



Caractérisation des déchets solides en vue d'une valorisation par compostage: cas du campus 2iE Ouagadougou

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER D'INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : Eau et Assainissement

Présenté et soutenu publiquement le 27 juin 2016 par

Massoum Hilaire SAWADOGO

Travaux dirigés par :

Dr. Seyram SOSSOU

et

Dr. Mariam SOU/DAKOURE

(Enseignant-chercheur LEDES/2iE)

(Enseignant-chercheur LEDES/2iE)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Harinaivo A. **ANDRIANISA**

Membres et correcteurs :

Dr Harinaivo A. **ANDRIANISA**
Célestin **OVONO**
Dr Seyram **SOSSOU**

Promotion [2014/2015]

DEDICACES

Je dédie ce travail à ma très chère et regrettée mère Feu SAWADOGO Clémentine.

A mon père SAWADOGO Tibo qui a bien voulu m'accompagner pour que les études se déroulent dans les meilleures conditions qui soient, je lui réitère une profonde gratitude.

A mes grands frères Roland, Cédric et Oscar à qui je dis merci pour les conseils dont j'ai pu bénéficier.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont à l'endroit de tous ceux qui ont contribué à la réussite de ce travail.

A mes encadreurs Dr. Seyram SOSSOU et Dr. Mariam DAKOURE/SOU tous deux enseignants-chercheurs à 2iE, pour leur disponibilité et leur dévouement pour la bonne marche du travail

A M. Pierre KABORE, M. Noel TINDOURE et M. Sohami HEMA qui n'ont ménagé aucun effort pour que mes travaux d'analyses se passent bien au LEDES.

Pour son sens de collaboration et son appui technique, je tiens à remercier SEBGO Danielle.

Un sincère remerciement à NELDE Jonathan qui m'a beaucoup aidé pendant mes travaux.

A M. ZAI Oumar pour son appui et ses conseils.

A mon ami SAVADOGO Ali pour son soutien et ses encouragements.

A mes camarades de classe avec qui nous avons des relations de franche collaboration tout au long de la formation.

RESUME

La gestion intégrée des déchets est un défi majeur à relever par les pays en développement. Pour que cela soit une réalité, il est important de disposer de données fiables sur la composition des déchets. Dans le but de réduire la quantité de déchets à envoyer à la décharge et de protéger l'environnement, cette étude a été initiée par l'Institut international de l'Eau et de l'Environnement dans le but de réduire la quantité de déchets. Deux (02) andains identiques constitués de 6kg de restes de cuisines, de 16 kg de déchets de jardins et de 30 l d'eau ont été mis en place. Un retournement des andains a été effectué chaque 2 semaines. Dans cette étude ont été reportés les résultats de la caractérisation des déchets solides urbains et d'un essai de compostage. La fraction fermentescible des déchets représente plus de 40% des déchets. Les paramètres physico-chimiques et microbiologiques ont été suivis lors de l'essai de compostage. Après 32 jours d'expérimentation le pH est de 6,2 et Le ratio C/N est de 24,9. Quant à la température, elle atteint un pic de 52,1°C après 7 jours de compostage, décroît ensuite jusqu'à la fin de l'expérimentation. D'un taux initial d'humidité de 42,5%, le compost contient 29,5% d'eau à la fin de l'essai. Les actinomycètes, les mycètes et les bactéries augmentent au cours de l'essai de compostage respectivement de 2,95 ulog, 3 ulog et 2,75 ulog. L'étude nous a permis de connaître la composition des déchets produits.

Mots Clés :

-
- 1 - Compostage**
 - 2 – Caractérisation des déchets**
 - 3 – Déchets solides**
 - 4 – Valorisation**
 - 5 – Tri sélectif des déchets**

ABSTRACT

Integrated waste management is one of greatest challenges for developing countries. For this management to be successful, it's important to have reliable data on waste characterization. With the aim of reducing the quantity of waste for rubbish dump and to protect the environment, this study has been introduced by the International Institute of Water and Environment Engineering to reduce the quantity of wastes. Two identical swaths constituted of rests of kitchen, brown wastes and water about respectively 6 kg, 16 kg and 30 liters. The reversal of waste occurs every two weeks. The results coming from waste characterization of the campus and compost testing have been reported in this study. The fermentable fractions of waste represent more than 40%. The rests of kitchen and brown wastes have been used for compost testing. Physico-chemical parameters and microbiological parameters have been followed in this compost testing. After 32 days of testing the pH is about 6.2 and the ratio C/N 24.9. The temperature reaches a peak of 52.1°C after 7 days of testing, then decrease until the end of the testing period. From a humidity initial rate of 42.5%, the compost contains 29.5% of water at the end of the testing. Actinomycetales, mycetales and heterotrophic bacteria increase respectively of 2,95 ulog, 3 ulog et 2,75 ulog. This study has contributed to know the composition of wastes.

Key words :

-
- 1 - Composting**
 - 2 – Wastes characterization**
 - 3 – Urban solid waste**
 - 4 - Valorization**
 - 5 – Separate collection of waste**

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE : Institut International de l'Eau et de l'Environnement

COT : Carbone Organique Total

C/N: Carbone sur Azote

DUS : Déchets Urbains Solides

FAO : Fond des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation

GIE : Groupement à Intérêt Economique

GPS : Global Positioning System

H : Humidité

MO : Matière organique

MVS : Matière Volatiles Sèches

NTK : Azote Total Kjeldhal

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur

PED : Pays en Développement

UFC : Unité Format Colonie

Table des matières

DEDICACES	I
REMERCIEMENTS	II
RESUME.....	III
LISTE DES ABREVIATIONS	V
LISTE DES TABLEAUX	VIII
LISTE DES FIGURES	IX
INTRODUCTION.....	1
I. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1. Définition de mots et concepts	3
2. Caractérisation des déchets solides.	4
3. Cadre réglementaire de la gestion des déchets au Burkina Faso	7
4. Classification des déchets solides.....	7
5. Critères d'évaluation techniques du compostage aérobie.....	7
6. Critères de maturité et de stabilité d'un compost.....	10
7. La microbiologie du compost et sa détermination des différentes phases de compostage	10
8. Les méthodes de caractérisation des déchets	11
9. les filières de traitement des déchets solides.....	14
10. Valorisation des déchets fermentescibles par compostage	16
II. MATERIELS ET METHODES	20
1- Présentation de la zone d'étude.....	20
2- Matériels utilisés	21
3- Estimation de la production journalière de déchets.....	21
4- Suivi des paramètres physico-chimiques au cours de l'essai de compostage	22
4.1- La température	22
4.2- Le pH	22
4.3- La conductivité.....	23
4.4- La matière organique.....	23
	VI

4.5-	Le carbone organique total.....	23
4.6-	La teneur en eau	23
4.7-	L'Azote Total Kjeldhal (NTK)	24
5-	Suivi des paramètres microbiologiques au cours de l'essai de compostage	24
III.	RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	25
1.	Caractérisation des déchets	25
2.	Comparaison des valeurs obtenues avec des données d'autres pays d'Afrique	27
3.	Suivi des paramètres physico-chimiques pendant l'essai de compostage.....	28
2.1	Suivi de la température.....	29
2.2	Suivi du pH	30
2.3	Suivi de l'humidité	31
2.4	Suivi du rapport C/N.....	32
4.	Suivi des paramètres microbiologiques pendant de l'essai de compostage	34
IV.	CONCLUSIONS	36
V.	RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES	37
VI.	ANNEXES	38

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Production de déchets par habitants et par jour de quelques pays.....	6
Tableau II : Rapport C/N et humidité recommandée pour le compostage des déchets.....	8
Tableau III : Composition des andains.....	22
Tableau IV : Conditions d'ensemencement pour les paramètres microbiologiques.....	25
Tableau V : Rapport C/N des micro-organismes et de résidus organique.....	33

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma illustratif de la production des déchets	3
Figure 2 : Typologie des déchets solides ménagers en pourcentage dans différents pays.....	4
Figure 3 : Composition moyenne des déchets solides produits à Ouagadougou	6
Figure 4 : Courbe théorique d'évolution de la température et du pH au cours du compostage d'après Mustin,(1987).....	8
Figure 5 : Processus de compostage	17
Figure 6 : Localisation du site de l'étude	20
Figure 7 : Images de la mise en place des andains.....	21
Figure 8 : Caractérisation des déchets	22
Figure 9 : Campagne de caractérisation des déchets du 11/01/2016 au 15/01/2016.....	25
Figure 10 : Campagne de caractérisation des déchets du 18/01/2016 au 22/01/2016.....	26
Figure 11 : Valeurs moyennes des campagnes de caractérisation des déchets.....	26
Figure 12 : Evolutions de la température moyenne des andains au cours de l'essai de compostage....	27
Figure 13 : Evolution du pH moyen des andains au cours de l'essai de compostage.....	29
Figure 14 : Evolution de l'humidité au cours de l'essai de compostage.....	30
Figure 15 : Evolution du rapport C/N au cours de l'essai de compostage.....	31
Figure 16 : Evolution des paramètres microbiologiques au cours de l'essai de compostage.....	33
Figure 17 : Aspect du compost au terme de l'essai de compostage.....	34

INTRODUCTION

La gestion intégrée des déchets solides constitue un problème environnemental préoccupant pour les pays en développement. La production moyenne journalière est estimée à 1,2 kg de déchets par personne et par jour. Ce volume passera à 1,42 kg en 2025 (World Bank, 2012). Toutefois, les difficultés de gestion font que l'impact global de ces actions est quasi nul. Les opportunités pour développer des systèmes durables de gestion des déchets solides sont limitées dues au faible budget alloué par les gouvernements (McBean et al., 2005).

Dans certaines villes africaines, moins de 30% des déchets sont évacués (PDM PSEAU, 2003). Dans les pays en développement, les pratiques de gestion des déchets solides contredisent les principes de protection des écosystèmes et de développement durable. Ces pratiques ont des impacts désastreux, à court et long termes, pour la santé des populations, les sols et les ressources. Or avec la croissance urbaine rapide, l'organisation et le financement de la gestion des déchets sont un défi difficile à relever pour les municipalités des grandes villes (PDM PSEAU, 2003). Des villes africaines émanent des initiatives venant des populations pour créer des petites entreprises privées ou des associations communautaires qui interviennent pour la collecte et le recyclage des déchets. Différentes expériences ont été menées dans plusieurs pays avec des processus communs de collecte, de transport, de traitement des déchets et de l'élimination finale des produits obtenus (Westendorf., 2000 ; Eriksen., 2002).

Au Burkina Faso comme dans la plupart des pays africains, l'accroissement et l'enracinement de la pauvreté se sont accompagnés d'une forte tension de phénomène démographique (Toguyeni, 2006). La ville de Ouagadougou a développé un modèle économique fondé sur la relation production et consommation, sans pourtant se soucier de la gestion des déchets. Ainsi, la production annuelle de déchets solides à Ouagadougou est passée de 300 000 tonnes à 800 000 tonnes par jour (Konate, 2008). La qualité intrinsèque des déchets de la capitale Ouagadougou est favorable au recyclage (matière organique, verres, plastiques, etc.) ce qui peut présager une minimisation des coûts de décharge, notamment par des activités de compostage. De plus, l'importance de la croissance de la demande alimentaire anime la volonté de mener l'agriculture en ville et nécessite des amendements de qualité.

Plusieurs voies de traitement des déchets solides existent et sont fonctions des objectifs visés. La filière de traitement des déchets ménagers par compostage présente un grand intérêt pour les pays en développement du fait de la nature très organiques des ordures et parallèlement du grand besoin des sols de ces pays (Matejka et al., 2004). Le compostage permet le recyclage des éléments nutritifs contenus dans les déchets et contribue à l'assainissement de l'environnement urbain (Compaoré et al.,

2010). Cette technique biologique constitue une voie de valorisation matière qui limite le recours au stockage et à l'incinération (Koledzi, 2011).

Les universités et les collèges ont une obligation morale et éthique d'agir de façon responsable vis-à-vis de l'environnement car ils sont amenés à être des leaders dans les organisations de protection de l'environnement (Armijo et al., 2008). Mbuligwe (2002) a constaté que le potentiel de valorisation des déchets dans trois instituts universitaires était de 71% en Tanzanie, aussi les établissements dans lesquels a été menée l'étude font une réutilisation des déchets alimentaires qu'ils mettent à la disposition des éleveurs de bétails qui les utilisent pour nourrir les animaux. L'auteur affirme que cette pratique réduit considérablement les dépenses en termes de gestion des déchets.

Notre étude a donc été initiée pour apporter une solution pour une meilleure gestion des déchets. Cette démarche s'inscrit dans un large projet de gestion des déchets solides sur le campus universitaire de 2iE dans la perspective d'une valorisation.

Objectifs

L'objectif global de cette présente étude vise à améliorer la gestion des déchets solides en vue d'une valorisation par compostage.

Hypothèses

Pour atteindre cet objectif, des hypothèses de travail ont été formulées à savoir que :

- ✓ Une bonne partie des déchets peut être utilisée pour faire du compost ;
- ✓ L'essai de compostage est possible.

Objectifs spécifiques

Plus spécifiquement, il s'agira de :

- Etudier la production globale et la nature des déchets ;
- Initier un essai de compostage.

La présente étude comporte trois parties. La première partie sera consacrée à la revue bibliographique qui portera sur la caractérisation des déchets et le compostage. La seconde partira portera sur le matériel et les méthodes utilisés pour mener à bien l'étude. La troisième partie traitera des résultats obtenus au cours de l'essai des expérimentations suivi d'une discussion. A la lumière des résultats obtenus et des objectifs fixés, une conclusion contenant à la fois des recommandations et perspectives marquera la fin de l'étude.

I. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Définition de mots et concepts

1.1. Déchets

✓ Définition usuelle

Selon l'article 1 (n° 75-633) de la loi Française du 15 juillet 1975, un déchet est défini comme « Tout résidu d'un processus de production, de transformation, ou d'utilisation, toute substance, matériau produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon et qui ont de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits ou des odeurs, et d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement. »

En se référant aux conventions de Bâles (adoptées le 22 mars 1989) et de Bamako (adoptées le 30 janvier 1991), on entend par *déchets* des substances ou objets qu'on élimine, qu'on a l'intention d'éliminer ou qu'on est tenu d'éliminer en vertu des dispositions du droit national.

La loi N°006-2013/AN du 02 Avril 2013 portant sur le Code de l'Environnement au Burkina Faso en son article 04 de la Section 02, définit le déchet comme tout résidu de matière ou de substance abandonné ou destiné à l'abandon qu'il soit liquide, solide ou gazeux, issu d'un processus de fabrication, de transformation ou d'utilisation d'une matière ou d'un produit.

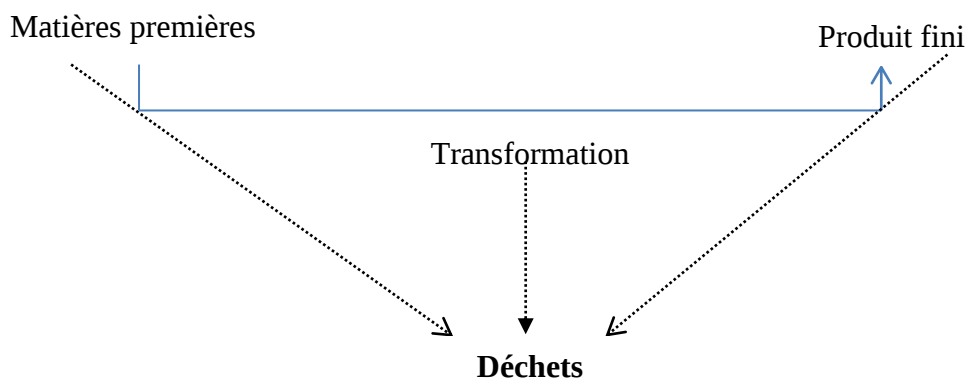


Figure 1 : Schéma illustratif de la production des déchets

✓ Approche réglementaire

La définition juridique du déchet se compose d'une conception subjective et d'une conception objective. Selon la conception subjective, un bien devient un déchet lorsque son propriétaire a la volonté de s'en débarrasser. Il demeure lui appartenir tant qu'il n'a pas quitté la propriété de cette personne ou l'espace qu'elle loue car elle peut à tout moment changer d'avis. Ce bien devient une propriété de la municipalité lorsqu'il est déposé sur la voie (ou l'espace) publique ou dans une poubelle collective,

car par cet acte son propriétaire signifie clairement sa volonté d'en abandonner tout droit de propriété. Selon la conception objective, un déchet est un bien dont la gestion contrôlée au profit de la protection de la santé publique et de l'environnement, indépendamment de la volonté du propriétaire et de la valeur économique du bien : les biens recyclages qui sont des matières premières secondaires entrent dans cette définition objective.

