



ECOLE DOCTORALE Science – Technique – Santé

Faculté des Sciences et Techniques

Thèse N°04-2011

Thèse

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LOME EN CO-TUTELLE AVEC
L'UNIVERSITE DE LIMOGES**

Discipline : Chimie et Microbiologie de l'eau

Présentée et soutenue publiquement par

K. Edem KOLEDZI

Le 17 février 2011

***VALORISATION DES DÉCHETS SOLIDES URBAINS DANS LES QUARTIERS DE
LOMÉ (TOGO): APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE POUR UNE PRODUCTION
DURABLE DE COMPOST***

Thèse dirigée par : Gnon BABA et Guy MATEJKA

Jury :

Rapporteurs

Rémy BAYARD

Maître de Conférences, INSA Lyon

Jean KOULIDIATI

Professeur, Université de Ouagadougou

Examineurs

K. Honoré KOUMAGLO

Professeur, Université de Lomé

Geneviève FEUILLADE

Professeur, Université de Limoges

Guy MATEJKA

Professeur, Université de Limoges

Gnon BABA

Maître de Conférences, Université de Kara

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
PREMIERE PARTIE: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
Chapitre I. Gestion des déchets dans les villes des PED.....	7
I.1. Problématique de la gestion des déchets.....	7
I.2. Cadre institutionnel.....	7
I.2.1. Acteurs.....	7
I.2.2. Cadre réglementaire.....	10
I.3. Inventaire du gisement des déchets.....	11
Chapitre II. Caractérisation des déchets urbains.....	13
II.1. Classification des déchets urbains.....	13
II.2. Gisement de déchets urbains.....	13
II.3. Echantillonnage, lieux et temps de prélèvement.....	14
II.3.1. Modes d'échantillonnage.....	14
II.3.2. Poids de l'échantillon des déchets à trier.....	16
II.4. Composition des déchets urbains.....	17
II.4.1. Composition physique.....	18
II.4.2. Masse volumique.....	21
II.4.3. Composition chimique.....	22
Chapitre III. Compostage des déchets, contraintes et avantages.....	26
III.1. Principe du compostage.....	26
III.2. Bio conversion de la matière organique.....	27
III.3. Paramètres du compostage.....	28
III.3.1. Micro organismes.....	29
III.3.2. Paramètres physico-chimiques.....	30
III.4. Amendements et effets sur les caractéristiques globales des sols.....	47
III.5. Modes de compostage des déchets urbains.....	48
III.5.1. Compostage centralisé.....	49
III.5.2. Compostage décentralisé.....	50
III.6. Procédés de compostage.....	50
III.6.1. Compostage en andains.....	51
III.6.2. Compostage en récipients clos.....	53
III.6.3. Lits rectangulaires remués ou Tunnels Siloda®.....	54
III.6.4. Tubes rotatifs.....	54
III.6.5. Vermicompostage.....	56
III.7. Echec des usines de compostage dans les PED et les pays émergents.....	57
III.8. Qualité du compost.....	59
III.8.1. Composition du compost.....	59
III.8.2. Avantages du compost.....	60
Chapitre IV. Installation pérenne d'une filière de compostage.....	64
IV.1. Aspect « technologique » du procédé.....	65
IV.2. Aspect marché du compost.....	67
IV.3. Aspect politique.....	68
IV.4. Aspect financier et économique.....	69
DEUXIEME PARTIE: METHODES ET MATERIELS ANALYTIQUES.....	71
Préambule : Présentation du Togo et de la ville de Lomé.....	73

Chapitre I Gestion des déchets de la ville de Lomé	76
I.1. Historique de la gestion des déchets à Lomé	76
I.2. Organisation de la gestion des déchets à Lomé	76
I.2.1. Pré-collecte	77
I.2.2. Recyclage informel	80
I.2.3. Post-collecte ou collecte secondaire	81
I.2.4. Mise en décharge	81
Chapitre II: Méthode expérimentale pour la valorisation par compostage des déchets urbains à Lomé.....	84
II.1. Mise en place du protocole expérimental	85
II.1.1. Données climatiques.....	86
II.1.2. Données sur les déchets	86
II.1.3. Données sur les ONG	87
II.2. Méthodes de choix de l'échantillon.....	87
II.2.1. Enquêtes préliminaires	87
II.2.2. Choix de l'origine des déchets.....	87
II.2.3. Lieu de la campagne de caractérisation	88
II.2.4. Taille de l'échantillon	88
II.3. Caractérisation physique.....	90
II.3.1. Séparation par taille	91
II.3.2. Séparation par catégories.....	91
II.4. Compostage, aspects méthodologiques	92
II.4.1. Choix du site expérimental	93
II.4.2. Choix des outils et des substrats	93
II.4.3. Choix de la méthode de compostage	93
II.4.4. Composition des cuves et des andains.....	94
II.4.5. Mode de valorisation du compost.....	95
II.5. Méthodes analytiques	95
II.5.1. Caractérisation physique.....	95
II.5.2. Composition chimique.....	96
II.5.3. Méthodes de suivi de compostage	99
II.6. Essais agronomiques.....	103
II.7. Statistiques.....	105
 TROISIEME PARTIE: RESULTATS ET DISCUSSIONS	 107
Chapitre I. Etude du gisement de déchets urbains dans les quartiers à Lomé.....	109
I.1. Production de déchets solides	109
I.1.1. Type d'échantillon après enquête préliminaire	109
I.1.2. Ratios de production	109
I.2. Caractérisation des déchets entrant sur la décharge d'Agoenyivé	110
I.2.1. Type d'échantillon.....	110
I.2.2. Tri par taille.....	110
I.2.3. Tri par catégorie	112
I.3. Caractérisation des déchets collectés dans les ménages	119
I.3.1. Type d'échantillon.....	119
I.3.2. Tri par taille.....	119
I.3.3. Tri par catégorie	120
I.4. Composition moyenne des déchets solides de Lomé.....	121
I.5. Caractéristiques physico-chimiques.....	122
I.5.1. Paramètres physiques.....	122
I.5.2. Paramètres chimiques	128

I.6. Quantités d'OM générées	131
I.6.1. Quantités de déchets générés par grands types de filières	131
I.6.2. Quantités maximales de déchets générés par filières possibles	133
I.7. Le compostage des déchets de Lomé ? quelles filières possibles	134
Chapitre II : Etude de la pré-collecte des déchets ménagers	137
II.1. Quartiers couverts par la pré-collecte	137
II.2. Evaluation de la pré-collecte dans les quartiers de Lomé	139
II.2.1 Quartier d'Agbalépédogan	139
II.2.2. Comparaison avec d'autres quartiers	141
II.2.3. Comparaison avec d'autres données internationales	141
Chapitre III: Etude expérimentale d'optimisation du procédé de compostage	143
III.1. Suivi du procédé de compostage	144
III.1.1. Humidité, H%	144
III.1.2. Température, T°C	145
III.1.3. Evolution du pH et de la matière organique	147
III.2. Bilan matière	149
III.3. Paramètres en fin de compostage	151
III.3.1. Teneur en carbone organique	151
III.3.2. Teneur en éléments fertilisants	152
III.3.3. Rapport C/N des composts produits	153
III.3.4. Teneurs en éléments trace métalliques, ETM	154
III.3.5. Teneurs en impuretés + MO oxydable au chlore	154
III.4. Test de lixiviation : mesure du relargage du plomb	156
III.5. Mesure de la maturité et de la stabilité du compost	160
III.5.1. Test respirométrique, AT4	160
III.5.2. Indice de germination, IG	162
Chapitre IV: Etude de la valorisation agronomique du compost produit	164
IV.1. Analyses des sols	164
IV.2. Teneur en nutriments	164
IV.3. Essais des composts en champ	165
Chapitre V: Quelle filière pérenne de compostage dans les quartiers de Lomé ?	168
V.1. Aspect socio-culturel et politique	168
V.2. Conception d'une plateforme de compostage	169
V.2.1. Choix de la ligne de production de compost	169
V.2.2. Dimensionnement de la plateforme	170
V.3. Suivi d'exploitation	173
V.4. Débouché et commercialisation du compost	175
V.5. Aspect financier	176
CONCLUSION GENERALE	179
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	185

Index des tableaux

Tableau 1 : Responsabilités et rôles des acteurs dans la gestion des déchets.....	9
Tableau 2 : Evaluation globale de la quantité de déchets produits.....	12
Tableau 3 : Production de déchets par habitant et par jour de quelques pays	14
Tableau 4: Calcul de la taille de l'échantillon	17
Tableau 5 : Composition des déchets urbains dans plusieurs pays de différents continents....	21
Tableau 6 : Composition chimique en % des différentes catégories de déchets / MS	23
Tableau 7 : Composition en métaux dans les déchets urbains de quelques PED.....	24
Tableau 8 : Classification des espèces en fonction des phases du compostage	29
Tableau 9 : Différents types de champignons en phase de ralentissement.....	30
Tableau 10 : Type de micro organismes détruites en fonction de la température	31
Tableau 11 : Paramètres de contrôle et de suivi du procédé.....	34
Tableau 12 : Rapport C/N de divers substrats	43
Tableau 13 : Récapitulatif des différents critères de stabilité et de maturité d'un compost....	46
Tableau 14 : Nombres de classes de compost dans plusieurs pays	47
Tableau 15 : Récapitulatif des procédés de fermentation employés dans les P.E.D.....	56
Tableau 16 : Exemples de dysfonctionnements rencontrés dans les P.E.D.....	59
Tableau 17 : Composition de quelques composts en métaux et nutriments.....	60
Tableau 18 : Aspects techniques et socio-économiques de la filière compostage.....	64
Tableau 19 : Coût du compostage par rapport à l'incinération	69
Tableau 20 : PIB et PNB de quelques pays de l'Afrique Sub-saharienne	75
Tableau 21 : Quantité de déchets prélevés au niveau de chaque centre pour un facteur de risque : 0,05 et t=1.96.....	89
Tableau 22 : Différents catégorie de déchets.....	91
Tableau 23 : Composition et construction des cuves et des andains	94
Tableau 24 : Désignation des différents traitements des essais agronomiques	104
Tableau 25 : Production de déchets dans deux quartiers.....	109
Tableau 26 : Quantité de déchets prélevés provenant de chaque centre pour un facteur de risque : 0,05 et t=1.96.....	110
Tableau 27 : Composition par catégorie de l'année 1 et 2 à la décharge finale	118
Tableau 28 : Proportion des fines dans les déchets ménagers.....	119
Tableau 29 : Densité en T/m ³ des ordures par pesée manuelle	123
Tableau 30 : Densité en T/m ³ des ordures pesées au pont bascule.....	123
Tableau 31 : Valeurs moyennes de l'humidité dans les différentes fractions de déchets	127
Tableau 32 : Valeurs moyennes de l'humidité des déchets dans les ménages	128
Tableau 33 : Teneur en MO dans différentes catégories à la décharge finale	128
Tableau 34 : Teneur en MO des déchets dans les ménages.....	129
Tableau 35 : Valeurs moyennes du COT des déchets.....	130
Tableau 36 : Teneurs en métaux lourds de la fraction fine.....	130
Tableau 37 : Distribution des ordures ménagères par mode de gestion	131
Tableau 38 : Flux par types de déchets produits chez les ménages.....	133
Tableau 39 : Flux par types de déchets sur la décharge	134
Tableau 40 : Présentation des quartiers de Lomé ainsi que des ONG chargées de la pré- collecte et des centres de transit	138
Tableau 41 : Indicateurs de pré-collecte dans le quartier Agbalépédogan	139
Tableau 42 : Evaluation des frais de collecte de l'ONG ENPRO	140
Tableau 43 : Etude comparée du service de trois ONG	141
Tableau 44 : Etude comparative de la qualité du service	141
Tableau 45 : Schéma de la filière expérimental de compostage.....	144
Tableau 46 : Quantité d'eau consommée par les 4 types de compost	145
Tableau 47 : Evolution dans le temps du pH et de la MO des composts	149

Tableau 48 : Comparaison des deux mesures de la teneur en matière organique	149
Tableau 49 : Teneurs en Carbone organique en fin de maturation dans.....	151
Tableau 50 : Composition en nutriments /MS des 4 composts A, B, C, D	153
Tableau 51 : Valeur du rapport C/N des composts produits	153
Tableau 52 : Concentration de quelques polluants métalliques dans les composts A, B, C et D	154
Tableau 53 : Teneurs en MO comparées par perte au feu et par attaque au chlore des composts A, B, C et D.....	156
Tableau 54 : Extraction simple du Pb au bout de 5 jours.....	156
Tableau 55 : Mesures comparées des AT4 des 4 composts produits et des substrats initiaux en	162
Tableau 56 : Valeur moyenne de l'indice de germination (IG)	163
Tableau 57 : Pédologie des sols utilisés pour les essais agronomiques	164
Tableau 58 : Composition chimique de la matière sèche des 4 composts A, B, C, D.....	164
Tableau 59 : Désignation des différents traitements des essais agronomiques sur S ₁	165
Tableau 60 : Désignation des différents traitements des essais agronomiques sur S ₂	166
Tableau 61 : Données pour le dimensionnement de la plateforme déterminées à partir du bilan massique.....	169
Tableau 62 : Dimensions des différentes étapes.....	171
Tableau 63 : Répartition des différentes surfaces nécessaires de la plateforme de compostage ($\leq 5T/J$).....	173
Tableau 64 : Indicateurs de suivi de fonctionnement de la plateforme	174
Tableau 65 : Résultats des enquêtes auprès des maraîchers utilisateurs d'engrais organiques et chimiques	175
Tableau 66 : Evaluation du coût de fonctionnement de la plateforme	176

Index des figures

Figure 1 : Schéma simplifié du processus de compostage.....	27
Figure 2 : Courbe théorique d'évolution de la température au cours du compostage	28
Figure 3 : Courbe théorique d'évolution de la température et du pH au cours du compostage	32
Figure 4 : Coupure d'une structure non phénolique interne et terminale.....	39
Figure 5 : Les quatre voies de l'humification	40
Figure 6 : Représentation schématique de la formation des substances humiques par la théorie poly phénolique.....	41
Figure 7 : Schéma du cycle de l'azote lié à un apport de compost	62
Figure 8 : Carte de zonage de pré collecte et localisation des centres de transit	79
Figure 9 : Schéma explicatif du protocole expérimental.....	85
Figure 10 : Evolution de la température moyenne et de la hauteur de pluie.....	86
Figure 11 : Schéma descriptif et synthétique du protocole de caractérisation des déchets.....	92
Figure 12 : Principe de l'analyse des inertes.....	102
Figure 13 : Schéma du dispositif randomisé des semis.....	104
Figure 14 : Répartition par tailles des déchets de Lomé par années	111
Figure 15 : Répartition par tailles des déchets de Lomé par saisons.....	112
Figure 16 : Composition de la fraction >100 mm de l'année 1.....	113
Figure 17 : Composition de la fraction >100 mm de l'année 2.....	113
Figure 18 : Composition de la fraction >100 mm en saisons sèches.....	114
Figure 19 : Composition de la fraction >100 mm en saisons humides	114
Figure 20 : Composition des déchets de la fraction 100-20 mm de l'année 1	115
Figure 21 : Composition des déchets de la fraction 100-20 mm de l'année 2	115

Figure 22 : Composition de la fraction 100-20 mm en saisons sèches	116
Figure 23 : Composition de la fraction 100-20 mm en saisons humides	116
Figure 24 : Composition globale moyenne des déchets de Lomé en année 1	117
Figure 25 : Composition globale moyenne des déchets de Lomé en année 2	117
Figure 26 : Répartition par taille des déchets prélevés.....	120
Figure 27 : Répartition des déchets par catégories.....	121
Figure 28 : Moyenne de la campagne de caractérisation physique à la décharge finale.....	122
Figure 29 : Humidité dans les différentes fractions des déchets sur la décharge.....	124
Figure 30 : Variations d'humidité par catégorie dans la fraction >100 mm de l'année 1	125
Figure 31 : Variations d'humidité par catégorie dans la fraction >100 mm de l'année 2	125
Figure 32 : Variations d'humidité par catégorie dans la fraction 100 -20 mm de l'année 1 ..	126
Figure 33 : Variations d'humidité par catégorie dans la fraction 100 -20 mm de l'année 2 ..	126
Figure 34 : Choix du type de compostage.....	135
Figure 35 : Evolution de la température pendant le compostage comparée à celle de la température ambiante (points rouges sur les figures).....	146
Figure 36 : Bilans matière des quatre procédés de compostage.....	150
Figure 37 : Schéma explicatif du devenir des refus	151
Figure 38 : Teneur en impureté et en MOO des composts.....	155
Figure 39 : Extraction du Pb avec différentes solutions.....	157
Figure 40 : Différents formes possibles de complexation du plomb.....	159
Figure 41 : Consommation d'O ₂ par les composts A, B, C et D.....	161
Figure 42 : Rendements comparés des différents amendements pour la production de la carotte.....	165
Figure 43 : Rendements comparés des différents amendements pour la production de la betterave	167
Figure 44 : Schéma de la ligne de compostage artisanal ($\leq 5T/J$).....	169
Figure 45 : Table de tri d'une unité de compostage artisanal ($\leq 5T/J$).....	170
Figure 46 : Plateforme de compostage et disposition des andains.....	171
Figure 47 : Distribution des différents retournements des andains sur la plateforme de compostage.....	172

Index des Photos

Photo 1 : Tas en fermentation à Alexandrie.....	50
Photo 2 : Constitution des andains d'Alexandrie.....	52
Photo 3 : Andain en couche.....	54
Photo 4 : Tas triangulaire en fermentation.....	54
Photo 5 : Usine de Lantic en France.....	57
Photo 6 : Tube rotatif à Lantic.....	57
Photo 7 : Lombricompost en maturation.....	59
Photo 8 : Lombricompost en fermentation.....	59
Photo 9 : Centre de transit d'Agbalépédogan.....	79
Photo 10 : Grand dépotoir d'Agoenyivé	79
Photo 11 : Charrette de pré collecte à 2 roues.....	80
Photo 12 : Charrette à deux roues et mini tracteur à 4 roues.....	80

Photo 13 : Centre de transit de Bè Avéto	81
Photo 14 : Dépotoir sauvage à l'Université.....	81
Photo 15 : Ferrailles regroupés dans un magasin.....	82
Photo 16 : Sacs de récupération attachés à la charrette.....	82
Photo 17 : Matériaux récupérés sur un centre de transit.....	83
Photo 18 : Chiffonniers sur un centre de transit.....	83
Photo 19 : Une tente sur la décharge finale.....	84
Photo 20 : Les chiffonniers sur la décharge finale.....	84
Photo 21 : Pesée avant la pré collecte.....	92
Photo 22 : Collecte des déchets dans les sacs.....	92

Glossaire et Abréviation

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

AFNOR : Association Française de NORmalisation

AT4 : Test Respirométrique Statique à 4 jours

AZOTE KJELDAHL : Représente la somme de l'azote organique et de l'azote ammoniacal

CIT : Carbone Inorganique Total

CNC : Combustibles Non Classés

CT : Carbone Total

COT : Carbone Organique Total

DASRI : Déchets d'Activité de Soins à Risque Infectieux

DBO : Demande Biologique en Oxygène

DB : Déchets Bruts

DST : Direction des Services Techniques

DUS : Déchets Urbains Solides

EDTA : Ethylène Diamine Tétra Acétique

ENPRO : Ecosystème Naturel PROpre

ESA : Ecole Supérieure d'Agronomie

FAPOMA : Fédération d'Association de Précollecte d'Ordures Ménagères et d'Assainissement

FFEM : Fonds Français pour l'Environnement Mondial

FFOM : Fraction Fermentescible des Ordures ménagères

FINES : Particules de petites tailles définies en fonction de l'analyse soit <20mm soit < 10mm

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

H% : Pourcentage Humidité

IG : Indice de Germination

INC : Incombustibles Non Classés

MO : Matière Organique

MO% : Pourcentage Matière Organique

MODECOM : MODE de Caractérisation des Ordures Ménagères

MOO : Matière Organique Oxydable

NTK : Azote Total Kjeldahl

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economique

OM : Ordures Ménagères

ONG : Organisation Non Gouvernementale

ONU : Organisation des Nations Unies

P.A.P : Porte à Porte

PED : Pays en Développement

PI : Pays Industrialisé

P.I.B : Produit Intérieur Brut

ppm : Partie Par Million

SOTOEMA : Société Togolaise d'Enlèvement des Ordures Ménagères et d'Assainissement

TAE : Test d'Auto-Echauffement

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

/MS : Par rapport à la Matière Sèche

Remerciements

Ce projet de thèse a été réalisé en cotutelle entre le Laboratoire GTVD (Gestion, Traitement et Valorisation des Déchets) de l'Université de Lomé et le GRESE (Groupement de Recherche Eau, Sol et Environnement) de l'Université de Limoges sur le site de l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Limoges (ENSIL). J'exprime ma reconnaissance au Professeur Gado TCHANGBEDJI et au Professeur Michel BAUDU respectivement directeur du laboratoire GTVD et directeur du GRESE pour la confiance qu'ils m'ont témoignée en m'accueillant au sein de leurs laboratoires pendant ces années de recherche.

Je remercie profondément le Professeur Gnon BABA des Universités de Lomé et Kara et le Professeur Guy MATEJKA de l'Université de Limoges pour avoir dirigé ce travail et pour l'intérêt constant qu'ils ont porté à ce sujet de recherche. Je souhaiterais ici leur témoigner ma sincère reconnaissance pour tous les conseils et les remarques objectives qu'ils m'ont apportés.

J'exprime ma reconnaissance aux Professeurs Rémy BAYARD et Jean KOULIDIATI, pour m'avoir honoré en acceptant d'être les rapporteurs de ce travail, de le juger, pour avoir apporté leurs contributions et pour l'intérêt qu'ils portent au sujet.

Mes plus vifs remerciements vont au Professeur KOUMAGLO Kossi Honoré de l'Université de Lomé pour avoir bien voulu me faire l'honneur en acceptant de présider mon jury de thèse. Mes remerciements s'adressent également au Professeur Geneviève FEUILLADE pour sa disponibilité, ses orientations, ses remarques fructueuses et l'intérêt qu'elle a accordé à ce travail en acceptant de le juger.

Je tiens également à remercier les donateurs du Projet Corus N°6126, le Service de Coopération et d'Action Culturelle (SCAC) de l'Ambassade de France au Togo et les responsables de l'Université de Lomé pour leurs soutiens financiers.

Je n'oublie pas les membres du Laboratoire GTVD, du GRESE sur le site de l'ENSIL et de l'ONG ENPRO avec qui j'ai partagé les bons comme les mauvais moments et qui m'ont permis de trouver une deuxième famille.

Je ne pourrai terminer ces remerciements sans y associer ma famille et mes amis qui m'ont toujours apporté tout leur soutien et leur appui afin d'arriver au terme de cette aventure, et tous ceux rencontrés durant ces 4 années sans le soutien desquels je n'aurais pu entreprendre ces études. A toutes et à tous je leur dis un grand merci !

Que DIEU soit honoré à tous égards !

INTRODUCTION GENERALE

La pratique d'enterrer les déchets dans des décharges ou éventuellement dans des centres techniques d'enfouissement, et de ne plus y penser, ce qui crée un nombre incalculable de sites contaminés pour les générations futures, doit être abandonnée. Ce changement fondamental doit être un évènement marquant pour la protection de l'environnement. En améliorant la gestion des déchets par la collecte de tous les déchets générés par les habitants des villes par la récupération de la part recyclable et par la valorisation agronomique de la part organique, cela doit aider à l'amélioration de la propreté urbaine tout en apportant une plus value économique à la mise en place des conditions du développement durable. La collecte et l'élimination des déchets dans les PED (pays en développement) sont devenues des problèmes que tous les acteurs locaux institutionnels, bénévoles ou scientifiques n'arrivent plus à résoudre d'une manière permanente. Les tentatives de solutions proposées ou des solutions en cours d'exécution ne se limitent qu'à l'enfouissement ou au remblaiement des bas-fonds aux périphéries des villes alors que la population de ces villes ne cesse d'augmenter. Même si les derniers accords sur le changement climatique ont montré que les PED contribuent peu au réchauffement climatique, ces pays peuvent contribuer à réduire l'évolution globale du réchauffement, ne serait-ce que par la réduction du biogaz produit par les déchets stockés, par le compostage de la fraction biodégradable qui constitue la fraction la plus importante de leurs déchets.

Le compostage permet de valoriser la fraction fermentescible des déchets ménagers et le retour au sol d'une matière organique stabilisée. Cette technique biologique constitue une voie de valorisation matière qui limite le recours au stockage et à l'incinération. Les procédés de compostage, dans leur diversité, ont comme finalité la production d'un compost de qualité même à partir de déchets ménagers hétérogènes.

On note malheureusement dans la plupart des PED, une absence fréquente ou une insuffisance des démarches de caractérisation des déchets, en préalable à la mise en œuvre de ces projets, ce qui ne permet pas d'apporter les informations nécessaires à ce choix raisonné et conduit très souvent à des erreurs dans les modes de traitement. Cette faiblesse en matière de caractérisation des déchets, qui est la source des nombreux échecs ou erreurs de leur gestion, est due principalement :

- à l'ignorance du besoin d'une caractérisation précise des déchets comme un des fondements d'une politique de leur gestion,
- aux difficultés administratives et financières pour la réalisation de la caractérisation qui est une opération coûteuse et fastidieuse,

- à l'absence de méthodes de caractérisation rigoureuses, préalablement adaptées aux contraintes et aux objectifs de caractérisation des PED,
- à l'absence de laboratoires spécialisés dans le domaine des déchets, disposant de compétences et d'équipements pour mettre en œuvre une méthode adaptée et pour réaliser des analyses elles-mêmes spécifiques.

A Lomé (Togo), la gestion des déchets n'a pas toujours été une préoccupation comme pour les autres villes des PED. Aujourd'hui malgré plusieurs projets dans le domaine de la gestion des déchets qu'a pilotés la municipalité, on constate toujours une multitude de dépotoirs aux abords des rues et dans les bas fonds, et le remblaiement d'une ancienne carrière d'Agoenyivé qui sert d'exutoire final. Plusieurs projets ont porté sur cette décharge mais la plupart ont été voués à l'échec par manque de connaissance géologique et environnementale du site et surtout, par manque de données sur les déchets de la commune de Lomé. C'est pourquoi les informations dans ce rapport ont une grande importance non seulement sur les caractéristiques physiques des déchets afin de mieux gérer la décharge finale, mais aussi de mieux maîtriser la technique de compostage notamment pour en faire une filière pérenne en particulier dans les quartiers périphériques en collaboration avec les ONG (Organisation Non Gouvernementale) en charge du ramassage des ordures.

Le projet d'étude de cette thèse comprend trois phases.

La première phase de caractérisation des déchets générés dans la ville de Lomé a constitué la phase décisive de l'étude et a permis de choisir le type de traitement approprié. Elle a fourni aussi une base de données sur le gisement et la composition physico-chimique des déchets. La deuxième phase a représenté le cœur du travail : c'est l'étude expérimentale du compostage. Elle a ressorti les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du compostage par rapport aux déchets de la ville de Lomé. Une troisième et dernière phase, a porté sur l'analyse des différents aspects de la pérennisation de cette filière. C'est donc la partie clé de cette étude si l'on envisage de rendre opérationnel et durable ce procédé.

Le rapport de thèse s'articule en trois parties.

Une première partie bibliographique fait état de la problématique de la gestion des déchets, les modes de caractérisation, l'élaboration et les analyses physico-chimiques du compost. Cette première partie permet de dégager les paramètres à prendre en compte dans la gestion des déchets de la ville de Lomé par compostage. Une deuxième partie est consacrée aux méthodes et aux matériels analytiques utilisés. Cette partie présentera l'historique de la gestion des déchets à Lomé et la valorisation des déchets de Lomé par la récupération informelle. La troisième partie présentera les résultats et les discussions, ainsi que les perspectives en vue d'une maîtrise du compostage des ordures dans les quartiers de Lomé.

PREMIERE PARTIE
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I. Gestion des déchets dans les villes des PED

I.1. Problématique de la gestion des déchets

Le problème de la gestion des déchets ne s'est posé avec acuité que récemment, suite à l'accroissement de la production industrielle et au développement des centres urbains. L'élimination des déchets nécessite dès lors une approche technologique et méthodologique. Cette vision s'est traduite par le développement de technologies de plus en plus performantes de traitement qui prennent en compte la croissance des populations, les concentrations des déchets, les préoccupations environnementales et le développement durable. Aussi l'objectif ultime de la gestion des déchets étant de réduire le volume des matériaux destinés à la décharge finale pour minimiser les risques de pollution qu'ils peuvent causer pour la santé et l'environnement (potentiel polluant, émission du biogaz, lixiviat, pathogènes, etc.) (MBT, 2003), les stratégies de gestion doivent passer par l'application de principes simples qui permettent d'atteindre les objectifs spécifiques correspondants (Wicker, 2000). Il s'agit surtout de la mise en œuvre de filières de réutilisation, de recyclage et de compostage des déchets.

Dans les PED, la croissance rapide de la population dans les villes et les multitudes de coutumes entraînant différentes habitudes de vie ont eu pour conséquence une augmentation des taux de production de déchets auxquels les acteurs locaux, collectivités locales et régionales n'étaient pas préparés à faire face.

Jusqu'au seuil des années 90, il n'existait presque pas de stratégies nationales en matière d'assainissement pour ces villes, car les priorités étaient données à d'autres secteurs de développement telles que la lutte contre la désertification, la recherche de l'autosuffisance alimentaire, la santé publique etc.

Jusqu'alors ces acteurs sont surtout restés préoccupés par la collecte et l'évacuation des ordures sans essayer d'approcher les déchets en tant que ressource qui peut avoir une valeur économique. A cause de cela, les rues des villes des PED, et en particulier en Afrique Sub Saharienne offrent un spectacle désolant causé par les immondices dispersées en tous lieux, en attente des « mères » salvatrices que sont les mairies et les municipalités, une attente prolongée car ces dernières ne disposent pas suffisamment de moyens pour y faire face.

I.2. Cadre institutionnel

I.2.1. Acteurs

La gestion des déchets n'est pas seulement une affaire de l'Etat. De nombreux acteurs

privés comme publics interviennent dans la gestion des déchets urbains à différents niveaux. Bien souvent, la responsabilité en matière de gestion quotidienne incombe aux communes. Cinq types d'acteurs se répartissent la lourde tâche de la gestion des déchets des villes :

- le **secteur public** représenté par les autorités locales (commune, préfecture, mairie,...);
- le **secteur privé** formé de petites et de grandes entreprises qui relie les activités des ONG et des autorités;
- le **secteur informel** composé soit par des particuliers rassemblés en association de quartier, soit par des petites entreprises non officielles, s'occupant soit de la pré-collecte en porte à porte (P.A.P) (Charnay, 2005), soit des matières recyclables. Ce secteur est une caractéristique de la gestion des déchets urbains dans les villes des P.E.D. Il est représenté par une population à très bas revenu, qui pour survivre, récupère les matériaux directement dans les poubelles du producteur, ou sur les points de transit ou les sites de traitement. Le secteur informel prélève tous les recyclables (cartons, plastiques) et les réutilisables (verres, ferrailles, textiles) d'abord pour leur consommation personnelle, puis pour les revendre après restauration. Environ 2 % de la population des villes d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine survivent grâce à la récupération de matériaux, exemple des « Zabbaleen » au Caire (Medina, 1998);
- la **population**, premier producteur, bénéficie souvent d'un service de pré - collecte. Sa contribution financière est soit directe par le recouvrement des redevances auprès des ONG ou associations ou informels, soit indirecte par le biais des impôts et taxes locales;
- les **O.N.G** et les **associations**, représentent le secteur le plus important. Très nombreuses dans les P.E.D, elles doivent leur essor aux défaillances des communes, des mairies ou autres autorités compétentes dans le domaine de l'environnement. Leurs actions sont fondées sur les liens sociaux entretenus avec la population. Avec de faibles moyens financiers, techniques et une organisation structurelle assez précaire, elles offrent un service apprécié par une population mobilisée dans tous les programmes d'amélioration du cadre de vie. Dans certains pays les autorités n'arrivent plus à jouer leur rôle d'organisateur. C'est le cas par exemple de Bangalore en Inde où la population a décidé elle-même de mettre en place une collecte en porte à porte (P.A.P) pour diminuer les nuisances dues à la surcharge des points de transit (Poornima et Manjula, 2001).

Le rôle et l'implication de chaque acteur dans le système de gestion des déchets sont très variables et dépendent du mode de gestion. Le tableau 1 présente les rôles et les responsabilités de chaque acteur de la gestion. Une multitude d'acteurs interviennent; la prise de décision est alors plus difficile et la mise en place des actions plus complexe.

Tableau 1 : Responsabilités et rôles des acteurs dans la gestion des déchets (Charnay, 2005).

Acteurs	Responsabilités	Rôles
Secteur public	<ul style="list-style-type: none"> - Service de tutelle - Distributeur des tâches entre ONG et entreprises -Coordination des activités d'assainissement de la ville -Veille à l'application des lois et textes -Amendement et répression si nécessaire 	<ul style="list-style-type: none"> -Délivrance des autorisations d'interventions - Evacuation des déchets des dépotoirs de transit vers la décharge finale - Elaboration et mise en application de textes réglementaires sur la gestion des déchets -Sensibilisation, éducation, dissuasion, répression si nécessaire des populations
Secteur privé	<ul style="list-style-type: none"> -Respect des engagements vis-à-vis des partenaires, -Offre d'un service de qualité aux abonnés 	<ul style="list-style-type: none"> - Création d'emploi -Sensibilisation, éducation des populations - Evacuation des déchets des dépotoirs de transit vers la décharge finale - Suivi et évaluation des activités de ramassage
Secteur informel	<ul style="list-style-type: none"> -Diminution du gisement et déchets entrants en décharge 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilisation, éducation des populations - Vente des recyclables et réutilisables - Tri des déchets urbains
Population	<ul style="list-style-type: none"> - Respect des conditions de mise en poubelle - Paiement des redevances et taxes - Respect des normes d'hygiène publique 	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en poubelle des déchets devant leur concession - Sensibilisation et information - Participation aux activités de salubrités et d'hygiène du quartier
ONG et associations	<ul style="list-style-type: none"> - Aide à l'assainissement des quartiers 	<ul style="list-style-type: none"> - Organisation des rencontres - Sensibilisation et information dans les rues et les concessions - Appui pour l'évacuation et le suivi - Appui technique et financier - Relation avec d'autres partenaires

Les responsabilités et les rôles de tous ces acteurs ne sont jamais détaillés de façon rigoureuse dans les PED. Soit c'est l'Etat qui n'applique pas les sanctions prévues, soit c'est la population qui n'a souvent pas le goût de « jeté utile » afin d'inciter les entreprises et les ONG à effectuer leur travail en dépit des routes désastreuses. Les populations par manque du réflexe du « jeté utile » continuent à en déverser davantage au coin des rues ou dans les bas - fonds, et contribuent à aggraver la situation.

