a	9.61±1.26a	6.66±5.77a

ESSAI D'OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DU COMPOST À PARTIR DU CO-COMPOSTAGE DES DÉCHETS SOLIDES MÉNAGERS ORGANIQUES AVEC LES DÉJECTIONS D'ÉLEVAGE.

6. HAUTEUR DU 17 ; VARIABLE DOSE

Dose	C1	C2	C3	C4
D0	11.72±2.74a	11.72±2.74a	11.72±2.74a	11.72±2.74ab
D25	12.09±3.20a	11.86±1.24a	11.87±0.39a	14.19±2.80b
D50	13.38±1.42a	10.87±1.59ab	12.30±2.32a	13.36±2.42ab
D75	11.94±0.52a	9.42±0.55ab	10.62±1.18a	12.89±2.08ab
D100	6.93±6.21a	8.27±1.33b	10.71±0.48a	7.08±6.14a

7. HAUTEUR DU 24 ; VARIABLE DOSE

Dose	C1	C2	C3	C4
D0	13.70±2.88a	13.70±2.88ab	13.70±2.88abc	13.70±2.88ab
D25	16.62±3.51a	15.58±1.94b	16.31±1.71b	18.57±3.11b
D50	17.05±.95a	16.71±2.28b	14.90±1.66b	15.65±2.35ab
D75	14.46±1.53a	10.80±0.47ac	12.33±0.17ac	14.32±1.42ab
D100	7.03±6.09b	9.73±1.76c	11.42±0.50ac	8.41±7.45a

8. HAUTEUR DU 31 ; VARIABLE DOSE

Dose	C1	C2	C3	C4
D0	14.75±2.93ab	14.75±2.93a	14.75±2.93abc	14.75±2.93ab
D25	22.45±2.32b	20.53±2.01b	18.20±2.66a	20.36±2.81b
D50	20.52±0.98b	20.14±3.46b	16.86±2.21ab	18.20±3.01ab
D75	16.70±2.25b	11.72±1.32a	13.67±1.03bc	17.68±1.90ab
D100	8.83±7.71a	10.65±2.88a	12.05±0.49c	9.50±8.59a

9. BIOMASSE VEG. : RAPPORT Mr/Ma; variable compost

Compost	C25	C50	C75	C100
C1	0.15±0.04a	0.18±0.01ab	0.18±0.04a	0.23±0.05a
C2	0.14±0.02a	0.19±0.01a	0.19±0.02a	0.31±0.05a
C3	0.14±0.01a	0.15±0.02ab	0.22±0.07a	0.22±0.07a
C4	0.17±0.04a	0.14±0.02b	0.15±0.02a	0.24±0.10a

10. BIOMASSE VEG. : RAPPORT Mr/Ma; variable Dose

Dose	C1	C2	C3	C4
D0	0.16±0.01ab	0.16±0.01a	0.16±0.01a	0.16±0.01a
D25	0.15±0.04a	0.14±0.02a	0.14±0.01a	0.17±0.04a
D50	0.18±0.01ab	0.19±0.01a	0.15±0.02a	0.14±0.02a
D75	0.18±0.04ab	0.19±0.02a	0.22±0.07a	0.15±0.02a
D100	0.23±0.05b	0.31±0.05 b	0.22±0.07a	0.24±0.10a

NB : Verticalement, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes (Duncan, $p \leq 0,05$).