✓ Approche environnementale

« Déchets »= déchets solides, liquides et gazeux qui ont un impact négatif sur l'environnement. Cette approche environnementale permet de prendre également en compte en plus des déchets solides municipaux :

- Les eaux usées municipales (eaux usées résiduelles urbaines) et les eaux usées résiduelles industrielles ;
- Les gaz et les fumées rejetés dans l'atmosphère par des cheminées ou des échappements des engins motorisés.

1.2. Les déchets municipaux

Les déchets municipaux sont constitués des déchets ménagers et assimilés, des déchets industriels banaux et des encombrants ou objets.

Les ordures ménagères, les déchets ménagers spéciaux et des déchets ménagers et assimilés des structures constituent la famille des déchets ménagers et assimilés. Sont qualifiées d'ordures ménagères, les déchets collectés dans le cadre du ramassage par les collectivités, les GIE, les associations, etc. Les déchets ménagers spéciaux sont contenus dans les déchets ménagers en petite quantité mais présentent des propriétés dangereuses et sont responsables de la présence des polluants. Ils contiennent des produits explosifs (aérosols), corrosifs (acides), irritants (ammoniaque), produits facilement inflammables et nuisibles pour la santé et l'environnement.

Les encombrants sont constitués de matelas, meubles, réfrigérateurs, télévisions, etc. Ces déchets sont collectés soit de porte en porte, soit réceptionnés dans une installation mise à la disposition des ménagers. Les déchets des espaces publics proviennent des rues, marchés, égouts, espaces verts ou des établissements publics comme les administrations, les écoles, les hôpitaux, etc.

2. Caractérisation des déchets solides.

2.1. Typologies des déchets

La connaissance de la typologie des déchets est essentielle pour proposer un schéma de gestion adaptée, du moins pour apprécier les possibilités de valorisation des matériaux recyclables tels que :

les métaux, papiers, cartons, verres, plastiques et fraction fermentescible (Buenrostro et *al.*, 2003 ; Zaïri et *al.*, 2004).

La méthodologie la plus utilisée est décrite dans la norme AFNOR (1996) dont découle le MODECOM. Cette méthode propose 12 catégories de constituants : les fractions fermentescibles, papiers, cartons, textiles, textiles sanitaires, plastiques, verres, métaux, inertes, complexes, fines inférieure à 20 mm et autres. Suivant la finalité de l'étude, d'autres chercheurs proposent une classification typologique pouvant varier de 2 à 98 constituants (Fehr et *al.*, 2000). (Buenrostro et *al.*, 2003) ont considéré 7 catégories (matières fermentescibles, papier-carton, verres, éléments métalliques, textiles, graviers et autres) pendant leur étude pour la composition des déchets.

Les déchets dans les pays en développement en général et en Afrique Subsaharienne en particulier se composent d'une fraction fermentescible de 45% contre une moyenne de 35% dans les pays industrialisés à l'exception de la Grèce (42%) (Ka-Mbayu et *al.*, 2007 ; Charnay., 2005).

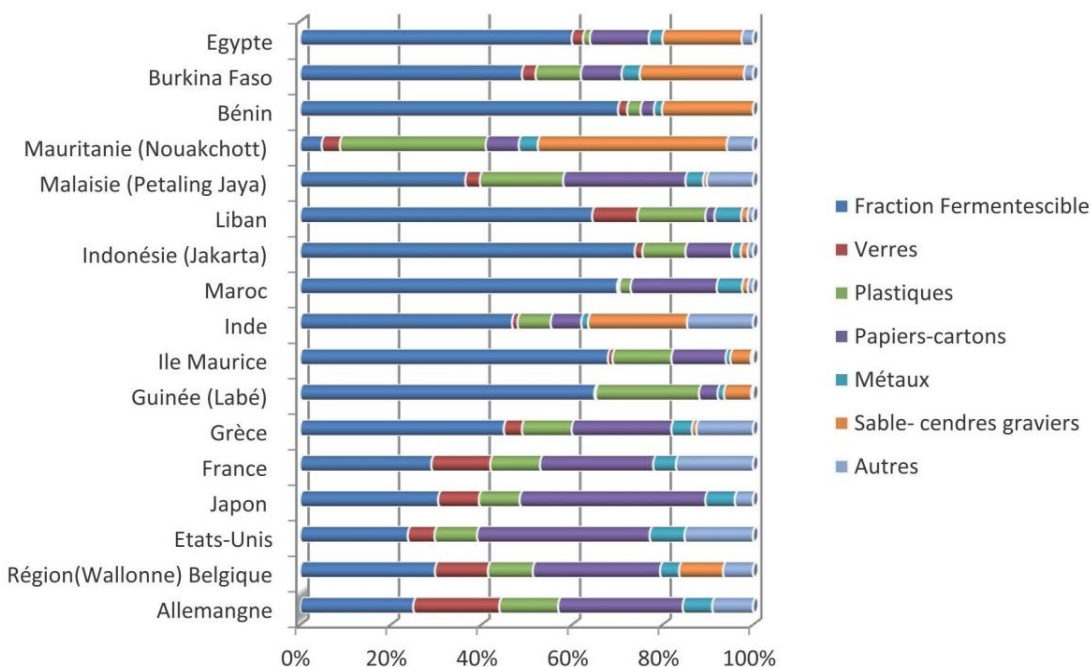


Figure 2 : Typologie des déchets solides ménagers en pourcentage dans différents pays (Aloueimine., 2006 ; Charnay., 2005).

(Aina., 2006) indique que les quantités de plastiques ont subi une baisse dans les poubelles ménagères au profit d'autres fractions moins polluantes grâce aux politiques menées dans les pays industrialisés visant à réduire à la source les quantités de plastiques provenant des emballages. Par contre, l'absence de politiques similaires dans les pays en développement allant dans ce sens fait que cette catégorie de déchets demeure très présente et peut représenter plus de 20% des déchets solides ménagers.

Dans les pays en développement, une particularité des déchets solides est la forte teneur en fractions fines $\Phi < 20\text{mm}$, qui peut atteindre jusqu'à 50 % (Soclo et *al.*, 1999). Elles sont souvent constituées

de sables et de petits cailloux provenant en grande partie de la nature de l'habitat (Mbulugwe et *al.*, 2002 ; Thonart et *al.*, 2005). Cela s'explique par le fait que les sols en général des habitations sont non revêtu.

Tableau I : Production de déchets par habitants et par jour de quelques pays

Pays	Ville	Référence	Production de déchets (Kg/hab/jr)
Brésil	Uberlândia	Ferh et al., 2000	0,51
Cameroun	Yaoundé	Ngnikam, 2000	0,85
Cameroun	Bafoussam	Ngnikam, 2000	0,37
Chine	Hong Kong	Chung et al., 1998	0,7
Chine	Guangzhou	Chung et al., 1998	0,4
Etats-Unis	Moyenne nationale	ONEM, 2001	1,8
France	Paris	www.ordif.com, 2002	1,37
Malaise	Kuala Lumpur	Kathirvalle et al., 2003	1,7
Malaise	Moyenne nationale	Kathirvalle et al., 2003	0,5-0,8
Maroc	Moyenne nationale	ONEM, 2001	0,75
Mauritanie	Nouakchott	Aloueimine et al., 2005 a & b	0,21
Mexique	Mexicali	Ojeda-Benitz et al., 2003	0,59

2.2. Le gisement des déchets solides

La connaissance de la production des déchets solides est essentielle dans la planification d'un système de gestion afin de prévoir au mieux la collecte et les installations de traitement. (Koledzi., 2011). Dans la ville de Yaoundé au Cameroun la production de déchets est de 0,85 kg/hab/jour (N'gnikan., 2000), dans la ville de Nouakchott (Mauritanie) elle est de 0,21 kg/hab/jour (Aloueimine., 2006). Au Burkina Faso, elle est de 0,54 kg/hab/jour (Dessau-Soprin., 2000). En général, dans les pays industrialisés la moyenne se situe autour de 1,4 à 1,7 kg/hab/jour alors qu'elle est beaucoup plus faible, inférieure à 1 kg/hab/jour dans les pays en développement (Kathirvale et *al.*, 2003).

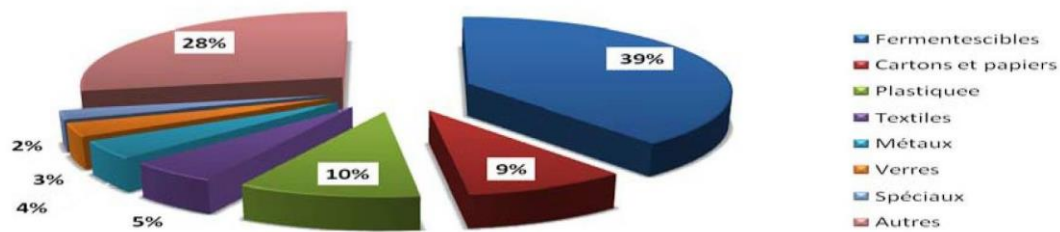


Figure 3 : Composition moyenne des déchets solides produits à Ouagadougou.

Source (Tezanou., 2003).

3. Cadre réglementaire de la gestion des déchets au Burkina Faso

Le cadre normatif de la gestion des déchets au Burkina Faso, à Ouagadougou en particulier, comprend un volet législatif et un volet réglementaire.

✓ Le Code de l'Environnement constitue la cadre législatif principal de la gestion des déchets au Burkina Faso. Ce code pose les principes généraux de préservation de l'environnement et d'amélioration du cadre de vie, définit les termes et fixe le cadre de répression des infractions.

✓ Le cadre réglementaire est composé de décrets pris en Conseil des Ministres et arrêtés municipaux. Parmi ces décrets, le décret conjoint n°98-323 portant réglementation de la collecte, du stockage, du transport, du traitement et l'élimination des déchets solides, édicté suite aux prescriptions du Code de l'Environnement, vient préciser, responsabilités et obligations spécifiques des communes en matière de collecte et de traitement des déchets solides. (Loi n°006-2013/an portant code de l'environnement au Burkina Faso).

4. Classification des déchets solides

Il existe différentes classifications des déchets selon leur origine, la nature du risque sanitaire pour l'Homme et l'environnement ou selon l'objectif de la classification (Aloueimine, 2006). Les déchets sont également classés selon leur origine : déchets agricoles, industriels et ménagers (Tini, 2003). Les déchets solides ménagers représentent l'ensemble des déchets produits par les ménages.

5. Critères d'évaluation techniques du compostage aérobie

La connaissance de la composition et des quantités des déchets permet d'optimiser le mode de gestion et de promouvoir la création des filières de valorisations. Ceci contribue non seulement à la salubrité de l'environnement des villes, mais aussi peut jouer un rôle significatif dans la lutte contre la pauvreté particulièrement dans les pays en développement.

5.1- Masse volumique

La masse volumique est l'un des paramètres importants dans le choix de la conception des moyens de collectes des déchets solides ménagers et des techniques de valorisation/recyclage des déchets. En raison de l'humidité élevée, de la typologie des déchets, de la proportion importante de la matière fine, des matières fermentescibles et des constituants lourds, la masse volumique est en moyenne plus élevée dans les pays en développement que dans ceux industrialisés (Charnay., 2005 ; Cointreau., 2006).

5.2- Humidité

L'humidité est un paramètre déterminant pour fixer le taux de dégradation des déchets (Berthe., 2006), ou les modes de traitement des déchets (Gachet., 2005). Elle est fortement dépendante de la composition des déchets. Les déchets des pays en voie de développement riches en matière organique, se caractérisent par une forte teneur en eau. (Charnay., 2005) souligne qu'en Europe, particulièrement en France, l'humidité approche 35 % du fait de la faible proportion de matières fermentescibles et du pourcentage non négligeable des plastiques, elle dépasse parfois 75 % avec une moyenne générale de 50 % dans les pays du sud.

5.3- Matière solide volatile

Ce paramètre est utile pour évaluer le potentiel polluant ou non des déchets (Aloueimine., 2006). 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 en MSV fait augmenter le Pouvoir calorifique Inférieur (PCI). Une valorisation par compostage serait un traitement recommandée pour une des MSV faible (Charnay., 2005).

5.4- Le rapport Carbone/Azote (C/N)

Les bactéries utilisent le carbone comme source d'énergie et l'azote comme source protéique. Le procédé de compostage entraîne une décomposition de la matière organique, donc une consommation du carbone et de l'azote correspondant à la diminution du rapport carbone sur azote (C/N). En outre, ce rapport exprime la proportion entre le carbone et l'azote biodisponible (Koledzi., 2011). Pour les ordures ménagères hétérogènes, ce rapport se situe entre 25 et 45 alors que le rapport C/N minimum des déchets verts est proche de 30 (Bernal et al., 1998).

Tableau II : Rapport C/N et humidité recommandée pour le compostage des déchets.

Rapport C/N	Humidité(%)	Référence
20-35	50-65	Mohee (2005)
20-30	-	Mbulingwe et al., (2004)
20-25	-	Hoornweg et al., (2005)

15-20	-	Iyengar Srinath et al., (2005)
<30	40-50	MBT (2003)

5.5- La température et le pH

Le pH est un indicateur relié à la concentration des ions H_3O^+ dans une solution aqueuse. Le pH des suspensions solides (déchets en phase de dégradation, compost mur) varie entre 5 et 8 pour atteindre 9 (Yu et al., 2009). Le pH optimal se situe autour de la neutralité en fonction de la nature du substrat (Damien, 2004). Le pH est un indicateur de décomposition biologique et biochimique. La première phase acidogène est difficilement observable Sanchez-Monedero et al., (2001).

Le suivi de la température renseigne sur la qualité du processus de dégradation (Bustamante et al., 2008) : un épuisement en oxygène peut ainsi être décelé et corrigé par un retournement. Les variations des montées en température sont fonction de l'aération et de la composition du substrat notamment la teneur en eau nécessaire au développement des microorganismes impliqués (Koledzi., 2011).

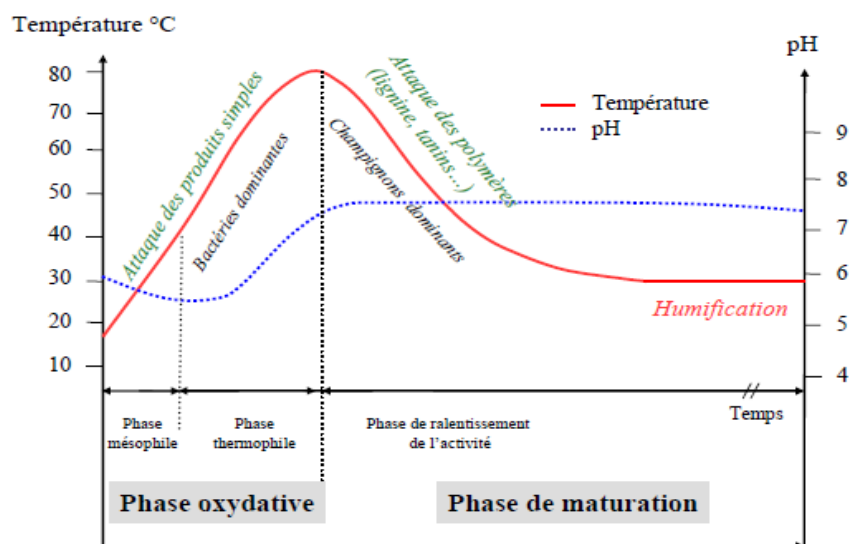


Figure 4 : Courbe théorique d'évolution de la température et du pH au cours du compostage d'après Mustin, (1987)

5.6- L'aération

La présence d'oxygène est indispensable au bon déroulement du compostage pour maintenir les conditions aérobies nécessaires à une décomposition rapide et inodore (Koledzi., 2011). Au fur et à mesure de la dégradation, le besoin en oxygène diminue (Mustin, 1987). Les systèmes d'aération sont divers et variés : retournement mécanique, aération forcée ou pilotée (Bari, 2001). L'apport en oxygène réduit aussi l'humidité initiale (si elle est trop forte), améliore l'homogénéité du substrat et diminue une possible élévation de température (Koledzi., 2011).