La récupération et l'élimination des ordures ménagères, notamment les résidus de

végétaux, les emballages en papier, bois, cartons, matières synthétiques etc., posent ainsi d'énormes problèmes. Il était facile alors de procéder à l'épandage direct des déchets ménagers sur les décharges, hors des agglomérations urbaines. Mais cette opération même si elle est bien conduite ne saurait être satisfaisante parce qu'elle engendre la pollution de l'air (odeurs, gaz, etc.), du sol (surface, sous-sol, etc.), des eaux et la prolifération d'insectes et de petits rongeurs. Cette situation est liée au fait que les décharges n'avaient jamais fait l'objet d'études permettant leur exploitation rationnelle. Il faut souligner que le brûlage des ordures auquel s'adonnent les populations et même les ONG en charge des dépotoirs, dégage un panache de fumées dans l'atmosphère, source d'innombrables maladies respiratoires.

La dégradation des conditions de vie progressive, le chômage des jeunes et la pauvreté sont autant de facteurs ayant favorisé l'émergence d'un secteur informel auquel reviennent les principales tâches dans la gestion des déchets, à savoir la récupération et le recyclage d'une importante quantité de matériaux récupérables dans les ordures. Ce secteur informel joue le plus grand rôle dans la réduction des flux de déchets générés surtout dans les quartiers défavorisés en périphérie des grandes villes.

I.2.2. Cadre réglementaire

Sur le plan international, peu de législations ou de réglementations en matière de gestion des déchets urbains sont élaborées (Yeye, 2002). Chaque pays a donc la responsabilité de cette gestion. Les textes législatifs et les réglementations ne concernent de manière générale que les déchets dangereux (Convention de Bâle sur les déchets dangereux, ratifiée le 5 octobre 2001) et leurs transports (Convention de Bamako sur l'interdiction de transfert des déchets dangereux en Afrique, signée en 1990) ou les polluants organiques persistants (Convention de Stockholm sur les Polluants Organiques Persistants (POPs) avec pour objectif de protéger l'environnement et la santé humaine contre les effets des POPs, signée le 23 mai 2001 à Stockholm. La prise de conscience des différents gouvernements en matière de gestion des déchets, appuyée par les politiques mondiales de protection de l'environnement, s'est concrétisée par la création des ministères de l'environnement ou de structures équivalentes dans les années 90. Différents textes orientés sur la décentralisation ont par la suite été votés. Rares sont les PED ayant une législation spécialement dédiée aux déchets urbains qu'ils auraient plagiée chez les pays développés. Le peu existant dans ce domaine est actuellement désuet à cause de leur faible fréquence de révision. Au Togo, trois lois ont été adoptées très récemment : le Plan National d'Action Pour l'Environnement adopté en juillet 2001 (et en particulier sur ses aspects correspondant à la gestion des déchets, la lutte contre la pauvreté, la protection des zones littorales, la maîtrise des phénomènes de désertification, la lutte contre

les changements climatiques) ; la Loi cadre sur l'environnement au Togo (Loi n° 2008-005 du 30 mai 2008) instituant que les collectivités territoriales ont la charge de la gestion des ordures ménagères et le rapport PNUD- République Togolaise « Amélioration de la gouvernance environnementale au Togo » adopté en 2008. Mais tout comme pour les autres PED, l'application sur le terrain de ces lois relève d'autres difficultés et n'arrive souvent pas à résoudre les problèmes de propreté urbaine.

I.3. Inventaire du gisement des déchets

Pour un meilleur inventaire, il faut tenir compte des activités de collecte, de transport, de tri, de stockage intermédiaire, de traitement, de stockage final, forme inquiétante de durabilité pour certains déchets ainsi que les secteurs d'activités qui sont l'industrie, l'agriculture et la sylviculture, la construction et la démolition, les déchets municipaux, les mines, la production d'énergie, la purification de l'eau et les autres. Avec l'essor des échanges et des flux aux échelles régionales et mondiales, ces filières s'étendent spatialement et une bonne part des matériaux issus du recyclage font l'objet d'un marché, plus moins important. Par manque d'une réelle campagne de caractérisation à l'échelle mondiale, la connaissance et la comptabilisation des flux nationaux de déchets générés par les diverses activités anthropiques ne peut s'effectuer que d'une manière approchée.

En 2001, la production de déchets des pays de l'OCDE est évaluée à 4 milliards de tonnes (Atlas du Monde Diplomatique, 2006). Par manque d'informations fiables surtout sur les productions d'Afrique, de Chine et d'Asie Océanie, la valeur obtenue par défaut à l'échelle de la planète est de l'ordre de 12 Gt/an en 1992 (Salou H., 2005). Pour ce même auteur, pour une meilleure approche de la production mondiale, il faut tenir compte des déchets déversés dans l'environnement marin (déchets faiblement radioactifs, déchets de boues industrielles, déchets de soutes de navires, des boues de stations d'épuration, déblais de dragage des fleuves et d'estuaires, etc.) estimés à 20 Gt/an et vers 2050, il faut prévoir l'élimination d'environ 100 Gtonne/an.

La quantité de déchets produits dépend du niveau de vie des populations. Le tableau 2 présente la quantité de déchets ménagers produits par jour dans les trois différentes catégories de pays. Plus le niveau de vie est élevé plus la production des déchets est forte. Même au sein d'un pays la production varie en fonction de la densité des villes. Les villes à forte densité ont un niveau de vie plus fort que les petites villes, par conséquent elle présente des valeurs plus élevées de production de déchets.

Tableau 2 : Evaluation globale de la quantité de déchets produits (Cointreau, 2006)

Ratio (kg/hab/jour)	Pays pauvres	PED	Pays développés
Déchets mélangés- Grande ville	0,5 à 0,75	0,55 à 1,1	0,75 à 2,2
Déchets mélangés - Ville moyenne	0,35 à 0,65	0,45 à 0,75	0,65 à 1,5
Déchets des habitants d'une localité	0,25 à 0,45	0,35 à 0,65	0,55 à 1,0

Chapitre II. Caractérisation des déchets urbains

La caractérisation des déchets permet d'obtenir des données fiables sur leur composition. Les données obtenues permettront de juger de l'efficacité du tri par apport volontaire afin d'y apporter des modifications nécessaires comme par exemple une meilleure sensibilisation. Les résultats de cette caractérisation serviront aussi de bases pour étudier l'opportunité d'implanter un système de tri des ordures. Les teneurs en humidité et en matière organique des ordures sont aussi des informations intéressantes pour la maîtrise du processus de pré - traitement biologique.

II.1. Classification des déchets urbains

Différentes classifications des déchets existent soit selon leur origine (Loi Française, Annexe II du décret n° 2002 – 540 du 18-04-2002), soit selon la nature du danger qu'ils font courir à l'homme ou à son environnement (O.E.C.D, 1998). Cette étude est uniquement consacrée aux déchets urbains qui représentent l'ensemble des déchets des collectivités, c'est-à-dire les déchets des particuliers, ceux des artisans, commerçants et petits établissements collectés avec les ordures ménagères et les déchets produits par les municipalités elles mêmes. Leur gestion incombe le plus souvent à la municipalité. Parmi les déchets urbains, on distingue notamment les déchets ménagers liés à l'activité domestique. Ils comprennent les ordures ménagères au sens strict, les encombrants et les déchets verts. Les déchets ménagers spéciaux sont les déchets toxiques produits de façon diffuse par les ménages (piles, solvants, peintures, médicaments).

II.2. Gisement de déchets urbains

La connaissance de la production des déchets urbains est essentielle dans la planification d'un système de gestion afin de prévoir au mieux la collecte et les installations de traitement. De nombreuses études ont évalué la quantité de déchets produits, mais les résultats présentent des écarts importants. Dans la ville de Yaoundé (Cameroun) la production des déchets est de 0,85 kg/hab/jour (Ngnikam, 2000), dans la ville Nouakchott (Mauritanie) elle est de 0,21 kg/hab/jour (Aloueimine et al, 2006 a et b). A Lomé (Togo), la moyenne nationale se situe autour de 0,68 kg/hab/j selon URBAPLAN (1996). Aux Etats-Unis la moyenne nationale est de 1,80 kg/hab/jour selon O.N.E.M. (2001). Généralement cette moyenne pour les pays industrialisés 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 PED. Selon Kathirvale et al. (2003),

la production journalière dépend de la densité d'une ville et peut atteindre pour les villes à forte densité, 1,7 kg/hab/j. Le tableau 3 présente la production de déchets par habitant et par jour de quelques pays.

Tableau 3 : Production de déchets par habitant et par jour de quelques pays

Pays	Ville	Référence	Production déchets Kg/hab/j
Brésil	Uberlândia	Fehr et al., 2000	0,51
Cameroun	Yaoundé	Ngnikam, 2000	0,85
Cameroun	Bafoussam	Ngnikam, 2000	0,37
Chine	Hong-Kong	Chung & Pool, 1998	0,7
Chine	Guangzhou	Chung & Pool, 1998	0,4
Etats-Unis	Moyenne nationale	O.N.E.M, 2001	1,8
France	Paris	www.ordif.com, 2002	1,37
Malaisie	Kuala Lumpur	Kathirvale et al., 2003	1,7
Malaisie	Moyenne nationale	Kathirvale et al., 2003	0,5-0,8
Maroc	Moyenne nationale	O.N.E.M, 2001	0,75
Mauritanie	Nouakchott	Aloueimine et al, 2005 a & b	0,21
Mexique	Mexicali	Ojeda-Benitz et al., 2003	0,59

Les pays industrialisés sont davantage orientés vers une société de consommation et de rapidité d'utilisation des produits à durée de vie courte, et avec des emballages importants. Dans les PED, les divergences de coutumes entre les villes et les campagnes se retrouvent dans la production des déchets. En milieu rural, le besoin pour l'alimentation des animaux domestiques et le bétail, ainsi que les habitudes de recyclage diminuent cette production, entraînant généralement des écarts entre les résultats, des études ciblées sur une ville précise et la moyenne nationale du pays. Cette variabilité dans la production des déchets urbains est fonction du pays mais également de la ville, du niveau de vie de la population et des conditions climatiques. Ces écarts peuvent provenir de la méthode même d'évaluation de la production des déchets : évaluation au sein des foyers (Aloueimine et al., 2006 a et b) ou évaluation à l'arrivée des déchets sur les sites de regroupement, de transfert ou de traitement (Tchobanoglous et al., 1993).

II.3. Echantillonnage, lieux et temps de prélèvement

II.3.1. Modes d'échantillonnage

C'est l'étape fondamentale et décisive en ce qui concerne la qualité et la précision des résultats attendus de la caractérisation. Avant de pouvoir identifier les différents types de

déchets, il est nécessaire de définir le contexte dans lequel les opérations de prélèvement vont être effectuées.

L'hétérogénéité des gisements de déchets et la variation au sein des populations rendent l'échantillonnage plus complexe. Il doit tenir compte du zonage, de la période (variation saisonnière), de la fréquence de collecte de l'échantillon et de la source de l'échantillon collecté (Alouimine et al., 2006 a). La technique d'échantillonnage doit être choisie de manière à avoir un échantillon le plus représentatif de la population initiale (déchets, bennes ou ménages) et ainsi à minimiser au maximum les biais dans les résultats. L'enjeu est donc de taille et il faut recourir à une combinaison de technique. Ainsi selon, Nordtest method (1995), il existe trois principales méthodes d'échantillonnage.

II.3.1.1. Echantillonnage aléatoire simple

Toute la population a la même chance théorique d'être dans l'échantillon sélectionné. Cet échantillonnage aléatoire est dit parfait si toutes les variations au sein de la population sont représentées dans l'échantillon, et par conséquent, ce dernier est parfaitement représentatif de la population. Dans ce cas, les unités formant l'échantillon sont déterminées, par exemple, en numérotant toute les unités et en choisissant celles qui constituent l'échantillon selon des tables de nombres aléatoires. Cet échantillonnage est souvent utilisé dans le choix des quartiers, des ménages ou des camions déversant leurs déchets à la décharge.

II.3.1.2. Echantillonnage aléatoire stratifié

Il est plus complexe et il est employé lorsqu'il s'agit d'une population hétérogène. Le critère de stratification doit avoir une relation étroite avec la variable étudiée. Autrement dit, la population est stratifiée de telle manière qu'au sein de chaque partie ou strate les fluctuations de la variable (niveau de vie, production des déchets, taille des ménages,...) soient minimales. Après cette stratification, l'échantillonnage aléatoire (simple ou systématique) est alors fait dans chaque strate. Le nombre d'échantillon de chaque strate peut être déterminé soit par proportionnalité à la population, soit par optimisation, c'est-à-dire que l'échantillon est choisi de manière à ce que la variation de la moyenne soit la plus basse possible pour la taille de l'échantillon considéré.

II.3.1.3. Echantillonnage aléatoire systématique

C'est parfois la seule solution à adopter. Il s'agit de choisir au hasard chaque n^{ième} élément de la population à échantillonner. L'inconvénient de cette technique est relatif à la

faible précision des résultats obtenus quand la population, objet de l'échantillonnage, a des tendances inconnues ou des variations non systématique. Toutefois, dans certains cas ces éventuelles variations sont minimisées grâce à une stratification préalable.

II.3.2. Poids de l'échantillon des déchets à trier

La taille de l'échantillon a une influence fondamentale sur la précision des estimations réalisées sur les caractéristiques de la population-mère. D'après les normes AFNOR, « un échantillon est représentatif lorsque pour une propriété ou des propriétés que l'on veut mesurer, il manifeste les mêmes caractéristiques que la matière dont il est issu » (Lanini, 1998).

La représentativité est souvent une notion qualitative, empirique. Intuitivement, plus la taille de l'échantillon est importante, plus il est représentatif. Certains préconisent des prélèvements dont la taille est au moins trois fois plus grande que celle de leur plus grand composant (Lanini, 1998). La taille de l'échantillon a une influence fondamentale sur la précision des estimations réalisées sur les caractéristiques de la population mère. Elle est déterminée par la loi de Bernoulli qui fait intervenir trois paramètres: sa représentativité, son homogénéité, sa précision. Des niveaux d'incertitudes sont fixés 0,5 ; 0,6 ; 0,7 et la formule de calcul de la taille de l'échantillon est la suivante :

$$n = \frac{t^2 p(1-p)N}{[t^2 p(1-p) + (N-1)\Delta^2]} ; \text{ avec } n = \text{taille de l'échantillon, } \Delta = \text{largeur de la fourchette}$$

exprimant la marge d'erreur, $p = 0,5$; $t = 1,96$ est la variable de Student, $N =$ taille de l'univers investigué correspondant à la masse totale quotidienne de déchets entrants. Le tableau 4 présente un exemple de la taille de l'échantillon en fonction de l'erreur, de la taille de l'univers pour un facteur de risque $p = 0,5$.

Les études de caractérisation des déchets ménagers proposent différentes tailles (masse) d'échantillon à trier en fonction de l'approche d'échantillonnage choisie et des résultats attendus de l'étude. La masse de l'échantillon de déchets à trier peut dépendre de plusieurs facteurs d'ordre économique, de commodité et ou en fonction de l'objectif que l'on se fixe pour cette caractérisation. Par exemple, si l'on veut déterminer les quantités des déchets de cuisine qui sont majoritaires en général dans les ordures ménagères, on peut étudier un échantillon de 100 kg pour avoir un degré de précision donné, alors que pour les composants plus minoritaire dans le flux de déchets, tels que les métaux ou le verre, l'échantillon doit être beaucoup plus important pour avoir le même degré de précision dans les résultats (SENES Consultants Limited, 1999).

Tableau 4: Calcul de la taille de l'échantillon

Δ	n	N	T
5%	80	100	1,96
5%	217	500	1,96
5%	278	1000	1,96
5%	333	2500	1,96
6%	73	100	1,96
6%	174	500	1,96
6%	211	1000	1,96
6%	241	2500	1,96
7%	66	100	1,96
7%	141	500	1,96
7%	164	1000	1,96
7%	182	2500	1,96

Différentes masses de déchets ont été proposées dans la littérature pour satisfaire les précisions requises. La Commission Européenne recommande 100 kg de déchets (Project SWA- Tool, 2004) ou encore 150 kg provenant de 33 unités territoriales différentes (Diop, 1988). Dans SENES Consultants limited (1999), différentes études ont été conduites avec une variation des tailles d'échantillon très importante. Selon cette même source citée dans Aloueimine (2006 a), la méthode « California Integrated Waste Management Board (CIWMB) recommande 25 à 50 échantillons par an d'un poids total de 90 kg dans le cas des études à la décharge et de 57 kg environ pour les études à la source répartis en deux saisons. Pour une meilleure représentativité des échantillons, il est préférable que la ville soit divisée en secteurs homogènes selon le niveau de vie et le type d'activité des habitants, la quantité minimale d'échantillon représentatif ne doit pas être inférieure à 500 Kg après quartage pour éviter les erreurs de mesure (ADEME, 1993).

D'autres méthodes proposent un poids de 100 kg à 200 kg après un quartage répété d'une charge entière de camion (Mohee, 2002), ou 30 échantillons d'un poids total de 200 à 300 kg prélevés sur une période de 6 mois (Kathirvale et al., 2003).

II.4. Composition des déchets urbains

La connaissance de la composition des déchets est essentielle afin d'apprécier les possibilités de valorisation comme le compostage, la récupération de métaux ou d'autres matériaux recyclables (papier, carton, verre, plastique) et de prévoir ainsi la capacité des installations. Les prévisions des impacts sur l'environnement, en évaluant la nature et la quantité des émissions, permettent un meilleur contrôle sur le procédé et une anticipation des difficultés futures.

II.4.1. Composition physique

La gestion efficace des déchets ne peut s'inscrire dans une vision durable que par la connaissance précise de l'évolution des flux de ces rejets et surtout de leur composition. La connaissance des quantités et de la composition des déchets permet d'optimiser le mode de gestion et de promouvoir, éventuellement, la création de filières de valorisation matière. 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 PED (Aye et Widjaya, 2006 ; Zaïri et al., 2004) grâce à la récupération des différents matériaux et à leur vente par les récupérateurs (comme par exemple les carcasses de voitures, des objets contenant du fer,...). La composition physique des déchets varie beaucoup. Le tableau 4 illustre la grande variabilité dans la composition qualitative des déchets de différents pays d'un même continent comme l'Afrique par exemple, (Diop, 1988 ; Zaïri et al., 2004) et dans différents continents (ADEME, 2000; Enda, 1998 ; Mbulugwe et Kassenga, 2004; Mohee, 2002; Ojeda-Benitz et al., 2003; Wei et al., 2000). La grande dispersion observée concerne les différentes fractions de déchets et varie d'un pays à l'autre. Pour les putrescibles, l'écart type peut dépasser 25%, si l'on considère les ordures ménagères de Douala au Cameroun ou celle de Jakarta en Indonésie où cette fraction fait 80% et peut atteindre jusqu'à 87% de ces déchets (Aye et Widjaya, 2006 ; Ngnikam et al., 2002).

II.4.1.1. Tri par taille

Les déchets peuvent être caractérisés par leurs tailles granulométriques. On classe en général ces tailles en 4 granulométries distinctes lors d'un tri (François 2004; Von Blottnitz et al., 2001) : gros (>100 mm), moyens (<100 – 20 mm >), fines (<20 – 8 mm >) et extra fines (< 8 mm souvent du sable). Toutefois, certaines études définissent les gros par une taille comprise entre 100 mm et 300 mm (ADEME, 2005-b) et recommandent un tri visuel des hétéroclites (> 300 mm). D'autres granulométries ont été utilisées dans certaines études comme les diamètres de 40 et 80 mm (François, 2004). Il est parfois opportun de déterminer cette caractéristique des déchets particulièrement quand on envisage d'installer des séparateurs mécaniques ou d'optimiser la séparation magnétique des déchets ferreux basés sur la connaissance des tailles des composants (MBT, 2003; Project SWA-Tool, 2004).

Il est conseillé de séparer les déchets selon plusieurs tranches granulométriques. Deux cribles plans superposables d'environ 2 m², de mailles rondes de 20 mm pour l'un et 100 mm pour l'autre sont alors utilisés. Pour des raisons de possibilité de séchage d'un volume important, le tri ne peut pas systématiquement se faire sur des déchets secs comme le

Par contre, l'absence de politique similaire dans les PED fait que cette catégorie demeure encore très présente et peut représenter plus de 20 % de la masse des ordures ménagères (Aloueimine et al. 2006 b). Les résultats donnés dans le tableau 5 permettent d'avoir une idée non exhaustive de la variation de composition de certaines catégories des déchets.

Tirés de la revue bibliographique (Aloueimine, 2006 b; ANPE, 2004 ; ANRED, 1986 ; ANRED, 1992 ; Arykan, 1997 ; CEN, 2004; Cointreau-Levine, 1996; INM, 2003; Matejka et al., 2001; MEAT, 2003; METAP-PRGDS-Algérie, 2005 ; METAP-PRGDS-Palestine, 2004 ; METAP-PRGDS-Syrie, 2004 ; METAP-PRGDS-Tunisie, 2004 ; MODECOM, 1993; N'gnikan, 1997) les résultats de caractérisation des déchets ménagers de 49 PED (cf. tableau 5) et la France ont été classés par zone géographique. Dans ce tableau ont été indiquées les principales caractéristiques quantitatives et qualitatives des déchets :

- ratios de production de déchets en kg par habitant et par jour,
- principaux paramètres physico-chimiques : densité et humidité,
- principales composantes : fraction organique putrescible, fraction recyclable (papiers-cartons et plastiques) et fraction inerte fine.

A noter tout de même que l'interprétation des résultats de ce tableau doit être faite avec prudence car les statistiques ne sont pas faites de la même manière, pas au même moment et varient d'un pays à l'autre.

La fraction putrescible des déchets est surtout dominante dans les PED, dépassant 55 % contre 35 % dans les pays industrialisés. A l'inverse, la part de papiers, de verres et de matières plastiques s'accroît dans les pays industrialisés, reflétant ainsi les nouveaux modes de consommation de la population. La part des verres est faible dans les PED (entre 1 à 7 %) tout comme la proportion des métaux potentiellement polluants. Seuls les résultats de la caractérisation des déchets urbains pour la Mauritanie sont très divergents. En effet, les fractions putrescibles sont valorisées au sein même des ménages comme alimentation pour les animaux.

Tableau 5 : Composition des déchets urbains dans plusieurs pays de différents continents

Pays	Taux de production Kg/hab/J	Densité T/m ³	Humidité %	Putrescibles %	Papiers- Carton %	Plastiques %	Fines %	Métaux %
Afrique Centrale								
Cameroun	0,9	0,2-0,65	50-65	62-84	03-04	02-03	0,4-25	
Zaire (Rép.Dém. Congo)	0,3-0,6	0,2	31	37-76	02-09	02-03	11-58	
Afrique de l'Est								
Burundi	0,3	0,4						
Tanzanie	0,95	0,39		63	6	inf.1		
Rwanda	0,65	0,35		53	inf.1		45	
Afrique Sub Saharienne								
Benin	0,4-0,5	0,38	47	40-70	1		36-53	
Burkina Faso	0,65	0,3	45	60	2	0,5	32,5	2
Ghana	0,25-0,55		50-60	87	6	1	1	4
Guinée				69	4,1	22,8+ textiles		1,4
Afrique du Nord								
Algérie	0,3-1,3	0,3-0,5	58-62	67-89	07-09	02-03	0,2-23	
Mauritanie	0,21	0,41	11	4,6	3	17	44,5	4,2
Tunisie	0,2-0,8	0,2-0,5	35-68	37-81	1-23	01-16	0-2	4
Proche-Orient								
Jordanie	0,65-0,85			56	16	13		
Palestine		0,3-0,6		69-72	10,6	09-11		
Syrie	0,2-0,6	0,35	54	39-65	10-26	05-12	19,5	
Golfe								
Arabie Saoudite	0,8		25					
Iran	0,2-0,7	0,2-0,3		56-60	22-24			
Yemen	0,4	0,13	18	43-57	15-18	3	2	
Asie du Sud-Est								
Indonésie	0,5-0,8	0,25-0,3	65-80	60-84	08-12	05-10	3	
Philippines	0,7-0,9		60	50	13	2	18-21	
Thaïlande	0,6-0,8	0,25	60	40-45	24	7	5	
Amérique du Sud								
Colombie	0,4-0,9		60-70	56-62	18-22	05-07	5	
Pérou	0,65-2			34	24		32	2,8
Vénézuela	0,6			40	35	8	2	
France	1,37		35	32,2	21,5	11,2		3

II.4.2. Masse volumique

La masse volumique ou masse spécifique est une grandeur physique qui représente la masse par unité de volume. Elle est exprimée en Kg.m⁻³ ou T.m⁻³. Dans la littérature, la masse volumique des déchets est souvent désignée, maladroitement, par les auteurs, par *densité* qui

théoriquement est un nombre sans unité, égal au rapport d'une masse de substance ou matériau homogène à la masse du même volume d'eau pure à une température de 4 °C environ. L'origine de cet équivoque est du fait qu'en anglais le mot *mass-density*, qui désigne la masse volumique, est souvent réduit à *density*. La masse volumique est l'un des paramètres important aussi bien dans le choix et la conception des moyens de transport des déchets urbain (en particulier dans les PED) que dans la stabilisation des déchets en décharge. Elle dépend de la composition des déchets et en particulier de la fraction organique avec une humidité élevée, et de la fraction des fines inférieure à 8 mm (sable et poussière) dans certains PED. En effet, la masse volumique relativement importante des déchets en Tanzanie, par exemple, est due à la teneur élevée en matière organique qui est de 78 % (Mbulugwe et Kassenga, 2004). En Mauritanie, où cette fraction est presque absente dans les déchets à cause de sa valorisation au niveau ménage, ne représentant que moins de 5 % (Aloueimine et al., 2005), la masse volumique est élevée en raison du pourcentage de fraction des fines. En fonction des pays, sa valeur peut varier dans les PI de 100 à 200 Kg/m³ et de 130 à 500 Kg/m³ dans les PED (Charnay, 2005). Dans les décharges, après compactage des déchets, la masse volumique peut varier entre 400 et 500 Kg.m⁻³ aussi bien dans les PI que dans les PED et peut atteindre 830 Kg.m⁻³ et dépasse même 1 T.m⁻³ au fond du massif de déchets. Le tableau 5 présente quelques valeurs dans différents pays.

II.4.3. Composition chimique

Afin d'estimer les pollutions possibles sur l'environnement et sur l'homme, il est important de connaître la composition physico-chimique des déchets. Par la suite il sera donc plus facile d'entreprendre des procédures de contrôle et de réduction des émissions polluantes. La composition chimique soit des déchets bruts soit par catégorie, est utile aussi pour la production de lixiviat et biogaz dans les décharges et, la production de compost.

II.4.3.1. Humidité, H %

La teneur en eau est très importante pour la plupart des déchets des PED riches en matière organique, MO (fruits, légumes, reste de nourriture) là où cette dernière n'est pas valorisée; elle est comprise entre 50 % et 95 %. Au Ghana, elle est de 70-95 % (Asomani-Boateng et al., 1996), de 40-60 % au Burkina Faso (Folléa et al., 2001) et en France elle est de 35 % (ADEME., 1999). Dans certains pays la matière organique est récupérée au niveau des ménages et valorisée comme aliment de bétail et, par conséquent, n'intègre pas le circuit municipal des déchets. L'humidité dans ce cas est très faible. Elle est de 11 % à Nouakchott en Mauritanie (Aloueimine et al., 2006 b).

II.4.3.2. Paramètres chimiques globaux

Le tableau 6 présente les exemples de composition chimique des différentes catégories de déchets.

Tableau 6 : Composition chimique en % des différentes catégories de déchets / MS (*Tchobanoglous et al., 1993*)

Catégories		Matière organique (%)	Carbone (%)	Hydrogène (%)	Azote (%)	Cendres (%)
Putrescibles	Déchets de cuisines	21,4	48	6,4	2,6	5
	Déchets de jardins	75,5	49,6	6,1	0,1	0,9
	viande	56,4	59,6	9,4	1,2	4,9
Plastiques	Polyéthylène	98,5	85,2	14,2	□ 0,1	0,4
	Polystyrène	98,7	87,1	8,4	0,2	0,3
	PVC	86,9	45,2	5,6	0,1	2
Papiers-cartons	Papiers	75,9	43,4	5,8	0,3	6
	Cartons	90,9	59,2	9,3	0,1	1,2
	Textiles	66	48	6,4	2,2	3,2
	Bois	68,1	49,5	6,0	0,2	1,5
	Verres	2,0	0,5	0,1	□ 0,1	98,9
	Métaux	2,0	4,5	0,6	□ 0,1	90,5

MS : matière sèche

La connaissance de ces paramètres permet d'apprécier le potentiel polluant des décharges, ou la charge organique du massif de déchets et mieux encore, permet de prendre une décision quant au traitement des déchets comme le compostage dans les PED. La composition des déchets est très variable même au sein d'une catégorie. La teneur en matière organique (MO) dans les putrescibles varie de 21,4 % à 75 %. Les plastiques contiennent de fort taux de matière organique, mais très peu dégradable, or leur présence peut conduire à surestimer le taux de matière organique biodégradable. Seuls les verres et les métaux contiennent un taux faible de MO. Les plastiques surtout les polystyrènes contiennent la teneur la plus élevée en carbone. Les cartons contiennent le taux d'hydrogène le plus élevé suivi des putrescibles. L'azote est plus présent dans les putrescibles. Les verres et les métaux ont les taux les plus élevés en cendres.

II.4.3.3. Métaux

L'évaluation des quantités des métaux dans les déchets est nécessaire et permet d'évaluer leur potentiel polluant et, par conséquent d'entreprendre les mesures appropriées pour atténuer leur impact sur la santé des populations et sur l'environnement. La présence des métaux dans les déchets est tout d'abord due en grande partie à leur utilisation dans l'industrie pour la fabrication de produits (piles, aérosols, ustensiles de cuisine, peintures, encre, composants électroniques, etc.) ou comme emballage pour divers produits (boîtes de

conserve, briques de lait et de jus, papier, carton, plastiques, etc.). Cependant, l'apport de ces métaux dans les ordures ménagères varie en fonction des catégories qui composent le déchet et en fonction du métal considéré. Leurs toxicités varient considérablement d'un métal à l'autre (Aloueimine et al., 2006 c).

La mise en place de données relatives au potentiel polluant en métaux par catégorie est une étape essentielle dans la gestion des déchets en vue de l'atténuation de l'impact de ces éléments sur la santé et l'environnement. Ceci est d'autant plus important dans les PED où de sérieuses réflexions doivent être menées dans ce cadre précis. Ainsi, cela permettra d'orienter les approches de gestion, adaptées au contexte donné, en optimisant leur contribution dans la réduction des quantités spécifiques de déchets destinés à la décharge finale et surtout au compostage. Par exemple, en faisant un bilan toxicité/quantité par métal et par catégorie, les acteurs impliqués dans la gestion des déchets (décideurs, responsables communaux, entreprises, etc.) peuvent concevoir efficacement les programmes et auront les arguments nécessaires pour convaincre les populations à adhérer à des programmes de gestion spécifiques. Ainsi, par exemple, étant donné que les déchets spéciaux sont sensés subir un traitement spécifique, la réduction du plastique, qui est la principale source de Cd dans les ordures ménagères, contribuerait sensiblement à la réduction des taux en cet élément ; le tri du verre induirait une baisse significative de As, Cr, Mn et du Pb. L'enjeu sanitaire et environnemental de ces éléments toxiques, est particulièrement important quand on tient compte de leur période de demi-vie qui peut aller de quelques jours à quelques milliers d'années (Meoun et Le Clerc, 1999). Le tableau 7 présente les teneurs en métaux dans les déchets de certains PED.

Tableau 7 : Composition en métaux dans les déchets urbains de quelques PED

Pays	Référence	Teneurs en métaux lourds (mg/kg) / MS						
		Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Algérie (Alger)	Aina et al., 2006	50-55	-	200-245	-	300-365	503-552	276-360
Burkina Faso (Ouagadougou)	Aina et al., 2007	-	-	130-170	-	209-303	292-733	134-397
Mauritanie (Nouakchott)	Aloueimine et al. 2006 c	14	228	54	-	64	183	53
Tunisie	Hassen et al. 2001	1,3-4,5	29-90	75-181	-	34-85	155-175	553-677

Conclusion

La méconnaissance des bases de fonctionnement des systèmes de traitement et d'élimination des déchets s'explique dans tous les cas analysés par l'absence de connaissance précise des caractéristiques physiques et chimiques des déchets concernés.

***Cas de l'enfouissement**

La réelle connaissance des déchets est essentielle pour définir les caractéristiques géotechniques de la décharge, sa durée de vie et son mode d'exploitation. Ces données sont en particulier : l'origine et les flux des déchets entrants, leur composition physique et chimique, la variation de la densité et de la teneur en eau durant l'exploitation (Aina et al., 2007).

***Cas du compostage**

La connaissance de la composition et des caractéristiques physico - chimiques des déchets à composter est fondamentale pour caractériser les modalités de leur traitement dans une chaîne de compostage. Ces données sont en particulier : la composition chimique pour équilibrer les mélanges, la composition exacte en matière organique et matériaux non compostables qui devront être triés, la composition granulométrique pour le dimensionnement des équipements de tri, la présence d'éventuels facteurs nocifs (polluants, métaux lourds, pathogènes, etc.) (Aboulam, 2005; Charnay, 2005).

***Cas de l'incinération**

Le taux d'humidité dans les déchets des PED est un des facteurs défavorables à ce type de traitement qui comporte les trois phases successives de la combustion suivante : le séchage, la combustion proprement dite, la fin de la combustion et le refroidissement des mâchefers. A ces trois phases correspondent trois caractéristiques des déchets, dont la connaissance est essentielle: les matières combustibles, les inertes, l'eau.