5.7- La durée du compostage

La durée du compostage dépend des cycles biologiques des micro-organismes impliqués. La durée de la réplication est conditionnée par des facteurs environnementaux et par la constitution génétique des

micro-organismes. Bien que des facteurs environnementaux puissent être améliorés, les limites génétiques demeurent. La durée de compostage dépend de la nature de la matière organique mise à composter et de l'efficacité du processus, déterminée par le degré d'aération et d'agitation (Tuomela *et al.*, 2000).

6. Critères de maturité et de stabilité d'un compost

La maturité du compost est l'étape finale dans le processus de compostage. Elle constitue l'un des principaux critères d'appréciation de la qualité du compost en agronomie. La maturité des composts correspondant à la stabilité de la matière organique sur le plan physique, chimique et biologique est fonction des différentes proportions des constituants initiaux et du respect des conditions (humidité, aération...) de mise en œuvre du processus de compostage (El-Fadel *et al.*, 2002). Les paramètres empiriques fournissent de bons indicateurs de la dégradation aérobie de la matière organique et de l'avancée du processus d'humification. Il s'agit en occurrence d'observer et de manipuler le compost afin de définir son stade d'évolution. Cette méthode présente l'avantage d'être rapide mais peu scientifique. (Khalil, 2005 ; Doublet *et al.*, 2011) mentionnent qu'un compost bien humifié possède les caractéristiques suivantes :

- ✓ Il ne colle pas ;
- ✓ Il ne dégage pas d'odeur d'ammoniac ;
- ✓ Sa température est basse même si l'humidité reste bonne ;
- ✓ Il est granuleux et de couleur foncée ;
- ✓ Ses constituants d'origine ne sont plus distingués à l'œil nu.

Les méthodes biologiques qui mesurent la phytotoxicité des composts sont actuellement les méthodes les plus précises et les plus efficaces (Yulipriyanto, 2001). Ces méthodes incluent le test de germination et l'accroissement racinaire (Zuconni *et al.*, 1981).

7. La microbiologie du compost et sa détermination des différentes phases de compostage

L'évolution des microorganismes présente un profil défini en fonction des espèces au cours des différentes phases de compostage. Cette évolution est liée principalement aux paramètres physico-chimiques, la nature et la structure des composés compostés (Rosenzweig *et al.*, 1980). Au cours du compostage, plusieurs phases théoriques se succèdent. La première phase est dite mésophile du fait des températures atteintes inférieures à 45°C. La chaleur dégagée au cours de cette phase dépend de la nature des déchets compostés et le type d'isolement du milieu extérieur. Ensuite, un changement de communautés mésophiles par des communautés thermotolérantes et thermophiles. La phase thermophile se caractérise par des températures pouvant atteindre 65°C voire 75°C. Cette phase est suivie par un ralentissement de l'activité pendant laquelle, la température diminue graduellement. S'en suit une phase de maturation où apparaissent lentement les éléments précurseurs de l'humus.

Les microorganismes principaux représentés dans le compost sont les bactéries, les

actinomycètes et les champignons. Les champignons (mycètes) premiers colonisateurs des composts, dégradent plus de carbone organique que les bactéries hétérotrophes et les actinomycètes. (Yulipriyanto, 2001). La plupart des champignons préfère un environnement acide et tolèrent un large éventail de pH avec un niveau modérément élevé de l'azote nécessaire à leur développement (Loubna, 2014). La majorité des champignons sont mésophiles et se développe entre 5 et 37°C, avec une température optimale de 25 à 30°C (Dix et al., 1995).

Les actinomycètes sont des bactéries filamenteuses multicellulaires dont la présence a été constatée dans la phase thermophile et dans la phase de maturation agissant plus tardivement que les autres Tuomela et al. (2000). Les actinomycètes tolèrent des pH légèrement basique et se caractérisent par une croissance lente (Loubna, 2014). Ils peuvent dégrader la cellulose et la lignite tout en tolérant des températures et des pH plus élevés que des champignons.

Les bactéries hétérotrophes sont présentes dans les substrats à composter. Ils agissent en oxydant les composés organiques afin de récupérer le carbone (Misra et al., 2005). Elles se distinguent des champignons par leur rapport surface/volume très élevé, qui leur permettent de transférer rapidement des substrats solubles à l'intérieur de la cellule (Tuomela et al., 2000). Les champignons et les bactéries hétérotrophes sont dominants dans les déchets organiques frais et aux premiers stades du compostage entre 20 et 40°C (Yulipriyanto, 2001).

8. Les méthodes de caractérisation des déchets

8.1. Méthodes indirectes

La plus populaire est la méthode dite « *material flows methodology* » développée par l'Agence américaine de la Protection de l'Environnement. Cette méthode se base sur l'analyse des produits mis sur le marché et repose sur le principe suivant :

- Les produits sont commercialisés puis, après usage, ils sont rejetés en tant que déchets ;
- Si on arrive à connaître avec précision les quantités de chaque produit manufacturé et mis sur le marché ainsi que les durées de consommation respectives de ces produits, alors les quantités de déchets générées pourraient être calculées.

Comme toutes méthodes théoriques, cette méthode est très rapide et moins coûteuse, si on la compare aux méthodes directes (Ben Ammar., 2006). La méthode indirecte présente cependant des limites :

- Elle ne peut être qu'appliquée dans des municipalités totalement urbaines et dans lesquelles les populations se procurent tout ce dont ils ont besoin dans les commerces ;
- Elle ne peut être efficace que si tous les produits commercialisés sont répertoriés et les données relatives à leur production et aux taux de consommation locale disponibles ;
- Elle se limite au maillon de la chaîne qui est la production des consommables et ne considère que l'une de ses possibilités ;

- Elle ne tient pas compte des facteurs humains et naturels qui sont susceptibles d'intervenir de façon significative sur le cycle de vie des produits de consommation.

8.2. Méthodes directes

Les méthodes d'analyse directes sont basées sur l'échantillonnage et le tri manuel des déchets pour déterminer leur composition selon des catégories prédéfinies. Ces méthodes reposent généralement sur des protocoles qui définissent les principes d'échantillonnage et de tri d'une campagne de caractérisation. Les principales sont : la méthode MODECOM, la méthode IBGE, la méthode EPA et la méthode ARGUS (Ben Ammar., 2006).

a) La méthode MODECOM

Cette méthode a été développée par l'Agence Française de l'Environnement en 1994. Elle donne le canevas pour trier un échantillon de 500 kg de déchets d'une aire géographique donnée. L'échantillonnage dans la fosse d'une usine se réfère à la norme NF XP X 30-411 et celui dans une benne à la norme NF XP X 30-416. La caractérisation se fait sur le produit sec par tranches granulométriques (100, 20 et 8 mm). Les ordures ménagères sont séparées en 13 catégories (déchets putrescibles, papiers, cartons, complexes, textiles, textiles sanitaires, plastiques, combustibles non classés, verres, métaux, incombustibles non classés, déchets ménagers spéciaux et éléments fins < 20 mm), puis en 39 sous-catégories (ADEME., 1998). Il est nécessaire de faire deux campagnes de caractérisations sur une année (été et hiver), et chaque campagne comporte 5 étapes :

- Enquête préalable pour recueillir l'ensemble des données nécessaires à l'organisation d'une campagne d'analyse ;
- Choix des conteneurs ou des bennes de collecte à échantillonner ;
- Constitution des échantillons à trier ;
- Tri de l'échantillon de 500 kg en 13 catégories puis en 39 sous-catégories ;
- Analyse au laboratoire.

b) La méthode IBGE

Cette méthode a été initiée par l'Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement en 1995 en partenariat avec l'Agence Bruxelles-Propreté afin d'évaluer le gisement et la composition des déchets ménagers.

L'établissement du bilan global de la production des déchets ménagers pour 1999 repose sur 3 types de données dont :

- Les données fournies par les gestionnaires de collecte des déchets ménagers ;
- Les données découlant d'une modélisation ;
- Les données expérimentales.

Les déchets sont au minimum triés en 13 catégories (les mêmes que MODECOM) et les mesures sont

faites sur les échantillons bruts (humides). Les résultats obtenus sont extrapolés à l'année entière et au total des ménages (Squilbin et *al.*, 2002).

c) La méthode EPA

Cette méthode a été mise en place par l'Agence Irlandaise pour la protection de l'Environnement en 1996. La caractérisation est biannuelle comme dans la méthode MODECOM. L'échantillonnage et la taille de l'échantillon se fait en fonction du nombre de ménages de la zone d'étude, du type d'habitat, du niveau social et du type de collecte utilisé. Sept classes sociales ont été définies et regroupées en trois catégories : les zones de plus de 25 000 ménages, les zones entre 25 000 et 400 ménages et celles de moins de 400 ménages (EPA., 1996).

d) La méthode ARGUS

Développé par l'Agence Allemande de l'Environnement en 1979-80 et en 1983-85, ce protocole fait une classification des déchets en 13 catégories que sont : métaux ferreux, métaux non ferreux, papiers et cartons, verre, plastiques, déchets organiques, bois, textiles, minéraux (autres que verres), composites, déchets dangereux, autres et éléments fins < 10mm. Ces déchets sont ensuite répartis en 41 sous-catégories (Ben Ammar., 2006).

Il convient de noter que toutes ces méthodes ne peuvent cependant être transposées comme telles au contexte des pays en développement à cause d'une part des différences qu'il existe en ces pays et les pays industrialisés, et d'autre part des particularités des pays en développement. La nécessité des méthodes rigoureuses adaptées aux conditions locales des pays en développement a été exprimée à travers certains travaux de recherche. C'est le cas par exemple de la thèse de Ben Ammar et de Aloueimine en 2006 (Ngahane., 2015).

8.3. Quelques méthodes développées pour les pays en développement

Dans le but de connaître les ordures ménagères produites dans la capitale mauritanienne, de faire une évaluation de la fraction organique des ordures ménagères qui est valorisée au niveau des ménages et des quantités récupérées à partir des sites de transit, Aloueimine a développé une méthode de caractérisation des ordures ménagères qui opère de porte en porte, dans les différents quartiers et standings aussi bien pendant saison sèche que pluvieuse. Précédée d'une enquête préliminaire, la procédure d'échantillonnage abouti à la constitution d'un tas de 130 à 150 kg d'ordures ménagères issus de secteurs choisis de façon aléatoire. La ville a été divisée en trois zones différentes en fonction du niveau de vie des ménages à savoir une zone de haut standing, moyen standing et bas standing. Le standing est le seul critère d'habitat. Ces zones ont été sectorisées de sorte que chaque secteur compte 30 ménages. Les ordures ménagères produites pendant 7 jours sont collectées le 8^{ème} jour pour la

caractérisation pendant 3 semaines. Le tri manuel sur échantillons bruts a suivi et les ordures ont été réparties en 13 catégories principales comme dans la méthode MODECOM. Les caractéristiques physico-chimiques déterminées sont les masses volumiques, l'humidité, la teneur en matière organique (solides volatils), le pouvoir calorifique inférieur (PCI) et la teneur en métaux lourds (Aloueimine., 2006).

La méthode de caractérisation des déchets ménagers consignée dans la thèse de Ben Ammar et dite « adaptées » aux pays en développement a été mise au point dans le cadre du Programme de Recherche « Mise en place d'une filière de compostage en Tunisie ». Les zones d'échantillonnage ont été identifiées à partir de la sectorisation du Grand Tunis en 5 secteurs dont la population était de 691250 habitants en 2002. L'échantillonnage s'est fait sur des bennes choisies aléatoirement parmi toutes celles desservant ces secteurs. Quatre campagnes de caractérisation ont été menées pour estimer les variations saisonnières de la production des déchets ménagers. Ainsi 600 échantillons de 20 kg au total ont fait l'objet d'un tri dit « adapté » comportant 2 étapes. Un tri des déchets bruts en tranches granulométriques à l'aide d'une table à deux coupures (100 et 20mm), complété par un tri sur ces différentes tranches séchées à 80°C jusqu'à stabilisation des masses (environ une semaine). Les déchets ont été répartis en 13 catégories puis en 5 sous-catégories : les déchets putrescibles, papiers, cartons, composites, textiles, textiles sanitaires, plastiques, combustibles non classés, verres, métaux (ferreux ou non ferreux), incombustibles non classés, déchets ménagers spéciaux et éléments très fins. Les analyses au laboratoire ont consisté à la détermination du taux de matière organique et des teneurs en métaux lourds dans la fraction putrescible et fine ; en la détermination des teneurs carbone et en azote dans les putrescibles, les papiers et les cartons. Cette méthode combinant un échantillonnage dit « optimisé » et d'un tri dit « adapté » a été présentée comme la solution opérationnelle à toutes les contraintes et spécificités liées au pays en développement (Ben Ammar., 2006).

Ces deux méthodes qui ne sont pas les seules font ressortir que la méthode de caractérisation est définie selon les objectifs à atteindre et le contexte de l'étude.

9. les filières de traitement des déchets solides

Il existe plusieurs filières de traitement des déchets, (Crowe et *al.*, 2002) identifie deux techniques de traitement : la mise en décharge et la valorisation matière, y compris la valorisation agronomique et énergétique.

9.1. Mise en décharge

Adaptée à tout type de déchets, c'est la technique la plus ancienne et la plus utilisée à travers le monde (Gachet., 2005). Malgré les impacts qu'elle engendre, elle est pratiquée depuis longtemps. Les

décharges, qu'elles soient contrôlées ou non dans les pays en développement sont le réceptacle de la grande quantité des déchets entraînant non seulement des risques d'émission de biogaz issu de la biodégradation anaérobie des fractions fermentescibles mais également la circulation de lixiviats pouvant contaminer aussi bien les eaux souterraines que superficielle. (Thonart et *al.*, 2005).

Conçu pour absorber les quantités croissantes des déchets générés chaque année et parer aux insuffisances des décharges, l'enfouissement traditionnel a été conçu. Il s'agit de disposer les déchets par couches successives et de les couvrir après les avoir compactées pour empêcher des nuisances telles les odeurs nauséabondes générées par la décomposition des déchets ensevelis, les animaux, l'envol des matériaux légers. Le taux d'humidité le plus souvent rencontré dans un enfouissement traditionnel varie de 15 à 25 % (Markarian et *al.*, 2003). En fin d'exploitation, les casiers reçoivent une couverture destinée à les isoler des eaux de pluie et à contenir les fuites de gaz.

9.2. Traitement par valorisation matière

✓ Le compostage

C'est un procédé biologique de conversion et valorisation des matières organiques présentes sous forme végétale ou animale qui permet, sous l'action des bactéries aérobies (présence d'oxygène), leur transformation en substance humique. Le choix d'une filière de valorisation matière comme le compostage, traitement à faible coups apparait comme généralement comme la solution la mieux adaptée aussi bien pour les villes des pays en développement que celles des pays industrialisés en raison de la proportion importante de matières fermentescibles contenus dans plusieurs catégories de déchets. Cette technique de valorisation de la matière fermentescible est très répandue et adoptée. (Topanou., 2012).

✓ La méthanisation

La méthanisation est un processus de déjection anaérobie. Elle est une forme de valorisation énergétique par la biodégradation de la matière organique des déchets conduisant à la libération d'un biogaz. Le biogaz contient entre 50 et 70 % de méthane, fraction la plus riche en énergie. Le déchet initial débarrassé de la fraction organique est appelé digestat, fraction solide. Un post traitement de ce dernier permet de d'obtenir un matériau similaire au compost, le méthanisat.

✓ Réemploi-Recyclage-Réutilisation

Selon (Gbedo., 2010), le recyclage des déchets et le réemploi nécessite un tri manuel par les acteurs de la filière avant et pendant la collecte ou sur les décharges. Cette pratique réalisée par les populations

des pays en développement offre un marché abondant en produits réutilisables et à faible coût. Les poubelles des ménages regorgent de richesses inestimables qui nourrissent directement ou non les différents intervenants du secteur informel (Gbedo., 2010).