Une connaissance précise des paramètres de fonctionnement de chaque système de traitement est une condition préalable et objective à une démarche de choix de traitements des déchets. De plus, la mauvaise prise en compte de la nature des déchets, de manière laxiste, insouciante ou approximative, apparaît dans tous les cas à la source d'erreurs lourdes de conséquences (Aloueimine et al., 2006 b).

La nécessité de caractériser les déchets est donc essentielle pour la mise en place des outils de gestion que constituent la collecte, le tri-recyclage, la valorisation par bio conversion et l'élimination finale. La caractérisation des déchets doit être basée sur une méthode rigoureuse et adaptée à la finalité d'identification de ces outils de manière parfaitement définie.

Chapitre III. Compostage des déchets, contraintes et avantages

Les PED font face à une urbanisation croissante qui s'accompagne du développement d'une agriculture urbaine et périurbaine. Cette urbanisation entraîne également une production d'importantes quantités de déchets ménagers et industriels. Relativement riches en matières organiques, ces déchets ménagers sont une opportunité pour les agriculteurs pour fertiliser ou améliorer la qualité des sols des parcelles cultivées. Pour cela, il est nécessaire d'améliorer les techniques de compostage de ces divers substrats organiques pour les sols cultivés, en favorisant la biodisponibilité des nutriments pour la plante cultivée. Une exploitation directe des déchets urbains, sans aucun traitement de stabilisation et d'hygiénisation préalable, existe dans les PED; se pose alors la question de l'impact de ces pratiques sur la qualité des sols et l'environnement dans ces zones périurbaines. Par ailleurs, participant à la valorisation de ces déchets, les techniques de compostage ont été testées et améliorées pour être adaptées aux conditions locales de différents systèmes de production.

Des questions se posent aux responsables locaux en charge de l'élimination des déchets urbains: comment valoriser "naturellement" les matières biodégradables des déchets urbains et ménagers ? la logique, coûteuse en termes financiers, environnementaux et sanitaires de la mise en décharge ou l'incinération aurait-elle vécu ? le développement du compostage, solution "naturelle" de "bon sens", apparaît de plus en plus comme seule voie réelle de valorisation des déchets putrescibles surtout dans les PED.

III.1. Principe du compostage

Il est difficile de donner une définition précise et rapide du compost car selon le cas, les objectifs et les caractéristiques qui lui sont attribués varient. On peut toutefois retenir que le compost est un produit de stabilisation et de traitement aérobie des déchets organiques putrescibles. Le compostage concerne tous les déchets organiques mais surtout les déchets solides et semi - solides. C'est un processus de transformation de matière organique fraîche en une substance organique humifiée, plus stable, appelée « compost » (Peigne et al., 2001).

Le compost est aussi le résultat

- d'une technique biologique de dégradation de la matière organique qui au terme de son évolution donne des humus, facteurs de stabilité et de fertilité des sols,
- d'une activité microbiologique complexe survenant dans des conditions particulières,

On peut également dire que le compost est un produit organique stable, hygiénique semblable à un terreau, riche en composés humiques et fulviques (Mustin, 1987), ou encore

un cas particulier de sol actif très riche en matière organique en évolution et pauvre en éléments minéraux.

En conclusion on peut dire que le compost est le résultat d'un processus de transformation des déchets putrescibles en produit stable et basé sur le principe schématisé par la figure 1.

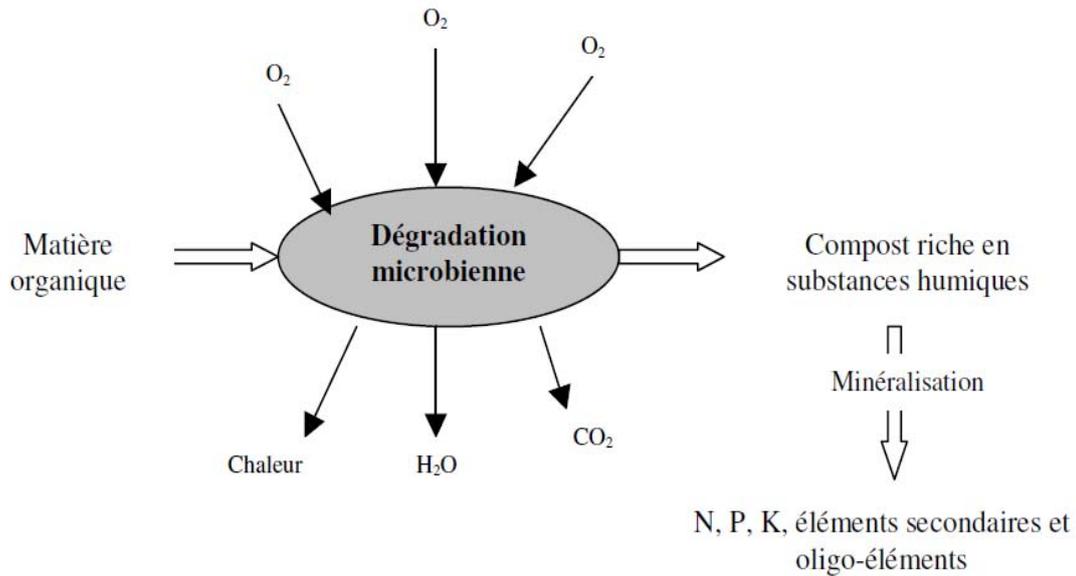


Figure 1 : Schéma simplifié du processus de compostage
(Aboulam, 2005).

Le compost produit, assez riche en substances humiques, constitue un excellent produit d'amendement des sols. Il permet à la fois d'améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol et de fournir par voie de minéralisation des éléments nutritifs assimilables par les plantes cultivées (Souidi, 2001).

III.2. Bio conversion de la matière organique

Le processus de compostage se déroule en quatre phases en fonction de l'évolution de la température :

- la phase mésophile : c'est la phase initiale du compostage. Durant les premiers jours, la présence de matières organiques facilement biodégradables (les sucres, les glucides, les lipides) entraîne une forte activité microbienne générant une rapide montée en température à l'intérieur du compost.

- la phase thermophile : on observe une montée de la température allant de 60°C à 75°C. Seules les bactéries peuvent survivre à ces températures. La grande partie de la matière organique est perdue sous forme de CO₂ et H₂O.
- la phase de refroidissement : elle est caractérisée par une diminution de la quantité de matières organiques facilement dégradables provoquant un ralentissement de l'activité microbienne. Ceci favorise un refroidissement du compost.
- la phase de maturation : les processus d'humification prédominent ainsi que la dégradation lente des composés résistants. Cette phase de maturation dure jusqu'à l'utilisation du compost.

Les deux premières phases qui sont des phases de dégradation des matières organiques sont regroupées sous le nom de fermentation (figure 2), la dégradation de la matière organique y est intensive. Le compost évolue en condition aérobie. L'évolution de la température au sein du compost dépend de la production interne de chaleur et des échanges avec l'extérieur.

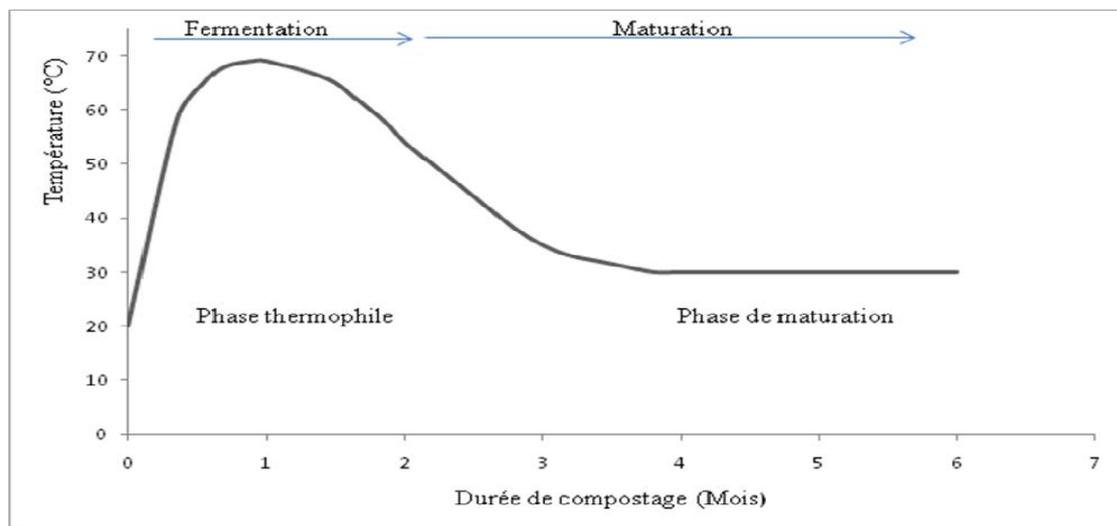


Figure 2 : Courbe théorique d'évolution de la température au cours du compostage (Francou, 2003)

III.3. Paramètres du compostage

Le phénomène de compostage a lieu spontanément dans le milieu naturel, de façon non optimale, avec une répartition de la chaleur trop hétérogène. Pour en faire un procédé technologique, il est donc nécessaire de connaître parfaitement les différents paramètres physico-chimiques et biologiques qui interviennent pour la production d'un compost de qualité.

Les différentes techniques de compostage permettent d'améliorer et d'accélérer le processus de dégradation naturelle des matières putrescibles. Pour ce faire, on cherche à

"doper" l'activité des micro-organismes en optimisant l'offre en substances nutritives et en régulant les conditions de pH, de température, d'humidité et d'aération.

III.3.1. Micro-organismes

Bien que le compostage soit un « art » très ancien et couramment utilisé, ce procédé est l'une des biotechnologies les plus complexes qu'il soit, en raison des changements d'états physiques et biologiques innombrables durant le processus. Une bonne compréhension de ces changements exige une étude précise des successions de communautés microbiennes comprenant l'ensemble des micro-organismes présents y compris ceux qui sont en très faible proportion. Selon Haruta *et al.* (2005), la microbiologie du compostage doit être étudiée au travers de divers aspects, comme par exemple, la composition et la succession des communautés pendant le processus, les micros habitats, ainsi que les fonctions des microorganismes au sein de la communauté.

Les bactéries sont toujours présentes et largement dominantes en qualité et quantité au cours du compostage. Le tableau 8 présente les différentes bactéries intervenant à différentes phases du compostage et qui sont responsables de la destruction des produits simples au cours des deux premières phases. Elles sont majoritaires au cours de la première phase.

Comme les bactéries, la majorité des champignons sont mésophiles et se développent entre 5°C et 37°C. Le tableau 9 présente quelques champignons intervenant à des températures et pH donnés pour dégrader la matière organique (MO) surtout au cours de la phase de ralentissement.

Tableau 8 : Classification des espèces en fonction des phases du compostage (Haruta *et al.*, 2005, Mustin, 1987)

Phase mésophile	<i>Alcaligenaceae, Alteromonadaceae, Bacillaceae, Burkholderiaceae, Bradyrhizobiaceae, Caryophanaceae, Caulobacteraceae, Cellulomonadaceae, Clostridiaceae, Comamonadaceae, Corynebacteriaceae, Enterobacteriaceae, Flavobacteriaceae, Flexibacteraceae, Hyphomicrobiaceae, Intrasporangiaceae, Methylobacteriaceae, Microbacteriaceae, Micrococcaceae, Moraxellaceae, Neisseriaceae, Nitrosomonadaceae, Nocardiaceae, Nocardiosaceae, Paenibacillaceae, Phyllobacteriaceae, Propionibacteriaceae, Pseudomonadaceae, Pseudonocardiaceae, Rhodobacteraceae, Sphingobacteriaceae, Staphylococcaceae, et Xanthomonadaceae</i>
Phase thermophile	<i>Micromonosporaceae, Streptomycetaceae, Thermoactinomycetaceae, Thermomonosporaceae et Streptosporangiaceae</i>
Phase de maturation	<i>Streptomyces et Nocardia</i>

Tableau 9 : Différents types de champignons en phase de ralentissement

Champignons	MO dégradée	Température	pH	Références
<i>Basidiomycotina</i>	Lignine	5°C à 37°C	Sup à 7,5	Mouchacca, 1997
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Cellulose, lignine	36°C à 49°C	Sup à 7,5	Mouchacca, 1997
<i>Basidiomycètes</i>	Lignine	15°C à 40°C	acide	Dix & Webster, 1995
<i>Coprinus</i> (<i>Basidiomycètes</i>)	Cellulose, hémicelluloses	15°C à 40°C	Milieu alcalin	Dix & Webster, 1995
<i>Petits groupes de champignon</i>	Lignine, cellulose, hémicelluloses	40°C à 75°C	acide	Mouchacca, 1997, Tuomela <i>et al.</i> , 2000

A côté de ces deux principaux types de microorganismes, on retrouve également dans le compost, des algues, des protozoaires et des animaux pluricellulaires. Les algues se développent en surface en présence de lumière. Le rôle des algues est mal connu, mais leur importance dans l'évolution de la matière organique en milieu aérobie est sans doute faible (Mustin, 1987).

III.3.2. Paramètres physico-chimiques

Un procédé de compostage optimal correspond à une « fermentation » aérobie réalisée dans les conditions les plus propices au développement de la flore bactérienne. Pour vérifier ces conditions, les principaux paramètres à suivre pendant le procédé sont les suivants :

III.3.2.1. pH

Défini comme le Potentiel Hydrogène, c'est une indication chiffrée reliée à la concentration en H_3O^+ (noté H^+ pour simplifier) d'une solution aqueuse. En solution diluée, $[H^+] = 10^{-pH}$, c'est à dire $pH = -\log [H^+]$, avec $[H^+]$ exprimé en $mol.l^{-1}$. Le pH baisse donc d'une unité lorsque la concentration est multipliée par 10 (un apport d'acide diminue le pH). Le pH des suspensions de solides (déchets en phase de dégradation aérobie, compost mur) varie entre 5 et 8 et peut atteindre 9 (Yu et al., 2009). Une phase acidogène se produit au début du processus de dégradation : production d'acides organiques et de dioxyde de carbone (CO_2) par les bactéries acidogènes, décomposeurs du matériel carbone complexe, provoquant ainsi une diminution du pH initial. La seconde phase correspond à une alcalinisation : hydrolyse bactérienne de l'azote avec production d'ammoniac (NH_3) associée à la dégradation de protéines et à la décomposition d'acides organiques (Haug, 1993 ; Mustin, 1987). Le pH optimal se situe donc vers la neutralité en fonction de la nature du substrat (Damien, 2004).

Le suivi du pH est un indicateur du degré de décomposition biologique et biochimique. La première phase acidogène est difficilement observable comme l'indiquent les études de Canet & Pomares (1995) ou celles de Sanchez-Monedero *et al.* (2001). Il existe différentes méthodes de mesure du pH justement parce que l'on ne sait pas mesurer le pH de la solution du sol. Il existe des méthodes normalisées. Quelle que soit la méthode de mesure du pH utilisée (pH eau, pH KCl, pH CaCl₂), il s'agit d'une mesure simple, peu onéreuse, robuste et avec de nombreuses références agronomiques.

III.3.2.2. Température

Le suivi de la température est une mesure indirecte de l'intensité des dégradations qui ont la particularité d'être exothermiques. Il renseigne également sur la qualité du processus de dégradation (Bustamante *et al.*, 2008) : un épuisement en oxygène peut ainsi être décelé puis corrigé par des apports complémentaires (retournement). De plus, ce suivi caractérise au début du processus la qualité du mélange. Les variations des montées en température sont fonction de l'aération et de la composition du substrat notamment de la teneur en eau nécessaire au développement des différents microorganismes impliqués. Le tableau 10 indique le type de micro-organismes intervenant en fonction de la température atteinte lors du procédé. Pour obtenir l'hygiénisation du compost, l'U.S.E.P.A (1994) recommande une température de 55°C au moins pendant 15 jours en compostage à l'air libre. Dans des réacteurs, la température doit dépasser 60°C pendant une semaine (ADEME, 1998). Les conditions optimales pour une hygiénisation dépendent de la nature du procédé et de la durée de maintien de la température. Stentiford (1996) rapporte qu'une température supérieure à 55°C permet l'hygiénisation, entre 45 et 55°C, elle favorise la biodégradation et entre 35 et 40°C, elle améliore la diversité des micro-organismes. La figure 3 montre l'évolution de la température en fonction du pH. Une température voisine de 20°C ou supérieure à 82°C inhibe, voire arrête cette activité microbienne (Liang *et al.*, 2003). Mais même avec une montée en température suffisante, il existe un risque pour le compost de réinfection due à l'action de certains pathogènes en état de latence (Hamer, 2003).

Tableau 10 : Type de micro organismes détruites en fonction de la température

Type de micro organismes	Température et durée nécessaire à sa destruction
<i>Ascaris lumbricoides</i>	4h à 60°C ou 1h à 65°C
<i>Escherichia coli</i>	15-20 min à 60°C ou 1h à 55°C
<i>Salomonella spp</i>	15-20 min à 60°C ou 1h à 55°C
<i>Shigella spp</i>	1h à 55°C
<i>Taenia saginata</i>	5 min à 71°C

La température peut être mesurée *in situ* à l'aide d'un thermomètre électronique de type VT100 équipé d'une sonde de pénétration de type PT100 (Albrecht R., 2007).

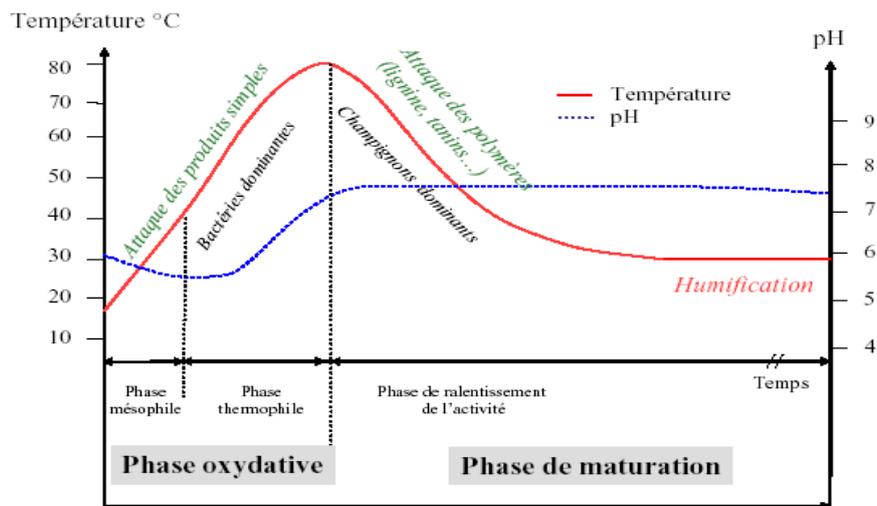


Figure 3 : Courbe théorique d'évolution de la température et du pH au cours du compostage d'après Mustin, (1987)

III.3.2.3. Teneur en eau

La teneur en eau ou humidité (H %) du substrat conditionne l'activité des micro-organismes. La teneur optimale dépend de la densité du milieu, qui est fonction de l'état physique et de la nature du substrat. Elle est sensible à deux phénomènes ayant des effets complémentaires, d'une part, la dégradation de la matière organique provoquant une libération d'eau et d'autre part, une évaporation de l'eau sous l'effet de l'énergie calorifique libérée par la fermentation.

La décomposition de la matière organique est inhibée si la teneur en eau baisse en dessous de 20 %. Au contraire, 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. Selon Mustin (1987), l'optimum de teneur en eau se situe entre 40% et 60 %. En fin de procédé, un produit sec ou presque facilite la finition mécanique du compost en évitant un colmatage des équipements.

Le pH, la température et l'humidité sont des paramètres interdépendants et difficilement dissociables. Les auteurs s'accordent pour donner des valeurs optimales de ces paramètres. Liang *et al.* (2003) étudient plus spécifiquement les effets de deux paramètres, l'humidité et la température de dégradation des biodéchets. L'humidité semble être le paramètre ayant la plus grande influence. Cela suggère un contrôle du procédé par l'humidité et non comme habituellement par la température. D'autres études insistent sur les valeurs de pH et de température au cours du procédé ou sur le compost lui-même (Smars *et al.*, 2002 cité dans F.

Charnay, 2005). Ces paramètres sont optimaux lorsqu'ils permettent une hygiénisation du produit, une vitesse de dégradation rapide et une humidification suffisamment active. Ils sont fonction de la nature du substrat et des conditions particulières de mise en œuvre du procédé.

III.3.2.4. Apport d'oxygène

L'oxygène est utilisé par les microorganismes comme un récepteur terminal d'électrons lors de la respiration aérobie et de l'oxydation des substances organiques (Waas et al., 1996). La présence d'oxygène est indispensable au bon déroulement du compostage pour maintenir les conditions aérobies nécessaires à une décomposition rapide et inodore. La teneur en oxygène lacunaire représente le pourcentage d'oxygène dans l'air des vides entre les particules de compost. Ce taux est fonction de la granulométrie et de l'humidité des particules comme du renouvellement de l'air des lacunes. Au fur et à mesure de la dégradation du substrat, le besoin en oxygène diminue (Haug, 1993; Mustin, 1987). Le taux minimal d'oxygène dans les espaces lacunaires d'un andain en fermentation doit être de 5 % (Puyuelo et al., 2010). Si la teneur en oxygène est trop faible ou la masse à composter trop compacte, les conditions favorables à l'anaérobiose se mettent en place. Ce type de fermentation aboutit à un produit stabilisé mais par le biais d'un processus plus lent avec dégagement d'odeurs nauséabondes.

Les systèmes d'aération sont divers et variés : retournements mécaniques, aération forcée ou pilotée, avec ou sans recirculation (Bari, 2001 cité dans F. Charnay, 2005). L'apport d'oxygène réduit aussi l'humidité initiale (si elle est trop forte), améliore l'homogénéité du substrat et diminue une possible élévation de température.

III.3.2.5. Granulométrie

La granulométrie est un facteur qui détermine la vitesse de biodégradabilité. Plus la surface spécifique du substrat sera élevée, plus la zone de contact entre le substrat et les micro-organismes sera étendue et meilleure sera la fermentation. Une granulométrie trop fine induit un espace poral trop réduit et diminue l'accès puis la circulation de l'air : « étouffement » du compost. A *contrario* si la granulométrie est trop élevée, les apports en oxygène vont dépasser les teneurs optimales, asséchant le compost, et la montée en température se réalisera difficilement. La granulométrie du substrat évolue au cours du processus de dégradation par fragmentation des agrégats vers des éléments fins. Elle peut être modifiée par l'emploi de cribleur de préférence au broyeur pour les déchets urbains très hétérogènes pour lesquels le broyage peut conduire à la dissémination des impuretés dans le compost.

En conclusion, l'identification des principaux paramètres physico-chimiques est nécessaire pour optimiser puis améliorer l'efficacité du procédé. De la caractérisation physico-chimique du substrat va découler le réajustement des conditions du procédé: ajout d'eau, fréquences des retournements. Au cours du procédé, un contrôle des principaux paramètres permet non seulement de connaître le stade de dégradation du compost mais aussi d'avoir une idée du bon déroulement du processus. Dans la pratique, les conditions de dégradation rapides et contrôlées dépendent du système de fermentation employé. Le tableau 11 présente ces caractéristiques pour un système classique en andain avec retournement mécanique.

Il reste très difficile de définir avec précision les valeurs optimales pour chaque paramètre. En effet, ceux-ci dépendent de la composition intrinsèque du substrat, variant en fonction des conditions socio-économiques et du mode de vie de chaque pays. Ces paramètres s'équilibrent au cours du procédé: le dépassement de la valeur de l'un sera compensé par la valeur de l'autre. Certains paramètres comme la température ou l'humidité sont également fonction de la technologie du procédé. En pratique, il est nécessaire de trouver un compromis entre la théorie et les contraintes de terrain.

Tableau 11 : Paramètres de contrôle et de suivi du procédé

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

III.3.2.6. Teneur en azote

La majorité de l'azote contenu dans le compost est d'origine organique, et sous forme de protéines ou de peptides simples. La qualité du compost est également évaluée par le suivi de l'azote. En effet, les microorganismes nitrifient le substrat, se traduisant par une diminution de la concentration en NH_4^+ et une apparition d'ions nitrate NO_3^- . Certains auteurs fixent la limite de stabilité d'un compost d'OM pour une teneur en NH_4^+ voisine de 0,04%, soit 400 mg/kg (Bernal, 1998 ; Bustamante et al., 2008). Sanchez-Monedero (2001) a montré que la perte d'azote dans un compost d'ordures ménagères est proche de 40% et qu'un rapport

$[N - NH_4^+] / [N - NO_3^-]$ inférieur ou égal à 0,11% correspond à un indicateur de maturité pour ce type de compost. L'azote organique des composts stabilisés, se minéralise lentement, avec une vitesse similaire à celle des sols (0,26 mg N/kg/j) sans évolution avec l'âge du compost. Pour les composts moins stables, la vitesse de minéralisation est supérieure (0,4 mg N/kg/j) (Houot, 2002).

III.3.2.7. Teneurs en matière organique et en carbone organique

La matière organique est la matière spécifique des êtres vivants végétaux et animaux. En raison de sa richesse en carbone, la matière organique est appelée matière carbonée. Elle constitue l'humus. Elle est composée d'éléments principaux (C, H, O, N) et d'éléments secondaires, (S, P, K, Ca, Mg) (Mustin, 1987). On fait référence sous le terme de matière organique à la matière capable de se décomposer (ou de l'être) ou à la matière résultant de la décomposition. Il est vrai que la matière organique est bien souvent le reste d'un organisme vivant, et peut même contenir des organismes vivants. Les polymères et les plastiques, si on les qualifie de « composés organiques », ne sont généralement pas considérés comme des matériaux organiques car ils se décomposent très difficilement.

□ Différents types de matière organique

Afin de mieux comprendre l'évolution de la matière organique dans les composts, il faut décrire son évolution dans les sols. Dans le sol, de façon simplifiée on distingue trois fractions : solide minéral et organique, liquide (la solution aqueuse du sol), gazeuse dans les lacunes. La première fraction qui sera plus particulièrement étudiée (car c'est sur elle qu'agira l'apport de compost) comprend une fraction solide minérale (cailloux, argiles,..) et une fraction solide organique. Dans le sol, cette fraction organique se subdivise en quatre grands groupes :

- la matière organique vivante, végétale et animale qui englobe la totalité de la biomasse en activité;
- les débris d'origine végétale (résidus végétaux, exsudats) et d'origine animale (déjections et cadavres) qui sont regroupés sous le terme de matière organique fraîche;
- des composés organiques intermédiaires, encore appelés produits transitoires ou matière organique transitoire qui sont les matières organiques en cours d'évolution entre la matière organique fraîche et les composés finals, les substances humiques.
- les matières organiques stabilisés : les substances humiques dont l'humus, avec une fraction extractible par les solvants (acides fulviques et humiques) et une fraction non extractible par

ces solvants (humine).

□ Matière organique dans le sol – notion d’humus

La matière organique du sol est tout d’abord indispensable à la vie des micro-organismes et constitue avec le complexe argilo - humique, une importante réserve en ions essentiels à l’alimentation des végétaux. Mais son rôle ne se limite pas à cette seule fonction nutritive : elle est susceptible de par sa constitution, d’améliorer les propriétés physiques des sols. C’est un élément capital pour l’entretien des sols et le maintien de leur fertilité. Presque toujours associée à des matières minérales sous forme de complexes notamment avec les minéraux argileux, la matière organique constitue ainsi le complexe argilo humique et c’est cette association qui va jouer un rôle essentiel sur la structure du sol, ses propriétés mécaniques, physiques, hydriques et chimiques. On peut ainsi caractériser un sol par sa Capacité d’Echange Cationique (CEC) proportionnelle à la quantité de charges électriques portées par le complexe. Plus la CEC est élevée, plus le sol peut absorber et désorber de cations et donc les restituer à la plante. La CEC dépend de la nature et de l’association des argiles avec les composés humiques (Thonart. et Diabaté, 2005).

Par exemple pour exprimer l’activité relative des ions sodium (R_{Na}) dans les réactions d’échange avec le sol, on utilise la relation :

$$R_{Na} = \frac{Na}{\sqrt{\frac{(Ca + Mg)}{2}}}, \text{ où Na, Ca, Mg sont exprimés en méq/l}$$

On détermine le pourcentage de sodium échangeable (EPS) par la relation suivante (Thonart.

et Diabaté, 2005): $EPS = \frac{m_{Na}}{CEC}$, avec m_{Na} le sodium échangeable et CEC tous deux exprimés

en méq/100g du sol. La matière organique évolue dans le sol; elle y subit un cycle de transformation qui correspond à un phénomène fondamental assurant un recyclage des éléments constitutifs de la matière vivante dans les sols. La dégradation de la matière organique, qui aboutit à la formation d’humus se compose de deux phases :

- une phase de minéralisation: dégradation par les micro-organismes du sol en éléments minéraux simples, en solution ou fixés sur le complexe argilo- humique. Au cours de cette phase les protéines sont hydrolysées en peptides simples et en acides aminés [$H_2N-CH(R)-COOH$] et, les glucides $C_n(H_2O)_n$ et les lipides commencent à être hydrolysés respectivement en sucres simples et acides gras,
- une phase d’humification : réorganisation des éléments en composés humiques plus stables.

L’humus peut donc être défini comme étant un composé final de la dégradation de la

matière organique; c'est un composé organique stable, à noyaux aromatiques, riche en radicaux libres, très important du point de vue agronomique car il possède de nombreuses actions sur les sols cultivés et également sur la physiologie des végétaux par une réduction de la consommation d'eau par unité de matière sèche produite et par diminution de la transpiration et accélération des processus respiratoires et indirectement de la photosynthèse (Eq 1) :



Cette phase possède des effets favorables sur les métabolismes internes de l'azote, du phosphore et des glucides ; des actions stimulantes sur la formation et la croissance des racines et des tiges et permet une augmentation globale de la santé des plantes par augmentation de leur résistance aux différentes agressions (Mustin, 1987).

□ Evolution de la matière organique

- Dégradation enzymatique des glucides

Plusieurs voies interviennent dans le métabolisme des glucides. Ils sont hydrolysés en glucose, puis subissent une dégradation par la glycolyse en pyruvate. Le pyruvate peut fermenter en lactase ou éthanol suivant les conditions. En aérobiose, il est transformé en acétylCoA (forme activée de l'acide acétique) et oxaloacétate. Enfin, ces derniers rentrent dans le cycle de Krebs qui libère du dioxyde de carbone et de l'eau. Le métabolisme des polysaccharides est particulièrement important dans le compostage comprenant des déchets verts. La cellulose est hydrolysée par un ensemble d'enzymes spécialisées : les cellulases (Bayer *et al.*, 1998). Selon ces auteurs ces enzymes hydrolysent les polymères de cellulose en petits oligosaccharides et en glucose, par l'intermédiaire de trois types majeurs d'enzymes. Ces enzymes peuvent être libres, en particulier chez les microorganismes aérobies, ou groupées dans une même enzyme à plusieurs composants complexes, le cellulosome, chez les bactéries cellulolytiques anaérobies (Bayer *et al.*, 1998). Les mécanismes de dégradation enzymatique des hémicelluloses sont similaires à ceux impliqués dans l'hydrolyse de la cellulose avec notamment, l'intervention des xylanases et des mannases (Sinsabaugh *et al.*, 1991). Les produits de dégradation sont variés du fait de l'hétérogénéité même des hémicelluloses (Sinsabaugh *et al.*, 1991).

- Dégradation enzymatique de la lignine

La lignine est un polymère récalcitrant à la dégradation. Les microorganismes principalement responsables de la biodégradation du complexe ligninocellulose sont les

champignons aérobies filamenteux parmi lesquels la classe des *Basidiomycètes* est le groupe le plus actif (Albrecht, 2007). En effet, seul un groupe limité de champignons de la pourriture blanche est capable de la minéraliser totalement. Ils ont une vitesse de dégradation plus grande de la lignine (Tuomela *et al.*, 2000), de la cellulose et les hémicelluloses (Blanchette, 1995) qui sont aussi dégradés par les champignons de la pourriture brune.

La lignine peroxydase ressemble à d'autres peroxydases et fonctionne par l'intermédiaire d'un cycle catalytique de peroxydase typique (Kirk et Farrell, 1987). L'enzyme est oxydée par H_2O_2 en un intermédiaire déficient en deux électrons, puis revient à son état de repos en exécutant deux oxydations sur le substrat donneur. La lignine peroxydase génère des radicaux cations, des réactions de clivage des liaisons $C\alpha-C\beta$ (Figure 4 a) et l'ouverture de cycles. La lignine peroxydase oxyde non seulement les substrats habituels des peroxydases tels que des phénols et des anilines, mais également une variété de structures non phénoliques de lignine et d'autres éthers aromatiques qui ressemblent à l'unité structurale de base de la lignine (Hammel, 1997). Les manganèses peroxydases sont aussi des hémoprotéines renfermant du fer. Elles sont similaires aux peroxydases à la différence que Mn est obligatoirement le donneur d'électron. La réaction nécessite la présence d'acides organiques chélateurs tels que le glycolate ou l'oxalate, stabilisant le manganèse et favorisant son dégagement de l'enzyme (figure 4 b). Le manganèse peut ainsi agir à distance, éloigné du site actif de l'enzyme. Le complexe manganèse - acide organique oxyde, à son tour, les composés phénoliques de la lignine (Mester et Field, 1997). Cependant, ces manganèses peroxydases n'ont pas un potentiel oxydant très important et ne peuvent, par conséquent, pas attaquer les structures non phénoliques récalcitrantes qui prédominent dans la lignine. Hammel (1997) explique que le manganèse chélaté oxyde ainsi les structures phénoliques les plus réactives qui composent approximativement 10% de la lignine. Ces réactions ont comme conséquence un degré limité dans la ligninolyse, par la coupure de la liaison $C\alpha-C\beta$ et d'autres réactions dégradantes.