✓ **L'incinération**

La valorisation énergétique est généralement faite à travers l'incinération. Elle consiste à brûler les ordures dans un four spécialement adapté à une température d'environ 850°C en libérant de la chaleur et de la vapeur, des effluents gazeux (fumées), des mâchefers (30%) et des cendres volantes (3 à 4 %) (FoE., 2002 ; Kaibouchi., 2004). Elle a l'avantage de d'une forte réduction de la quantité et du volume des déchets. Toutefois, la valorisation énergétique engendre une forte pollution atmosphérique avec l'émission de plusieurs gaz (Hefa et *al.*, 2007). Aussi, l'un des inconvénients majeurs de cette technologie est que ses rejets nécessitent un traitement très onéreux. Seuls les équipements d'épuration des fumées peuvent représenter plus de 30 % du coût total de l'incinérateur (Emmanuel., 2004). L'incinération conduit à la formation de scories, appelés mâchefers d'incinération qui ont l'avantage d'être valorisés sous certaines condition en travaux publics (remblai et autre) (Aloueimine., 2006).

10. Valorisation des déchets fermentescibles par compostage

10.1. Mode de compostage des déchets solides

La solution la plus sûre pour le traitement des ordures ménagères dans les pays en développement reste le tri-compostage avec valorisation des matériaux recyclables (Tinôco et *al.*, 2009).

✓ **Le compostage centralisé**

Ce type de compostage est réalisé au bout de la chaîne de collecte (décharge finale). Il concerne les grosses installations d'une capacité de traitement supérieur à 100 T/jour. Les déchets peuvent être la fraction fermentescible compostage de la fraction fermentescible des ordures ménagères, FFOM) ou peuvent être bruts (tri-compostage).

Pour le compostage de la fraction fermentescible, une collecte sélective organisée semble être la solution la plus efficace (FCM., 2005). Si une zone met en œuvre une filière de compostage de la FFOM simultanément à une réduction de la fréquence des autres collectes de déchets, il est important de garantir que les collectes des déchets biodégradables soient assez fréquentes pour prévenir l'accumulation des déchets à des niveaux inacceptables pour les habitants. Cela est particulièrement important dans des régions à climat plus chaud où les déchets biodégradables peuvent commencer à se décomposer et émettre des odeurs et des nuisances environnementales avant la collecte si celle-ci n'est pas assez fréquente. Ce problème lié souvent à la collecte sélective amène le plus souvent au tri-compostage de déchets bruts des déchets bruts dans les pays en développement (Koledzi., 2011).

Le tri-compostage est un procédé biomécanique qui permet d'avoir un compost stable, hygiénique avec un taux d'indésirables ou d'impuretés qui respecte les normes de qualité en vigueur. Les cribles (tri dimensionnel), le tapis sélectionneur ou double (tri par rebond ou adhérence), la table densimétrique (tri densimétrique), l'overband (tri magnétique) sont les équipements de tri les plus utilisés. Cela permet de séparer ces éléments indésirables du reste de la matière en compostage. (Koledzi., 2011).

✓ Le compostage décentralisé

Il est réalisé par les ménages, les ONG ou les associations des quartiers. Il est réalisé le plus souvent dans des centres de petites tailles qui peuvent assurer le tri et le compostage jusqu'à 5-6 T/J de déchets provenant de leur voisinage. Il s'agit d'une installation disposant d'un équipement simple nécessitant un faible investissement et un coût d'entretien réduit. Leur intérêt ne réside pas seulement dans le recyclage des matières nutritives mais aussi dans l'amélioration des conditions d'hygiène locales dans la réduction de la quantité des déchets transportés et mis en décharge (Muller., 2006 ; Kumbrom et *al.*, 2004 ; Drescher et *al.*, 2006). Il est cependant rare que ces petites installations de compostage soient intégré au système municipal de traitement des déchets (Koledzi., 2011). L'utilisation et l'entretien des engins de collecte posent souvent des difficultés tant techniques que financières. Dans les pays en développement, le compostage décentralisé pourrait libérer des capacités de transport qui pourraient éventuellement être mises à profit pour assurer le raccordement au service de ramassage des quartiers non desservis (Koledzi., 2011).

10.2. Processus de compostage

✓ la phase **mésophile** : c'est la phase initiale du compostage. Les matières premières sont envahies par les micro-organismes mésophiles (bactéries et champignons essentiellement), absorbant les molécules simples (sucres simples, acides aminés, alcools...) et transformant une partie des polymères (protéines, acides nucléiques, amidon, pectines, hémicellulose, cellulose...). Leur activité engendre une montée en température (de 10-15 °C à 30-40 °C), un dégagement important de CO₂ (d'où la diminution du rapport C/N) ainsi qu'une acidification. La dégradation de la cellulose durant cette phase est responsable de plus de 75 % de la perte de poids sec.

✓ la phase **thermophile** : elle est atteinte, au centre du tas, à des températures élevées (de l'ordre de 60 à 70 °C pour les composts agricoles), auxquelles ne résistent que des micro-organismes thermo tolérants ou thermophiles (arrêt de l'activité des champignons, développement des actinomycètes et des bactéries thermophiles). Les pertes en azote, minéralisé sous forme ammoniacale (NH₄⁺), qui peut être volatilisé sous forme d'ammoniac (NH₃) dans certaines conditions, ainsi que l'évaporation d'eau, sont plus importantes au cours de cette phase. La libération de CO₂ peut entraîner,

à la fin des phases thermophiles, jusqu'à 50 % de perte en poids sec. Les hautes températures caractérisant la phase thermophile ne concernent que le centre du tas.

✓ la phase de **refroidissement** : elle est la phase intermédiaire entre la phase thermophile et la phase de maturation. Elle prend fin avec le retour à la température ambiante. Le milieu est colonisé de nouveau par des micro-organismes mésophiles. Ils dégradent les polymères restés intacts en phase thermophile et incorporent l'azote dans des molécules complexes.

✓ la phase de **maturation** : elle est la phase qui présente peu d'activité microbiologique mais est adaptée à la colonisation par la macrofaune, en particulier les lombrics lorsque ceux-ci sont présents dans l'environnement du tas. Les matières organiques sont stabilisées et humifiées par rapport aux matières premières mises à composter. À ce stade le pH tend à s'équilibrer vers la neutralité.

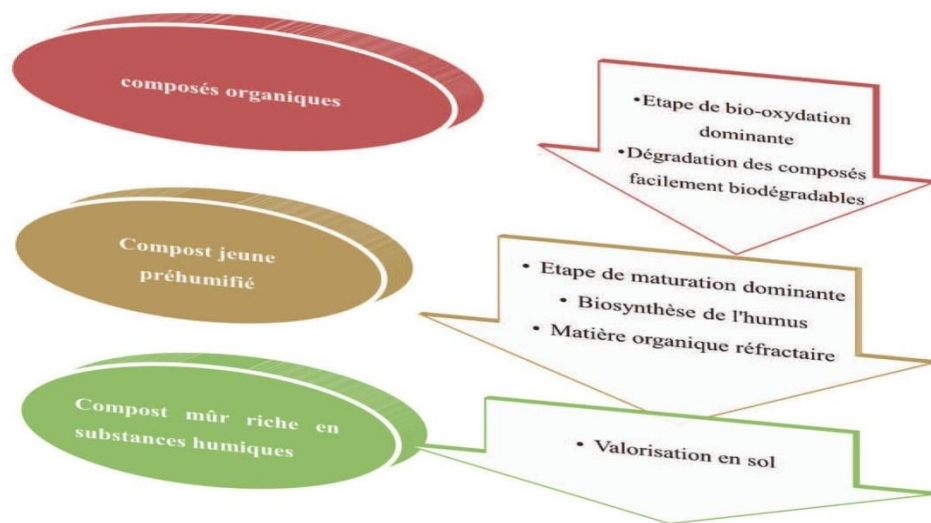


Figure 5 : Processus de compostage Source : (Topanou, 2012)

10.3. Procédé de compostage

Selon les méthodes de fabrication du compost élaboré par la FAO, il se dégage cinq étapes dans le procédé :

- ✓ une première phase correspondant à la réception des matières premières ;
- ✓ suivie d'une phase de tri manuel ou mécanique granulométrique ou densimétrique pour certains déchets comme les bios déchets et les ordures ménagères. Le tri permet de valoriser les matières (papiers, cartons, verres, métaux...) et énergie (bois) et/ou d'éliminer les éléments indésirables (piles, pot de peinture...) puis au lancement du compost.
- ✓ Ces prétraitements sont suivis d'une phase de fermentation au cours de laquelle la matière organique est dégradée et recombinaée

- ✓ Affinage permettant d'atteindre la granulométrie souhaitée ;
- ✓ Une phase de maturation.

10.4. Les facteurs favorisant le compostage

- ✓ La nature des substrats

La qualité des substrats est d'une importance capitale pour un bon déroulement du processus de compostage. Le substrat sert de support et de nourriture aux microorganismes décomposeurs qui vont réaliser sa transformation.

- ✓ L'humidité

L'humidité des substrats est nécessaire à la vie des êtres vivants qui interviennent dans le compostage (Mustin, 1987). Elle est un facteur indispensable à la décomposition des substrats, bien que si la teneur en eau est en dessous de 20%, la décomposition sera inhibée. En revanche, si elle dépasse 70% l'eau commence à remplir les espaces lacunaires des déchets et empêche les échanges d'oxygène, provoquant des conditions favorables à l'anaérobiose (Loubna, 2014).

- ✓ L'aération

Quand l'approvisionnement en oxygène n'est pas suffisant, la croissance des micro-organismes aérobies se trouve limitée, ce qui ralentit la décomposition. D'où la nécessité d'assurer une bonne aération du compost. L'aération offre de bonne condition pour la décomposition aérobie (Misra et al., 2005). L'évacuation de chaleur est particulièrement important pour les pays chaud compte tenu des risques les plus élevés de surchauffes voir d'incendie.

- ✓ La durée

En général, si le rapport C/N et l'aération sont favorables, la durée de compostage est courte. Mais si le rapport C/N est très élevé, l'humidité, faible, la température, basse, l'aération, insuffisante ou si le matériel est trop résistant, le compostage se déroule plus lentement (Rynk, 1992). Dans le cas d'un compostage d'andain mené avec retournement, une durée raisonnable de compostage peut être de l'ordre de 4 mois pour la fermentation suivis de 3 mois pour la maturation.

- ✓ La température et le pH

L'évolution du pH dépend du déroulement du bon déroulement du processus de compostage, d'une aération efficace permettant une bonne dégradation de la matière organique et conduisant à un pH final plus élevé (Ferrer et al., 2001). La température joue un rôle important dans l'évolution du pH en favorisant la volatilisation (Yulipriyanto, 2001).

II. MATERIELS ET METHODES

1- Présentation de la zone d'étude

L'étude a été menée dans la ville de Ouagadougou au Burkina Faso, sur le campus de la fondation 2iE.



Figure 6 : Localisation du site de l'étude

Pour l'essai de compostage, la méthode de compostage aérobie a été retenue. Deux (02) tas identiques ont été confectionnés à partir de la méthode chinoise à haute température. L'étude a été menée en saison sèche et pendant les périodes de cours d'octobre à mars. Les andains ont été confectionnés avec une forme pyramidale avec une hauteur de 1m et une surface de base de 1m x 1m. Il est bon est recommandé d'utiliser 1/3 de matière humide et 2/3 de matière sèche pour les intrants du compost (Misra et al., 2005). Afin de permettre de bonne aération, des tuyaux PVC perforés ont été introduites dans le tas. Le retournement des andains doit être assuré une fois chaque deux semaines. Pour assurer l'activité métabolique des microorganismes, il faut avoir une humidité au départ comprise entre 40 et 65% (Misra et al., 2005).



Figure 7 : Images de la mise en place des andains

2- Matériels utilisés

Pour la réalisation de cette étude, nous avons utilisé une fiche d'enquête (Annexe 2) pour la caractérisation des déchets, une balance, un GPS Garmin 60, des gants, des bottes, des cache-nez, un appareil photo pour les prises de vue.

3- Estimation de la production journalière de déchets

Afin de terminer la production journalière de déchets, nous avons utilisés un bac à ordure dont nous avons taré le poids et une balance.



Figure 8 : Caractérisation des déchets

Tableau III: Compositions des andains

N° du tas	tas 1	tas 2
Restes de cuisine (kg)	8	8
Déchets de jardins (kg)	16	16
Eau(l)	30	30

4- Suivi des paramètres physico-chimiques au cours de l'essai de compostage

4.1- La température

La mesure de la température a été faite de manière journalière à l'aide d'une sonde de température à 10 cm de profondeur sur trois différents points : en bas, au milieu et au sommet.

4.2- Le pH

Le pH a été mesuré de manière journalière avec une sonde pH-mètre pH WTW 3310 SET 2 plongée dans une solution de 10 ml d'eau distillée contenant un échantillon de 4g de compost et agitée pendant 10 mn.

4.3- La conductivité

La conductivité a été mesurée de manière journalière avec le conductimètre Cond WTW 3310 SET 1 plongé dans une solution de 20 ml d'eau distillée contenant un échantillon de 4g de compost et agitée pendant 10 mn.

4.4- La matière organique

La matière organique (MO) ou matière volatile en suspension (MVS) a été déterminée par passage de l'échantillon sorti de l'étuve au four (Carbolite) à 550°C pendant 15 mn. La fraction de matière organique a ainsi été déduite par la relation suivante :

$$\%MO = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100$$

Avec :

- %MO (g) : teneur en matière organique totale
- m_1 (g) : masse d'échantillon avant passage au four
- m_2 (g) : masse d'échantillon après sortie du four

4.5- Le carbone organique total

Les Matières volatiles en suspensions (MVS) ont été déterminées par perte de l'échantillon (préalablement séché au four à 105 ° C) sur l'incinération à 550 ° C dans un four. Le carbone organique total a été calculé en multipliant les valeurs de 1,76 MVS (Nelson et Sommers, 1982).

$$\%COT = \frac{\%MO}{1.76}$$

- % COT : teneur en carbone organique total
- % MO : teneur en matière organique

4.6- La teneur en eau

La teneur en eau dans les andains doit être maintenue autour de l'optimum 50%. En effet, les mesures de teneur en eau vont se faire 2 fois par semaine.

$$\%H = \frac{(M0 - M1) * 100}{M0}$$

Où :

- **%H** pourcentage d'humidité
- **M0** : masse initiale de l'échantillon avant séchage
- **M1** : masse finale de l'échantillon après séchage

4.7- L'Azote Total Kjeldhal (NTK)

L'Azote total (NTK) est obtenu en trois (03) étapes :

- Une minéralisation dans un tube kjeldhal de 100ml d'échantillon et de 10 ml d'acide sulfurique concentré dans un minéralisateur BUCHI K-435 aux températures de 180°C pendant 2 heures, 250°C pendant 2 heures, 340°C pendant 2 heures, suivis d'un refroidissement pendant 24 heures ;
- Une distillation avec le distillateur BUCHI K-355 ;
- Un dosage par titrimétrie avec l'aide de l'acide chlorhydrique à 0,04 mol/l.

La relation suivante permet de déterminer la teneur en azote :

$$\% NTK = \frac{0,14 * (V_1 - V_0)}{V_{PE}} * 100$$

Avec :

- % NTK : teneur en Azote Total Kjeldhal ;
- V1 (ml de HCL) : Volume utilisé pour le dosage ;
- V0 (ml de HCL) : Volume utilisé pour le blanc ;
- VPE (ml de HCL) : Volume de la prise d'essai, soit 150 ml.

5- Suivi des paramètres microbiologiques au cours de l'essai de compostage

Au cours de l'essai de compostage portant sur la phase de fermentation, le suivi des paramètres microbiologiques a porté sur les bactéries hétérotrophes, les actinomycètes et les mycètes. Pour ce faire, une solution mère a été obtenue à partir de 10 g d'échantillon et 90 ml d'eau peptonée tamponnée. Un échantillon de 1 ml a été prélevé dans la solution mère, dilué dans 9 ml d'eau distillée (ce qui correspond à une dilution 10^{-1}) et agitée au vortex. Des dilutions successives ont été effectuées à l'aide du réactif de Ringer et 0,1 ml de chaque dilution a étéensemencée sur une boîte de pétri dans les milieux de cultures spécifiques. Les différentes Unités Format Colonies ont été mesurées et exprimées en UFC/100g de compost.

Tableau IV : Conditions d'ensemencement pour les paramètres microbiologiques (Parthasarati et al., 2007)

Groupes cultivés	Température	Temps d'incubation	Milieu de culture
Bactéries hétérotrophes	30 °C, 37°C	18-24 h	Nutri agar
Actinomycètes	30 °C, 37°C	10-12 jours	Sabouraud agar
Mycètes	25 °C, 28°C	4-7 jours	Sabouraud agar

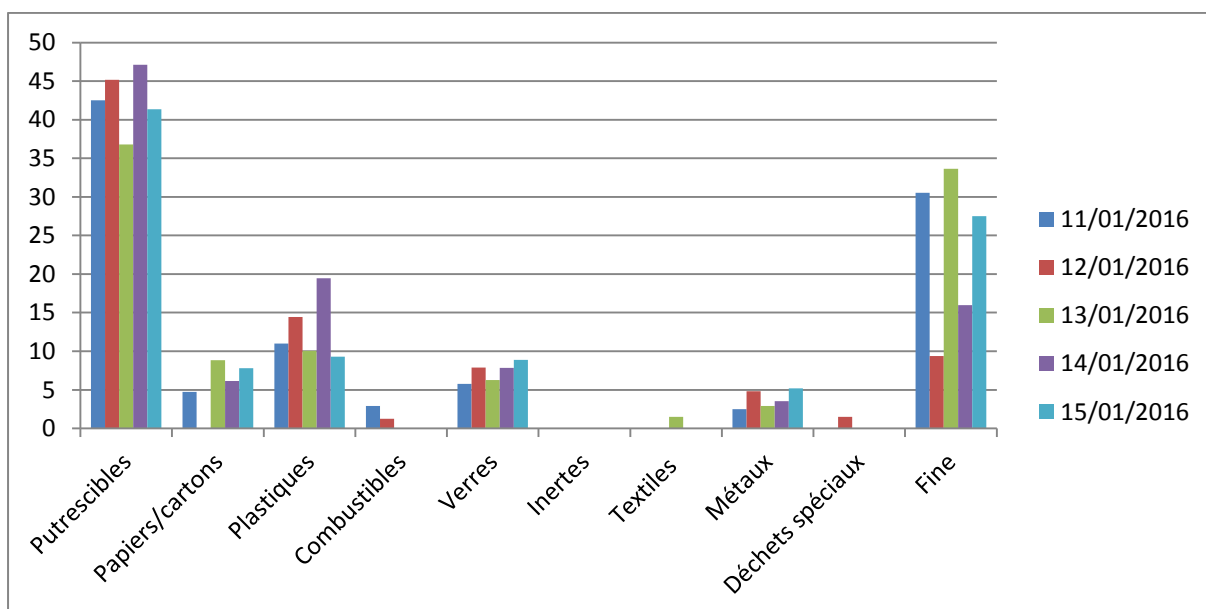
III.RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. Caractérisation des déchets

La classification des déchets est basée sur leur provenance. De ce fait, les déchets provenant des écoles et universités sont considérés comme des déchets ménagers et assimilés. Dans cette catégorie de déchets, il existe :

- Les ordures ménagères ;
- Les déchets ménagers spéciaux (piles, peinture, solvants etc) ;
- Les encombrants (meubles ; matelas...) ;
- Les déchets verts, de nettoyage, de cantine, papier, cartons ;

Les figures 9, 10 et 11 présentent les résultats obtenus à travers les campagnes de caractérisation des déchets.

**Figure 9 : Campagne de caractérisation des déchets du 11/01/2016 au 15/01/2016**

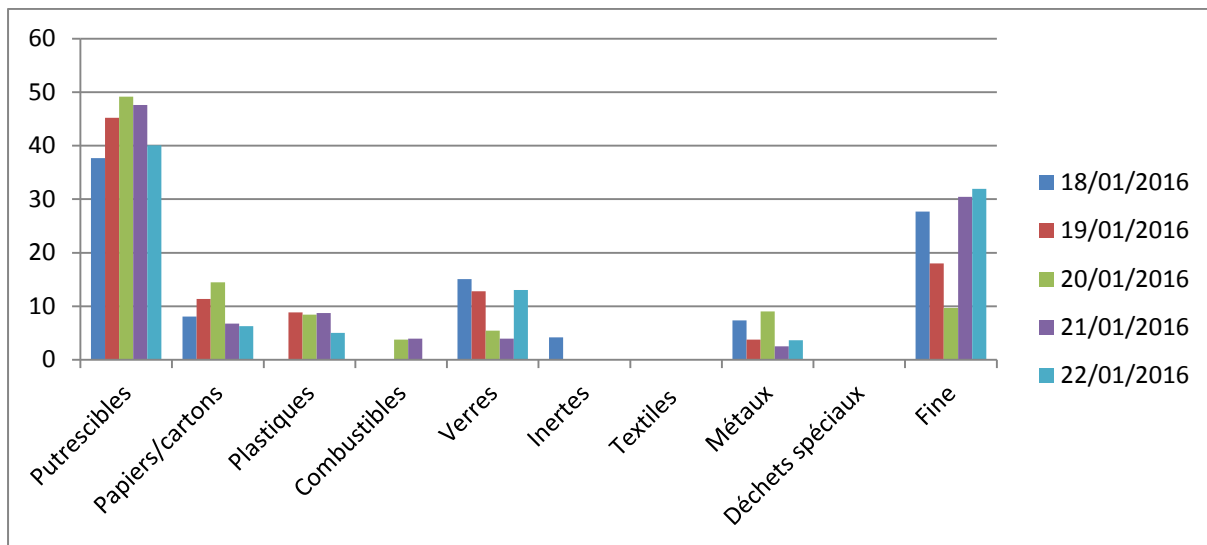


Figure 10 : Campagne de caractérisation des déchets du 18/01/2016 au 22/01/2016

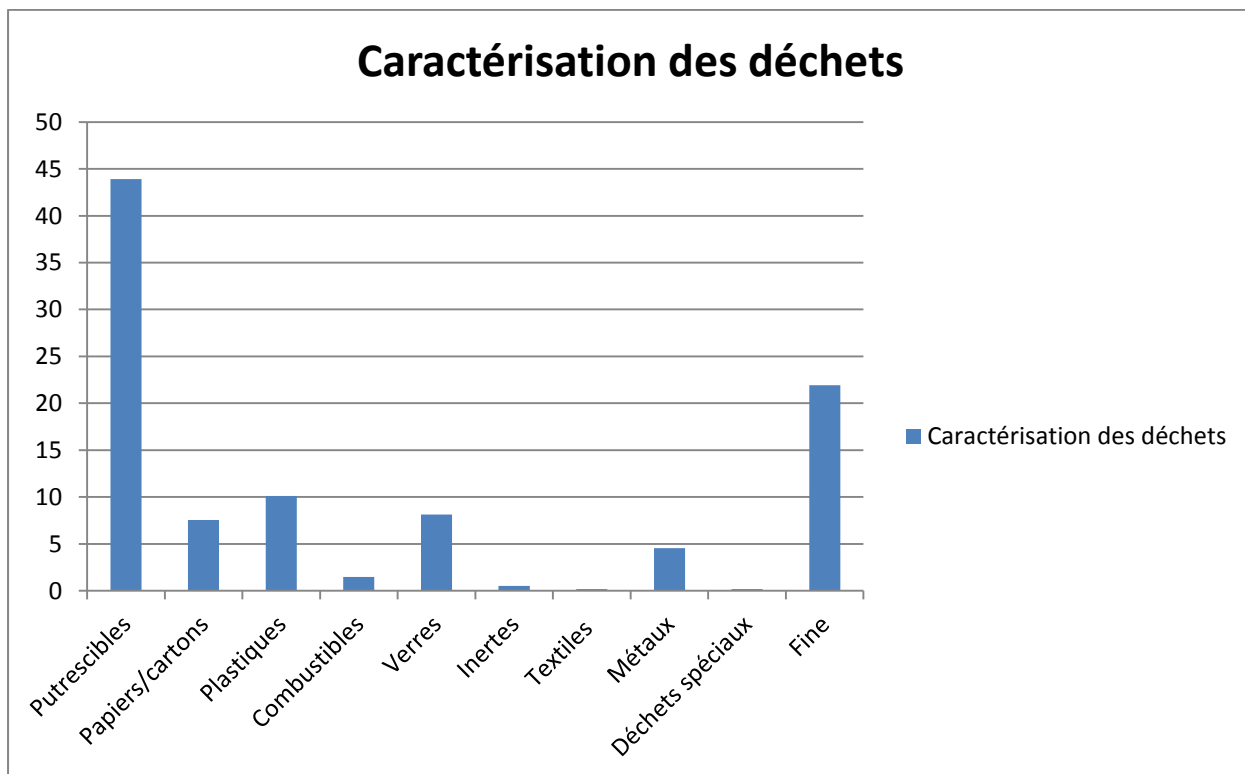


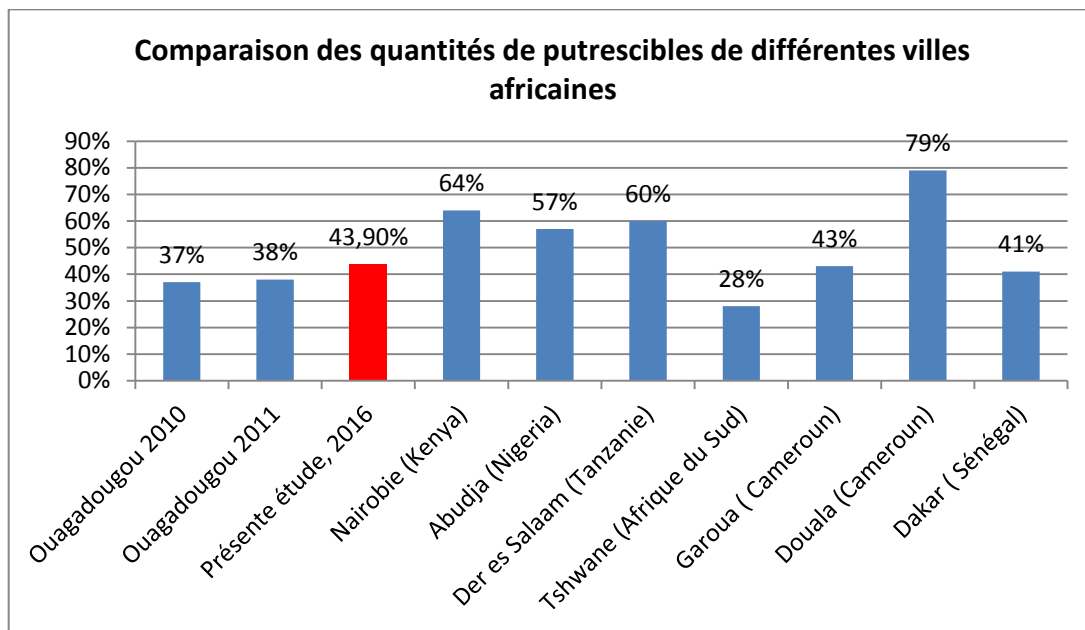
Figure 11 : Valeurs moyennes des campagnes de caractérisation des déchets

A l'issue des campagnes de caractérisation des déchets, le taux de production moyen des déchets solides est de 0,27 kg/hab/jour. Partant des résultats présentés sur la figure 11, nous constatons que la fraction fermentescible domine toutes les dix catégories de déchets. La fraction fermentescible représente plus de 40% des déchets produits au niveau du campus de 2iE Ouagadougou. Cette quantité importante de déchets fermentescibles permet de mettre en place un essai de compostage en vue d'une valorisation des déchets.

2. Comparaison des valeurs obtenues avec des données d'autres pays d'Afrique

a. La fraction fermentescible

Les proportions de la fraction fermentescible obtenues dans cette étude et dans l'étude effectuée par (PSRDO-CER, 2011) pendant la saison sèche à Ouagadougou sont respectivement de 43,9% et de 38%. En comparant les résultats sur le graphique ci-dessous, la fraction fermentescible est plus faible que celles des villes côtières comme Nairobi, Abudja, Dar Es Salam et Douala qui présentent des proportions de putrescibles entre 57% et 79%. Les villes de Dakar et de Garoua ont une proportion semblable à celle de notre étude menée à Ouagadougou avec 43,9% contre 41% et 43%.



(Tezanou, 2003) a mentionné qu'il semble que les données en saison sèche soient assez représentatives de toute l'année puisque l'augmentation des déchets de cuisines pendant la production abondante des légumes n'a pas d'impact significatif sur les moyennes annuelles.

La ville de Tshwane en Afrique du Sud a une fraction fermentescible beaucoup plus faible que dans les pays subsahariens dans le graphique ci-dessus. La ville de Tshwane est une agglomération beaucoup plus développée pour celle des villes d'Afrique subsaharienne. Les villes développées ont en générale une proportion organique beaucoup plus faible que les villes des pays en développement. (PSRDO-CER, 2010).

La connaissance de la caractérisation des déchets est essentielle afin d'apprécier les possibilités de valorisation (Koledzi., 2011). Vu le potentiel de production des déchets putrescibles, une étude d'expérimentation de la valorisation par voie de compostage peut être menée afin d'envisager une

gestion optimale des déchets.

b. Les particules fines

Les résultats de caractérisation des déchets montrent une teneur en particule fine non négligeable en occurrence plus de 20%. L'étude menée par (PSRDO-CER, 2011) a abouti à une teneur en fines de 28% pour l'arrondissement de Sig-Noghin. Cette forte proportion est due au fait qu'une grande partie de la cours du campus de 2ie Ouagadougou n'est pas pavée, cela génère une quantité importante de poussière. A travers une étude conduite par (Korfmacher, 1997), les fines des pays en développement représentaient 82% et près de 0% dans les pays en développement. Le climat pourrait avoir un impact sur la quantité des fines. La ville côtière de Douala au Cameroun a 1,3% de fines tandis que la ville de Garoua qui est une ville continentale au Nord a une proportion en fines de 41,9% (Ngnikam et al., 2006). La ville de Garoua a un climat semblable à celui de Ouagadougou ce qui favorise la production de particules fines (PSRDO-CER, 2011).

3. Suivi des paramètres physico-chimiques pendant l'essai de compostage

Les différents paramètres physico-chimiques mesurés sont l'humidité, le pH, la température et le rapport C/N.