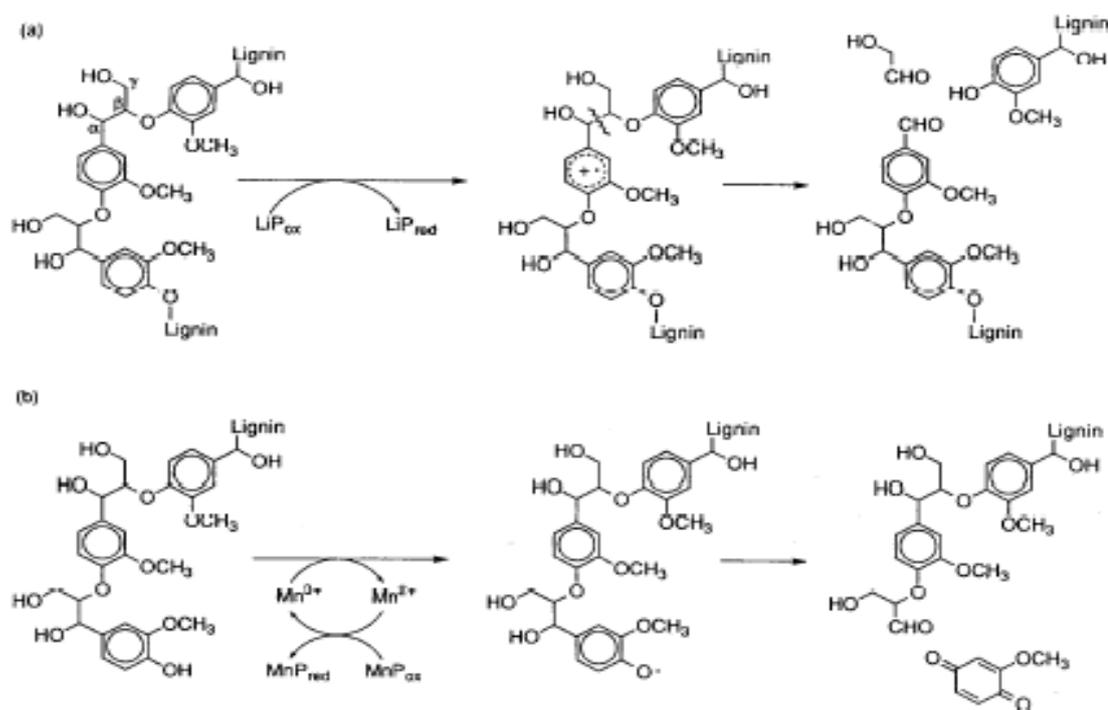


Figure (4a) : coupure par une lignine peroxydase de la structure non phénolique interne arylglycérol-B-aryl éther de la lignine.

Figure (4b) : coupure par un manganèse peroxydase de la structure terminale arylglycérol-B-aryl éther de la lignine.

Figure 4 : Coupure d'une structure non phénolique interne et terminale (Albrecht, 2007)

□ Minéralisation et humification

La matière organique peut suivre deux voies : la minéralisation ou l'humification. La minéralisation est une assimilation par les organismes du compost des composés organiques comme source d'énergie et comme élément pour leur métabolisme, au cours de laquelle la matière organique est transformée en composés minéraux (CO_2 , N_2 , etc.). La vitesse de minéralisation est très fortement dépendante, d'une part, de la nature des composés organiques et des facteurs environnementaux tels que l'aération ou l'humidité, de la température, du pH et, d'autre part, de l'accessibilité aux microorganismes de la matière organique. La nature des composés organiques influe considérablement sur la vitesse de minéralisation. Par exemple, la lignine n'est totalement minéralisée que par les champignons de la pourriture blanche. La biodégradabilité de la matière organique diffère d'un composant à l'autre. Alors que les glucides et les composés azotés sont rapidement minéralisés (De Bertoldi *et al.*, 1983), la lignine, la cutine, la subérine et les tanins condensés présentent une résistance intrinsèque plus ou moins grande, liée à leur structure chimique qui réduit leur biodégradabilité. L'humification est l'ensemble des processus de transformation de la matière

organique engendrant la formation des substances humiques. Les théories classiques de l'humification présentent les processus d'humification soit comme des processus purement biologiques, soit comme des processus biologiques suivis de processus purement chimiques (Stevenson, 1994). La Figure 5 schématise ainsi les quatre voies théoriques classiques de formation des substances humiques.

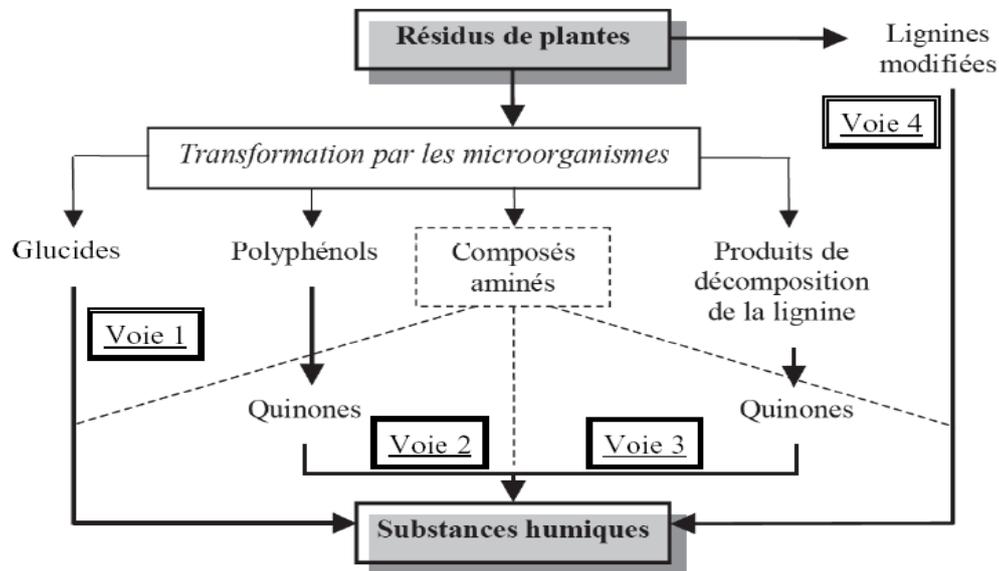


Figure 5 : Les quatre voies de l'humification (Stevenson, 1994)

- La voie 1 strictement chimique est connue sous le nom de la réaction de Maillard. Glucides réducteurs et acides aminés, sous-produits du métabolisme microbien, se condensent sans catalyse enzymatique et conduisent à des mélanoïdes de couleur brune.
- La voie 2 privilégie la formation de polyphénols par les micro-organismes à partir de composés non ligniques. L'oxydation enzymatique de ces polyphénols en quinones est suivie d'une polymérisation produisant les substances humiques.
- La voie 3 : les acides et aldéhydes phénoliques, produits de la dégradation microbienne de la lignine, sont convertis en quinones sous l'action d'enzymes. Ces quinones ensuite polymérisent en présence ou absence de composés aminés et forment les substances humiques.
- La voie 4 est appelée théorie ligno-protéique développée par Waksman (1936). Les composés aminés des micro-organismes réagissent avec les lignines modifiées. Les lignines sont dégradées de façon incomplète, provoquant une perte des groupes méthoxyl (-OCH₃), la génération d'O-hydroxyphénols, et l'oxydation des composés aliphatiques conduisant à la formation de groupes -COOH. La majorité de la communauté scientifique actuelle privilégie les mécanismes impliquant les voies 2 et 3, *i.e.* les mécanismes impliquant des polyphénols et des quinones (figure 6). Dans ce modèle, la première étape est la réduction des macros

molécules végétales, y compris la lignine, en leurs monomères. Certains d'entre eux polymérisent sous l'action d'enzymes ou spontanément dans certaines conditions et produisent des molécules plus complexes. L'ordre de formation des substances humiques, dans ce cas, est : acides fulviques => acides humiques => humines (Stevenson, 1994).

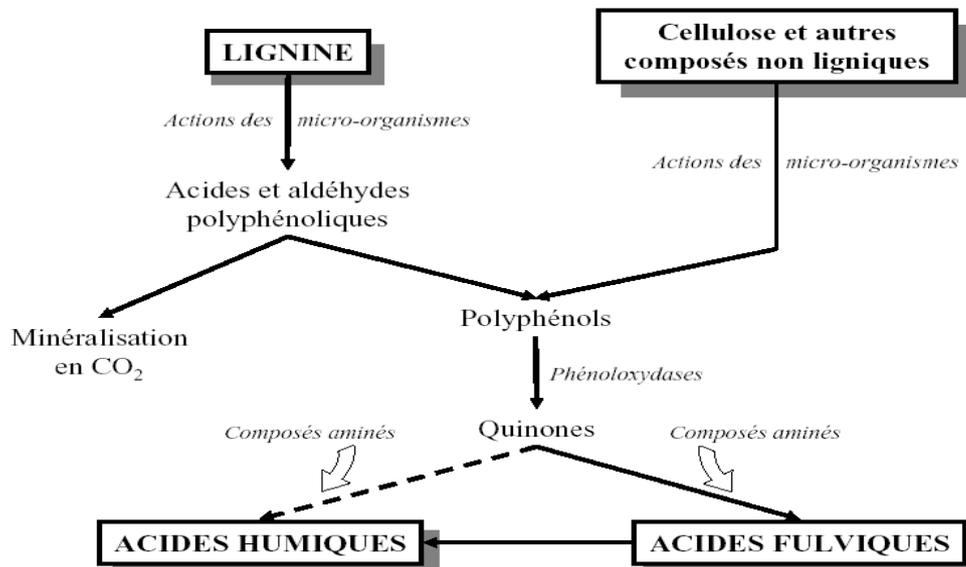


Figure 6 : Représentation schématique de la formation des substances humiques par la théorie polyphénolique (Stevenson, 1994).

Chaque année, le sol perd de l'humus à cause de la minéralisation ; il est donc nécessaire de compenser ce phénomène en apportant de la matière organique. Ces pertes sont fonction du type de sol (teneur en argile et en calcaire) et du climat (humide, sec ou froid). Des apports compensatoires de matières organiques peuvent être de différentes natures : on peut utiliser des amendements organiques comme les résidus de récolte, l'enherbement temporaire, les feuilles et sarments d'arbres, les déjections animales et surtout le compost.

❑ Evaluation de la matière organique par le carbone organique total

Ses paramètres sont fortement liés et font partie des caractéristiques importantes à déterminer dans un compost.

Méthode du dosage du COT

La méthode normée NF EN 13137 (AFNOR, 2001) donne deux méthodes différentes pour le dosage du COT :

Méthode indirecte : le carbone total (CT) dans l'échantillon non séché est transformé par combustion en CO₂ dans un flux d'oxygène exempt de CO₂. Schumacher (2002) note qu'une

température supérieure à 1350 °C permet la destruction complète des carbonates inorganiques présents éventuellement dans l'échantillon. Le CO₂ ainsi libéré est mesuré par une technique appropriée (spectrométrie infrarouge, gravimétrie, volumétrie, autres). Le CIT est déterminé séparément par acidification de l'échantillon et purge du CO₂ libéré qui sera mesuré à l'aide de l'une des techniques citées ci-dessus.

Méthode directe : dans cette méthode, les carbonates, présents dans l'échantillon, sont tout d'abord éliminés par un acide minéral non oxydant (H₃PO₄) avant de procéder à la combustion dans un flux d'O₂. Afin d'assurer une combustion totale permettant de transformer tout le carbone organique en CO₂ et augmenter le taux de récupération, on peut utiliser des catalyseurs/modificateurs tels que l'étain, le cuivre, l'oxyde d'aluminium, (AFNOR, 2001; Schumacher, 2002). A l'issue de cette combustion, le CO₂ libéré est dosé par l'une des méthodes citées plus haut et exprimé en carbone.

Méthode Walkley-Black

Oxydation à froid : c'est la méthode la plus rencontrée dans la littérature grâce à sa simplicité, sa rapidité et le minimum d'équipement qu'elle nécessite (Charnay, 2005 ; François, 2004; Schumacher, 2002). Selon ces auteurs, une quantité d'échantillon de 0,125 à 1,0 g est analysée. Ainsi, la matière organique est oxydée à froid et en milieu acide (H₂SO₄) par du bichromate de potassium en excès (1M) conformément à la réaction suivante (Equa 2)



Le bichromate n'ayant pas réagi avec la matière organique est réduit par un excès de fer (II) (solution de sulfate double de fer ferreux et d'ammonium à 0,5 N) ou sel de Mohr, dosé en retour par du bichromate de potassium (1M). Afin d'éviter les interférences dues à l'éventuelle présence de (Fe³⁺) l'ajout de H₃PO₄ peut s'avérer utile (Schumacher, 2002). Les teneurs sont calculées en tenant compte du fait que 76 à 77 % du carbone organique total sont oxydés (Charnay, 2005 et Schumacher, 2002) et 1 mL de bichromate correspond à 3 mg de carbone organique. Toutefois, à cause de cette oxydation incomplète, dans la littérature on trouve un facteur de correction de 1,33 communément utilisé pour ajuster le taux de récupération du carbone organique (Schumacher, 2002). Le taux de carbone organique mesuré peut être calculé suivant la formule: $\%C_{\text{org}} = \frac{[X_1 - (10 - X_2)] \times 0,003 \times 1,33 \times 100}{m}$

m : masse de déchets (g)

X₁ : volume de bichromate versé (mL)

X₂ : volume de bichromate utilisé pour titrer la solution de sel de Mohr (mL)

Oxydation à chaud : il s'agit de la méthode normée NF ISO 14235 selon laquelle le carbone

organique est oxydé à 135°C dans un mélange de solutions de bichromate de potassium (0,27 mol/l) et d'acide sulfurique concentré. Les ions bichromate sont alors réduits en Cr^{3+} et les ions Cr^{6+} en excès sont déterminés par spectrométrie à une longueur d'onde de 585 à 601 nm (Charnay, 2005; Schumacher, 2002) par comparaison de l'intensité des couleurs (absorbances) avec celles obtenues pour étalonnage réalisé dans les mêmes conditions avec du glucose anhydre.

La teneur du carbone organique est alors déterminée par la formule : $C_{\text{org}} = \frac{C}{100 \times m}$ (en g de carbone/kg de matière sèche) où C : teneur du carbone organique trouvée dans la prise d'essai par rapport à la droite d'étalonnage (mg) et m: masse sèche de l'échantillon prise pour l'essai (g).

III.3.2.8. Rapport Carbone/Azote

Les bactéries utilisent le carbone comme source d'énergie et l'azote comme source protéique. Le procédé de compostage entraîne une décomposition de la MO, donc une consommation de l'azote et du carbone, correspondant à la diminution du rapport C/N. Ce rapport exprime la proportion entre le carbone et l'azote biodisponible. Il dépend de la composition intrinsèque du substrat à composter comme le montre le Tableau 12.

Tableau 12 : Rapport C/N de divers substrats

(Mustin, 1987 ; www.ademe.fr)

Matières	Rapport C/N
Urines	0,8
Gazon coupé	12
Tabac	13
Paille de céréales	90-120
Ordures ménagères	25
Papiers- cartons	70
Branches arbres	70
Paille de blés	128
Sciure de bois	200

De nombreux auteurs déterminent des valeurs optimales de ce rapport C/N qui peut varier de 18 à 107 en début de compostage. Par exemple, il se situe entre 25 et 45 pour les ordures ménagères hétérogènes (Bernal *et al.*, 1998), alors que le rapport minimum C/N des déchets verts est proche de 30. La valeur 35 ne doit pas être dépassée pour les déchets

urbains, sinon les micro-organismes passent par plus de cycles d'oxydation pour atteindre la valeur optimale dans le compost. De même, si ce rapport est faible, une perte excessive en azote ammoniacal risque d'entraîner une diminution du pH.

Il est donc important de connaître le rapport C/N initial des déchets afin de constituer un mélange optimal en ajoutant la quantité d'éléments déficitaires pour assurer une dégradation idéale et homogène sur l'ensemble du processus.

III.3.2.9. Maturité et stabilité du compost

La stabilité et la maturité du compost sont essentielles pour une utilisation optimale du compost comme amendement du sol et source de nutriments pour les plantes (Magdi et al., 2004). Différents paramètres peuvent être utilisés pour déterminer la stabilité et la maturité du compost. Iannotti et al. (1993) ont montré que la stabilité du compost estimée en terme d'activité microbienne (taux de respiration ou libération d'énergie) et la maturité du compost est déterminée par l'odeur, la germination des plantes tests ou la composition chimique.

□ Test respirométrique, AT4

Il repose sur la mesure de l'activité respiratoire des micro-organismes présents dans le compost dans des conditions spécifiques d'incubation (humidité, température). Un compost non mûr a une demande en O₂ et un taux de production de CO₂ importants, dus à une intense activité microbienne provoquée par la biodégradabilité du substrat (Bernal, 1998). De nombreuses méthodes respirométriques existent des plus rudimentaires (Nicolardot, 1982) aux plus sophistiquées et mécanisées. La méthode S.O.U.R (Specific Oxygen Uptake Rate) est souvent citée et correspond à une mesure par sonde des variations de concentration en O₂, dans une solution aqueuse de compost. Le S.O.U.R correspond au taux maximum d'O₂ consommé, exprimé en mg O₂/gVS/h. L'avantage de cette méthode réside dans l'utilisation de matériel courant de laboratoire. Une méthode similaire est employée mais sur produit sec (D.S.O.U.R pour Dry Specific Oxygen Uptake Rate) (Lasaridi et Stentiford, 1998). D'autres tests existent dans des conditions opératoires différentes, c'est pourquoi, donner des chiffres de référence sans en attribuer la méthode, n'est pas significatif. Les mesures directes de l'activité des micro-organismes, sont les plus fiables selon certains auteurs (Rynk, 2003). Pourtant, aucun de ces tests n'est retenu comme référence en matière d'indicateur de maturité du compost.

□ Tests d'auto-échauffement, TAE

Une des conséquences de l'intense activité des microorganismes est la production de chaleur lors de la dégradation de la MO. Le degré de décomposition de celle-ci peut donc être évalué par son aptitude à remonter en température (auto-échauffement). Ce test d'auto-échauffement, développé en Europe, est recommandé par l'organisme de normalisation allemande (Bundes Gütegemeinschaft Kompost BGK) (F.C.Q.A.O, 1994) puis aux Etats-Unis (05.08 D Respirometry U.S.D.A, 2002). Le compost est placé dans des conditions spécifiques de température, d'humidité et en enceinte thermostatée à $20 \pm 1^\circ\text{C}$ à l'intérieur d'un vase Dewar. La température est suivie pendant 10 jours. L'indice de maturité est fonction de la plus haute température atteinte lors du test. Ce dernier est qualifié de :

- **mûr** pour un degré de maturation de V (température $< 30^\circ\text{C}$) ou un degré de IV (température $< 40^\circ\text{C}$),
- **compost frais** pour un degré de maturation degré III (température $< 50^\circ\text{C}$) ou de degré II (température $< 60^\circ\text{C}$).

□ Tests colorimétriques

Cette méthode colorimétrique repose sur le virage d'indicateurs colorés mesurant simultanément la volatilisation de NH_3 et le dégagement de CO_2 à partir d'un échantillon de compost placé dans une enceinte hermétique, dans des conditions spécifiques d'humidité. Ce test nommé Solvita® est développé par le Woods Research® Management, USA (W.E.R.L). Les résultats sont disponibles en 4 heures par comparaison avec une échelle de valeur colorimétrique de maturité. L'échelle allant de 1 pour les composts frais à 8 pour les composts mûrs. Ce test est officiellement recommandé aux Etats- Unis (05.08 E Respirometry U.S.D.A, 2002), au Danemark, en Norvège et en Suède. De récentes études indiquent que la lecture des résultats est fonction de l'appréciation colorimétrique des manipulateurs. Ce test reste sensible à l'ajustement en eau, mais ne nécessite *à priori* pas de durée de mise en équilibre avant utilisation comme le préconise le mode d'emploi (Francou, 2003).

En conclusion, d'autres méthodes d'évaluation de l'activité des micro-organismes sont envisageables comme les mesures des activités enzymatiques. Certaines méthodes appliquées au sol ont été transférées sur le compost comme la mesure de la phosphatase alcaline, l'invertase (ou saccharase), les catalases ou l'A.T.P (Adénosine TriPhosphate) (Godden, 1986). Cette dernière traduit l'activité de la biomasse; son suivi permet d'apprécier le stade et l'évolution de la dégradation au cours du compostage. Sa teneur est forte au cours de la phase mésophile, de l'ordre de $10 \mu\text{g A.T.P/g MS}$, puis elle baisse jusqu'à $0,1 \mu\text{g A.T.P/g MS}$ pendant la phase thermophile et celle de maturation. Mais l'application de ces méthodes est

problématique sur site. Le test d'auto-échauffement, comparé au test colorimétrique, permet d'atteindre une sensibilité plus grande, dans la différenciation des classes des composts mûrs et stabilisés.

Ces tests sont de plus en plus souvent comparés et corrélés avec les tests de laboratoire (pH, teneur en eau, en carbone, en azote total, et ammoniacal...) (Brewer et Sullivan, 2003; C.C.Q.C, 2001; Changa *et al.*; 2003; Copper, 2004; Francou, 2003; Wang *et al.*, 2004). Ces méthodes de terrain sont retenues par les exploitants pour leur facilité d'interprétation, leur simplicité de mise en œuvre. Elles donnent une indication relativement précise et fiable de l'état de maturité du compost. Une grande variété de méthodes analytiques existe, fournissant une multitude d'indicateurs. Chaque auteur développe une technique d'évaluation de la maturité et avec elle ses indicateurs. Il devient alors très difficile de choisir une référence parmi tous ces indicateurs. Bien souvent plusieurs paramètres sont nécessaires à la détermination de la maturité du compost. Le tableau 13 récapitule les différents critères de stabilité et de maturité d'un compost.

Au regards des différences entre les critères dues aux origines des matières initiales à composter, des méthodes de compostage utilisées et des conditions d'obtention du compost, ces différents paramètres ne sont pas souvent cohérents et ainsi Wang *et al.*, (2004a) suggèrent que nul critère n'est adéquat isolément et recommandent une combinaison entre les différentes techniques.

Tableau 13 : Récapitulatif des différents critères de stabilité et de maturité d'un compost
(Aboulam, 2005 ; Charnay, 2005)

Critères	Paramètres
Critères physiques	odeur, couleur, aspect (terreau homogène), absence de reste végétal ou autres débris non bien décomposés), température
Critères chimiques	rapport C/N, capacité d'échange cationique CEC, NO_3^- , NO_2^- , rapport $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$, pH, analyse des substances facilement biodégradables (sucres, acides aminés, phénols etc) et des fibres.
Critères microbiologiques et Enzymatiques	activité de phosphatase alcaline, indicateurs des microorganismes : phospholipides, mesure de biomasse, métabolisme latent évalué par le taux respiratoire, la capacité d'auto-échauffement, Solivita® et les tests respirométriques
Test de germination	évaluation de la phytotoxicité résiduelle (taux germination des graines, longueur des racines) sur Cresson «Lepidium sativum L. » et Ray grass «Lolium perenne L. » ou d'autres plantes tests.
Critères spectroscopiques et Analytiques	des composts ou de leurs substances humiques (acides humiques et fulviques): Analyse Élémentaire, Spectroscopies Infrarouges FTIR et Résonances Magnétiques Nucléaires RMN, Chromatographie sur gel de Séphadex, Thermochemolyse / Chromatographie Phase Gazeuse /Spectroscopie de Masse, Rayons X, Spectrométrie UV, defluorescence, etc.

III.3.2.10. Teneur en métaux

L'évaluation de la maturité du compost est essentielle pour son application dans les sols et la détermination de sa qualité. Une distinction est réalisée dans certains pays entre les différentes qualités de composts : mature, frais ou mulch, comme indiqué dans le Tableau 14. Différents critères permettent de définir les classes de composts : la maturité et la stabilité, mais également les teneurs en métaux lourds, en inertes... Ces classements ne sont utilisés que dans les P.I, où la réglementation et les critères de qualité sont stricts.

La plupart des P.E.D ne possèdent pas de réglementation en matière de qualité de compost. Parmi les critères de qualité, la teneur en métaux lourds est toujours préconisée dans la réglementation. Une grande diversité est observée dans les tolérances de chaque pays : les teneurs en chrome total sont multipliées par dix entre les Pays-Bas et l'Australie, de même pour celles du zinc entre les Pays- Bas et l'Autriche. Les teneurs admissibles en cadmium et en mercure restent faibles, inférieures à 3 mg/kg quel que soit le pays.

Tableau 14 : Nombres de classes de compost dans plusieurs pays (Hogg et al., 2002)

Pays	Nombre de classe	Description des classes
Allemagne	2	selon la teneur en métaux lourds
Australie	4	produit composté & produit pasteurisé, eux-mêmes subdivisés en mulch fin et mulch
Autriche	3	Classe A+, A & B
Canada	3	AA, A, B (selon MO% & teneurs en inertes)
France	2	Classe A & B
Luxembourg	2	frais & Mature
Pays bas	2	très bon et bon compost (selon la teneur en métaux lourds)

Les sources principales de métaux lourds dans les composts urbains sont souvent communs aux déchets urbains : piles (Hg, Zn, Pb, Cd), peintures (Cr, Cd, Pb), plastiques (Cd, Ni, Zn), papiers et cartons (Pb), composants électroniques (Pb, Cd), céramiques, cosmétiques (Meoun et Le Clerc, 1999; Miquel, 2001). Les teneurs en métaux lourds dans les composts de certains pays ont été données dans le tableau 17 au paragraphe III.8.

III.4. Amendements et effets sur les caractéristiques globales des sols

Les études concernant l'apport de matière organique « naturelle » comme les composts, les boues de stations d'épuration ou les fumiers, sur des sols cultivés sont nombreuses. Divers types d'apports ont été étudiés. Les plus courants sont les déchets municipaux solides, les boues de stations d'épuration, les engrais fermiers et les composts de déchets verts. Certains

auteurs rapportent aussi l'utilisation de pailles de résidus agricoles (Sebastia *et al.*, 2007) ou encore de solution d'acides humiques (Albiach *et al.*, 2001).

Les doses apportées ou les durées d'expérimentation sont variables, que ce soit en essais aux champs ou en incubations. En général, les auteurs comparent différents amendements en quantités agronomiques (20 à 30 t/ha) (Albiach *et al.*, 2001; Brunetti *et al.*, 2007; Celik *et al.*, 2004; Pascual *et al.*, 1999), ou différentes quantités d'un même amendement. Dans ce cas la dose minimale est en quantités agronomiques et la maximale peut être 2 à 10 fois plus importante (Brunetti *et al.*, 2007). Les durées d'expérimentation vont de 1 à 10 ans pour les essais aux champs et peuvent s'étaler sur une année dans le cas d'incubations. Ainsi Albiach *et al.* (2001) ont comparé l'effet de déchets municipaux solides compostés (24 t/ha/an), de boues de stations d'épuration (24 t/ha/an), d'engrais fermiers (24 t/ha/an), de solution d'acides humiques (100 L/ha/an) et de vermicompost (24 t/ha/an). Les trois premiers amendements permettent une augmentation significative du taux de matière organique, de la quantité de substances humiques, et de la proportion de sucres, après 5 ans aux champs. L'effet sur le taux de matière organique est beaucoup plus limité pour les deux autres. Brunetti *et al.* (2007) ont observé une évolution similaire pour un compost de déchets municipaux solides et des boues de stations d'épuration, mais une diminution avec un engrais fermier. De plus, l'apport de matière organique résiduaire permet l'augmentation de la proportion de lipides (Debosz *et al.*, 2002) et de carbone organique soluble (Pascual *et al.*, 1999). Cependant ces apports de matière organique entraînent une forte minéralisation du carbone dans les 15 premiers jours après amendement (Cambardella *et al.*, 2003).

Selon le degré de maturité et la quantité apportée d'un compost, son épandage n'aura pas le même impact sur le sol : un compost frais constituera un apport de matière organique directement utilisable par les microorganismes et assimilable par le sol, tandis qu'un compost mature constituera un meilleur engrais pour un sol cultivé et aura un effet stabilisant pour la structure du sol (Pascual *et al.*, 1999). Pare *et al.* (1999) ont observé le même effet avec de faibles doses de fumier et un effet inverse à forte dose.

III.5. Modes de compostage des déchets urbains

Des études récentes (Tinôco *et al.*, 2009) ont montré que la solution la plus sûre de traitement des ordures ménagères dans la plupart des PED reste le tri - compostage avec valorisation des matériaux recyclables. Ce mode de traitement selon ces auteurs a des avantages économiques et environnementaux. Le problème se pose souvent dans le choix du mode adapté aux contextes locaux.

III.5.1. Compostage centralisé

Il 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/J. C'est le cas du centre de tri-compostage d'Alexandrie (Egypte) avec une capacité de traitement de 400 tonnes par jour (cf. photo 1 et photo 2). Les déchets traités peuvent être la fraction putrescible (compostage de la fraction fermentescible des ordures ménagères, FFOM) ou peuvent être bruts (tri-compostage).

Pour le compostage de la FFOM, une collecte sélective organisée semble être la solution la plus efficace (FCM, 2005). Des conteneurs ou des sacs supplémentaires sont donc nécessaire pour ces déchets compostables ; ce qui est donc un facteur limitant. Faire payer pour ces conteneurs est généralement considéré comme ayant un effet dissuasif sur les foyers qui participent au système de compostage (Commission européenne DG ENV., 2002). Si une zone met en œuvre une filière de compostage de la collecte de la FFOM simultanément à une réduction de la fréquence des autres collectes de déchets, il est important de garantir que les collectes de déchets biodégradables soient assez fréquentes pour prévenir l'accumulation de 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 à émettre des odeurs et des nuisances environnementales avant la collecte si celles-ci ne sont pas assez fréquentes. Ces problèmes liés à la collecte sélective amène le plus souvent au tri-compostage de déchets bruts dans les PED.

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 équipements de tri les plus utilisés sont :

- les cribles (tri dimensionnel),
- le tapis sélectionneur simple ou double (tri par rebond et adhérence),
- la table densimétrique (tri densimétrique),
- l'overband (tri magnétique).

Ce qui permettra de séparer ces éléments indésirables du reste de la matière en compostage. La combinaison de ces équipements a donné naissance aux procédés de tri-compostage.

Les difficultés rencontrées par les entreprises dans le compostage centralisé ont entraîné la fermeture de la majorité des centres de traitements



Photo 1 : Tas en fermentation à Alexandrie Photo 2: Constitution des andains d'Alexandrie

III.5.2. Compostage décentralisé

C'est le compostage réalisé par les ménages, les ONG ou les associations de quartiers. Il est réalisé le plus souvent dans des centres de petite taille 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 et dans la réduction des quantités de déchets transportés et mis en décharge et la diminution de l'impact des centres de transit (Drescher et al, 2006; Müller, 2006; Kubrom et al, 2004 ;). Il est cependant rare que ces petites installations de compostage soient intégrées au système municipal de traitement des déchets.

Le compostage décentralisé peut donc soulager le maillon le plus faible de la chaîne d'évacuation des déchets, c'est-à-dire les transports et surtout réduirait le taux de sable par rapport au compostage centralisé. L'utilisation et l'entretien des engins de collecte posent souvent des difficultés tant techniques que financières. Dans les PED le compostage décentralisé pourrait libérer des capacités de transport qui pourraient éventuellement être mises à profit pour assurer le raccordement au service de ramassage de quartiers non encore desservis. Le problème devient encore plus crucial lorsqu'une décharge atteint sa capacité maximale de stockage et qu'une nouvelle doit être aménagée à une distance encore plus grande de la ville. Au lieu d'engager de nouveaux moyens dans le parc de véhicules et dans l'extension des décharges, il serait plus judicieux d'investir dans le compostage décentralisé.

III.6. Procédés de compostage

La description, ci-dessous, des méthodes de fabrication du compost, est celle de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Il existe cinq étapes dans le procédé de compostage : une première phase correspond à la réception des matières

premières. Cette phase est suivie d'un tri manuel ou d'un tri mécanique granulométrique ou densimétrique pour certains déchets comme les biodéchets ou les ordures ménagères. Le tri permet de valoriser les matières (papiers, carton, plastiques, verres, métaux...) et énergie (bois,...) et / ou d'éliminer les éléments indésirables (piles, pots 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. A cette phase de fermentation, succède une phase de maturation qui peut être précédée ou suivi d'un affinage permettant d'atteindre la granulométrie souhaitée en fonction de l'utilisation prévue du compost.

Les pays développés ont introduit dans la chaîne des outils plus adaptés afin de faciliter le travail comme par exemple les bioréacteurs. Dans ces pays, les déchets entassés dans une fosse d'une capacité connue sont déplacés par un opérateur à l'aide d'un immense grappin. Le bioréacteur constitue le cœur du système. Les résidus séjournent pendant trois jours à l'intérieur du cylindre dans lequel les résidus sont homogénéisés. La fermentation des matières putrescibles (organiques, compostables) est accélérée. Grâce à la décomposition de la matière, la température à l'intérieur du bioréacteur atteint 65°C, assurant ainsi la destruction des bactéries pathogènes. À la sortie du bioréacteur, les résidus sont séparés au moyen de tamis et de convoyeurs. Ainsi, les matières recyclables ainsi que les déchets ultimes sont séparées de la matière putrescible dont la décomposition est déjà bien amorcée. La matière en fin de fermentation séjourne ensuite sur une aire de maturation. Une injection d'air par le plancher ainsi qu'un retourneur d'andain assurent une bonne aération du tas en maturation. Une pression est maintenue dans tous les bâtiments de l'usine, de manière à minimiser les nuisances olfactives. Tout l'air de l'usine est traité dans un bio filtre avant d'être rejeté dans l'atmosphère (Poliquin, 2007).

III.6.1. Compostage en andains

III.6.1.1. Andains retournés

Le compostage en andains consiste à placer un mélange de matières premières dans de longs tas étroits appelés andains remués ou tournés de façon régulière. Ces andains sont aérés essentiellement par un mouvement passif ou naturel de l'air (convection et diffusion gazeuse). Le taux d'échange avec l'air dépend de la porosité de l'andain. Ainsi, la taille de l'andain qui peut être effectivement aéré de cette manière est déterminée par sa porosité.

L'**andain en couches** correspond à une superposition de couches de déchets (photo 3). En raison des divers véhicules de livraison, le matériau est souvent compressé.