2.1 Suivi de la température

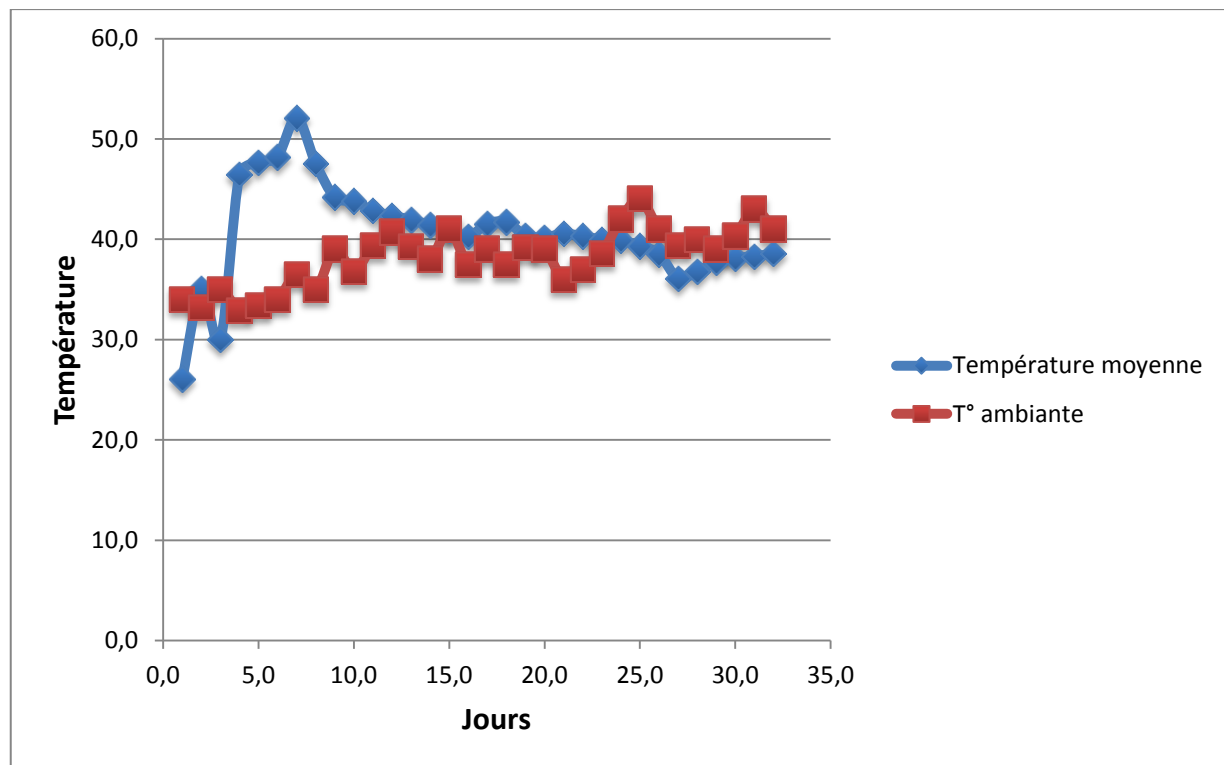


Figure 12 : Evolutions de la température moyenne des andains au cours de l'essai de compostage

Les résultats de la figure 12 montrent qu'au début du processus de compostage, la température moyenne était de 26,1°C. (Misra et al., 2005) mentionnent dans leur travaux que la température idéale dans la phase initiale du compostage est de 20 à 45°C. Du 1^{er} jour de compostage au 5^{ème} jour, la température va de 26,1°C à 52,1°C. La température a pratiquement doublé en 5 jours. Le dégagement de la chaleur pendant le compostage est un bon indicateur de l'évolution des réactions biologiques. Les micro-organismes dégradent les matières organiques facilement biodégradables. La phase thermophile est caractérisée par une élévation de la température qui peut atteindre entre 50 et 65 °C (LOUBNA, 2014). L'énergie contenue dans les liaisons chimiques des composés est libérée, entraînant ainsi une augmentation de la température (TOPANOU, 2012). L'élévation de la température confirme la phase active des micro-organismes aérobies décomposeurs (Tuemola et al., 2000). La variation de la température sur la figure 12 confirme la dégradation de la matière organique.

Entre le 7^{ème} et 15^{ème} jour, la température chute de plus de 10°C. Ce ralentissement de l'activité biologique est dû à un manque d'oxygène et/ou d'eau qui s'est manifesté par une chute de la température (TOPANOU, 2012). Les 16^{ème} et 27 jours après un retournement des andains, la température augmente de nouveau ce qui se traduit par un redémarrage des activités biologiques. Au

cours du processus de compostage, une baisse de la température indique parfois une phase de dégradation anaérobie, et donc une faible activité des micro-organismes (Tremier et al., 2005a). L'augmentation de la température est d'autant plus importante que les matières organiques sont facilement biodégradables (Guardia et al., 2010). La phase de maturation se caractérise par la stabilisation de la température des andains autour de la température ambiante (LOUBNA, 2014). Cette stabilisation de la température n'est pas atteinte lors de notre essai de compostage.

2.2 Suivi du pH

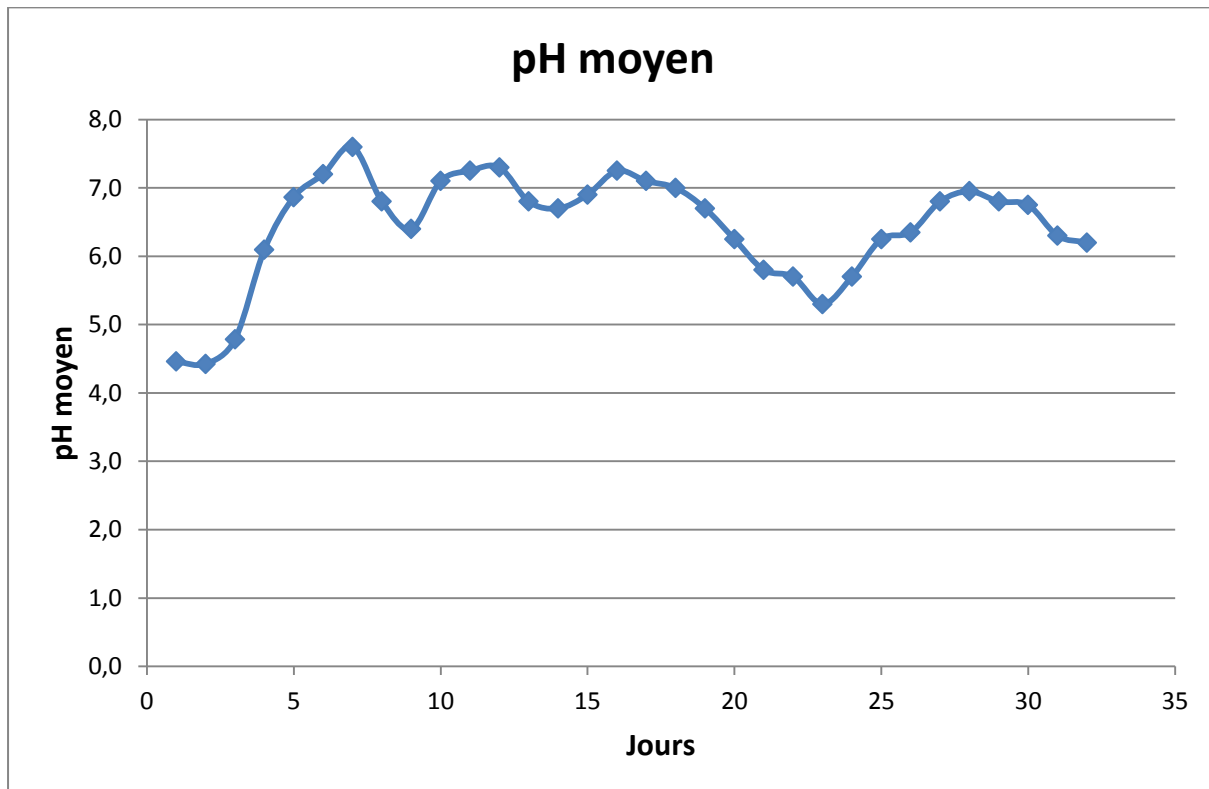


Figure 13 : Evolution du pH moyen des andains au cours de l'essai de compostage

Il ressort de la figure 13 que le pH n'est pas constant au cours de l'essai de compostage. Au début du processus de compostage, la valeur du pH se situe autour de 4 et se stabilise autour de 7 après le 5^{ème} jour de compostage. Les déchets organiques ménagers présentent des pH initiaux qui varient entre 4,5 et 6 (Sundberg et al., 2004). Cette augmentation peut s'expliquer par un processus d'ammonification et de production ammoniacale à partir de la dégradation des amines (protéines, bases azotés...) (Ouattmane et al., 2000). La valeur du pH ne devrait pas dépasser 8. A des valeurs de pH plus élevés, une plus grande quantité d'ammoniac est générée et risque d'être perdu dans l'atmosphère (Misra et al., 2005). Entre le 16^{ème} et le 23^{ème} jour, le pH passe de 7,3 à 5,3. Cette baisse considérable du pH est due à la production de d'acides organiques et à la dissolution du CO₂ dans le milieu et/ou les produits

de dégradations des molécules simples (glucides, lipides) (Peter et al., 2000 ; Mustin, 1987). Au 32^{ème} jour de l'essai de compostage, le pH est de 6,2. (Loubna, 2014) a montré que les composts murs ont un pH voisins de la neutralité. Les valeurs de pH obtenues dans cette étude indiquent que le compost n'est pas encore mur.

2.3 Suivi de l'humidité

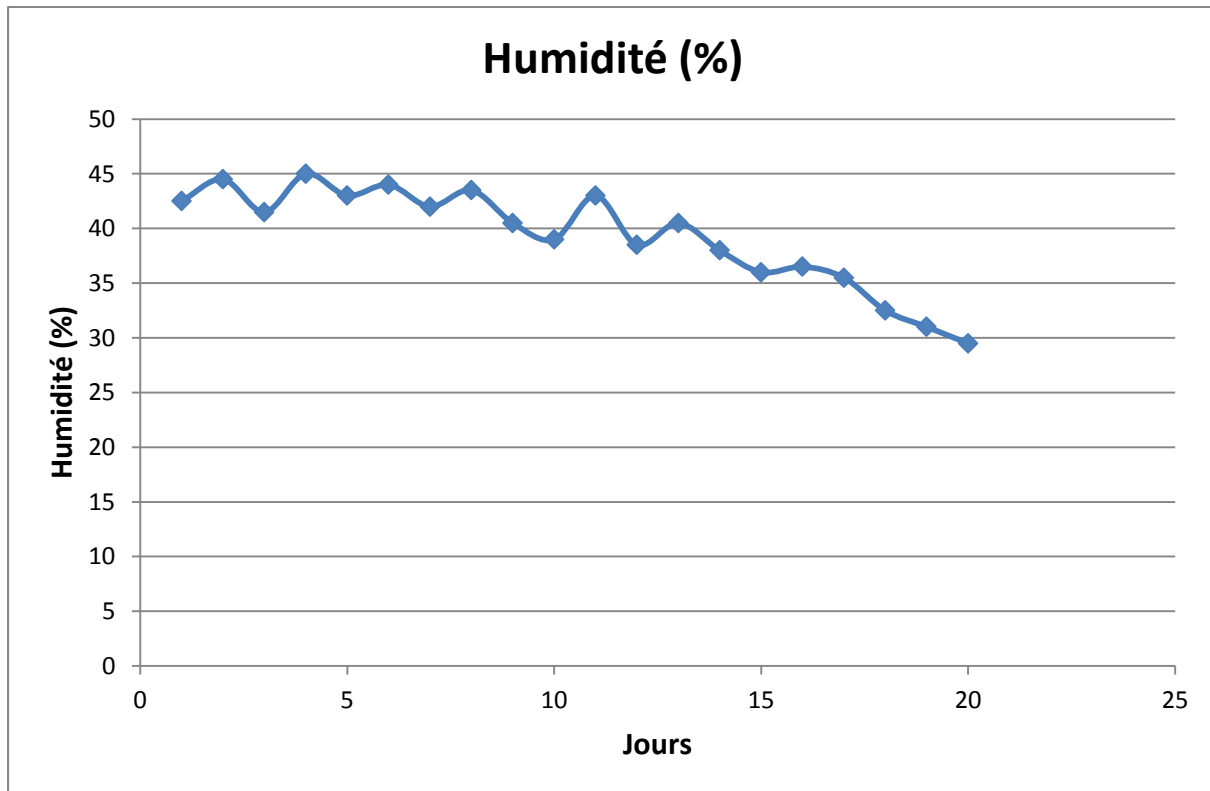


Figure 14 : Evolution de l'humidité au cours de l'essai de compostage

La figure 14 indique de manière générale la baisse de la teneur en eau lors du processus de compostage. L'humidité est nécessaire pour assurer l'activité métabolique des micro-organismes. L'humidité initiale est de 42,5%. Selon (Misra et al., 2005) le compost devrait avoir une humidité située entre 40 et 60% pour permettre d'assurer l'activité métabolique des micro-organismes. Après un retournement des andains effectué le 7^{ème} et 15^{ème} jour, des hausses de d'humidité respective de 42 à 43,5 % et 36 à 36,5%. La maintenance d'une valeur optimale de l'humidité pendant le compostage est compliquée. En pratique ce problème est souvent résolu au suivi de température auquel on assujetti soit un retournement des andains, soit une modification de l'aération soit un arrosage (Yulipriyanto, 2001).

Au cours de la 1^{ère} semaine du processus de compostage, une hausse d'humidité est constatée par moment. Pendant le compostage, la teneur en eau a tendance à augmenter par libération d'eau

métabolique par des micro-organismes qui dégradent les matières organiques en présence d'oxygène, et à diminuer sous l'action conjuguée en température et de l'aération forcée ou du retournement qui entraînent des pertes sous formes de vapeur d'eau (Yulipriyanto, 2001).

2.4 Suivi du rapport C/N

La figure représente l'évolution du ratio C/N.

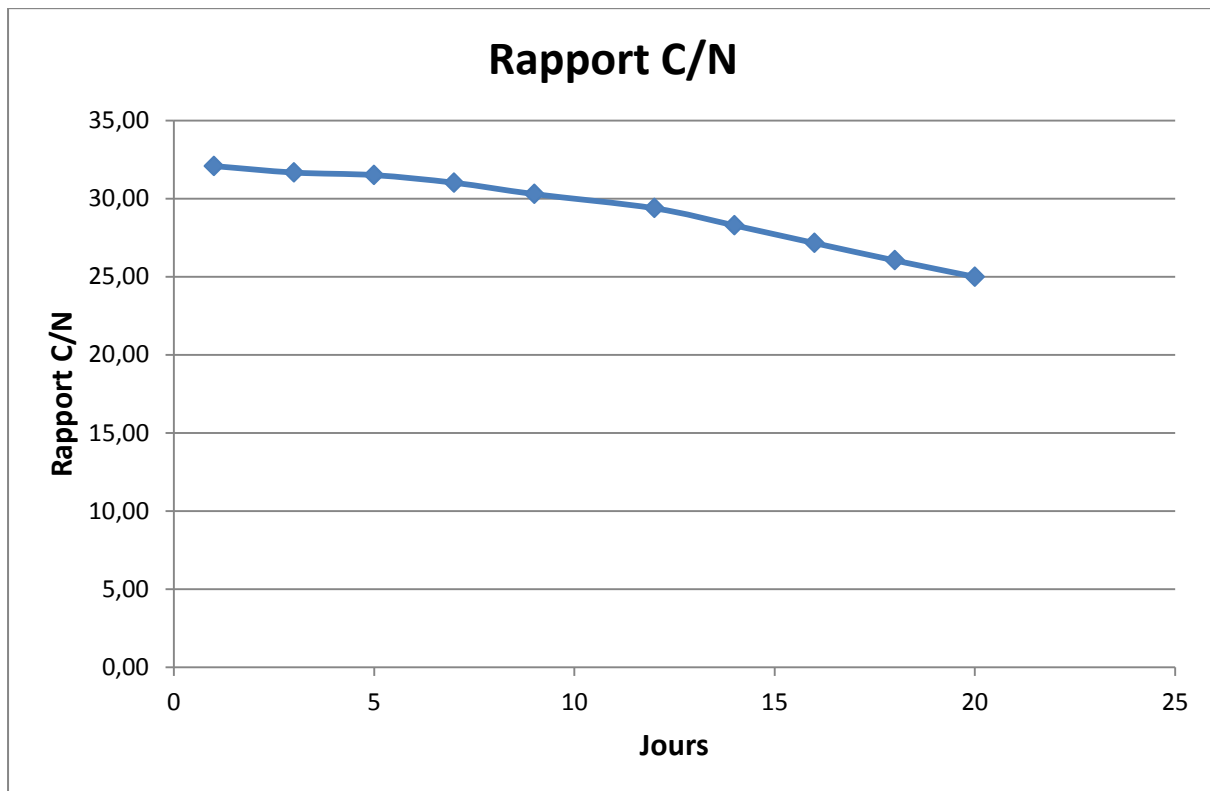


Figure 15 : Evolution du rapport C/N au cours de l'essai de compostage

En début de compostage, le rapport C/N est de 32. Un rapport de C/N idéal des substrats de compostage se situe autour de 30, l'apport énergétique du carbone permettant alors une croissance rapide des microorganismes (Yulipriyanto, 2001). Par la suite, le rapport C/N diminue progressivement durant le processus de compostage. Cela témoigne de la dégradation de la matière organique par les microorganismes. Le rapport C/N décroît progressivement pour se stabiliser au tour 13 (10-15) dans un compost fini (Mustin, 1987).

La dégradation de la matière organique entraîne une minéralisation importante du substrat au cours du compostage. Les composts se caractérisent donc par des teneurs en matières organiques inférieures à celles des déchets bruts. La diminution relative de matière organique est très variable et dépend des conditions de compostage, de sa durée et des caractéristiques de la matière première

(Koledzi, 2011).