L'**andain triangulaire** présente une hauteur allant jusqu'à 2 m et une largeur de 2,5 à 3

m. Une « couche extérieure » d'épaisseur 0,3 m soit environ 40 % du volume total, limite l'activité biologique dans cette zone, limitant la montée en température. Cependant, la nature des déchets dans les P.E.D exige un taux d'oxygénation élevé, favorisé par cette technique. L'échange gazeux entre la partie centrale de l'andain et l'extérieur, est supérieur à celui rencontré dans les andains trapézoïdaux. Afin de mieux aérer les tas, on peut utiliser des bambous pour former ce triangle (Zurbrugg et al., 2005) comme le montre la photo 4.



Photo 3 : Andain en couche

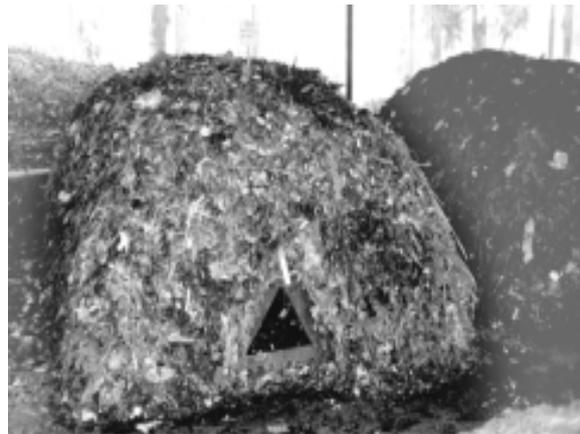


Photo 4 : Tas triangulaire en fermentation

La hauteur des **andains trapézoïdaux** est fonction du matériau de base et des conditions atmosphériques. Il est possible de constituer des andains d'une hauteur de 3 m pour 7 à 8 m de base et une pente de 70 %. Dans ces conditions, le besoin en surface par mètre cube de matériaux est réduit d'un quart par rapport à la demande de la technique en andains triangulaires (Grossmann, 2003).

Un andain composé de feuilles peut être bien plus grand qu'un andain humide contenant du fumier. Quand l'andain est trop grand, des zones anaérobies peuvent alors apparaître à proximité du centre et des odeurs sont libérées quand l'andain est retourné. Par contre, les petits andains perdent rapidement de la chaleur et risquent de ne pas réussir à atteindre une température suffisamment élevée pour permettre l'évaporation de l'eau et l'élimination des pathogènes et des graines d'adventices. Pour les compostages à petites et moyennes échelles, le retournement peut être effectué à l'aide d'un chargeur frontal ou d'une pelle portée par un tracteur ou un tractopelle.

Le chargeur soulève les matériaux de l'andain et les déverse à nouveau, mélangeant ainsi les matières et dépose le mélange sous forme d'un andain plus aéré. Le chargeur peut mélanger les matières se trouvant à la base de l'andain avec celles du haut, formant ainsi un nouvel andain à proximité de l'ancien. Il est très important de suivre un programme de retournement. La fréquence de retournement est fonction du taux de décomposition, du taux

d'humidité et de la porosité des matériaux, ainsi que de la durée désirée de compostage. Comme le taux de décomposition est plus important au début du processus, la fréquence de retournement diminue au fur et à mesure que les andains fermentent et atteignent la maturation.

III.6.1.2. Andains aérés passivement

Avec la méthode des andains aérés passivement, l'air est fourni par des tuyaux perforés, enfoncés dans l'andain, qui élimine la nécessité du retournement. Les extrémités des tuyaux sont ouvertes et l'air circule ainsi dans les tuyaux et à travers l'andain en raison de l'effet de tirage créé par les gaz chauds qui s'élèvent hors de l'andain. Comme les matières premières ne sont pas retournées quand les andains sont achevés, celles-ci doivent être parfaitement mélangées préalablement à leur mise en andain. Il est crucial d'éviter le compactage des matières lors de la préparation des andains.

La méthode du tas statique aéré peut être améliorée par l'injection d'air forcée par l'usage d'un ventilateur. Le ventilateur offre un contrôle direct du processus et permet de travailler avec des tas plus importants, sans retournement après le début du compostage. L'air est aspiré ou soufflé à travers le tas. Le tas n'étant pas retourné par la suite, la sélection et le mélange initial des matières premières sont cruciaux afin d'éviter une mauvaise répartition de l'air et un compostage irrégulier. Le mélange a également besoin d'une bonne structure afin de conserver sa porosité tout au long de la période de compostage. Pour le compostage statique en tas, l'air peut être fourni de deux façons: un système d'aspiration avec l'air aspiré à travers le tas ou un système de soufflage avec un ventilateur injectant de l'air dans le tas.

III.6.2. Compostage en récipients clos

Le compostage en récipient fait référence à un ensemble de méthodes qui confinent les matières à composter dans un bâtiment, un container ou un récipient. Ces méthodes sont basées sur l'aération forcée et des techniques de retournement mécanique qui visent à accélérer le processus de compostage. De nombreuses méthodes combinent les techniques des andains et des tas aérés dans le but de surmonter les faiblesses et exploiter les avantages de chaque méthode (Rytz, 2001).

Le compostage en casier est peut-être la méthode de compostage en récipient la plus simple. Les matières sont contenues par des murs avec le plus souvent un toit. Les bâtiments ou les silos permettent de stocker des quantités plus importantes de matériaux et d'utiliser l'espace au sol de manière plus efficace que ne le font les tas indépendants. Les casiers permettent aussi d'éliminer les problèmes climatiques, de maîtriser les odeurs et d'offrir un

meilleur contrôle de la température.

Les méthodes de compostage en casier fonctionnent de la même façon que la méthode du tas statique aéré. Elles comprennent des procédés d'aération forcée à la base du casier et un petit nombre, voire aucun retournement des matériaux. Un mélange occasionnel des matières dans les casiers peut faire redémarrer le processus. Les matières à composter peuvent être déplacées d'un casier à l'autre. La plupart des principes et des conseils suggérés pour le tas aéré s'appliquent également au compostage en casier.

III.6.3. Lits rectangulaires remués ou Tunnels Siloda®

Le système de lit remué est une combinaison des méthodes d'aération contrôlée et de retournement périodique. Le compostage a lieu entre des murs qui forment de longs et étroits couloirs appelés lits. Un rail ou une saignée en haut de chaque mur supporte et guide la machine retournant le compost. Un chargeur place les matières premières à l'extrémité frontale du lit. Au fur et à mesure que la machine avance sur les rails, le compost est retourné et reposé à l'arrière. Suivant leur nature, les déchets subissent un prétraitement physique de broyage ou dilacération, avant d'être déposés dans un couloir de fermentation ou silo de 30 m de large, de longueur adaptée au procédé et sous un hangar. Le passage d'une roue pelleuse à axe horizontal placée sur des murets de séparation, brevet Siloda®, permet un retournement automatique des déchets tous les deux jours. Cette roue permet le déchiquetage des déchets et leur déversement sur une double vis sans fin. Cette dernière envoie le produit dans le silo voisin permettant simultanément son oxygénation et son homogénéisation. Un système de ventilation, similaire à celui de l'aération forcée, peut-être ajouté. Un contrôle permanent des paramètres de fonctionnement comme humidité, oxygénation, température est assuré et les émissions gazeuses sont captées puis traitées par des unités de désodorisation (www.vincienvironnement.fr).

III.6.4. Tubes rotatifs

- Procédé « Biologic Reactor Stabilisation » (BRS®)

Sur la paroi interne, des fers profilés à intervalles réguliers facilitent la circulation verticale des déchets dans le but d'augmenter leur hauteur de chute, de mieux les aérer et les homogénéiser. La partie aval du tube est constituée d'un crible en tôle. La longueur du cylindre conditionne la durée de séjour des déchets en général de 3 jours pour une longueur de 24 m. La vitesse de rotation varie entre 0,5 et 1 tr/min (www.vincienvironnement.fr). Parfois, ce temps de séjour est réduit à un jour quand l'usine est saturée. A Bangkok (Thaïlande) trois systèmes de tubes rotatifs sont placés successivement, correspondant à une durée de 8 à 12

heures de fermentation accélérée (Sogreah consultants, 2001). La qualité du compost est fortement pénalisée par la quantité élevée de matières putrescibles non dégradées, et par la forte présence de matières plastiques et de verres. Ce procédé est souvent rencontré en France et en Europe (Furedy, 2000), mais rarement dans les P.E.D. Les photos 5 et 6 présentent les tubes rotatifs de l'usine de Lantic en France qui est gérée par le Syndicat Mixte Intercommunal de Traitement des Ordures ménagères.



Photo 5: Usine de Lantic en France



Photo 6 : Tube rotatif à Lantic

- Procédé Dano®

Ce procédé traite des déchets urbains seuls mais aussi associés à des boues de station d'épuration (Stahlschmidt, 1984). Le réacteur, rempli à moitié de déchets, tourne à une vitesse comprise entre 0,1 et 1 tr/min. Les déchets se déplacent de manière hélicoïdale vers la sortie simultanément avec la rotation du réacteur. Tout au long de leur cheminement, les déchets sont homogénéisés et subissent, par abrasion, une réduction de la granulométrie. Le cylindre se termine par une section de criblage. Le temps de séjour dans le réacteur dépend du rythme d'alimentation, entre 1 et 5 jours. Cette étape est suivie d'un criblage puis d'une maturation. Le contrôle des principaux paramètres comme l'humidité, l'apport de nutriments ou l'aération, est informatisé. Ce procédé est l'un des plus populaires dans la gestion des déchets urbains: il en existe une centaine en Europe (Charnay, 2005). Ce procédé est aussi rencontré dans d'autres pays à part l'Europe: trois usines pilotes en Egypte (Stahlschmidt 1984), 4 usines au Brésil (Fardeau, 2000), en Chine (Wei et al., 2000) et en Turquie (Erdirin, 1999). Malgré sa notoriété ce procédé rencontre des problèmes notamment au niveau du dégagement d'odeurs nauséabondes (tableau 15). Le tableau 15 présente les avantages et les inconvénients de tous ces procédés.

Tableau 15 : Récapitulatif des procédés de fermentation employés dans les P.E.D

(Charnay, 2005)

	Andain	Réacteur vertical	Réacteur horizontal	Tube rotatif
Avantages	-En extérieur ou intérieur -Composts de nature diverse -Facilité d'exploitation -Faible coût d'investissement	-Espace réduit -Confinement des odeurs -Contrôle des paramètres	-Espace réduit -Confinement des odeurs -Contrôle des Paramètres	-Aucun prétraitement (sauf verres et plastiques) -Forte diminution des nuisances -Espace réduit -Contrôle des Paramètres
Inconvénients	-Manutention importante -Qualité irrégulière	-Consommation forte d'énergie -Investissement lourd -odeurs	-Consommation forte d'énergie -Investissement lourd -Respect du temps de séjour	-Consommation forte d'énergie -Investissement lourd -Respect des temps de séjour

III.6.5. Vermicompostage

Le lombricompostage encore appelé le vermicompostage consiste à placer dans une compostière (un récipient) de vers de fumier (*Eisenia foetida*) (Mustin, 1987) qui se nourrissent des déchets qu'on leur apporte. Leurs déjections s'accumulent et constituent le « Lombricompost » (photo 7) de la consistance d'un terreau et sans odeur. Le terme vermicompostage (ou lombricompostage) se réfère à l'utilisation de vers pour composter les résidus organiques. Les vers peuvent consommer pratiquement tous les types de matière organique et peuvent absorber l'équivalent de leur propre poids par jour. Ce ver est un ver rouge (*Eisenia foetida*) qui se distingue des autres par ses entrailles jaunes et un liquide jaune visqueux s'épanche si on le coupe en deux. Il vit dans un milieu dont la température, l'humidité et le pH sont compris respectivement entre 15°C et 25°C, 75 et 85%, 6,5 et 8 ; il n'aime ni la lumière ni le bruit. A l'exception des produits animaux, le ver de fumier se nourrit d'une quantité équivalente à plus ou moins son poids par jour de matières fraîches en décomposition (Mustin, 1987).

La compostière est constituée de plusieurs compartiments (photo 8) pour permettre la migration des vers et faciliter ainsi la récolte du compost. L'aération de la litière est assurée par les galeries creusées par les vers. Le couvercle doit être suffisamment bien fermé pour éviter l'intrusion des mouches. Pour pallier à un excès d'humidité, on perce des trous dans le fond pour permettre l'évacuation de lixiviat. Les déchets doivent toujours être enfouis sous une dizaine de centimètres de litière ce qui garantit une bonne décomposition et l'absence d'odeur. Le lombricompost est riche en éléments nutritifs pour les végétaux et en oligo-éléments. Le lombricompostage est donc une technique de production de biomasse à partir de

la matière organique des déchets et de dépollution. Le lombricompost est un amendement idéal à ajouter au terreau des semis.

Les turriculés (excréments) des vers sont riches en nitrates, et en formes disponibles de P, K, Ca et Mg. Le passage à travers ces vers de terre favorise la croissance des bactéries et notamment des actinomycètes dont la teneur dans les déjections de vers de terre est six fois supérieure à celle du sol d'origine (FAO, 2005). Ici les matières organiques ne sont pas décomposées par les microorganismes, mais par dégradation enzymatique via le système digestif des vers de terre. Ce sont les déjections des vers qui sont utilisées. L'inconvénient est que le lombricomposteur est un mini-écosystème fragile; il convient de le surveiller scrupuleusement et d'éviter certaines erreurs qui pourraient tuer les vers ou apporter des insectes nuisibles. Aussi le tas de compost doit être de taille limitée afin de maintenir les conditions aérobies et de limiter l'augmentation de la température. Une régulation de la température est donc nécessaire pour favoriser la croissance des vers.



Photo 7 : Lombricompost en maturation
(www.verslaterre.fr)



Photo 8: Lombricompost en fermentation
(www.verslaterre.fr)

III.7. Echec des usines de compostage dans les PED et les pays émergents

Au cours des années 1960-1985, plus d'une centaine d'installations de compostage ont été construites dans de nombreux pays dont beaucoup de PED: Inde, Chine, Indonésie, Brésil, Colombie, Côte d'Ivoire, etc., et en particulier dans quasiment tous les pays de la Méditerranée. Cependant, la plupart de ces installations sont actuellement arrêtées et rares sont celles encore en activité ou seulement en activité réduite (Gillet, 1985). Depuis les années 70, cinq unités de compostage ont été construites au Maroc. Il s'agit de grandes unités industrielles qui ont été conçues, mises en place et financées grâce à des organismes étrangers de développement. Mis à part l'installation de Rabat-Salé, qui a été arrêtée en 2000, aucune unité de traitement n'a fonctionné plus de 6 ans (METAP-PRGDS-Maroc, 2004). Toutes ces

unités, celle de Rabat comprise, ont connu de sérieux problèmes techniques et financiers (DGCL-DEA, 1991), en particulier :

- le colmatage des équipements et des pannes fréquentes,
- le sous-dimensionnement des fosses de réception et des surfaces nécessaires à la fermentation,
- un compost de mauvaise qualité (présence de contaminants),
- des difficultés de commercialisation du compost,
- d'importantes nuisances environnementales (mauvaises odeurs).
- les fortes teneurs en sables, spécifiques aux P.E.D altèrent les équipements par abrasion.

La teneur dépend bien souvent des conditions climatiques et de l'état des voies de circulation. Comme cités précédemment, les déchets ont une forte teneur en eau, ne permettant pas de séparer les sables par voie mécanique. De plus, après fermentation, les matières organiques ont la même granulométrie que les sables (Charnay, 2005), et il est très difficile de les trier. Ces installations de compostage implantées dans les PED reposent généralement sur des technologies importées « clés en main » sophistiquées et très coûteuses, d'où l'échec constaté. Le cas particulier de l'offre de l'usine de Sousse (ville du Centre à 140km-Sud de Tunis), négociée entre 1998 et 2000, est basée sur un procédé « en tunnel » de capacité 150 tonnes/jour. Elle fait apparaître les éléments suivants qui sont inadaptés, tant du point de vue technologique et économique, que du point de vue de la prise en compte des contraintes de la gestion des déchets (ANPE, 1998), (ANPE, 1999), (ANPE, 2000):

- un investissement très coûteux : 10 millions d'euros,
- une technologie sophistiquée avec contrôle automatisé de la fermentation et une logique de traitement inefficace et inadaptée comportant 2 broyeurs en tête,
- un coût de traitement et de production très élevé : 125 euros/tonne de compost,
- l'absence de la caractérisation des déchets et d'une étude de marché
- l'obligation de mise en place d'un système de collecte sélective,

Dans les PED, les projets de compostage sont implantés sans aucun paramétrage préalable de l'ensemble de ces critères. Hormis la disponibilité du marché (qui doit être vérifiée dans chaque cas par l'étude du marché), ce constat explique la situation d'échec pour des raisons de manque d'adaptation technologique (cf. tableau 16) de « près d'une centaine » d'installations de compostage.

Tableau 16 : Exemples de dysfonctionnements rencontrés dans les P.E.D (Charnay, 2005)

<i>Procédé</i>	<i>Pays et usine</i>	<i>Date de mise en service</i>	<i>Capacité (T/j)</i>	<i>Problèmes rencontrés</i>
Andain	Maroc Marrakech	-1967 -modification du crible (1976) - remise en état (1980-81)	140	Fermeture : 1989 Difficultés de commercialisation Fonctionnement intermittent et en deçà de la capacité nominale
Andain	Maroc Meknès	1980	230	Difficultés de commercialisation Fonctionnement intermittent et en deçà de la capacité nominale
Andain	Maroc Rabat-Salé	-1961 -extension en 1971	50 puis 200 T/j après extension	Difficultés de commercialisation Renouvellement des équipements
Andain	Turquie Izmir	1988	500	Renouvellement des équipements Formation des employés
Andain	Tunisie Tunis	1991	20	Fermeture : 1998 Raisons politiques
Réacteur horizontal	Maroc Casablanca	1974	700	Fermeture : 1975: Production d'odeurs Nauséabondes
Réacteur Vertical	Brésil Brasilia		660	
Réacteur Vertical	Brésil Rio de Janeiro (Caju)		1100	Fermeture : 2 ans après Production d'odeurs nauséabondes
Réacteur Vertical	Brésil Sao Matheus Vila Leopoldina	1970 1974	210 puis 900 T/j 420 puis 600 T/j	
Tube Rotatif	Indonésie Sourabaya		100	Fermeture : 1983 Difficultés de commercialisation: concurrence avec les engrais chimiques et avec le criblé de décharge
Tube Rotatif	Turquie Izmir (2 usines)	1968 & 1969	75 puis 150T/j	Usure des équipements Raisons politiques
Tube Rotatif	Thaïlande Bangkok			Qualité de compost : temps de séjour trop court

III.8. Qualité du compost

III.8.1. Composition du compost

Aujourd'hui, nul ne peut construire une plate forme de compostage sans tenir compte des conditions spécifiques locales du PED. Les conditions climatiques, comme par exemple un climat très sec ralentit la dégradation. La teneur en eau lors du procédé doit être contrôlée et optimale. Dans les PED où l'apport d'eau est abondant et involontaire par pluviométrie, il est préconisé de couvrir les plates-formes de fermentation, ou quelques fois uniquement les andains. Dans ces mêmes pays le problème d'humidité intervient également au niveau de la

composition des ordures ménagères, leur humidité moyenne étant supérieure à 50%. La montée en température ne s'effectuera qu'après l'évacuation, par les pentes autour des andains, de cet excès d'humidité. Cet excès qui est le lixiviat et qui finit par ruisseler totalement après un ou deux jours doit être traité pour éviter leur propagation dans le milieu naturel. Le tableau 17 présente la composition en métaux et en nutriments de quelques composts d'ordures ménagères.

Tableau 17 : Composition de quelques composts en métaux et nutriments

Composition		¹ Bénin	² Guinée	³ Indonésie	⁴ Italie	⁵ Mali	³ Canada	³ Autriche
Métaux (mg/kg MS)	Cd	6,3	1,5	3	3,2	□. LD	2,6	4
	Cr	12,4	140	50	296	-	210	150
	Cu	5,4	75	80	437	10	128	400
	Pb	107	140	150	652	3,4	83	500
	Zn	11	-	300	1228	110	315	1000
	Hg	-	-	1	-	0,026	0,83	4
	Ni	-	-	50	140	6,5	32	100
	As	-	-	10	-	-	13	-
Qualité Agronomique (mg/g MS)	K ₂ O	6,2	10,9	-	-	10,6	-	-
	CaO	54,6	57,5	-	-	90	-	-
	MgO	3,6	7,5	-	-	4,6	-	-
	P ₂ O ₅	45,8	10,5	-	-	0,92	-	-
	C/N	17,6	13,6	-	-	16,8	-	-
	pH	7,8	8,5	-	-	8,5	-	-

LD : limite de détection

1. Soclo, 1999 ; 2. Matejka 2001 ; 3. Hoornweg 1999 ; 4. Pianamonti, 1997 ; 5. Soumaré 2003

III.8.2. Avantages du compost

Le premier intérêt des amendements organiques issus des déchets ménagers est donc une diminution de la part des engrais chimiques lixiviables et leur remplacement par des déchets organiques valorisés. L'utilisation du compost comporte plusieurs avantages parmi lesquels on peut citer :

III.8.2.1. Amélioration de la croissance de végétaux et racines

Il a été démontré que les végétaux se développant dans un milieu de croissance contenant du compost sont plus forts et ont un meilleur rendement. Le compost ajoute non seulement de la matière organique au sol mais aussi des fertilisants (N, P₂O₅, K₂O, CaO), des oligo-éléments tels que le fer, le manganèse, le cuivre, le zinc et le bore, nécessaires à la croissance des végétaux (ADEME, 2008; ADEME, 2001).

III.8.2.2. Amélioration du rythme de diffusion des nutriments

Le compost rend au sol ses nutriments prolongeant ainsi leur présence dans le sol pour nourrir les végétaux pendant une plus longue période (ADEME, 2008; ADEME, 2001).

III.8.2.3. Amélioration de la porosité du sol

L'activité microbienne est essentielle à la porosité du sol. Les micro-organismes décomposent les matières organiques pour rendre les nutriments accessibles aux végétaux. Le compost étant constitué de particules de tailles différentes, il offre une structure poreuse qui améliore la porosité du sol. (ADEME, 2008 ; ADEME, 2001).. L'amélioration de la porosité entraîne également une meilleure aération du sol et ainsi le développement de l'activité biologique.

III.8.2.4. Amélioration de la capacité de rétention d'eau

La matière organique contenue dans le compost peut absorber l'eau et améliorer ainsi la capacité de rétention d'eau du sol. Ce dernier est alors en mesure d'absorber une forte quantité d'eau et de la retenir pour la mettre à la disposition des végétaux entre deux pluies ou deux arrosages. L'eau disponible pour les végétaux grâce à l'utilisation d'un compost correspond au double du volume d'eau pouvant être retenue par un sol minéral. Ainsi en augmentant le taux d'humus du sol de 0,2 %, la quantité d'eau disponible pour la plante croît de 0,5 % et la porosité du sol de 1%.(ADEME, 2008; ADEME, 2001; Zurbrugg et Ahmed, 1999).

III.8.2.5. Elimination des maladies chez les végétaux

Il a été montré que certains composts améliorent la résistance des végétaux vis-à-vis de certaines maladies (Larbi, 2006). L'effet phytosanitaire décrit la faculté fongicide du compost. D'une manière générale le compost contient des substances donnant plus de vigueur aux végétaux et augmentant ainsi leur résistance vis-à-vis de certains pathogènes.

III.8.2.6. Amélioration de la structure

Le compost améliore la structure du sol par l'augmentation des agrégats (pénétration des racines, facilitée et exploitation du sol favorisée), la meilleure perméabilité à l'air et à l'eau, la réduction importante de l'érosion (eau et vent), la diminution de la dessiccation par ventilation (Zurbrugg et Ahmed, 1999) et l'augmentation de l'absorption des rayons solaires (réchauffement).

En effet, parmi les différents éléments minéraux présents dans le sol, les argiles s'associent à la matière organique du sol (l'humus) et aux micro-organismes pour former, sous l'action stabilisatrice du calcium, le complexe argilo-humique. Sa structure en feuillet lui

confère une puissante charge négative permettant à une certaine quantité de cations libres de la solution du sol de s'y fixer (Ca^{2+} , K^+ , H^+ , Na^+ etc.) (Guittonny-Larchevêque, 2004). Le complexe argilo-humique est ainsi un véritable réservoir d'éléments nutritifs pour la culture. Selon ce même auteur, la formation d'agrégats stables rend ainsi le sol plus résistant à l'influence éolienne et hydrique, par conséquent, moins soumis à l'érosion. L'ajout de compost retient l'érosion causée par l'eau ; les nutriments sont alors plus accessibles aux végétaux, ce qui améliore leur qualité dans les régions exposées à l'érosion.

Les amendements de composts favorisent le processus de reforestation en améliorant la nutrition et la croissance des arbres, et surtout des arbustes en augmentant leur potentiel de survie en période de sécheresse (Guittonny-Larchevêque, 2004).

L'azote est l'élément fondamental de la production végétale, le « pivot de la fertilisation ». Sa disponibilité détermine le rendement. Il entre dans la composition de très nombreux éléments essentiels à la vie cellulaire : acides aminés, acides nucléiques, etc. Le cycle de l'azote consiste en la transformation des formes de l'azote assuré par les microorganismes du sol (Francou, 2003). La figure 7 montre le cycle de l'azote lié à un apport de compost dans le sol.

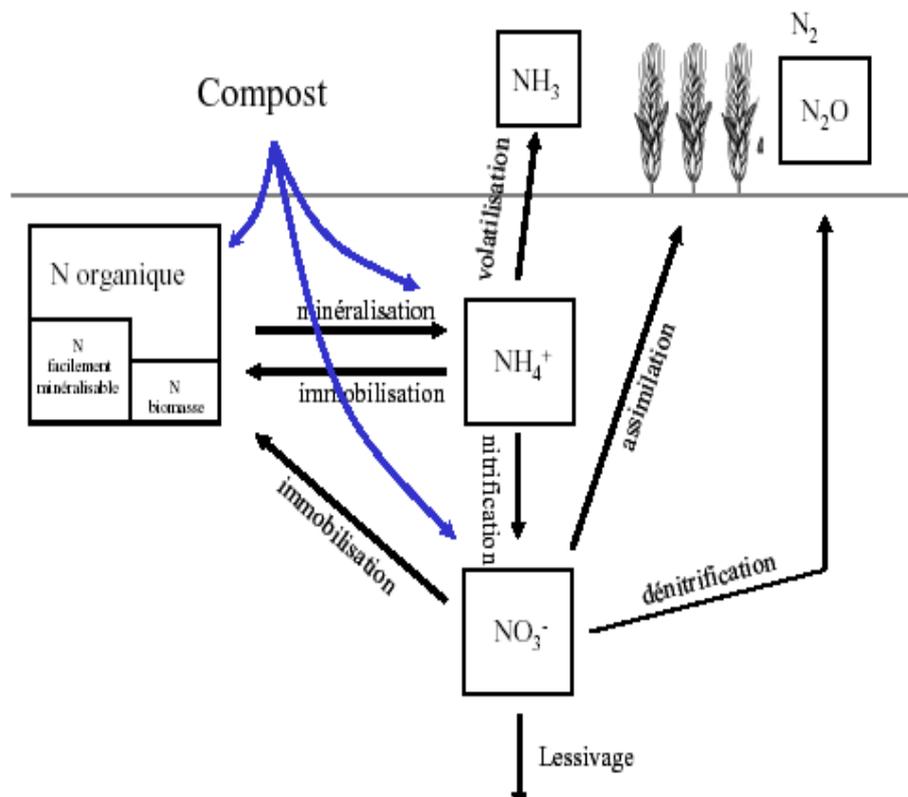


Figure 7 : Schéma du cycle de l'azote lié à un apport de compost (Francou, 2003)

III.8.2.7. Effet sur les caractéristiques physico-chimiques du sol

En se minéralisant, le compost fournit des substances nutritives progressivement assimilables par les plantes. La matière organique du compost améliore les propriétés

physiques du sol, augmente son pouvoir tampon. Le compost contenant la chaux réagit avec l'acide carbonique de la solution du sol et le neutralise. De cette façon le carbonate de calcium insoluble dans l'eau se transforme en bicarbonate soluble qui est un sel amphotère basique (pH \approx 8).

De nombreuses études ont montré le rôle bénéfique du compost sur les qualités physiques et chimiques des sols amendés. Par exemple, une amélioration des propriétés physiques, une augmentation de la conductivité hydrique et une diminution de la densité des sols ont été observées par Wong *et al.* (1999). De même, l'incorporation de compost au sol s'avère efficace pour lutter contre la dégradation de la surface du sol (Bresson *et al.*, 2001). Pagliai *et al.* (2004) ont montré que l'ajout de compost dans un sol améliore sa porosité et sa structure. Les amendements en matière organique stable augmentent le pouvoir tampon et la capacité d'échange des sols, deux paramètres qui conditionnent la nutrition minérale des plantes (Mustin, 1987). Le compost mûr évite une acidification du sol ou corrige l'acidité d'un sol ou permet de réduire l'acidité du sol, et de diminuer ainsi les risques d'exportation des métaux vers la plante (Bolan *et al.*, 2003). Les substances basiques du compost et les substances humiques sont bénéfiques contre l'acidification du sol et le stabilisent chimiquement. Une revitalisation des sols fortement dégradés et un développement de la végétation sont favorisés.

III.8.2.8. Effet sur la dynamique du sol et amélioration des échanges gazeux (Zurbrugg et Ahmed, 1999).

La présence de micro-organismes divers dans le compost augmente l'activité biologique du sol et permet un bon échange gazeux sol-air-eau-plante. L'apport de compost permettra au sol d'être plus poreux favorisant ainsi, les échanges gazeux et le développement de nouvelles racines.

Chapitre IV. Installation pérenne d'une filière de compostage

Pour une durabilité de la filière compostage, il est nécessaire de s'assurer que toutes les étapes techniques, socio-économiques de la filière (cf. tableau 18) fonctionnent normalement. La production des déchets incombe aux ménages, leur qualité, leur quantité doivent être prises en compte dès l'installation de la filière. Ceci doit pouvoir être vérifié par le flux et la composition des déchets. L'approvisionnement du centre de compostage doit être assuré journalièrement par les ONG, les associations à travers les éboueurs. Les indicateurs de suivi restent la satisfaction des ménages, le taux de collecte, le coût de collecte. Le centre doit pouvoir être capable de trier tous les jours, tous les déchets qui leur parviennent et lancer le processus de fermentation. La densité, le temps de séjour des déchets bruts sur le centre, la vente régulière des matériaux recyclables sont les paramètres techniques de suivi. Le compostage informel restera pérenne lorsque la productivité, la qualité du compost, le rendement, le coût, le taux de la MO, le taux d'impureté sont contrôlés régulièrement. Ceci n'est possible que lorsque les aspects socio économiques sont pris en compte. La qualité du compost obtenu doit pouvoir permettre de le valoriser sur le plan agronomique.

Tableau 18 : Aspects techniques et socio-économiques de la filière compostage

ASPECTS TECHNIQUES	OUTILS	R&D	Gestion	Communication	R&D	Gestion	R&D	R&D
	INDICATEURS	* Caractérisation * Flux	Satisfaction des usagers	Réactions des usagers	* Productivité * Qualité du compost	* Rentabilité * Voirie adaptée	* Productivité * Qualité du compost	* Valorisation * Rentabilité
ASPECTS SOCIO-ECONOMIQUES	PARAMETRES	* Composition * T/J	* Taux de collecte * Coût	* Densité * Temps de séjour	* Rendement, coût * %MO, %impuretés	* Flux-T/J * Camions (nbre, type)	* Rendement, coût * %MO, %impuretés	* Productivité * Coût T/ha
	FILIERE COMPOSTAGE	Production					Epandage	
ASPECTS SOCIO-ECONOMIQUES	ACTEURS	Habitants Usagers	Secteur informel	Commune Habitants	Secteur informel	Secteur public ou privé	Secteur public ou privé	Agriculteurs Particuliers
	ORGANISATION	Familles Associations de quartier	ONG, PME Associations	Services techniques	ONG, PME Associations	Services techniques Entreprise	Services techniques Entreprise	Coopératives Associations
	MOYENS	Information, éducation sensibilisation	Coordination Réglementation	Coordination Réglementation	Formation Technicité	Financement Investissement	Financement Investissement	Informations

R & D : Recherche et Développement.

IV.1. Aspect « technologique » du procédé

Les problèmes à l'origine de la fermeture des centres de compostage sont souvent liés à l'importation des technologies ne répondant pas aux conditions locales (climatiques, technologiques et sociétales). Les études bibliographiques montrent que seul le tri-compostage est souvent effectué après collecte et transport vers les usines. Les PED peuvent utiliser le tri manuel à cause de la main d'œuvre bon marché et abondante mais ce tri manuel peut être associé à du tri mécanisé avec l'augmentation du flux d'entrée; il est donc important que cette partie du fonctionnement ne soit pas négligée afin de garantir un compost de qualité dépourvu des produits toxiques comme les piles qui contaminent le compost produit ou les inertes qui accélèrent la détérioration des équipements (Tuladhar et Bania, 1998; Van Beukering *et al.*, 1999). Si les déchets sont très humides et riches en fines des modifications des équipements doivent être envisagées, par exemple pour les déchets verts, l'utilisation d'un broyeur équipé de marteaux spécifiques adaptés à la quantité élevée de fines (Benami, 1987), ou un cribleur positionné plus en amont de la collecte.

Loin d'utiliser les équipements importés ou des systèmes brevetés, les PED à travers les artisans locaux pourraient fabriquer les outils adaptés à la nature de leur déchet afin d'éviter des défaillances dans le procédé comme par exemple en Turquie, où l'usine d'Izmir était dimensionnée pour une capacité nominale de 500 T/j et ne fonctionne qu'à sa moitié quelques années plus tard, à cause d'une usure précoce des équipements (Erdin, 1999). Etant donné que les andains sont soumis aux aléas climatiques car ils sont rarement abrités dans les PED, il est donc nécessaire d'augmenter la durée de mise en fermentation (plusieurs semaines) pour permettre une dégradation optimale de la matière organique et par conséquent une qualité optimale et constante de compost. Shin *et al.* (1997) ont montré que lorsque le temps de fermentation est très court, des composants sous forme de petites particules comme les cartons et papiers se retrouvent dans le produit final non stabilisé. Ces problèmes doivent être anticipés lors de l'étude préliminaire à l'implantation de l'usine.

Dans la plupart des cas d'échec dans les P.E.D, les usines ont été surdimensionnées et fonctionnent en dessous de leur capacité nominale ou par intermittence (Pereira-Neto *et al.*, 2001). *A contrario*, certaines usines ont été sous-dimensionnées et ne peuvent pas être agrandies par manque de place (Gamage *et al.*, 1999). Les problèmes de sous ou surdimensionnement des plateformes industrielles peuvent être actuellement évités par des montages de petites plateformes à proximités des centres de transit. L'étape essentielle de caractérisation des déchets engendrés dans la ville (flux et composition) ne doit pas être négligée. L'étude de marché (recyclables et compost) devrait se faire aussi régulièrement afin

d'évaluer le marché du compost et produire en conséquence pour ne pas être confronté au stockage surtout si l'espace est limité sur la plateforme.

La fourniture d'installations « clé en main » qui a existé au début de l'implantation de cette filière explique la fermeture de la plupart des centres à cause de la maintenance trop complexe (Asomani-Boateng *et al.*, 1996) avec des coûts de réparation très élevés. La disponibilité des pièces de rechange étant difficile sur place, les exploitants font appel aux opérateurs étrangers. Les délais de réparation sont alors longs, ce qui contraint l'usine à fonctionner avec une chaîne non complète ou à arrêter la production. Les réparations les plus rapides sont évidemment celles de proximité. On peut encore citer l'exemple d'un procédé en réacteur horizontal à Casablanca en 1976, n'ayant fonctionné que quelques mois à cause d'un dégagement d'odeurs nauséabondes dues à l'inadaptation du procédé aux caractéristiques des déchets urbains, trop humides, sans doute dégradés en anaérobiose (Benami, 1987).

Bien souvent il n'existe aucune étude préliminaire sur le choix du site, sa construction ni la technique de compostage appropriée. On observe aussi une irrégularité du suivi et du contrôle du processus de dégradation. Il est donc important d'élaborer un calendrier de suivi et de contrôle pour assurer le bon déroulement du processus (Mbulugwe *et al.*, 2002). Par exemple, Tuladhar et Bania, (1998) ont montré que le manque d'aération fait passer le système en phase d'anaérobiose; les conditions ne sont plus optimales, la durée du traitement augmente et un dégagement d'odeurs nauséabondes apparaît avec prolifération des animaux indésirables comme les mouches ou les rats (Perla, 1997) qui peuvent ensuite transmettre des germes pathogènes. Le produit obtenu, non hygiénique, comporte des risques pour les cultures et par évolution de la chaîne tropique pour l'Homme. L'humidité lors de la fermentation est essentielle à suivre (Gnanih *et al.*, 1998). Si l'humidité est trop forte, elle empêche les échanges gazeux, induisant une fermentation anaérobie; si elle est insuffisante, la fermentation ralentit par inhibition des microorganismes responsables du processus. La plupart des PED n'ont pas un système de récupération de lixiviats qui sont directement rejetés dans la nature sans aucun traitement préalable (Tuladhar et Bania, 1998). Il est donc important dans ces pays où la pluviométrie est très élevée, de couvrir le site par des hangars, afin de réduire le lessivage des composts et de construire l'usine sur une dalle bétonnée qui permet de récupérer les lixiviats. Toutefois si une étude sur les lixiviats montrait une teneur faible en éléments polluants, ils peuvent être utilisés à nouveau pour arroser les tas. La vente du compost dépend de sa qualité et des spécificités demandées par les utilisateurs. Pour que les exploitants assurent une bonne qualité à son produit, il est important qu'ils planifient un suivi analytique et assurent une certification de la qualité de leur produit dans le temps, quelles que soient les saisons et les variations des flux de déchets entrants. Dans beaucoup de

composts produits dans les PED où on note un apport insuffisant en matière organique et nutriments (Wei *et al.*, 2000), présence de métaux lourds, de particules de plastiques et de verre ou de sable en quantités non négligeables (Hoornweg et Thomas, 1999). Les contrôles doivent aussi tenir compte du débouché du produit fini. Par exemple dans le maraîchage ou le jardinage le compost doit être dépourvu des verres et des morceaux de métal, ce qui nécessiterait un tamisage plus fin.

Contrairement aux PED où la réglementation est inexistante ou non appliquée (Bertolino et Lardinois, 1998; Gamage *et al.*, 1999), dans les pays industrialisés des textes sévères au niveau de la production et de l'utilisation assurent un compost de qualité. Si jusqu'à maintenant les agriculteurs et les jardiniers continuent de se procurer des amendements minéraux et que les centres de compostage ferment, c'est parce qu'il reste encore beaucoup à faire de la fabrication jusqu'à l'utilisation du produit. Les agriculteurs ne vont donc pas risquer si rien ne les rassure d'utiliser un amendement tel le compost qui apportera un minimum d'éléments nutritifs à leurs terrains cultivables.

IV.2. Aspect marché du compost

Comme tout produit commercial, le compost est soumis au marché de l'offre et de la demande mais surtout à celui de la concurrence du fumier et des amendements inorganiques qui n'ont pas une image négative (Perla, 1997; Wahyono et Sahwan, 2000 ;). Les usines de compostage étant importées « clé en mains », elles sont par conséquent mal adaptées au marché local (Yoon-Seok *et al.*, 1999). Zurbrugg (2003 b) a montré que les usines doivent produire des composts de qualité dans des proportions adaptées au marché avant d'être compétitifs. Des études sont nécessaires avant l'implantation de l'usine qui permettront de connaître les débouchés comme le marché traditionnel (cultures, maraîchage, sylviculture) où la quantité prime sur la qualité, le marché de rente (pépiniéristes, paysagistes) où la qualité prime (Bionet, 2002; Zurbrugg *et al.*, 2004). Les parcelles de démonstration et d'expérimentation doivent être disponibles; ce qui permettra d'effectuer des essais dans des conditions rigoureuses par des agronomes. Ces essais d'amendement apporteront un appui pour convaincre l'utilisateur du potentiel et de l'intérêt de cet amendement en terme de rendement de production à l'hectare. Ils jouent un rôle fondamental pour la communication sur le compost, compte tenu de l'habitude d'utilisation des fertilisants chimiques (Matejka *et al.*, 2001, Rivero *et al.*, 2004). Les PED sont confrontés à un problème majeur qu'est le débouché du produit fini à cause d'une forte tradition de compostage individuel en milieu rural (Wei *et al.*, 2000). Une politique commerciale pour promouvoir et vendre le compost ainsi que les études préliminaires s'avèrent nécessaires (Hoornweg et Thomas , 1999) étant

donné que les sols des P.E.D ont besoin d'éléments nutritifs pouvant être apportés par le compost sous forme minérale.

Le compost d'ordures ménagères possède plusieurs avantages reconnus et sont incitatifs pour différents secteurs économiques, maraîchage, sylviculture, horticulture, pépinière, grandes cultures, mais aussi celui des particuliers et celui réservé à des usages particuliers (culture en serre, agriculture biologiques). Yoon-Seok et al., (1999) a montré que le compost doit être vendu en sac afin de faciliter son utilisation et son transport et doit être conditionné sous forme de granulats (John *et al.*, 1996). Afin d'éviter la transformation de l'usine en décharge incontrôlée ou sauvage comme à Blida (Algérie) (Grosman, 2002), il faut éviter la mévente, par conséquent son accumulation puis la saturation de l'usine. Pour cela, il faut tenir compte de la qualité, de la composition et de l'aspect physique de ce produit.

IV.3. Aspect politique

Dans la plupart des PED la politique locale de gestion des déchets par les autorités ne se limite qu'à la collecte et à la mise en décharge. Bien que des études sur la composition des déchets soient effectuées (Furedy, 2000; Gonzalez del Carpio, 1998) dans certains pays aucune politique tournant vers le traitement respectant les normes environnementales n'a fait l'objet d'une décision alors que la réussite de la rentabilité des usines de compostage est fortement connectée à l'implication des autorités locales dans le projet dans un souci de réduction de la production des déchets à la source (Shin *et al.*, 1997).

Aujourd'hui, dans tous ces pays s'est développée une récupération des matériaux en majorité par les femmes et les enfants sans aucune organisation ni un suivi de la part des autorités. Les gouvernements doivent alors définir une politique de gestion globale des déchets rigoureuse et cohérente avec recyclage de matériaux triés et valorisation de la MO. Les autorités locales doivent mettre en place une politique de communication et de sensibilisation auprès de la population comme des utilisateurs de compost, afin de promouvoir et de garantir ce produit et éviter une mauvaise gestion des déchets. Aujourd'hui, dans la plupart de ces pays, les autorités subventionnent les fertilisants chimiques. Il est primordial dans ces pays que ces autorités consacrent une attention particulière à la production du compost d'ordures ménagères, qui diminue le gisement à traiter dans les décharges et fassent ressortir les avantages de ce produit par rapport aux fertilisants chimiques.

Les ONG de collecte et les responsables locaux doivent recevoir un appui des autorités pour lancer des campagnes de promotion auprès des écoles (Yoon-Seok et al., 1999), des associations de quartiers (Shin *et al.*, 1997) et notamment celles des femmes qui sont souvent plus sensibilisées aux problèmes d'environnement et aux risques sanitaires. Les autorités

locales doivent définir le contenu et le contour d'une politique environnementale globale dans laquelle le monde entier est engagé afin de réduire le biogaz produit par les décharges (Domingo et al., 2009) pour régler les conflits d'intérêt national ou au niveau des exploitants (Arinola et Arinola, 1995) qui pourraient se produire.

IV.4. Aspect financier et économique

Comme pour tout projet de développement, un plan d'affaire « business plan » doit être établi et qui doit inclure le coût de procédé, les frais engendrés par l'étude de faisabilité, l'investissement initial sur les équipements et sur les bâtiments, le coût d'achat, de transport des matières premières et du compost, les matières entrantes (eau, énergie), les frais administratifs, le coût de production du compost,...

Comme le montre le tableau 19 qui présente les coûts de traitement des déchets par incinération et par compostage dans les pays développés, les PED et les pays pauvres, le compostage est toujours avantageux.

Tableau 19 : Coût du compostage par rapport à l'incinération (Cointreau, 2006)

	Pays pauvres	PED	Pays développés
Compostage	5-20 \$/t	10-40 \$/t	20-60 \$/t
Incinération	40-60 \$/t	30-80 \$/t	70-130 \$/t

Les PED en fonction de leur marché local n'utilisent que des moyens moins coûteux (Tuladhar et Bania, 1998) de la pré collecte jusqu'à l'obtention du produit stabilisé. Ceci se traduit sur le site par des arrivages irréguliers provoquant une amorce de la fermentation des déchets avant leur traitement. Ceci pourrait être évité en construisant les centres de compostage à proximité des centres de transit, étant donné que les ménages abonnés n'accepteront pas que leurs déchets stagnent une semaine dans leurs ménages sans être collectés. Folléa *et al.*, (2001) ont montré dans 9 capitales que le mode de collecte P.A.P est le plus répandu, ce qui permet d'alimenter les centres de transit tous les jours et par conséquent les sites de compostage. Les exploitants doivent tenir compte du coût de transport du compost. Ils peuvent l'effectuer gratuitement (Nunan, 2000) dans le but d'améliorer leur compétitivité en réduisant les dépenses de production et jouer sur le prix de la vente des matériaux recyclables triés et du compost pour équilibrer le bilan financier de la plate forme (Zurbrugg *et al.*, 2004).

Le tableau 19 montre que le coût de traitement par compostage varie par rapport aux catégories de pays, ce qui devrait agir sur le prix de vente du compost. Ce prix de vente peut

aussi varier au sein d'une même catégorie de pays et au sein d'un pays à cause de certaines subventions et aides financières des pouvoirs publics ou des ONG internationales que pourraient recevoir certains exploitants.

Si les revenus de la vente du compost et des matériaux recyclés ne couvrent pas le coût de production, de conditionnement et de transport alors le site ne sera pas rentable (Dulac, 2001). Pour éviter ce problème, une étude minutieuse pour connaître le marché disponible, les autres fertilisants utilisés afin de ne pas être amené à réduire le prix du compost quelle que soit sa qualité.

Conclusion

« Une mine d'or dort dans les ordures ». Les données sur le gisement de leurs déchets montrent qu'une grande part de déchets valorisables, est réutilisable et recyclable, mais aussi compostable. Plusieurs études sur la caractérisation physique des déchets tels que celle développée dans ce travail présentent une plage de données même au sein d'un même pays. Il est donc important de réactualiser périodiquement ces données. Bien qu'il y ait des variations dans la composition des déchets dans les PED, on note que les putrescibles représentent une part importante. Même si dans certains de ces pays, le taux de sable est supérieur à celui des putrescibles, le compostage reste toujours une voie à explorer surtout si l'on retient que le sable n'est pas un élément toxique.

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

L'installation d'une plateforme de compostage nécessite un choix minutieux du procédé en tenant compte du marché disponible et des autorités locales. Une évaluation périodique de la plate forme est nécessaire afin de relever les insuffisances dans le seul but d'apporter des solutions rapides pour que ces insuffisances ne deviennent pas des problèmes qui pourraient conduire à la fermeture du centre. Cette évaluation devra porter à cet effet sur la quantité de déchets entrants, sur leur composition et leur teneur en matière organique, sur les impuretés et autres analyses nécessaires (teneurs en fertilisants, métaux lourds,...) pour le bon démarrage du processus.

DEUXIEME PARTIE
METHODES ET MATERIELS ANALYTIQUES

Préambule : Présentation du Togo et de la ville de Lomé

Historique

Le Togo est l'une des premières régions des pays de la côte des esclaves où se pratiquèrent le commerce triangulaire. En 1884, l'explorateur allemand G. Nachtigal signa un traité de protectorat avec le chef du lac Togo, et l'année suivante, au congrès de Berlin, la côte togolaise fut attribuée à l'Allemagne. Les Allemands fondèrent le port de Lomé et mirent en place une économie de plantations. En 1914, après le début de la première guerre mondiale, une opération franco-britannique força les Allemands, retranchés à Atakpamé, à capituler. La France et la Grande Bretagne procédèrent au partage définitif du pays. Lomé et toute la région côtière, devinrent le Togo Français, tandis que la partie occidentale fut administrée par la Grande Bretagne. En 1958 suite à un référendum organisé par l'ONU, le Togo français devint autonome en tant que république au sein de la communauté française et obtint son indépendance en 1960.

La ville de Lomé fût créée par la bourgeoisie commerçante peu avant l'arrivée des colonisateurs. Elle fût fondée en tant que comptoir commercial de marchands africains, lors de la restructuration du commerce transatlantique qui vit les échanges de matières premières et de produits manufacturés européens remplacer progressivement la traite des noirs. Elle revêt un caractère spécifique dans la mesure où il ne s'agit ni d'une ville coloniale créée de toute pièce comme la plupart des capitales africaines, ni d'une ville traditionnelle née d'un noyau villageois lentement mûri.

Situation géographique

Le Togo est l'un des plus petits états de l'Afrique occidentale avec une superficie de 56 600 km². Situé sur le méridien de Greenwich entre 6° et 11° de latitude Nord, il s'étend entre 0 et 1,6° de latitude Est. Il est limité au Nord par le Burkina Faso, à l'Ouest par le Ghana, à l'Est par le Bénin et au Sud par le golfe de Bénin. Le pays est subdivisé en six régions administratives : les Savanes, la Kara, la Centrale, les Plateaux, la Maritime et Lomé commune qui est le siège de la capitale.

Lomé se situe à l'extrême Sud - Ouest du Togo sur la côte du golfe du Bénin exactement à 06°07' latitude Nord, 01°11' longitude Est et a une altitude de 5 mètres au dessus du niveau moyen de la mer. Cette ville est délimitée au Nord Est par la basse vallée du

Zio, à l'Ouest par la frontière entre le Togo et le Ghana, et au Sud par l'Océan Atlantique donc elle ne se développe que par l'Est et le Nord. Les deux zones principales de la ville sont séparées par la lagune : au Nord de la lagune se situe le plateau de Tokoin et au Sud se trouve une zone plate située entre la lagune et la mer. Cette dernière fût pendant longtemps la zone la plus habitée de la ville.

Climat

Le pays jouit d'un climat subéquatorial peu pluvieux du fait de l'orientation parallèle des vents pluvieux à la côte. On distingue quatre saisons au Togo :

- une grande saison pluvieuse qui dure du mois de mars au mois de juillet avec un paroxysme en juin ;
- une petite saison sèche en août avec une baisse de température ;
- une petite saison pluvieuse en septembre et octobre ;
- une grande saison sèche qui s'étend du mois de novembre au mois de février.

Lomé est caractérisé par un climat subéquatorial de type guinéen constamment chaud sans être excessif, la température étant comprise entre 25 et 29°C. Sa proximité à la mer a engendré une humidité élevée souvent comprise entre 80 et 90 %. La ville de Lomé est sujette à un microclimat; en effet, elle constitue la station la moins arrosée de la région maritime avec environ 1000 mm de pluie par an, ce qui reste une pluviométrie clémente. La ville est balayée par deux vents: la mousson et l'harmattan. La mousson est un vent tropical chaud et humide qui vient du Sud – Ouest et souffle en août. L'harmattan est un vent continental sec et froid qui vient du Nord – Est très poussiéreux et balaie la ville en décembre.

Situation démographique

En 1981, la population togolaise s'élevait à 2 720 000 habitants. Une estimation réalisée en 2003 donnait une population de 4 700 000 personnes sur la base d'un taux de croissance de la population de 3,1 % par an. Inégalement répartie sur l'ensemble du territoire, cette population est essentiellement rurale puisque il y a seulement 30 % de population urbaine dont la moitié se situe à Lomé. En 2008, 60 % de la population du pays vivaient en dessous du seuil de pauvreté (moins de l'équivalent de 2 euros par habitant et par jour) sur une population estimée à plus de cinq millions d'habitants. Ceci s'accompagne d'un taux d'analphabètes, égale à 25 % en 2009. La population de la commune de Lomé estimée en 2008 est de 999 594 habitants (Mairie de Lomé, 2008) et est répartie en 35 quartiers

seront couverts lors du ramassage des ordures ménagères dans le nouveau projet que la mairie vient d'élaborer.

Situation socio-économique

La croissance économique du Togo est inférieure à la croissance de la population. Il en résulte une baisse du niveau de vie de la population en termes de produit intérieur brut (PIB) et du produit national brut par habitant par rapport à la majorité des pays de l'Afrique subsaharienne (cf. tableau 20). Mais il ne tient pas compte de toute l'activité économique informelle qui, représentée surtout par le commerce et l'artisanat, est la principale source de revenus de la majorité de la population.

Aujourd'hui, la superficie de la ville de Lomé est évaluée à 330 km² alors que la population est estimée à plus d'un million d'habitants.

Tableau 20 : PIB et PNB de quelques pays de l'Afrique Sub-saharienne (Atlas économique mondial, 2007 ; www.studentsoftheworld.info)

Afrique Sub Saharienne	PIB		PNB	
	Pays	\$	\$/hab	\$
Benin	2,7 milliards	386	4,3 milliards	514
Burkina faso	2,84 milliards	218	5,2 milliards	396
Cameroun	9,0 milliards	563	16,5 milliards	1009
Côte d'Ivoire	11,7 milliards	709	15,3 milliards	883
Ghana	6,06 milliards	303	10,0 milliards	452
Nigeria	42,7 milliards	336	74,2 milliards	564
Tchad	1,94 milliards	216	3,9 milliards	396
Togo	1,38 milliards	265	2,2 milliards	352

Chapitre I Gestion des déchets de la ville de Lomé

I.1. Historique de la gestion des déchets à Lomé

Il y a 20 ans, Lomé avait pour réputation d'être une ville plaisante et qui était un pôle d'attraction pour le tourisme international. Les touristes étaient séduits par la beauté et le pittoresque de la cité, par la chaleur accueillante, par les saveurs de la gastronomie mais également par la propriété de la ville. A cette époque, la gestion des déchets dans la capitale était confiée à une entreprise privée, la SOTOEMA (Société Togolaise d'Enlèvement des Ordures Ménagères et d'Assainissement) qui a commencé ces activités en 1974. La salubrité de la ville était assurée par l'efficacité de cette entreprise, et par de nombreuses journées d'actions communautaires organisées sur l'incitation du Ministre de l'intérieur et par la Mairie. Lors de ces journées, la population était invitée à participer au nettoyage des rues, pendant qu'au même moment, la SOTOEMA nettoyait les décharges intermédiaires et les dépotoirs sauvages. Rares sont les quartiers où la collecte était en partie mécanisée et effectuée en porte à porte avec des camions bennes et dans les quartiers difficiles d'accès où les camions bennes ne pouvaient accéder, la collecte était assurée par apport volontaire des déchets dans des conteneurs qui étaient changés régulièrement.

Alors que la gestion des déchets fonctionnait plus ou moins correctement, la crise socio politico économique des années 1990 vint désorganiser le système. La diminution des ressources financières de la mairie l'a conduite à devoir à cette entreprise environ 1.650.000.000 FCFA (soit environ 2.500.000€). Ne pouvant plus payer ni le personnel, ni les fournisseurs, ni même la réparation du matériel, la SOTOEMA fût contrainte d'arrêter toutes ses activités. Il s'en est suivi une période de transition, pendant laquelle les déchets n'étaient plus collectés et les habitants devaient gérer eux-mêmes leurs déchets au pied des habitations, au bord des rues et des lieux de travail de la population.

Pour pallier ce problème, les habitants se sont organisés et ont créé des associations de pré-collecte dans différents quartiers. Dans le but d'améliorer leur efficacité, ces associations se sont regroupées et ont mis en place la FAPOMA (la Fédération d'Associations de Pré-collecte d'Ordures Ménagères et d'Assainissement) qui sert d'intermédiaire entre la mairie et les agents de pré-collecte. De plus, elle a répertorié les dépotoirs que les associations avaient mis en place de façon anarchique ce qui a permis à la mairie d'organiser leur résorption par différentes entreprises spécialisées.

I.2. Organisation de la gestion des déchets à Lomé

Le système actuel de collecte des déchets dans la ville de Lomé s'est mis en place très

récemment. Il comporte trois phases principales que sont la pré-collecte (ou primaire) réalisée par les associations de quartiers, la post-collecte (ou secondaire) organisée par les entreprises sous le contrôle de la mairie à partir des centres de transit (cf. photo 9), et la mise en décharge finale à Agoenyivé (cf. Photo 10) qui est gérée par l'entreprise ICON sarl.



Photo 9 : Centre de transit d'Agbalépédogan



Photo 10: Grand dépotoir d'Agoenyivé

Mais ce système, actuellement en place, montre de nombreux problèmes.

I.2.1. Pré-collecte

La pré-collecte des déchets constitue la première phase dans la gestion des déchets à Lomé. En effet, lors de la pré-collecte, les déchets sont pris en charge depuis leur origine, c'est-à-dire les ménages, jusqu'à leur dépôt dans les centres de transit où les entreprises de collecte prennent le relais.

I.2.1.1. Pré-collecte par apport volontaire

Dans le cas de la pré-collecte par apport volontaire, il s'agit de l'acheminement des déchets par la population elle-même, à l'aide de sacs en plastique, des seaux de peinture de récupération, d'une brouette ou autre contenant vers un centre de transit situé à une distance maximale de 250 m des habitations car cette distance est souvent parcourue par les enfants et les femmes. Ce type de pré-collecte est mis en place lorsque certaines conditions sont réunies, telles que :

- la disponibilité de superficie pour l'implantation d'un dépotoir intermédiaire,
- une voie permettant l'accès des camions au dépotoir intermédiaire,
- un centre de transit situé au maximum à 250 m des habitations concernées par cet espace,
- une densité de population suffisante pour permettre le remplissage d'un conteneur en moins de 3 jours.

On note clairement que ce mode de gestion n'est pas très utilisé.

I.2.1.2. Pré-collecte en porte à porte

La pré-collecte, organisée par les associations de quartier, consiste à ramasser les déchets chez les particuliers en porte à porte. Ces associations de pré-collecte, déclarées ou non, sont plus d'une centaine ce qui permet de par leur nombre de couvrir la totalité des quartiers de la ville.

Cette activité est effectuée le plus souvent par des jeunes gens qui n'avaient pas d'emploi auparavant; on note qu'il s'agit de jeunes personnes car le travail est très difficile. En effet, les conditions d'hygiène sont déplorables alors que les charges à transporter sont importantes et parfois sur des distances longues compte tenu du mode de traction. Le transport des déchets se fait principalement à l'aide de charrettes à traction humaine, même si l'on remarque la présence dans les grands quartiers de charrettes motorisées (mini tracteurs) (cf. photo 12) ou d'utilitaires modifiés pour le transport des déchets, mais cela reste anecdotique. Ces charrettes permettent le transport des ordures des habitations jusqu'aux différents dépotoirs où les déchets sont stockés. Les charrettes à traction humaine peuvent être en bois ou en métal comme la photo 11 et souvent elles desservent les dépotoirs non reconnus par la municipalité dans des rayons de 2 km au maximum. Les mini-tracteurs appartiennent aux ONG reconnues par la municipalité et qui travaillent dans des quartiers identifiés. Ils desservent les dépotoirs situés à des distances qui peuvent atteindre 4 km. Le volume des charrettes à traction humaine est variable (0,5 à 1 m³) alors que le mini tracteur a un volume fixe, soit 4 m³ avec une charge d'environ 2 tonnes.



Photo 11 : Charrette de pré collecte à 2 roues



Photo 12 : Charrette à 2 roues et mini tracteur à 4 roues

Aujourd'hui de nouvelles formes de pré-collecte et de collecte viennent d'être mises au point par la mairie et sa Direction des Services Techniques (DST), qui tendent à remplacer les charrettes par des mini-tracteurs. Chaque zone est attribuée à une association de pré-collecte

et les dépotoirs de transit sont identifiés par la DST. La ville de Lomé compte actuellement 69 quartiers sur l'ensemble de son territoire dont 35 seulement sont couverts par cette nouvelle réforme. Beaucoup d'effort reste donc à accomplir dans ce domaine de pré-collecte. La figure 8 présente le zonage de la pré-collecte, les différents centres de transit et la décharge finale positionnés sur la carte de la ville de Lomé.

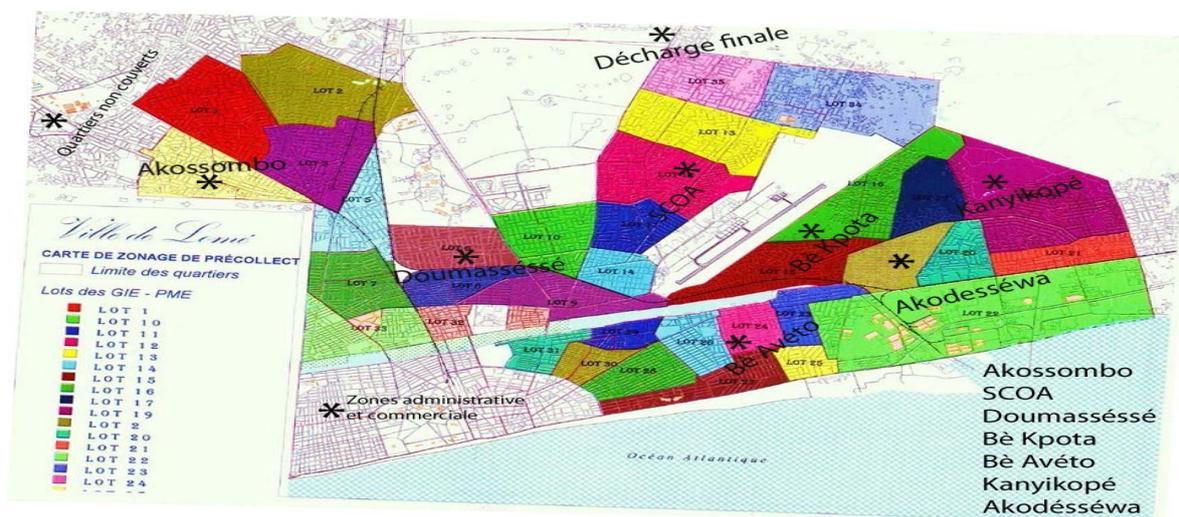


Figure 8 : Carte de zonage de pré collecte et localisation des centres de transit

I.2.1.3. Centres de transit

La nouvelle réforme de collecte des déchets ne reconnaît que sept centres de transit sur lesquels les déchets au moins des 35 quartiers devraient transiter. Malheureusement le nombre de ces centres de transit (cf. figure 8) est très insuffisant; ils sont mal gérés et souvent saturés (cf. photo 13), ce qui en partie a entraîné la création de plusieurs dépotoirs sauvages même dans des lieux inattendus (cf. Photo 14). Les déchets surtout les parts putrescibles finissent par se décomposer presque totalement avant leurs ramassages vers la décharge finale. On note alors une saturation de ces centres comme celui de Bè Avéto.



Photo 13 : Centre de transit de Bè Avéto



Photo 14 : Dépotoir sauvage à l'Université

I.2.2. Recyclage informel

A Lomé comme dans la plupart des grandes agglomérations des PED, la récupération et le recyclage des déchets font partie des activités informelles souvent effectuées, par des pauvres ou des groupes sociaux marginalisés, soit pour compléter le revenu, soit comme leur activité principale journalière. Jusqu'à 2 % de la population dans les villes asiatiques et latino-américaines dépendent du recyclage des déchets pour gagner leur vie (Medina, 2000), et certainement autant en Afrique. C'est une réponse adaptative pour les populations désavantagées ou des groupes sociaux discrets comme les *zabbalîn* en Egypte (Debout, 2010), ou les *cartoneros* au Costa Rica et en Argentine (Berthier, 2003). Selon le lieu et la méthode de récupération, on distingue quatre principales catégories de récupération informelle des déchets :

-à la source : les collecteurs vont de porte à porte pour acheter ces matières (bouteilles, ferrailles, cartons, boîtes,...) qu'ils rassemblent dans un magasin (cf. photo 15) ou les livrent à un grossiste. Ceci est très répandu en Afrique, en Asie ou en Amérique du Sud.

-dans les déchets des rues: les matières premières secondaires sont retrouvées dans les déchets jetés sur les rues ou dans les casiers communautaires aux abords des rues.

-pendant la collecte (pré-ou post-): les matières premières secondaires sont retrouvées et collectées par les agents de recouvrement (cf. photo 16) ou par les conducteurs des véhicules qui transportent les déchets solides municipaux vers les décharges finales.

-sur les centres de transit et sur la décharge finale: cette récupération est pratiquée par des communautés vivant dans les cabanes construites sur ou près de la décharges (cf. photos 17, 18, 19). Cela peut se vérifier dans tous les PED (Bernache, 2003).



Photo 15: Ferrailles regroupés dans un magasin.



Photo 16: Sacs de récupération attachés à la charrette.



Photo 17 : Matériaux récupérés sur un centre de transit



Photo 18 : Chiffonniers sur un centre de transit

Ces matériaux secondaires récupérés par les ménages, les éboueurs, les chiffonniers, etc. depuis l'amont jusqu'à l'aval sont vendus à des entreprises locales, surtout la ferraille, qui trouvent un marché Chinois pour son développement économique (Li, 2002).

A Lomé (Kolédzi et al., 2009), les ordures ménagères qui atteignent la décharge d'Agoenyivé, sont dépourvues de la ferraille, des boîtes de conserves, des bidons plastiques, des bouteilles et même de certains restes alimentaires. Les premières personnes concernées sont les agents de collecte. Ils enlèvent directement des déchets, tout objet pouvant les servir ou pouvant faire l'objet d'une vente. Ensuite certains (hommes ou femmes) agissent sur les décharges dans le même but. Ils sont souvent appelés les « archéologues » pour signifier combien de fois ils fouillent les ordures ménagères sur les décharges. A Dar Es Salam (Tanzanie), celles ou ceux qui vivent ou tirent leur nourriture sur les dépotoirs sont par moment encouragés ou soutenues financièrement (Yhedego, 1995). En général ils ne sont jamais considérés comme les principaux acteurs de la gestion ni par le gouvernement ni par les associations ou ONG et travaillent le plus souvent dans des conditions déplorables (UNCHS, 1992).

I.2.3. Post-collecte ou collecte secondaire

La collecte secondaire est assurée par les entreprises qui ont signé un contrat avec la DST. Elles sont payées par mois sur le tonnage collecté. Ces entreprises sont souvent confrontées aux difficultés de déplacement des engins surtout en saison humide entraînant un ralentissement ou des arrêts d'activités pendant un long moment. Ceci reste l'une des causes du débordement des déchets dans les centres de transit entraînant des nuisances pour les populations environnantes.

I.2.4. Mise en décharge

La décharge d'Agoenyivé est la seule décharge finale de la commune de Lomé. C'est

une ancienne carrière située sur la nationale N°1 à la fin du quartier d'Agoenyivé. Cette carrière est presque remplie. Cette décharge est entourée par les habitations. Les chiffonniers (cf. photos 19 et 20) y passent toute leur journée à la recherche des matériaux recyclables.

La quantité de déchets attendue sur la décharge tous les jours est environ 800 tonnes. Mais ce chiffre reste difficile à confirmer car le pont bascule qui était mis en place en mars 2009 tombe en panne à tout moment et a finalement été abandonné. Pour cela des conteneurs de volume connu ont été déposés sur la décharge afin que les camions passent verser d'abord les déchets avant qu'on ne les verse dans la carrière. Malheureusement à cause du taux d'humidité surtout en saison pluvieuse ces conteneurs n'ont pas résisté et sont finalement aussi abandonnés.



Photo 19 : Une tente sur la décharge finale Photo 20 : Les chiffonniers sur la décharge finale

Conclusion

Malgré l'existence d'un service incomplet de collecte, ne desservant qu'une partie de la population et ignorant le plus souvent les quartiers populaires à faibles revenus, ce service entraîne presque toujours de lourdes charges budgétaires, difficilement supportables par les collectivités locales.

L'introduction systématique d'équipements à la mécanique complexe, telle que les bennes compactrices (ou tasseuses) doit amener à poser la question de leur efficacité et de leur adaptation aux contraintes locales. Ces bennes dont le rôle est de réduire le volume des déchets, ne peuvent être utiles que dans les régions où les déchets sont composés majoritairement de matériaux de faibles densités comme les papiers et les plastiques.