Tableau VI : Rapport C/N des micro-organiques et de résidus organiques

Matériaux	Rapport C/N
Boues de station d'épuration	10 à 30
Débris végétaux sans légumineuse	10 à 15
Engrais vert et gazons	10 à 20
Feuille (à la chute)	20 à 60
Fumier de bovin pailleux	20 à 30
Fumier de mouton	15 à 20
Fumier de cheval pailleux	20 à 30
Pailles de céréales (à la moisson)	80 à 150
Sciures de bois	150 à 500
Microorganismes	9 à 12
Boues activées	6 à 8
Déchets ménagers	26 à 45
Résidus de maïs	80 à 90
Paille, blé	120 à 150

Source (Yulipriyanto, 2001).

4. Suivi des paramètres microbiologiques pendant de l'essai de compostage

La figure 16 présente l'évolution des paramètres microbiologiques dont les bactéries hétérotrophes, les actinomycètes et les mycètes.

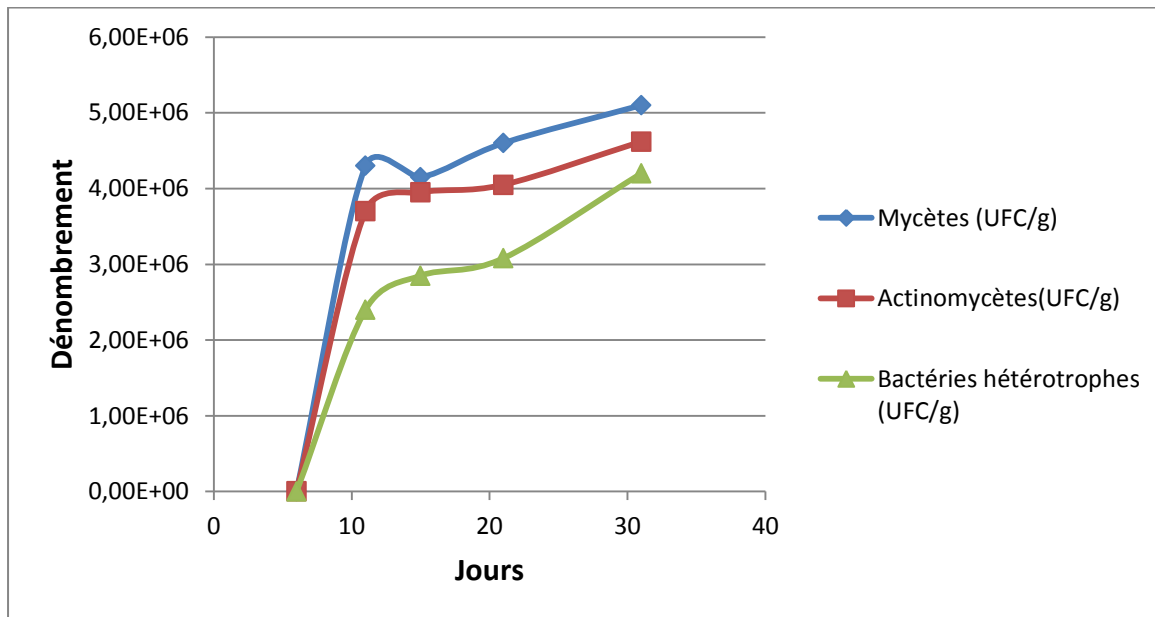


Figure 16 : Evolution des paramètres microbiologiques au cours de l'essai de compostage

La figure 16 montre une croissance continue de la population bactérienne durant le processus de compostage qui témoigne d'une dégradation de la matière organique. Dès le début du processus de compostage, actinomycètes et les mycètes ont une augmentation respective de 2,86 et 2,93 unités log entre le 6^{ème} et le 11^{ème} jour. D'une croissance moins rapide que les mycètes et actinomycètes, les bactéries hétérotrophes augmentent de 2,51 unités log pour la même période. Après 31 jours de compostage, la population des actinomycètes et des mycètes ont respectivement augmenté de 2,95 et 3 unités log. Les bactéries hétérotrophes après 31 jours de compostage, affiche une croissance de 2,75 unités log.

L'évolution des actinomycètes et des mycètes est liée à une forte concentration des substrats ligno-cellulosiques (Yulipriyanto, 2001). D'autres auteurs (Perez et al., 2002 ; Nakasaki et al., 2009) ont montré que les actinomycètes produisent une enzyme active pour dégrader les composés ligno-cellulosiques. Bhatia et al. (2013) ont montré que les bactéries hétérotrophes sont nécessaires à l'oxydation des substrats organiques, ce qui par conséquent conduit à une augmentation de la température du milieu, qui inhibe les bactéries.

AVANT



APRES



Figure 17 : Aspect du compost au terme de l'essai de compostage

IV. CONCLUSIONS

La connaissance de la caractérisation des déchets est indispensable pour proposer une filière de valorisation pérenne. Nos travaux ont permis de confirmer qu'une bonne partie de nos déchets peut être utilisée pour faire du compostage et la faisabilité du processus de compostage.

La caractérisation des déchets repartis en dix catégories révèle que les déchets sont essentiellement constitués de 43,9% de matière fermentescible et 21,9% de fines. Le taux de génération est de 0,27 kg/hab/jour. Cette proportion importante de matière organique reflète la disponibilité du gisement pour une production de compost. Le pourcentage de matière organique serait plus élevé si une partie des restes de cuisines n'était pas vendu aux éleveurs. Les déchets solides de 2iE sont riches en matière organique.

Le suivi des paramètres physico-chimiques et microbiologiques au cours de l'essai de compostage a donné des résultats satisfaisants. La température atteint un pic de 52,1°C au 5^{ème} jour du compostage. Cela témoigne d'une intense activité biologique. Au terme de l'essai de compostage, la température ne sait pas stabiliser. Aussi, le pH n'est pas constant lors du compostage. Il devrait normalement se stabiliser au tour de la neutralité pendant la phase de maturité du compost. Ces facteurs concourent à dire que le compost n'est pas encore mûr. D'une valeur initiale de 42,5%, le taux d'humidité à la fin de l'essai de compostage atteint 29,5%. L'évolution du ratio C/N se caractérise par une baisse de 32,08 à 24,99 tout au long du processus de compostage. Ce qui est cohérent et se justifie par une dégradation progressive de la matière organique. Les actinomycètes, les mycètes et les bactéries hétérotrophes connaissent une croissance tout au long du compostage respectivement de 2,95 unités log, 3 unités log et 2,75 unités log.

En toile de fond, ces travaux nous ont permis de connaître la nature des déchets solides produits sur le campus de 2iE et d'analyser l'évolution de l'essai de compostage.

V. RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES

La recherche bibliographique a montré un manque de données sur les études de caractérisation des déchets dans les PED. Cette faiblesse dans le manque de données fiables, est la source d'erreurs dans leurs modes d'élimination. Les rares pays qui ont abordé la valorisation des déchets par compostage se sont retrouvés confrontés à des difficultés dues à une importation de technologies utilisées dans les pays nord et pas toujours adaptées aux pays du sud. En ce sens, des études sur la caractérisation doit être menée sur les déchets solides en vue de disposer d'une base de données fiables qui permettrait d'avoir des projections réalistes en terme de prévision du budget à allouer au traitement.

La période du stage ne nous a pas permis d'aller jusqu'au bout du processus de compostage. Cependant, disposant à présent des données sur la caractérisation des déchets solides du campus de 2iE Ouagadougou, il serait bien de mener une étude sur tout le processus de compostage afin d'avoir des informations plus approfondies. Une valorisation par bio méthanisation peut être expérimentée vu que les déchets sont riches en matière organique.

Bibliographie

Ouvrages et articles

- AFNOR, (1996). Déchets : Caractérisation d'un échantillon de déchets ménagers et assimilés ; Eds AFNOR ; 24 pages.
- Aina, M., 2006. Expertises des centres d'enfouissement des déchets urbains dans les PED : contributions à l'élaboration d'un guide méthodologique et à sa validation expérimentale sur sites. Thèse de doctorat N°46, Université de Limoges.
- Aloueimine, S. O., 2006c. 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 N°012. Université de Limoges
- Anonyme, (2004-a). Recueil Activités Pédagogiques ; Québec-Cameroun, Mission 2003-2004 ; 74 pages ; www.eia.qc.ca/rapport2004/Monographies/Recueil_activités/Activités_Qc-cameroun_2004.pdf
- Armijo, C., Ojeda-Benítez, S., Ramírez-Barreto, E., 2008. Solid waste characterization and recycling potential for a university campus Resources, Waste Management 28, S21–S26.
- Bari Q.H., Koenig A., 2001: "Effect of air recirculation and reuse on composting of organic solid waste". Resources, Conservation and Recycling, 33, 93-111.
- BEN AMMAR S., 2006. Les enjeux de la caractérisation des déchets ménagers pour le choix des 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, Institut National Polytechnique de Lorraine, Laboratoire Environnement et Minéralogie. 326p.
- Bernal, M.P., Navarro, M.A., Sanchez-Monedero, M.A., Roig, A., Cegarra, J., 1998. "Influence of sewage sludge compost stability and maturity on carbon and nitrogen mineralization in soil." Biochem. Soil Biol. 30(3): 305-313.
- Berthe C, 2006. Etude de la Matière Organique contenue dans des lixiviats issus de différentes filières de traitement des déchets ménagers et assimilés. Thèse de doctorat. Limoges, 2006, 196 pages.
- Bhatia A., Madan S., Sahoo J., Ali M., Pathania R., Kazmi A.A., 2013: Diversity of bacterial isolates

- during full scale rotary drum composting. *Waste Management*, 33, 1595–1601.
- Buenrostro O. et Bocco G. (2003). Solid waste management in municipalities in Mexico: Goal and perspectives, *Resources, Conservation and Recycling* 39 (2003) 251 – 263.
- Bustamante, M.A., Paredes, C., Marhuenda-Egea, F.C., Perez-Espinosa, A., Bernal, M.P. Moral, R., 2008. Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. *Chemosphere*, 72: 551–557.
- CEFREPADE, 2008. Compostage des déchets ménagers dans les PED : modalité de mise en place et de suivi d'installations décentralisées pérennes. Version de travail. 62 pages
- Charnay, F., 2005. Compostage des déchets urbains dans les PED : Elaboration d'une démarche méthodologique pour une production pérenne de compost. Thèse de Doctorat N° 56. Université de Limoges.
- Chung, S.S., Pool, C.S., 1998. "A comparaison of waste management in Guangzhou and Hong Kong." *Resources, Conservation and Recycling* 22: 203-216. Clément M., Pieltain, F., 2003. Analyse chimique des sols. éd. TEC et DOC
- Compaoré et al., 2010. Evaluation de la qualité de compost de déchets urbains solides de la ville de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso pour une utilisation efficiente en agriculture. *Journal of applied Biosciences* 33 : 2076-2083.
- Crowe, M., Nolan, K., Collins, C., Carty, G., Donlon, B., 2002. Biodegradable Municipal Waste Management in Europe. Part 1. Strategies and Instruments. European Environment Agency, Copenhagen, pp. 6–24. Del Ri'
- Damien, A., 2004. "Guide du traitement des déchets, 3ème édition." Paris, France. 431. De Bertoldi, M., Vallini, G., Pera, A., 1983. The biology of composting: A review. *Waste Management & Research* 1, 157-176.
- Doublet J., Francou C., Poitrenaud M., Houot S., 2011, Influence of bulking agents on organic matter evolution during sewage sludge composting; consequences on compost organic matter stability and N availability. *Bioresource Technology* 102, 1298–1307.
- Drescher, S., Müller, C., Kubrom, T., Mehari, S., Zurbrügg, C., Kyzia, S. 2006. Decentralised composting – Assessment of viability through combined material flow analysis and cost accounting. *Proceedings, Orbit 2006 Conference, Weimar*, pp. 1215–1227. FC
- El-Fadel M., Bou-zeid E., Chahine W., Alayli B. 2002, Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content, *Waste*

Management 22: 269-282.

- Emmanuel J. (2004). Alternatives to Medical Waste Incineration, de Brenda A. Platt, Institute for Local Self-Reliance, Resources up in Flames: the Economic Pitfalls of Incineration versus a Zero Waste Approach in the Global South. www.no-burn.org/ResourcesupinFlames.zip
- EPA, 2006, Municipal solid waste generation, recycling and disposal in the United States: facts and figures for 2006.
- Eriksen, S. 2002. Danish Experiences in Collecting and Treating Organic Waste from Big Kitchens. Sustainable Urban Development Project Book, Sarawak, Borneo.
- FCM, 2005. Réacheminement et compostage des déchets organiques en régions rurales : Étude de faisabilité d'un programme amélioré de recyclage et de compostage (FHMV 3231).
- Fehr M., De Castro M.S.M.V., Calcado M.D.R. 2000, A practical solution to the problem of household waste management in Brazil, Resources, Conservation and Recycling 30: 245-257.
- FoE, (2002). Incineration Or Something Sensible ? A Briefing from Friends of the Earth Scotland, 15 pages.
- Gachet C., (2005). Evolution bio-physico-chimique des déchets enfouis au Centre de Stockage de Déchets Ultimes du SYDOM du Jura sous l'effet de la recirculation des lixiviats, thèse, Institut National des Recherches Appliquées de Lyon.
- Garcia A.J., Esteban M.B., Marquez M.C., Ramos P. (2005). Biodegradable municipal solid waste: Characterization and potential use as animal feedstuffs; Waste Management 25 (2005) 780–787.
- Gbedo V., 2010, Problématique de la valorisation des déchets plastiques à Cotonou : Approche pour une maîtrise des aspects technique et socio-économique, Thèse de Doctorat Université d'Abomey-Calavi, 237 pages.
- Hefa C., Yanguo Z., Aihong M. and Qinghai L., 2007, Municipal Solid Waste Fueled Power Generation in China: A Case Study of Waste-to-Energy in Changchun City Environ. Sci. Technol 41, pp.7509-7515.
- Iyengar Srinath R. et Bhav Prashant P., (2005). In-vessel composting of household wastes; Article In Press; Waste Management (2005); 11 pages
- Kaibouchi S., (2004). Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères : Contribution à l'étude des mécanismes de stabilisation par carbonatation et influence de la collecte selective ; thèse.
- Ka-Mbayu K., Colson G., Sabri K., Thonart P., 2007, A multiple criteria analysis for household solid waste management in the urban community of Dakar, Waste Management 27, pp. 1690–1705
- Khalil A., 2005; Etude de la biodégradabilité et du compostage de déchets verts de la région

- méditerranéenne: proposition de paramètres de terrain pour le suivi de l'évolution de la matière organique, thèse de doctorat, Université de Provence Aix-Marseille I, 231 pages.
- Kathiravale S., Muhud Yunus M.N., Sopian K., Samsuddin A.H. and Rahman R.A., (2003). Modeling the heating value of Municipal Solid Waste, *Fuel* 82 (2003) 1119 –1125.
- Koledzi E. K., 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 Lomé, N°04-2011, 224 pages.
- Konate., 2008. État des lieux des filières de valorisation des déchets solides dans la commune de Ouagadougou, Institut de Génie de l'Environnement et du Développement durable, p85
- Kubrom, T., Mehari, S., Wegmann, M., 2004. Economic valuation of Decentralized composting – Case study report of Asmara, Eritrea. University of Asmara, College of Asmara, 80 p.
- Markarian M. et Ménard K., (2003). La bioréaction appliquée à la gestion des déchets aux Québec : aspects techniques et environnementaux, *Front québécois pour une gestion écologiques des déchets*, 40 pages.
- Matejka et al., 2004. Gestion maîtrisée des déchets solides urbains et de l'assainissement dans les pays en voie de développement : les besoins en études scientifiques et techniques spécifiques, et en outils méthodologiques adaptés. 141-151
- Mbulugwe, S.E., Kassenga, G.R., Kaseva, M.E., Chaggu, E.J., 2002. Potential and constraints of composting domestic solid waste in developing countries: findings from a pilot study in Dar es Salaam, Tanzania. *Resources, Conservation and Recycling* 36 (2002) 45-59.
- MBT, 2003. Mechanical Biological Treatment, Cool Waste Management, a State-of-Art Alternative to Incineration for Residual Municipal Waste , February 2003 Published by the Greenpeace Environmental Trust Canonbury Villas, London N1 2PN, United Kingdom, 58 pages
- McBean, E.A., Rosso, E., Rovers, F.A., 2005. Improvement in financing for sustainability in solid waste management. *Journal of Resources, Conservation and Recycling* 43, 391–401.
- Misra, R.V., Roy, R.N., Hiraoka, H. (2005). Méthodes de compostage au niveau de l'exploitation agricole.
- Müller, C., 2006. Decentralised composting in developing countries – Financial and technical evaluation. Diplomarbeit, Sandec, Dübendorf, 85 p.
- Nakasaki K., Tran L.T.H., Idemoto Y., Abe M., Rollon A.P., 2009: Comparison of organic matter degradation and microbial community during thermophilic composting of two different types of anaerobic sludge. *Bioresource Technology*, 100, 676-682
- NGAHANE E. L., 2015. Gestion technique de l'environnement d'une ville (BEMBEREKE au