Dans les PED, les déchets sont caractérisés par une faible teneur en produits compressibles (emballages en particulier, ne dépassant généralement pas les 15-20 %) et une très grande part de matières putrescibles avec des humidités très élevées. La densité de ces déchets est par conséquent très élevée (0,5 à 0,7), ce qui ne nécessite pas leur compactage ou tout du moins se traduira par une efficacité marginale du tassement par la benne.

Dans les bennes tasseuses, la compaction ne réduit donc pas de façon significative le volume des ordures, mais par contre provoque un problème ignoré ou non résolu d'égouttage des déchets fortement humides. En absence de bacs de récupération, des écoulements d'eaux polluées et nauséabondes se répandent alors sur le trajet des bennes.

Par ailleurs, la mécanisation complexe des bennes tasseuses exige un entretien régulier et coûteux, ce qui est difficilement maîtrisé par les communes. Le recyclage informel trouve une évolution spectaculaire ces derniers temps et influence les résultats d'une caractérisation physique (Tinoco et al., 2009).

Chapitre II: Méthode expérimentale pour la valorisation par compostage des déchets urbains à Lomé

Le choix de la filière de traitement des déchets dans les PED a toujours été un problème majeur. L'expérience a montré que l'importation de technologies occidentales « clé en main », sans aucune maîtrise des bases de conception et de fonctionnement des systèmes de traitement et sans démarche préalable d'adaptation et de choix comparatif des filières a toujours été un échec. Ce constat doit être corroboré par le fait que les expertises précises des raisons de ces échecs sont inexistantes ou très parcellaires. La plupart de ces bases ne peuvent être obtenues que grâce à des données, mesures et analyses parfaitement fiables, effectuées dans des laboratoires spécialisés dans le domaine des déchets et selon une démarche expérimentale de caractérisation des systèmes de traitement.

Cependant, si dans les pays du nord les bases et outils méthodologiques et d'analyses spécifiques aux déchets existent, on ne peut que constater leur absence ou leur état embryonnaire dans les PED. Leur défaillance étant aisément explicable par l'absence de projets de nature Recherche-Développement, qui sera l'aboutissement de ce travail, pour lesquels peu de compétences et peu de financements sont disponibles. Dans cette optique de révision de la gestion des déchets notamment organiques, le compostage répond parfaitement à ces nouvelles obligations. Il permet de remettre en circulation la matière organique bloquée, à un moment donné dans la matière vivante, dans le cycle de la matière. La mise en œuvre de ce processus permet d'éviter le blocage de la matière organique dans une décharge.

Le compostage à ce niveau est une écotecnologie puisqu'il permet le retour de la matière organique dans le sol et donc sa réinsertion dans les grands cycles écologiques vitaux de notre planète. Il limite ainsi la fuite de matières premières, par les décharges, et répond pleinement au principe du développement durable sans limiter le potentiel des générations futures. Pour cela une connaissance précise des paramètres de fonctionnement de ce système de traitement est donc une condition objective, préalable à une maîtrise du choix de traitement des déchets adaptés aux PED. Pour la connaissance de ces paramètres, il est indispensable de disposer de données réelles de caractérisation des déchets; ce qui ne peut être acquis sans une méthode rigoureuse, opérationnelle et adaptée aux contraintes locales. Par ailleurs, les résultats d'une caractérisation à l'échelle d'une agglomération doivent avoir des finalités bien établies qui permettent d'apporter, non seulement les données de la caractérisation des gisements, mais aussi de déterminer tous les éléments nécessaires aux paramétrages techniques du compostage.

Ce projet s'inscrit dans le contexte de cette analyse et répond aux quatre objectifs

fondamentaux suivants :

- disposer les données de la caractérisation physique et chimique des déchets ménagers à Lomé, avec la nécessité d'utiliser des méthodes rigoureuses et adaptées aux spécificités de la ville de Lomé;
- mettre au point une méthode d'élaboration du compost dans le contexte socio-économique et climatique de Lomé;
- disposer des données sur les analyses physico chimiques et les tests agronomiques sur les différents composts élaborés afin d'apporter des éléments basiques de paramétrage de cette filière;
- mettre au point un schéma directeur pour la mise en place des plateformes pérennes de la filière compostage.

II.1. Mise en place du protocole expérimental

Dans un souci de cohérence pour avoir des résultats qui reflètent la réalité dans le temps un schéma est mis en place (cf. figure 9).

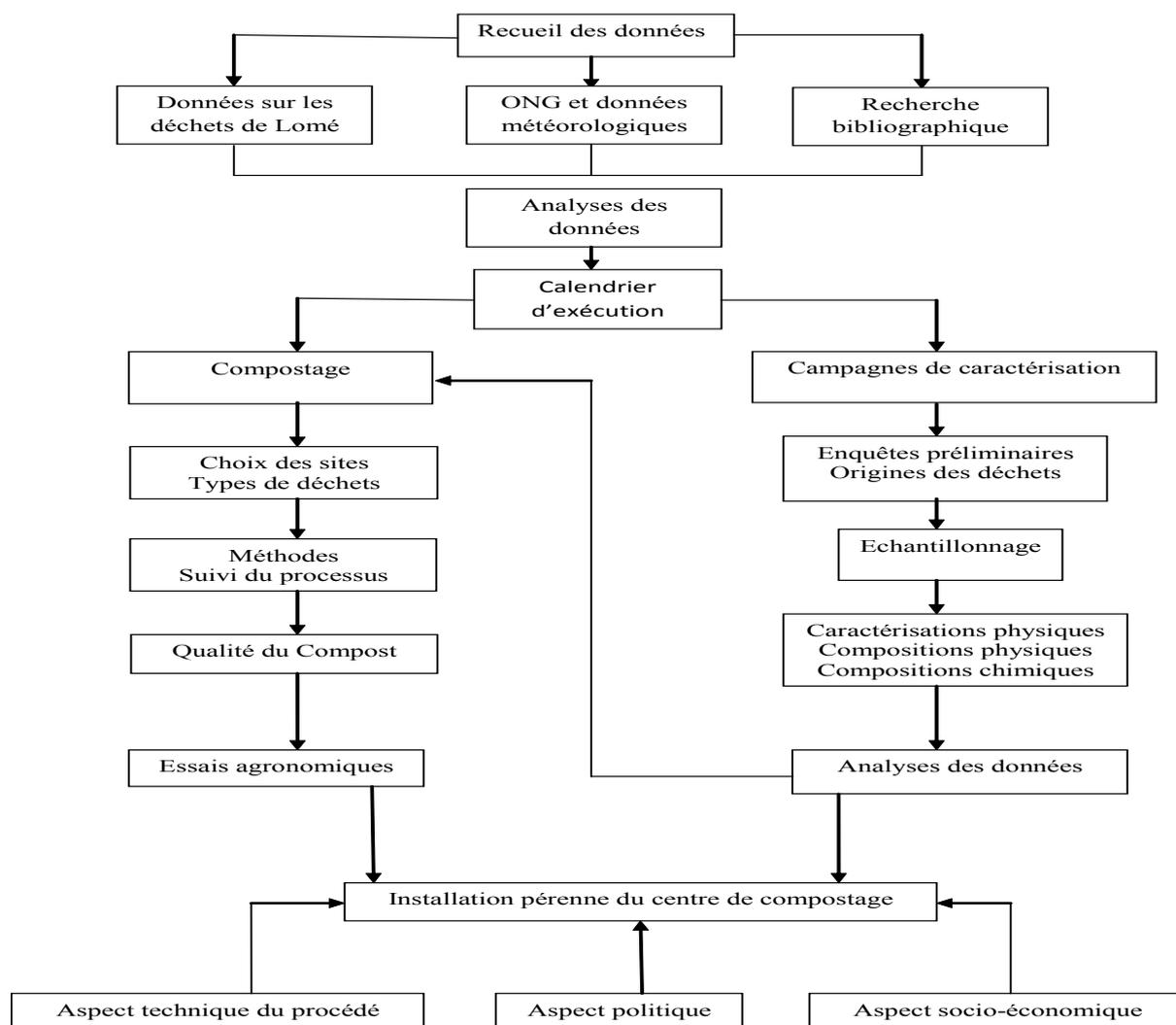


Figure 9 : Schéma explicatif du protocole expérimental

La recherche des données a été effectuée en 2008 à Lomé comme à Limoges. Les campagnes de caractérisation ont commencé en février 2009 et ont pris fin en juin 2010 à Lomé. Le compostage a commencé en mars 2009 et se poursuit jusqu'à ce jour à Lomé. Les analyses physico-chimiques ont été effectuées à Lomé et à Limoges.

II.1.1. Données climatiques

Contrairement aux données bibliographiques, on note une évolution et un bouleversement des saisons.

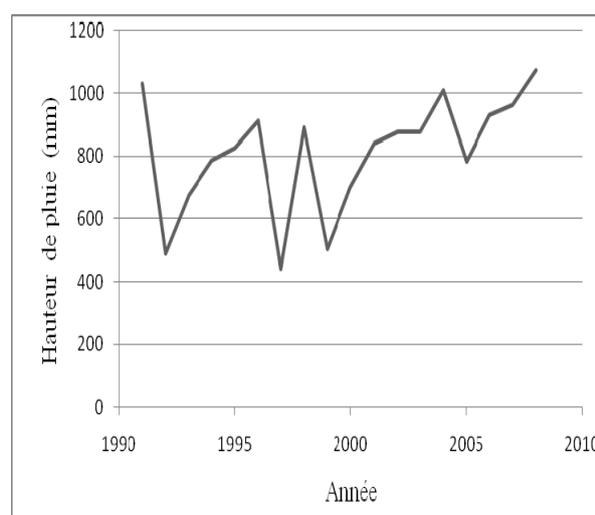
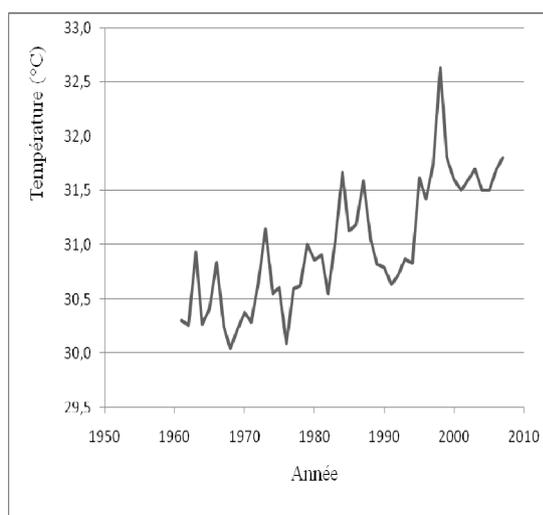


Figure 10a : Température de 1961 à 2008 Figure 10b : Hauteurs de pluie de 1991 à 2008
 Figure 10 : Evolution de la température moyenne et de la hauteur de pluie

La valeur maximale de température qui est de 35,1°C est atteinte au mois de février de l'année 1998 (cf. figure 10a). La figure 10b présente les valeurs moyennes des hauteurs de pluies enregistrées de 1991 à 2008. On note les valeurs moyennes les plus élevées en 1991 où on a enregistré 1032 mm et en 2008 où on a enregistré 1075 mm de pluie. La grande saison sèche dure de novembre à mars et la grande saison pluvieuse d'avril à août. Les deux petites saisons restent difficiles à définir.

II.1.2. Données sur les déchets

Les données existantes sur les déchets au Togo ne sont basées que sur les statistiques et des estimations. Aucune étude réelle n'a jamais été effectuée. On estime à près de 800 tonnes de déchets produits tous les jours dans la commune de Lomé sur la base d'une production journalière de 0,91 kg/hab. La récupération est forte et concerne la ferraille, les papiers-cartons, les plastiques en bouteille.

II.1.3. Données sur les ONG

On compte aujourd'hui à Lomé une trentaine d'associations ou ONG (NOUMEN, Crédo Action, ADD, AROBEGE, EGM, ENPRO, AME, APIQ, ELOGE, IMAGE, AGIP, etc.) regroupées en collectif qui s'occupent du ramassage des ordures à Lomé. A part la zone administrative et les quartiers en construction, ces ONG interviennent dans toute la capitale. Ces associations ou ONG se sont créées en 1998 suite à la rupture du contrat entre la mairie et la SOTOEMA. Aujourd'hui, plus de 50 000 ménages (un ménage peut compter plusieurs familles) reçoivent leur service contre une participation financière. Ils ont répondu à plusieurs problèmes en soulageant les ménages par leur service, en donnant du travail à plusieurs jeunes (aujourd'hui près de 25000 jeunes) qui se trouvaient dans la rue. Ces ONG ne reçoivent aucune subvention de l'Etat qui leur demande plutôt de reverser 20 % de leur revenu. Aucun suivi médical n'est organisé ni par l'Etat ni par les responsables de ces ONG envers les agents de propreté. Aujourd'hui, par faute de moyen, beaucoup de ces ONG ont dû cesser leur activité.

II.2. Méthodes de choix de l'échantillon

La collecte des données, la préparation et l'organisation des opérations pratiques, l'acquisition des moyens d'analyse et la mise au point des protocoles d'échantillonnage et de tri sont des étapes essentielles dans la démarche de caractérisation des déchets. A cause des nombreuses contraintes et difficultés spécifiques aux PED et plus spécialement au Togo, cette phase a duré plusieurs mois d'enquête et de préparation.

II.2.1. Enquêtes préliminaires

Afin de déterminer la quantité nécessaire à caractériser à la décharge finale une enquête est effectuée auprès des ONG qui desservent les centres, auprès de la DST, auprès des entreprises de collectes et auprès de l'ICON SARL qui est l'entreprise principale qui gère la décharge finale. Auprès des ONG, c'est nécessaire dans le but de déterminer le flux de déchets arrivant dans les centres de transit. La DST, représentant l'Etat, est responsable du contrôle et du suivi des activités au niveau de chaque acteur. Elle fournit donc le flux global de déchets arrivant à la décharge finale. Les entreprises, chargées de la collecte des centres de transit à la décharge finale permettront de connaître les difficultés qu'elles rencontrent.

II.2.2. Choix de l'origine des déchets

L'objectif est de connaître la composition des déchets de la ville de Lomé afin de

proposer un mode optimisé de gestion. Pour cela la quantité à caractériser devra être représentative de la quantité totale des déchets produits à Lomé ou du moins de la quantité de déchets transitant par les centres de transit, car ce sont ces centres qui abriteront les sites de traitement. La population totale de la commune de Lomé, estimée en 2008, est de 999594 habitants; seulement 919609 habitants, sont concernés par la pré-collecte assurée par les ONG, et, par conséquent 79985 habitants sont collectés par les services techniques de la ville (centre ville et résidence du Bénin) ou non collectés. Rappel: la figure 8 présente le zonage de la pré-collecte, les différents centres de transit et la décharge finale positionnés sur la carte de la ville de Lomé.

II.2.3. Lieu de la campagne de caractérisation

Pour les déchets transitant par les centres de transit, les campagnes de caractérisation ont lieu à la décharge finale d'Agoenyivé à Lomé. Pour les déchets collectés auprès des ménages, les campagnes ont lieu sur le site d'expérimentation du laboratoire GTVD. Plusieurs campagnes de caractérisation ont été effectuées, en saisons sèches et en saisons pluvieuses sur deux ans. Deux pré-études de caractérisation ont été réalisées. La première a été effectuée dans le but de former les gens sur la méthode d'échantillonnage, la caractérisation (taille et différentes catégories à prendre en compte). La deuxième pré- étude a été effectuée, le but n'étant pas d'effectuer une réelle caractérisation mais de valider le protocole et d'appréhender le temps nécessaire, ainsi que les outils nécessaires par une telle étude.

II.2.4. Taille de l'échantillon

Un échantillon doit posséder les mêmes caractéristiques que la totalité des déchets. Il faut donc que l'échantillon à caractériser soit de composition identique à celle de la masse globale. Ainsi, après l'étude menée sur ce prélèvement, les résultats pourront être étendus à l'ensemble des déchets collectés.

II.2.4.1. Déchets arrivant à la décharge

La méthode MODECOM recommande une prise d'échantillon de 500 kg après quartage afin de limiter les erreurs de mesure (ADEME, 1993 ; Tezanou et al., 2001). Pour constituer cet échantillon de 500 kg, on a évalué la masse minimale d'ordures ménagères (à prélever des camions provenant des centres de transit) en fonction de la population desservie par chaque centre de transit, des tonnages entrants sur chaque station de transit et sur la décharge.

$$n = \frac{t^2 p(1-p)N}{[t^2 p(1-p) + (N-1)\Delta^2]} ; N : \text{population}, \Delta: \text{erreur de l'échantillonnage}, p : 0,5 ; t : 1,96.$$

Le tableau 21, présente les quantités minimales d'échantillon de déchets prélevés en provenance de chaque centre de transit, pour un facteur de risque α égal à 0,05 (ou un niveau de confiance de 95% de sûreté), pour un facteur de Student, $t = 1,96$ et pour différentes incertitudes après quartage au niveau de chaque camion provenant des centres de transit.

Tableau 21 : Quantité de déchets prélevés au niveau de chaque centre pour un facteur de risque : 0,05 et $t=1.96$

Centre de transit	Habitants	Incertitudes	Quantité minimale	Quantité prélevée	Flux déchets sur le site	T
-	N	%	Kg	Kg	Kg.j ⁻¹	-
Bè Avéto	242.513	9	119	132	220.687	1,96
CEB	114.028	15	43	62	103.765	1,96
Doumasséssé	193.537	10	96	105	176.119	1,96
SCOA	171.818	15	43	93	156.354	1,96
Bè Kpota	101.382	15	43	55	92.258	1,96
Kanyikopé	75.157	16	37	41	68.393	1,96
Akodésséwa	21.174	30	11	12	19.268	1,96
Total ou Qté minimale	919.609	5	384	500	836.844	-

II.2.4.2. Collecte auprès des ménages

La ville d'étude est Lomé. La zone d'étude, Agbalépédogan, est le quartier où il y a plus de mélange d'ethnies et de différentes couches socio-économiques. Les ménages ciblés sont les ménages abonnés chez l'ONG ENPRO qui est aujourd'hui l'ONG en charge de la collecte des ordures ménagères dans ce quartier. Une nouvelle forme de collecte vient d'être mise au point par le gouvernement. La ville est subdivisée en zones ou quartiers où chaque zone ou quartier est attribué à une association de pré-collecte. Les charrettes à traction humaine seront remplacées par des charrettes motorisées.

La population de cette zone d'étude est estimée à 30187 habitants.

- Démarche méthodologique d'échantillonnage

Une étude préalable auprès des associations en charge de la collecte dans la zone a été

effectuée en vue de déterminer la méthode de collecte et le choix des ménages. Il y avait quatre ONG de pré-collecte au cours de notre étude dans la zone : PUA, AROME, AJEPE et ENPRO, cette dernière est actuellement la seule ONG opérant dans la zone.

- Contraintes

Deux contraintes ont été identifiées et ont limité le choix des ménages et le nombre de ramassage des OM dans les ménages au cours de la semaine d'essai et les autres semaines de collecte. Il s'agit des moyens financiers pour louer une voiture pour le ramassage journalier et le temps de collecte. La collecte s'effectue le septième jour de la semaine et débute à six heures du matin.

Afin d'avoir le maximum de déchets à traiter et de planifier le ramassage, une enquête suivie d'une demande de renseignements sur les déchets a été menée dans les ménages sélectionnés et chez les agents de collectes; celle-ci a été réalisée en deux jours à cause du programme des responsables d'ENPRO qui doivent nous accompagner dans les ménages en vue de faciliter les entretiens.

Dans le cadre des études concernant la production par habitant par jour (Kpabou, 2007), elles se sont déroulées dans le quartier, « Résidence du Bénin » (haut standing) et dans le quartier « Tokoin Forever » (Bas standing) (cf. photos 21 et 22).

Les échantillons pour la caractérisation physique ont été prélevés dans le quartier Agbalépédogan après une enquête. Les résultats de l'enquête ont permis de recueillir le maximum d'informations pour une bonne conduite de l'étude et aussi pour avoir une idée précise sur les perspectives en matière de gestion des déchets concernés.



Photo 21 : Pesée avant la pré collecte



Photo 22 : Collecte des déchets dans les sacs

II.3. Caractérisation physique

Deux types de caractérisations ont été effectués : d'abord par taille puis par catégorie.

II.3.1. Séparation par taille

Elle est effectuée à l'aide d'une table de tri de 2 m de long sur 1m de large respectant des diamètres de maille 100 mm et 20 mm permettant de distinguer plusieurs types de matériaux après avoir trié les hétéroclites (cf. figure 12) :- gros : > 100 mm ; - moyen : $20 < x < 100$ mm ; - fins : < 20 mm, qui sont ensuite séparés en deux sous catégories : fins : $10 < X < 20$ mm et extra fins : < 10 mm (Aina et al., 2006 ; MODECOM, 1993).

II.3.2. Séparation par catégories

Selon les pays et les objectifs poursuivis, plusieurs types de composants (catégories) de déchets sont identifiés : la norme XP X30 – 408 d'octobre 1996 (AFNOR, 1996) recommande 13 catégories (cf. tableau 22). Mais dans cette étude seulement 9 catégories, putrescibles, papiers-cartons, textiles-textiles sanitaires, plastiques, CNC (Combustibles Non Classés), verres, métaux, INC (Incombustibles Non Classés) et déchets spéciaux, ont été identifiées (cf. figure 11) en raison de la dégradation avancée des ordures ménagères arrivant à la décharge finale.

Tableau 22 : Différents catégorie de déchets
(CEFREPADE, 2008 ; AFNOR, 1996)

Catégories	Sous catégories
Putrescibles	Restes de cuisine, déchets de jardin, autres
Papiers	Emballages, journaux, magazines, imprimés, autres
Cartons	Emballages plats, ondulés
Composites	Emballages alimentaires-lait, jus de fruit, café, beurre
Textiles	Sacs, vêtements, lingerie
Textiles sanitaires	Couches culottes, serviettes, lingettes, mouchoirs, autres
Plastiques	Films PE et PP, bouteilles et flacons PET, autres PVC, PS
CNC	Bois, cuir, caoutchouc, charbon de bois, autres
Verres	Emballages et autres
Métaux	Emballages ferreux et aluminium, autres
INC	Pierres, porcelaine, brique, autres
Dangereux	Piles, peintures, solvants, déchets de soins, autres
Fines	< 20 mm (voir < 8 mm ou 2 mm)

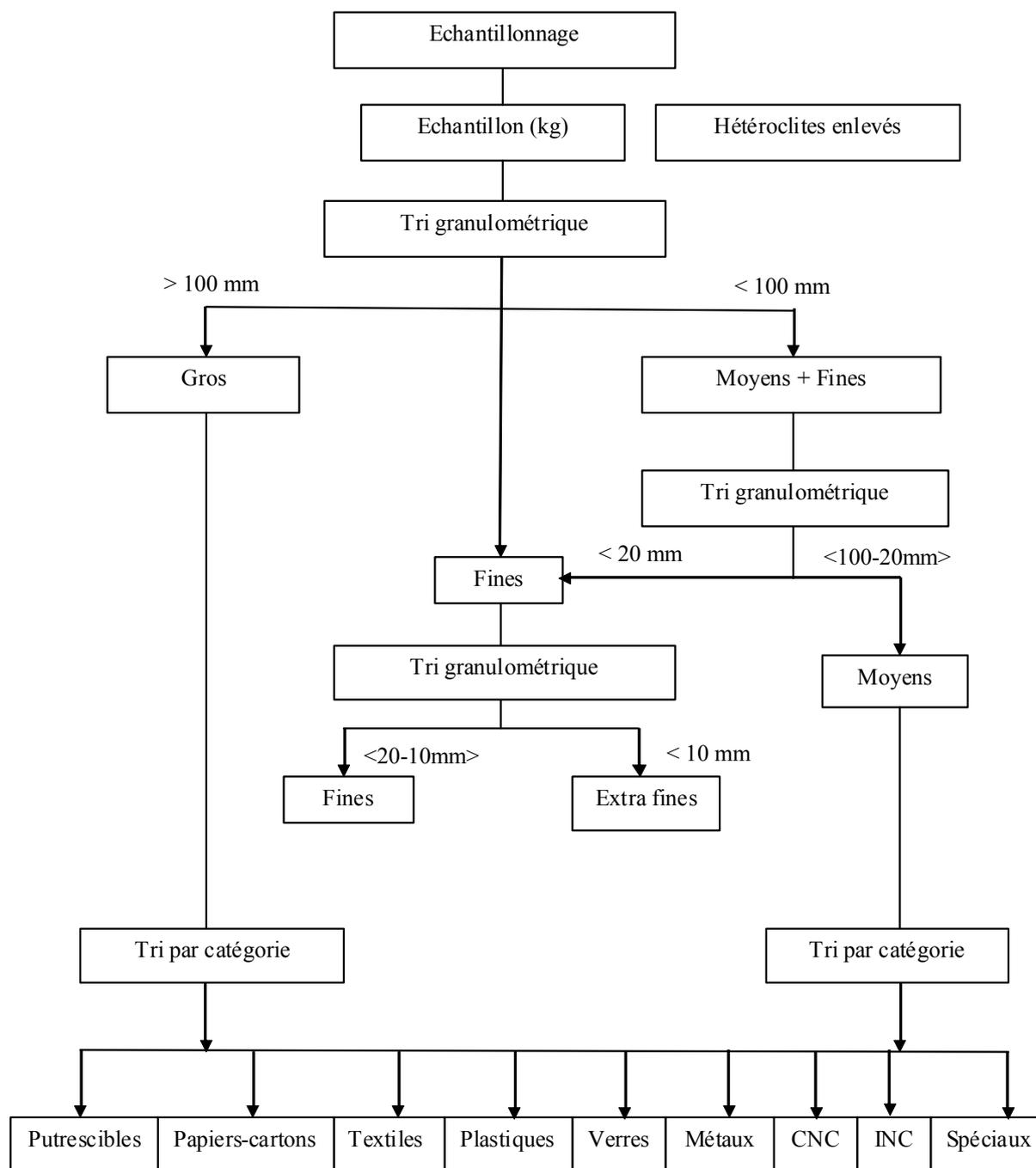


Figure 11 : Schéma descriptif et synthétique du protocole de caractérisation des déchets

II.4. Compostage, aspects méthodologiques

Au vu du retour d'expériences des grands centres industriels de compostage, qui ont la plupart cessé leurs activités après quelques années voire quelques mois d'exploitation ou, ont présenté des dysfonctionnements, pour plusieurs raisons, choix technologique, maintenance des installations et compétences des personnels, stratégies de gestion etc., il était nécessaire d'imaginer et de proposer d'autres scénarii. C'est l'objectif de ce projet de proposer une autre approche pour le compostage des déchets urbains, celle d'une gestion informelle de plateformes artisanales pour un flux journalier d'1 à 5 tonnes. Ce paragraphe rassemble les

critères et les outils de gestion, ainsi que tous les matériels et toutes les techniques de compostage utilisés, pour une étude expérimentale du compostage. Cette étude expérimentale permettra de répondre à plusieurs questions correspondant aux choix du site de compostage, du type de substrat issu de la poubelle des ménages, du type de procédé, du mode de valorisation du compost produit ainsi que du type de gestion préconisé pour la suite.

II.4.1. Choix du site expérimental

Les résultats de la caractérisation physique ont montré que la décharge finale est un site défavorable au compostage et que le compostage proche des ménages et à la limite aux centres de transit éliminerait le taux de sable ramassé au niveau des centres de transit et éviterait la dégradation entamée par les putrescibles. A cet effet, les sites retenus sont la ferme expérimentale du Laboratoire de Gestion, Traitement et Valorisation des Déchets (GTVD), le centre de transit de Bè Avéto et un domaine public proche d'un ménage à Agbalépédogan.

Le laboratoire GTVD est choisi dans ce projet pour traiter et valoriser par compostage les déchets provenant de la collecte sélective.

Le centre de transit de Bè Avéto est choisi car il représente le plus grand centre en terme de quantité de déchets reçus par jour. Les problèmes de vol du matériel ont amené à déplacer le substrat en phase de maturation à la ferme d'expérimentation du laboratoire.

Le troisième centre à Agbalépédogan est choisi en collaboration avec l'ONG ENPRO qui désire associer le compostage à la pré-collecte.

II.4.2. Choix des outils et des substrats

Pour le compostage, les outils suivants ont été utilisés : une balance à crochets, des coupe-coupe, une houe, un arrosoir, des claies, des tissus plastiques et des bâches. Les substrats utilisés sont : ordures ménagères brutes, fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM), fumier de caprins et phosphates naturels du Togo (minéral).

II.4.3. Choix de la méthode de compostage

Après le tri des indésirables, les putrescibles sont versés dans des seaux pour former les andains ou pour remplir les cuves.

Méthode en cuve . Les cuves sont construites sous un hangar afin de protéger les composts contre les fortes pluies, l'excès de soleil, les eaux de ruissellement (Zurbrugg, 2003 a). Une pente du fond de chaque cuve et des regards facilite l'évacuation des eaux excédentaires et les lixiviats.

Méthode en andain Les matières putrescibles ont été empilées sur les claies après le tri et ont

été protégées contre le soleil et la pluie par une bâche perméable à l'air (Matejka et al, 2001; Zurbrugg et al, 2005). Une canalisation recueille le lixiviat et l'eau excédentaire afin de le réutiliser pour l'arrosage. Cette méthode est comparée avec la méthode en cuve pour choisir la bonne méthode en termes d'accessibilité.

Fréquence de retournement les andains et les matériaux des cuves sont retournés toutes les 1 ou 2 semaines pour permettre l'aération (van Haaren et al., 2009) et l'homogénéisation de chaque tas du compost.

Plusieurs méthodes sont généralement employées pour la fabrication du compost. Dans cette étude c'est la méthode en couche qui a été utilisée. La première couche de matériaux est déposée directement sur une surface cimentée (dans le cas du compostage en cuve) ou sur une claie (dans le cas du compostage en andain). Chaque tas de compost est constitué de couches successives de matériaux cités précédemment et chaque couche est arrosée avec une quantité d'eau suffisante. Les quatre tas étudiés ne renferment pas les mêmes substrats.

II.4.4. Composition des cuves et des andains

En référence à la composition physique, deux groupes de composts ont été élaborés: composts des ordures ménagères sélectives et composts des ordures ménagères brutes après le tri des indésirables (papier-cartons, textiles, plastiques, verres, métaux, INC, spéciaux, etc.). Ces quatre types de composts ont été élaborés selon les combinaisons suivantes des matières premières (cf. Tableau 23):

Tableau 23 : Composition et construction des cuves et des andains

	Composition des substrats compostables				Couvert	Dimensions	
	Putrescibles Kg	OM brutes Kg	Fumier Kg	Phosphates naturels Kg		Volume m ³	(LxWxH) m
Cuve A	120	-	-	-	oui	0,72	1,2 x 1,2 x 0,5
Cuve B	120	-	24	8	oui	0,72	1,2 x 1,2 x 0,5
andain C	-	1650	-	-	oui	4,42	1 x 2,6 x 1,7
andain D	-	1420	-	-	oui	4,25	1 x 2,5 x 1,7

Compost A: Putrescibles directement collectés des ménages à Agbalépédogan

Compost B: Putrescibles+ Fumier + Phosphate naturel, dans les proportions 15/3/1;

Compost C: Déchets bruts après le tri des indésirables dans la zone de Bè Avéto;

Compost D: Déchets bruts après le tri des indésirables dans la zone d'Agbalépédogan.

Etant donné que le fumier est l'intrant le plus utilisé actuellement par les maraîchers, cette étude a jugé nécessaire de comparer le rendement d'une combinaison avec les OM. Par

ailleurs, le Togo exploitant des phosphates, il serait ainsi moins coûteux d'enrichir le compost en phosphore.

II.4.5. Mode de valorisation du compost

Le mode de compostage choisi est celui qui permettra de réduire la quantité de déchets transportés et mis en décharge. C'est donc le tri-compostage décentralisé tel que décrit dans la partie bibliographique qui a retenu notre attention dans le but de soulager le maillon le plus faible de la chaîne d'évacuation.

II.5. Méthodes analytiques

II.5.1. Caractérisation physique

II.5.1.1. Densité, ρ (T.m⁻³)

Deux méthodes sont possibles,
soit directement sur les échantillons de déchets

La densité est alors estimée par le remplissage de 10 seaux identiques de 20 L et par pesée. La densité s'exprime par : $d = M/V$ (Kg/L ou T/m³) ; M : Masse de l'échantillon en Kg ou T et V : Volume de l'échantillon en L ou m³.

soit sur les déchets entrants sur la décharge

Les véhicules utilisés, bennes tasseuses ou camions sont pesés pleins et vides. La densité est alors déterminée par le rapport de la masse de déchets sur le volume.

II.5.1.2. Humidité, H %

L'humidité (H %) doit être déterminée le plus rapidement possible, pour limiter les pertes par évaporation. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour sa détermination : la méthode normée à l'étuve ou ses variantes en fonction de la température, la thermo-balance, le séchage à l'air libre. La méthode normée AFNOR NF U 44-171 d'octobre 1982, consiste en un prélèvement d'une quantité maximale d'échantillon, de préférence une masse supérieure à $100 \pm 0,1g$, mise à l'étuve à $105 \pm 2^\circ C$ jusqu'à poids constant (Aloueimine et al., 2005; Charnay, 2005; Garcia et al., 2005; Yobouet et al., 2010), environ 24 heures et la masse de déchets à sécher varie de quelques grammes (Mohee, 2002) à plusieurs kilogrammes (AFNOR, 1996). Elle est exprimée en % par rapport à la masse humide des déchets, H%. La matière sèche (MS%) est le taux complémentaire du degré d'humidité.

Certains auteurs préfèrent sécher les déchets ménagers à des températures plus basses, afin de ne pas détériorer les composés organiques comme les sucres ou les plastiques. A poids

identique, la durée de l'analyse est d'autant plus longue que la température de séchage est basse : 24 heures à 105°C et 48 heures à 80°C ($\pm 2^\circ\text{C}$). Dans cette étude l'humidité est déterminée à 105°C jusqu'à poids constant.

Humidité par catégorie :

$$H_{cg} = \frac{M_{cg} - M_{cgs}}{M_{cg}} \cdot 100$$

H_{cg} : humidité de la catégorie c dans les gros, M_{cg} : Masse humide de la catégorie c dans les gros et M_{cgs} : Masse de la catégorie c dans les gros après passage à l'étuve à 105°C.