- BENIN): caractérisation et quantification des déchets solides émis ; connaissance des ressources en eau et approche technique Thèse de Doctorat, université de Liège, 239 p.
- N'gnikan, E., 2000. Evaluation environnementale et économique du système de gestion des déchets solides municipaux : analyse du cas de Yaoundé au Cameroun. LAEPSI. Lyon INSALYON : 314.
- O.N.E.M, 2001. Rapport sur l'Etat de l'environnement du Maroc. « Chapitre IV : Déchets et milieux humains. Observatoire National de l'Environnement au Maroc ».
- Mohee, R., 2002. Assessing the recovery potential of solid waste in Mauritius; Resources, Conservation and Recycling 36(2002) 33-43.
- Ouatmane A., Provenzano M.R., Hafidi M., Sensi N., 2000: Compost maturity assessment using calorimetry, spectroscopy and chemical analysis. Compost Science and Utilization, 8,124-134.
- Partenariat pour le Développement Municipal (PDM), Programme Solidarité Eau (PS EAU),. 2003. Gestion durable des déchets et de l'assainissement urbain, 191p.
- Parthasarathi, K., Ranganathan, L.S., Anandi, V., Zeyer, J. (2007). Diversity of microflora in the gut and casts of tropical composting earthworms reared on different substrates. Journal of Environmental Biology 28, 87–97.
- Peters S., Koschinsky S., Schweiger F., Tebbe C.C., 2000: Succession of microbial communities during hot composting as detected by PCR- single-strand conformation polymorphism-based genetic profiles of small-subunit rRNA genes. Applied and Environmental Microbiology, 66, 930-936.
- Rogaume T., 2001, Caractérisation des déchets ménagers de la ville de Ouagadougou (Burkina Faso). Annales de l'Université de Ouagadougou.
- Rynk, R., Van de Kamp, M., Willson, G. B., Singley, M. E., Richard, T. L., Kolega, J. J., Gouin, F. R., Laliberty, JR. L., Kay, D., Murphy, D. W., Hoitink, H. A. J. and Brinton, W. F., 1992.In: R. Rynk (ed.). On-farm composting handbook. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, NRAES-54, Ithaca, New York, 186
- Sanchez-Monedero, M.A., Roig, A., Paredes, C., Bernal, M.P., 2001. "Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, Ec and maturity of the composting mixtures." Bioresource Technology 78: 301-308.
- Sancho P., Pinacho A., Ramos P. et Tejedor C., (2004). Microbiological Characterization of food residues for animal feeding ; Waste Management 24 (2004) 919 –926.

- SQUILBIN C. et DEWULF B., 2002. Les données de l'IBGE : « les déchets bruxellois- des données pour le plan ». 2002. 6 p. Fiche.
- Soclo H. H., Aguewe M., Adjahossou B.C. et Houngue T. 1999, Recherche de compost type et toxicité résiduelle au Bénin, TSM N° 9, 94 ème année, 9 pages.
- Thonart P., Sory D., 2005, Guide pratique sur la gestion des déchets ménagers et des sites d'enfouissement techniques dans les pays du sud. Collection points de repère, OIF, 121 pages.
- Tinôco, A. A. P., Azevedo, I. C. D., Azevedo, R., Marques, E. A. G., 2009. Separation and composting plant in small cities of Zona Da Mata Minas Gerais, Brazil. Sardinia 2009 Symposium. XII International WM and Landfill Symposium. Page109. www.sardiniasymposium.it/sardinia2009/
- Toguyeni A., 2006. La gestion des déchets solides de la ville de Ouagadougou (Burkina Faso) : Etat des lieux et analyse de la problématique des déchets d'emballages plastiques, mémoire de DES, Université libre de Bruxelles (Belgique), 130p.
- Topanou., 2012. Gestion des déchets solides ménagers de la ville d'Abomey-Calavi (Bénin) : Caractérisation et essais de valorisation par compostage. 175p
- Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A., Itavaara, M., 2000. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. Bioresource Technology 72, 169-183.
- Westendorf, M.L., 2000. Food waste to animal feed: an introduction. In: Westendorf, M.L. (Ed.), Food Waste to Animal Feed. Iowa State University Press, Iowa, USA.
- World Bank., 2012. What a waste, A Global Review of Solid Waste Management. 116p
- Yu, H., Huang, G.H., 2009. Effects of sodium acetate as a pH control amendment on the composting of food waste. Bioresour. Technol., 100: 2005–2011
- Zucconi F., Pera A., Forte M., de Bertoldi M., 1981: Evaluating toxicity of immature Compost. BioCycle, 22, 54-57.

VI. ANNEXES

Annexe I : Résultats de la caractérisation des déchets.....	39
Annexe II : Fiche d'enquête de la caractérisation des déchets.....	41
Annexe III : Valeurs des paramètres physico-chimiques.....	42
Annexe IV : Valeurs des paramètres microbiologiques.....	46

ANNEXE I : Résultats de la caractérisation des déchets

11/01/2016	
Catégories	Pourcentage
Putrescibles	42,52
Papiers/cartons	4,73
Plastiques	11,00
Combustibles	2,92
Verres	5,78
Inertes	0,00
Textiles	0,00
Métaux	2,51
Déchets spéciaux	0,00
Fine	30,55

12/01/2016	
Catégories	Pourcentage
Putrescibles	45,18
Papiers/cartons	0,00
Plastiques	14,43
Combustibles	1,26
Verres	7,90
Inertes	0,00
Textiles	0,00
Métaux	4,81
Déchets spéciaux	1,49
Fine	9,39

13/01/2016	
Catégories	Pourcentage
Putrescibles	36,79
Papiers/cartons	8,85
Plastiques	10,03
Combustibles	0,00
Verres	6,26
Inertes	0,00
Textiles	1,51
Métaux	2,91
Déchets spéciaux	0,00
Fine	33,66

14/01/2016	
Catégories	Pourcentage
Putrescibles	47,11
Papiers/cartons	6,12
Plastiques	19,44
Combustibles	0,00
Verres	7,82
Inertes	0,00
Textiles	0,00
Métaux	3,52
Déchets spéciaux	0,00
Fine	15,99

15/01/2016	
Catégories	Pourcentage
Putrescibles	41,34
Papiers/cartons	7,79
Plastiques	9,31
Combustibles	0,00
Verres	8,87
Inertes	0,00
Textiles	0,00
Métaux	5,19
Déchets spéciaux	0,00
Fine	27,49

18/01/2016	
Catégories	Pourcentage
Putrescibles	37,65
Papiers/cartons	8,06
Plastiques	0,00
Combustibles	0,00
Verres	15,06
Inertes	4,20
Textiles	0,00
Métaux	7,36
Déchets spéciaux	0,00
Fine	27,67

19/01/2016	
Catégories	Pourcentage
Putrescibles	45,18
Papiers/cartons	11,37
Plastiques	8,85
Combustibles	0,00
Verres	12,80
Inertes	0,00
Textiles	0,00
Métaux	3,79
Déchets spéciaux	0,00
Fine	18,01

20/01/2016	
Catégories	Pourcentage
Putrescibles	49,16
Papiers/cartons	14,50
Plastiques	8,40
Combustibles	3,78
Verres	5,46
Inertes	0,00
Textiles	0,00
Métaux	9,03
Déchets spéciaux	0,00
Fine	9,66

21/01/2016	
Catégories	Pourcentage
Putrescibles	47,61
Papiers/cartons	6,76
Plastiques	8,73
Combustibles	3,94
Verres	3,94
Inertes	0,00
Textiles	0,00
Métaux	2,54
Déchets spéciaux	0,00
Fine	30,42

22/01/2016	
Catégories	Pourcentage
Putrescibles	40,08
Papiers/cartons	6,25
Plastiques	5,04
Combustibles	0,00
Verres	13,03
Inertes	0,00
Textiles	0,00
Métaux	3,65
Déchets spéciaux	0,00
Fine	31,96

ANNEXE II : Fiche d'enquête de la caractérisation des déchets

Catégories	sous-catégories	Poids en kg	%
Putrescibles	Déchets de jardins		
	Restes de cuisine		
	autres		
Papiers/cartons			
Plastiques	Souples		
	Dures		
Combustibles	Bois		
	Cuir		
	Charbon de bois		
	Autres		
Verres			
Inertes			
Textiles			
Métaux			
Déchets spéciaux	Piles		
	Produits chimiques		
	autres		
Fine			
TOTAL			

ANNEXE III : Valeurs des paramètres physico-chimiques

Jours	Tas N°	Poids à l'étuve à 105°C(g)	Poids au four 550°C(g)	%MO	%COT	C moyen(%)	N(%)	C/N
1	T1	0,54	0,22	59,26	33,67	32,20	1,00	32,08
	T2	0,61	0,28	54,10	30,74			
3	T1	0,56	0,24	57,14	32,47	32,07	1,01	31,67
	T2	0,61	0,27	55,74	31,67			
5	T1	0,54	0,23	57,41	32,62	31,46	1,00	31,50
	T2	0,6	0,28	53,33	30,30			
7	T1	0,59	0,27	54,24	30,82	28,37	0,91	31,01
	T2	0,57	0,31	45,61	25,92			
9	T1	0,61	0,29	52,46	29,81	28,13	0,93	30,29
	T2	0,58	0,31	46,55	26,45			
12	T1	0,65	0,32	50,77	28,85	26,60	0,91	29,38
	T2	0,49	0,28	42,86	24,35			
14	T1	0,65	0,35	46,15	26,22	26,26	0,93	28,28
	T2	0,54	0,29	46,30	26,30			
16	T1	0,69	0,37	46,38	26,35	25,21	0,93	27,15
	T2	0,59	0,34	42,37	24,08			
18	T1	0,69	0,35	49,28	28,00	23,94	0,92	26,04
	T2	0,6	0,39	35,00	19,89			
20	T1	0,71	0,45	36,62	20,81	22,28	0,89	24,99
	T2	0,67	0,39	41,79	23,74			

	Tas1	Tas2	T° moyen	T° ambiante
J1	26,2	26	26,1	34
J2	35,8	34,2	35,0	33,2
J3	32,0	28,1	30,0	35
J4	49,2	43,7	46,5	32,9
J5	48,9	46,4	47,7	33,4
J6	48,3	48,2	48,2	34
J7	51	53,2	52,1	36,5
J8	46,6	48,5	47,6	35
J9	43,1	45,3	44,2	39
J10	42,8	44,8	43,8	36,8
J11	43,2	42,5	42,9	39,4

Caractérisation des déchets solides en vue d'une valorisation par compostage: cas du campus 2iE

J12	42,9	41,8	42,4	40,7
J13	42,3	41,6	42,0	39,3
J14	41,7	41,1	41,4	38
J15	41,2	40,6	40,9	41
J16	39,3	41,3	40,3	37,5
J17	42,2	40,9	41,5	39
J18	41,3	42,1	41,7	37,5
J19	40,5	40,2	40,4	39,2
J20	40,0	40,4	40,2	39
J21	41,0	40,1	40,6	36
J22	39,6	41,0	40,3	37
J23	39,2	40,8	40,0	38,6
J24	38,8	41,0	39,9	42
J25	38,2	40,5	39,4	44
J26	37,9	39,2	38,6	41
J27	35,9	36,3	36,1	39,4
J28	36,2	37,4	36,8	40
J29	37,1	38,4	37,8	39
J30	36,8	39,5	38,2	40,3
J31	37,7	38,9	38,3	43
J32	38	39,2	38,6	41

	pH Tas1	pH Tas2	pH moyen
J1	4,4	4,49	4,5
J2	4,4	4,4	4,4
J3	4,6	5,0	4,8
J4	6,8	5,4	6,1
J5	6,69	7,0	6,9
J6	6,9	7,5	7,2
J7	7,3	7,9	7,6
J8	6,4	7,2	6,8
J9	6,1	6,7	6,4
J10	7,4	6,80	7,1
J11	6,7	7,8	7,3
J12	7,1	7,5	7,3
J13	6,3	7,3	6,8
J14	5,8	7,6	6,7
J15	6,6	7,2	6,9
J16	7,1	7,4	7,3
J17	7,3	6,9	7,1
J18	6,8	7,2	7,0

Caractérisation des déchets solides en vue d'une valorisation par compostage: cas du campus 2iE

J19	6,5	6,9	6,7
J20	6,1	6,4	6,3
J21	5,9	5,7	5,8
J22	5,6	5,8	5,7
J23	5,2	5,4	5,3
J24	5,6	5,8	5,7
J25	6,1	6,4	6,3
J26	6,5	6,2	6,4
J27	6,9	6,7	6,8
J28	7,1	6,8	7,0
J29	6,4	7,2	6,8
J30	6,6	6,9	6,8
J31	6,4	6,2	6,3
J32	6,1	6,3	6,2

Jour de prélèvement	Tas	Poids de l'échantillon (g)	Poids du pot(g)	Poids à l'étuve à 105°C (g)	Humidité (%)	Humidité moyenne
Jour 1	T1	1	9,24	9,78	46	42,5
	T2	1	9,32	9,93	39	
Jour 2	T1	1	9,92	10,44	48	44,5
	T2	1	8,96	9,55	41	
Jour 3	T1	1	9,05	9,61	44	41,5
	T2	1	10,03	10,64	39	
Jour 4	T1	1	9,62	10,13	49	45
	T2	1	8,56	9,15	41	
Jour 5	T1	1	9,71	10,25	46	43
	T2	1	9,35	9,95	40	
Jour 6	T1	1	10,3	10,89	41	44
	T2	1	9,62	10,15	47	
Jour 7	T1	1	8,66	9,25	41	42
	T2	1	9,25	9,82	43	
Jour 8	T1	1	9,9	10,41	49	43,5
	T2	1	8,43	9,05	38	
Jour 9	T1	1	9,68	10,29	39	40,5
	T2	1	8,82	9,4	42	
Jour 10	T1	1	8,92	9,55	37	39
	T2	1	9,36	9,95	41	
Jour 11	T1	1	9,04	9,69	35	43
	T2	1	8,54	9,03	51	
Jour 12	T1	1	8,76	9,36	40	38,5
	T2	1	9,02	9,65	37	

Caractérisation des déchets solides en vue d'une valorisation par compostage: cas du campus 2iE

Jour 13	T1	1	9,12	9,77	35	40,5
	T2	1	8,96	9,5	46	
Jour 14	T1	1	8,83	9,44	39	38
	T2	1	9,52	10,15	37	
Jour 15	T1	1	9,13	9,82	31	36
	T2	1	8,95	9,54	41	
Jour 16	T1	1	9,66	10,29	37	36,5
	T2	1	9,18	9,82	36	
Jour 17	T1	1	9,04	9,73	31	35,5
	T2	1	8,99	9,59	40	
Jour 18	T1	1	8,81	9,48	33	32,5
	T2	1	9,11	9,79	32	
Jour 19	T1	1	8,62	9,33	29	31
	T2	1	8,93	9,6	33	
Jour 20	T1	1	9,05	9,71	34	29,5
	T2	1	8,94	9,69	25	

ANNEXE IV : Valeurs des paramètres microbiologiques

Jours	Mycètes (UFC/g)	Actinomycètes (UFC/g)	Bactéries hétérotrophes (UFC/g)
J6	5,05E+03	5,10E+03	7,40E+03
J11	4,30E+06	3,70E+06	2,40E+06
J15	4,15E+06	3,95E+06	2,85E+06
J21	4,60E+06	4,05E+06	3,08E+06
J31	5,10E+06	4,62E+06	4,20E+06