Humidité par taille :

$$H_{cg} = \frac{1}{100} \sum_c \frac{M_{cg} - M_{cgs}}{M_{cg}} \cdot \%C$$

Humidité globale de l'échantillon :

$$H_{gl} = [H_g \cdot \%G + H_m \cdot \%M + H_f \cdot \%F] \cdot \frac{1}{100}$$

Avec %G, %M et %F les proportions des gros, moyens et fines respectivement et H_g , H_m , H_f , les humidités respectives des gros, moyens et fines.

Remarque : pour les déchets des ménages, l'humidité est déterminée sur déchets reconstitués (échantillon qui a les mêmes caractéristiques que l'échantillon initial. Il est obtenu sur la base d'une proportionnalité entre les différentes catégories après caractérisation) après la caractérisation.

II.5.1.3. Température

La température de l'andain et de la cuve est suivie tous les 2 jours avec un thermomètre à mercure dans un premier temps puis ensuite avec une sonde thermométrique, lors du processus de dégradation. La valeur donnée correspond à la moyenne de 6 mesures effectuées dans la longueur de l'andain, de chaque côté (Sandec, 2006; Unmar et al, 2008), à des profondeurs variables (0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 m).

II.5.2. Composition chimique

II.5.2.1. pH

La détermination du potentiel hydrogène, pH, est effectuée sur des suspensions aqueuses selon la norme AFNOR NF ISO 10-390 de novembre 1994; Belyaeva et al., (2009); Yu et al., (2009). Une masse de 20 g de matière sèche est mise en solution dans 100 ml d'eau distillée. La suspension est homogénéisée par agitation magnétique pendant 15 minutes. La

mesure de pH ($\pm 0,1$ unité pH) se fait directement par lecture sur un pH-mètre à électrode combinée.

II.5.2.2. Matière organique, MO%

Après séchage à l'étuve, l'échantillon n'est plus constitué que de matière organique et de matière minérale qui ne se consume pas à 500°C. Un échantillon préalablement étuvé à 105°C est mis au four à 550°C pendant 2H (Kelly, 2002a ; Kelly et al., 2002b; Unmar et al., 2008). La teneur en matière organique ou en solide volatil est obtenue par différence de pesée entre la masse du déchet sec (105°C) et la masse de déchet calciné. Elle est exprimée en % par rapport à la masse sèche des déchets.

$$\%MO = \frac{M_s - M_c}{M_s} \cdot 100$$

Avec %MO : pourcentage de matière organique dans l'échantillon sec, M_s : masse de l'échantillon après passage à l'étuve à 105°C et M_c : masse de l'échantillon après calcination.

Remarque : de même que pour l'humidité, la teneur en matière organique des déchets des ménages a été déterminée sur déchets reconstitués après la caractérisation.

II.5.2.3. Carbone organique total, COT, mg.kg⁻¹MS

La mesure du COT est effectuée sur les fractions fines, extra fines, sur déchets reconstitués et sur les composts

La technique utilisée pour déterminer la teneur en carbone organique totale contenue dans les déchets est celle de Walkley et Black (Clément M., 2003 ; Tumuhairwe and al., 2009 ; Waskman, 1936). Le mode opératoire comprend deux phases : l'oxydation de la matière organique et le dosage en retour de l'excès de l'oxydant.

Une masse de 588 g (2 mol) de dichromate de potassium correspond à 36 g (3 mol) de carbone.

La solution de dichromate renferme 49 g/l de produit et correspond à $36 \times 49 / 588 = 3$ g de carbone.

De même 1 ml de solution de dichromate oxyde $3/1000 = 0,003$ g soit 3 mg de carbone

Il a été montré dans la littérature que du point de vue expérimental l'oxydation du carbone par cette méthode ne se fait qu'à 77 %. On corrige donc le résultat par le facteur $100/77 = 1,2987$. Ce qui entraîne que : 1 ml de solution de dichromate correspond à 3,8961 mg ($3 \text{ mg} \times 1,2987$) soit 3,9 mg de carbone par excès.

Le pourcentage de carbone organique mesuré dans les déchets est déterminé par la relation suivante :

$$\%C_{\text{org}} = [X + (10 - Y)] \cdot 0,003 \cdot \frac{100}{77} \cdot \frac{100}{m}$$

m : masse de déchet (g)

X : volume de dichromate versé (ml)

Y : volume de dichromate servant à titrer le sel de Mohr (ml).

Le protocole indique que tout échantillon dont la descente de la burette n'est pas comprise entre 8 ml et 14 ml sera repris car il ne conduira pas à un résultat correct ; soit ne conduit pas à une réduction à moins de 75 % du dichromate, soit il conduit à une oxydation incomplète de la matière sèche.

La teneur en matière organique peut être retrouvée aussi par cette méthode.

La matière organique ne renferme que 58 % de carbone ; il faut donc multiplier le pourcentage de carbone par le facteur $100/58 = 1,724$ pour avoir le pourcentage de la matière organique.

$$\% \text{ MO} = 1,724 \cdot M_C$$

II.5.2.4. Azote Total Kjeldahl, NTK, % MS

L'azote NTK, somme de l'azote ammoniacal et de l'azote organique, est mesuré selon la norme AFNOR ISO 11261, juin 1995 et selon Barrena and al., (2010). Les échantillons séchés à 105°C sont minéralisés dans un « minéralisateur » pendant 1 heure à 180°C puis pendant 2 heures à 360°C en milieu acide et en présence d'un catalyseur (K_2SO_4 et Se). Les résidus obtenus après digestion sont distillés après neutralisation de l'excès d'acide par la lessive de soude 30 %. Le distillat est récupéré dans un erlenmeyer avec de l'acide chlorhydrique (0,1M). Le dosage réalisé avec de la soude (0,1M) et du rouge de méthyle permet de déterminer les teneurs en azote de l'échantillon. Les masses d'échantillons analysées sont faibles de l'ordre de 0,1g. Les essais ont déterminé la quantité d'échantillon, la mieux adaptée, en fonction du stade de maturation. Cette masse s'échelonne entre 0,1 à 1g. Plus la quantité d'échantillon est importante, plus la durée de minéralisation devra être longue. Pour une quantité 0,1g, la durée de minéralisation est d'une heure à 180°C et de deux heures à 360°C.

II.5.2.5. Phosphore total, PT, $mgP_2O_5 \cdot kg^{-1}MS$

La détermination du phosphore total s'effectue en deux étapes (Bustamante et al., 2008). La première étape est une digestion en milieu acide qui transforme tout le phosphore présent en orthophosphate. Dans la seconde étape, les ions orthophosphate sont dosés. L'ion orthophosphate réagit avec l'ion molybdate et l'ion antimoine pour former un complexe

phosphomolybdate. Ce dernier est réduit avec l'acide ascorbique en milieu acide pour provoquer l'apparition d'une coloration bleue, dont l'absorbance à 660 nm est proportionnelle à la concentration de l'ion orthophosphate. Le phosphore total est l'ensemble du phosphore présent dans un échantillon sous forme de phosphates (orthophosphate et polyphosphate) ou de composé organophosphorés.

Le dosage des phosphates est fait en utilisant un analyseur colorimétrique automatisé. La couleur produite lors de la réduction du complexe formé en présence d'orthophosphates ou de molybdate est mesurée à 660 nm.

II.5.2.6. Teneurs en éléments traces métalliques, ETM, mg kg⁻¹ MS

Les échantillons sont minéralisés à chaud avec de l'eau régale (1/3 HNO₃+2/3 HCl) selon AFNOR NF ISO 11 460 de juin 1995; Belyaeva et al., (2009); Bustamante et al., (2008). Le compost est séché à 105°C puis broyé. Compte tenu des interférences observées au cours du dosage, et de la masse de l'échantillon dissous (0,5g dans 30 ml d'eau régale), les analyses sont dupliquées. Les échantillons sont chauffés à 100°C pendant une heure puis à 135 °C jusqu'à évaporation de l'acide soit environ 3 heures. Un ajout d'eau distillée permet de ramener le volume à 50 mL. Les échantillons sont ensuite filtrés à 0,45µm. Les concentrations en métaux sont mesurées par spectrophotométrie d'absorption atomique flamme. Le mélange gazeux employé pour la flamme est de l'air-acétylène.

Après l'étalonnage, les étalons ayant la concentration la plus basse sont analysés afin de s'assurer que les limites de détection de la méthode peuvent être atteintes.

II.5.3. Méthodes de suivi de compostage

II.5.3.1. Test de lixiviation

Le test de lixiviation consiste en une mise en solution au contact d'une certaine masse de déchets broyés, avec une certaine quantité d'eau. Dans les quatre modes opératoires décrits dans les quatre parties de la norme prEN 12457 – 2 : 2002 (F), différents rapports L/S sont choisis (10, 8 et 2) conduisant généralement à des résultats d'essais différents. Ceci résulte d'une part des quantités de lixiviat différentes imposées par le déchet lui même (résultant des composés du matériau dissous dans le lixiviat). Il n'existe aucune relation pouvant être appliquée aux résultats obtenus avec un rapport L/S donné pour déterminer les résultats qui auraient été obtenus si l'essai avait été réalisé avec un autre rapport L/S. Cependant pour un rapport L/S faible, certains constituants sont présents dans le lixiviat à une concentration plus élevée car la quantité de lixiviat disponible est inférieure. Pour L/S = 2,

l'essai n'est pas applicable à différentes catégories de déchets. Dans le cas de cette étude l'essai a été réalisé avec un rapport L/S = 10, pour L/S = 10, de telles restrictions apparaissent dans un nombre limité de cas. Dans le cas de cette étude l'essai a été réalisé avec un rapport optimisé L/S = 8. Le pH des composts est une donnée essentielle car l'existence d'une phase minérale, sa spéciation et sa toxicité sont autant des paramètres liés au pH du milieu. Ce rapport a été optimisé au cours des travaux antérieurs effectués au laboratoire (François, 2004; Lagier, 2006). Différentes suspensions sont mises sous agitation pendant différentes heures allant de 24 à 168H (un jour à sept jours) pour évaluer le potentiel polluant des composts.

II.5.3.2. Test respirométrique, AT4, mgO₂.g⁻¹MS

Le compost est dégradé par fermentation aérobie (Shaw et al., 1999). Le substrat sert de source de carbone organique aux micro-organismes en présence d'oxygène. Le gaz carbonique (CO₂) est le produit principal de cette réaction. Cependant, si le milieu vient à manquer d'oxygène (O₂), une anaérobiose se crée modifiant ainsi la réaction. Le processus de méthanisation peut démarrer aussi, produisant du dioxyde de carbone et du méthane (CH₄). La mesure de la Demande Biologique en Oxygène (DBO) obtenue a été facilitée par l'emploi d'Oxitop® WTW, permettant d'enregistrer chaque jour la valeur d'O₂ consommée. Cet équipement permet une mesure manométrique par différence de pression. Elle estime la consommation d'oxygène lors de la fermentation aérobie. Cependant, pour que le CO₂ produit n'interagisse pas, il est neutralisé sous forme de carbonate de sodium (Na₂CO₃) par des pastilles de soude (NaOH). Ces équipements indiquent directement la valeur de la dépression en mg d'O₂ consommé par litre (Barrena et al., 2010; Unmar et Mohee, 2008). Les déchets et les composts criblés ou non sont introduits dans le flacon, d'une contenance de 500 mL. Les échantillons ont une granulométrie de 10 mm et une teneur en eau de 50 %.

II.5.3.3. Indice de germination, IG

La phytotoxicité est une particularité des composts qui permet d'évaluer leur maturité. Dans ce but l'effet des extraits aqueux des composts sur la germination des graines de maïs (*Zea mays*), de niébé (*unguiculata de Virgna*) et de cresson (*lepidium sativum*) a été mesuré par le pourcentage de germination défini par IG, l'indice de germination, suivant le protocole suivant.

L'extrait de compost est préparé selon la méthode DI.VA.P.R.A, (1998) : une proportion 1/ 5,7 (M / V) (compost (g de matière sèche) / eau distillée (ml)) est préparée pour chaque test de compost. Le mélange compost / eau distillée est laissé en contact pendant 2 heures. Ce mélange est ensuite centrifugé à 600 tpm pendant 15 min. Le surnageant est filtré 2 fois sur

papier filtre de diamètre 0,8 micromètre. Deux dilutions sont préparées à partir du filtrat final pour avoir une concentration de 50 % et 75 % de l'extrait. Les graines sont trempées dans l'eau distillée pendant 1 heure et mises à germer dans les boîtes de pétri contenant du papier filtre. Pour chaque compost, 10 boîtes sont imbibées chacune avec 5 ml de l'extrait aqueux du compost (5 boîtes pour chaque dilution). Les boîtes témoins reçoivent 5 ml d'eau distillée. Vingt graines de maïs (*Zea mays*), vingt graines de niébé (*unguiculata de Virgna*) considérées comme cultures de base au Togo et vingt graines de cresson (*lepidium sativum L*), ont été distribuées dans les boîtes de pétri et incubées à la température ambiante (28°C) dans l'obscurité pendant 48h (Chikae et al., 2006; Miyuki et al, 2005). Le nombre de graines germées a été compté et les longueurs des racines ont été mesurées. L'Indice de Germination, IG a été calculé par la formule de Zucconi (Bustamante et al., 2008; Zucconi et al, 1981):

$$IG = \frac{N_{m_{gg}} \cdot L_r}{N_{m_{ggt}} \cdot L_{rt}}$$

$N_{m_{gg}}$: Nombre de graines germées ; L_r : longueur moyen de la racine ;

$N_{m_{ggt}}$: Nombre de graines germées du témoin ; L_{rt} : longueur moyen de la racine témoin

On désigne par IG 50 et IG 75 les indices de germination des graines irriguées avec l'extrait aqueux du compost correspondant respectivement aux dilutions 50 % et 75 %. On définit

l'indice de germination calculé pour nos essais comme la moyenne : $IG = \frac{(IG\ 50 + IG\ 75)}{2}$.

II.5.3.4. Teneur en indésirables

L'eau de Javel détruit la matière organique non synthétique. Les inertes restants sont triés par densimétrie à l'eau, puis à l'aide d'une solution saturée en chlorure de calcium de densité 1,35 suivant le schéma de la figure 12. Dans un récipient de 10 l, on met 500 g de compost préalablement séché à 80°C. Le compost est couvert d'eau de javel et après avoir bien mélangé, on laisse agir. La réaction chimique est très vive. Ensuite le protocole suivant est appliqué comme le montre la figure 12.

Le compost est ensuite versé sur un tamis de 2 mm sous lequel on a placé une cuvette afin de récupérer les éléments inférieurs à 2 mm. On rince sommairement et on laisse égoutter.

L'attaque à l'extrait de javel est renouvelée trois fois après avoir remis à chaque fois le passant et le non passant dans le seau ce qui a permis de détruire complètement la matière organique (excepté le bois, les noyaux et la lignine). Les durées de contact de l'eau de javel et des échantillons sont les suivantes :

- un premier bain de 2 h ;
- un deuxième bain de 4 h ;

un tri densimétrique au chlorure de calcium est effectué puis on rince abondamment à l'eau chaude. On obtient ainsi les fines. Les quatre récipients sont ainsi placés dans une étuve à 80 °C jusqu'à masse constante. Une caractérisation physique est donc effectuée sur les lourds et les mi-lourds

II.6. Essais agronomiques

Les essais ont été réalisés à la Station d'Expérimentation Agronomique de l'Ecole Supérieure d'Agronomie (ESA) de l'Université de Lomé et sur des parcelles cultivables dans la zone portuaire en collaboration avec les agriculteurs. Les cultures choisies sont la carotte et la betterave. La dose expérimentale des différents types de compost et de fientes de poules est de 20 t/ha de matière sèche avec huit traitements. Les conditions expérimentales sont les suivantes : parcelle élémentaire a pour dimension : 2,8 m × 1m, - nombre de répétitions = 4, - schéma de semis : 25 cm × 1cm (3 ou 4 graines par cm), -éclaircissage : 25 cm × 5 cm.

Afin que les essais soient significatifs, deux conditions sont respectées. La première concerne le traitement qui doit être répété au cours du temps et la seconde l'emplacement des essais sur le terrain qui doit être tiré au sort. La répartition des traitements est réalisée statistiquement selon plusieurs dispositifs afin d'améliorer l'efficacité de l'expérimentation. Dans le cadre de l'étude, il a été retenu le mode de disposition en blocs aléatoires. Cette méthode repose sur la probabilité de trouver moins de différence entre des parcelles rapprochées qu'entre des parcelles éloignées.

Pour l'étude, des parcelles élémentaires de dimensions 2,8 m × 1m ont été retenues car elles sont adaptées à un travail manuel du sol dans le cas de la carotte et correspondent à un nombre d'individus semés relativement important et suffisant pour une interprétation statistique des résultats. Le nombre de répétition de chaque traitement a été fixé à 4, car un nombre moindre biaiserait la précision de l'essai. Les critères de choix pour sélectionner le terrain sont la proximité de la plate-forme de compostage du laboratoire GTVD, la non contamination du sol par d'autres fertilisants ou amendements depuis plusieurs années, l'homogénéisation du terrain au niveau des critères pédologiques et topographiques, une surface nécessaire pour mener les essais, la proximité d'un point d'eau et la sécurisation du terrain par une clôture afin d'assurer une protection contre les animaux. De plus, le terrain est représentatif des parcelles cultivées dans la région par conséquent l'essai est répétable chez les agriculteurs de la région. Les critères de choix des cultures expérimentales reposent sur une culture exigeant peu d'eau, à cycle végétatif court inférieur à 4 mois. Le dispositif expérimental adopté est celui complètement randomisé (cf. figure 13) avec 8 traitements à 4 répétitions. Le tableau 24 présente les différents traitements effectués.

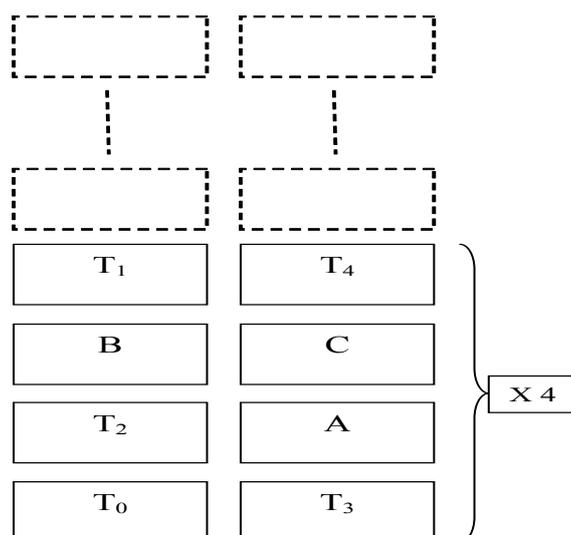


Figure 13 : Schéma du dispositif randomisé des semis.

Tableau 24 : Désignation des différents traitements des essais agronomiques

Traitements	Désignation
T₀	Témoin absolu
A	Compost d'ordures ménagères triés à la dose D ₁ *
B	Compost d'ordures ménagères triés enrichi au fumier et à au phosphate naturel à la dose D ₁ *
C	Compost d'ordures ménagères brutes à la dose D ₁ *
T₁ = F. P.	Fiente de poules à la dose D ₁ *
T₂ = N₁₅P₁₅K₁₅	Engrais à la dose selon la formule N ₁₅ P ₁₅ K ₁₅
T₃ = N₃₀P₃₀K₃₀	Engrais à la dose selon la formule N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀
T₄ = N₆₀P₄₅K₄₅	Engrais à la dose selon la formule N ₆₀ P ₄₅ K ₄₅

*D₁ = 20 t / ha

Pour les essais dans la ferme de l'ESA, les traitements (cf. Tableau 24) utilisés sont : le traitement témoin (T₀) correspond à la culture ne recevant ni fertilisant, ni amendement d'aucune sorte; le traitement composts (A, B, C) représente la culture recevant comme seul fertilisant une dose de 20 t/ha de compost; le traitement T₁ représente la culture recevant comme fertilisant une dose de 20 t/ha de fumier, les traitements d'engrais (T₂, T₃, T₄) représente les cultures ayant reçu l'engrais selon la formule dans le tableau 24.

Pour l'essai mené en collaboration avec les agriculteurs de la zone portuaire, les traitements suivants ont été effectués : le traitement composts (A, B, C) représente la culture recevant comme seul fertilisant une dose de 20 t/ha de compost, le traitement des mélanges composts-fumier (50%-50%) à la dose de 20 t/ha et le traitement du fumier à la même dose.

II.7. Statistiques

Les paramètres statistiques sont mis à contribution pour l'exploitation des résultats. Pour chaque résultat une moyenne u et un écart type s , afin d'apprécier la distribution et les écarts sur les valeurs obtenues à partir des différentes méthodes utilisées, sont calculés :

$$u = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \cdot x_i \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - u)^2}{n - 1}} \quad ES = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - u)^2}{n - 1}}}{\sqrt{n - 1}}$$

Les résultats des tests agronomiques sont traités avec une erreur standard (ES) selon Salant, (1994); Rea , (1997).

TROISIEME PARTIE

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Cette partie est articulée en cinq chapitres qui reprennent les principales étapes de la filière compostage, identifiées dans la partie bibliographique, qui sont le gage d'une gestion pérenne dans les PED, quel que soit le type de compostage, formel ou informel, centralisé ou décentralisé. En effet faire du compostage des déchets urbains une voie possible de valorisation des déchets majoritairement organiques, demande que le procédé soit viable techniquement, mais aussi que la collecte soit assurée de façon durable, que le compost soit utilisé de manière pérenne et que le coût pour les habitants soit équitable .

Les quatre premiers chapitres présentent donc les résultats obtenus au cours de cette étude. Le premier chapitre présente tout d'abord l'évaluation du gisement de déchets et de leur composition. Le second sera consacré à l'optimisation de la pré-collecte des ordures. Le troisième chapitre conclura sur les meilleurs choix technologiques adaptés aux conditions locales et aux paramètres humains. Le quatrième chapitre donnera enfin les éléments nécessaires pour la mise en place de la valorisation du compost produit. Un cinquième et dernier chapitre présentera de manière synthétique les conditions pour une filière pérenne du compostage des déchets solides urbains.

Chapitre I. Etude du gisement de déchets urbains dans les quartiers à Lomé

I.1. Production de déchets solides

Tout d'abord, il fallait quantifier la production d'ordures dans les quartiers étudiés ; aussi a-t-il été décidé d'établir les ratios en Kg/hab/jour de production d'ordures, au plus près des ménages et des concessions. Toutefois, la collecte des données, la préparation et l'organisation des opérations pratiques, l'acquisition des moyens d'analyse et la mise au point des protocoles d'échantillonnage et de tri, étapes essentielles dans la démarche de caractérisation des déchets ont été compliquées.

I.1.1. Type d'échantillon après enquête préliminaire

Les déchets concernés sont ceux répertoriés par l'ADEME (ADEME, 1993) et appelés ordures ménagères. Il s'agit des putrescibles, papiers, cartons, composites, textiles, textiles sanitaires, plastiques, combustibles non classés (CNC), verres, métaux, combustibles non classés (INC), les dangereux et les fines < 20 mm, ramassés par les ONG qui assurent la pré-collecte. On note aussi qu'il existe des services de pré-collecte parallèle effectuée par les mêmes agents de recouvrement pour ramasser les hétéroclites c'est-à-dire les déchets de grandes tailles. Ces services sont directement payés par les ménages et ne font pas partie des redevances mensuelles. Mais tous ces déchets se retrouvent mélangés dans les centres de transit avant d'être acheminés vers la décharge finale.

I.1.2. Ratios de production

Ces ratios ont été déterminés dans deux quartiers de la ville de Lomé, « La Résidence du Bénin », un quartier de haut standing et « Tokoin Forever » de bas standing. Afin d'évaluer leur production d'ordures ménagères, le nombre de personnes dans chaque ménage a été noté, ainsi que les quantités de déchets générés par jour et par ménage. Les résultats des quatre semaines de collecte des ordures ménagères par ménage et par quartier durant cette période sont consignés dans le tableau 25.

Tableau 25 : Production de déchets dans deux quartiers (Kpabou, 2007)

Quartier	Echantillon Hab.	Production kg	Durée Jours	Ratio moyen kg/Hab/j	Variation en kg/Hab./j	
					Min	Max
Résidence du Bénin	61	2129	28	1,24	0,50	1,78
Tokoin Forever	154	3373,5		0,78	0,38	1,32
Total	215	5507,5		0,91	0,44	1,55

L'analyse des résultats montre une production des déchets ménagers de 0,78 kg/hab/j au niveau du quartier Tokoin Forever alors qu'elle est de 1,24 kg/hab/j dans le quartier de la Résidence du Bénin. La moyenne pour les deux quartiers est de 0,91 kg/hab/j. C'est ce ratio moyen qui est appliqué pour l'évaluation du gisement de déchets à Lomé.

I.2. Caractérisation des déchets entrant sur la décharge d'Agoenyivé

I.2.1. Type d'échantillon

La caractérisation physique est effectuée sur les déchets à enfouir sur le site et sur les déchets sortant des ménages. Elle est effectuée suivant les tailles et les catégories décrites dans la partie II. Quatre campagnes réparties sur deux ans (deux en saisons sèches et deux durant les saisons humides) ont été réalisées sur les déchets arrivant à la décharge finale et deux campagnes sur les déchets sortant des ménages. A la décharge finale, les deux premières campagnes ont eu lieu en 2009 (année 1) et les troisième et quatrième campagnes en 2010 (année 2). Les deux campagnes sur les déchets sortant des ménages ont eu lieu en 2010. Les prélèvements d'échantillons de déchets sont conformes à la répartition des déchets dans chaque quartier (cf tableau 20 donné en deuxième partie) et rappelé ici (tableau 26).

Tableau 26 : Quantité de déchets prélevés provenant de chaque centre pour un facteur de risque : 0,05 et $t=1.96$

Centre de transit	Habitants	Incertitudes	Quantité minimale	Quantité Prélevée	Flux déchets sur le site	T
-	N	%	Kg	Kg	Kg.j ⁻¹	-
Bè Avéto	242.513	9	119	132	220.687	1,96
CEB	114.028	15	43	62	103.765	1,96
Doumasséssé	193.537	10	96	105	176.119	1,96
SCOA	171.818	15	43	93	156.354	1,96
Bè Kpota	101.382	15	43	55	92.258	1,96
Kanyikopé	75.157	16	37	41	68.393	1,96
Akodésséwa	21.174	30	11	12	19.268	1,96
Total	919.609	5	384	500	836.844	-

I.2.2. Tri par taille

Il a été procédé au tri suivant les 4 granulométries décrites dans la partie II matériels et méthodes, à savoir : les gros (>100 mm), les moyens (<100-20 mm>), les fines (<20-10 mm>) et les extra-fines (<10 mm).

Les résultats de cette caractérisation par taille montrent que la fraction dominante à Lomé est

celle des extra-fines avec près de 35-44 % (cf. Figure 14a et 14b) du poids total de déchets humides bruts suivie des moyens avec environ 30 % du poids total.

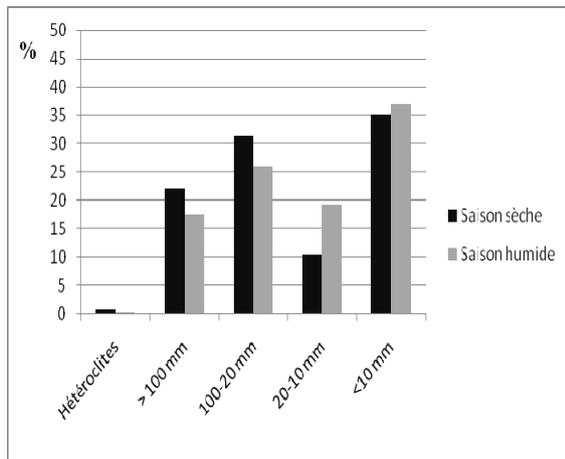


Figure 14a: année 1

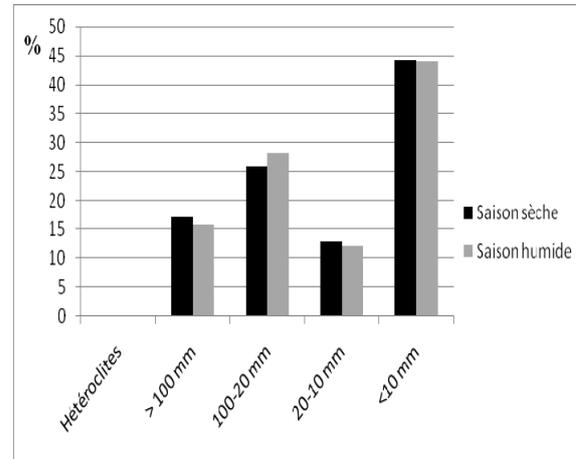


Figure 14b : année 2

Figure 14 : Répartition par tailles des déchets de Lomé par années

Les résultats de l'année 1 (cf. Figure 14a) montrent que les taux des hétéroclites, des gros et des moyens ont diminué en saison humide par rapport à la saison sèche de la même année; ce sont les fines et extra-fines qui augmentent en saison humide. Par contre, aucune différence significative n'a été observée en saison humide par rapport à la saison sèche de l'année 2 (cf. Figure 14b) ; les différences enregistrées dans l'année 1 pourraient être fortuites ou liées à la durée du séjour des déchets sur les centres de transit pendant la saison humide de l'année 1. Les déchets amorcent alors une dégradation surtout les fractions organiques, diminuant ainsi la part des gros et des moyens au profit des fines en saison humide. Au cours de l'année 2, ceci a été corrigé par l'achat de nouveaux engins par la commune et par les associations de collecte. Les déchets passent donc moins de temps dans les centres de transit au cours de l'année 2 par rapport à l'année 1.

Les hétéroclites (déchets de grandes tailles) ont totalement disparu au cours de l'année 2 (cf. Figure 14b) ; ceci est probablement dû à une augmentation du taux de récupération des matériaux valorisables comme les carrosseries d'engins, les gros morceaux de bois, les gros cartons. La part des gros a diminué pendant l'année 2 par rapport à l'année 1, soit en moyenne de 4 %. Pour les moyens, on note une légère diminution au cours de l'année 2 par rapport à l'année 1, de même pour les fines, ce qui s'accompagne d'une augmentation du taux de la fraction extra-fine, près de 44 % de l'échantillon au cours de l'année 2.

Lorsqu'on compare cette répartition pour une même saison sèche ou humide, on constate qu'en saison sèche, les pourcentages d'hétéroclites, des gros et des moyens ont diminué dans

l'année 2 par rapport à l'année 1, entraînant une augmentation des extra fines (<10 mm) de cette année 2 (cf. Figures 15a et 15b). Par contre, en saisons humides, cette augmentation des extra fines en année 2 pourrait être justifiée par la diminution des fines.

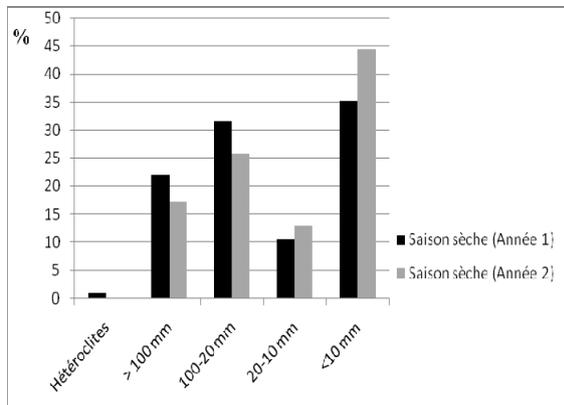


Figure 15a: saisons sèches.

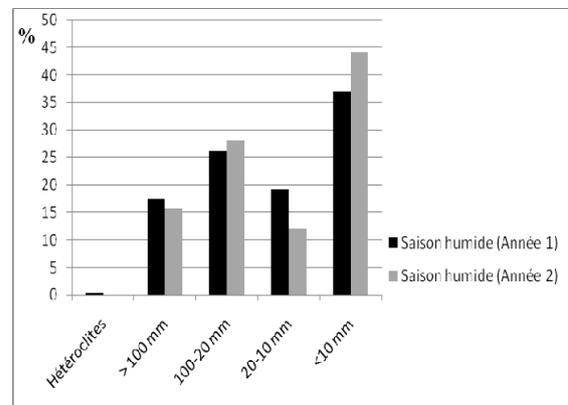


Figure 15b: saisons humides

Figure 15 : Répartition par tailles des déchets de Lomé par saisons

Selon cet inventaire, la caractérisation des OM de Lomé, n'a pas mis en évidence de variations significatives par taille en fonction de la saisonnalité, comme le montrent les figures 14 et 15. Elles indiquent que les déchets sont régulièrement répartis dans trois fractions. Cette répartition des déchets met surtout en évidence que les fractions des fines totales (fines (10-20 mm) et extra fines <10 mm) représentent la part la plus importante 46-56 % du poids brut des déchets en moyenne à Lomé ; deux explications peuvent être apportées, d'une part le temps de séjour dans les sites de transit est suffisamment long pour que les déchets commencent à se dégrader, et d'autre part, comme on le verra, la forte composition minérale, est en faveur d'une contamination par le sol à majorité du sable, des sites de transit.

1.2.3. Tri par catégorie

Afin de donner une caractérisation détaillée des ordures ménagères, on a procédé à l'analyse quantitative et qualitative des déchets selon un inventaire relativement complet composé de 9 catégories décrites précédemment en plus des fines 10 – 20 mm et des extra-fines <10 mm. Ceci permet de mettre en exergue l'influence du niveau de vie des populations et de choisir le mode de traitement approprié.

Les résultats des figures suivantes montrent la répartition des différentes catégories dans les deux fractions, gros >100mm et moyens <100-20mm>. Le tri par catégorie dans la fraction fines <20mm, n'a pas été réalisé en raison des difficultés de trier des petits morceaux <20mm.

I.2.3.1. Fraction >100 mm

Les plastiques représentent 20 à 32 % dans la fraction >100 mm au cours de l'année 1 (cf Figure 16), les putrescibles 17 à 22 %, les textiles 18 %, les plastiques 21 à 33 % et les papiers-cartons 14 à 19 %. Pour cette même fraction mais en année 2, le taux des plastiques a légèrement augmenté, soit 37-44 %, au détriment des putrescibles, papiers-cartons, textiles-textiles sanitaires qui ont chuté et sont autour de 10 % (cf. Figure 17).

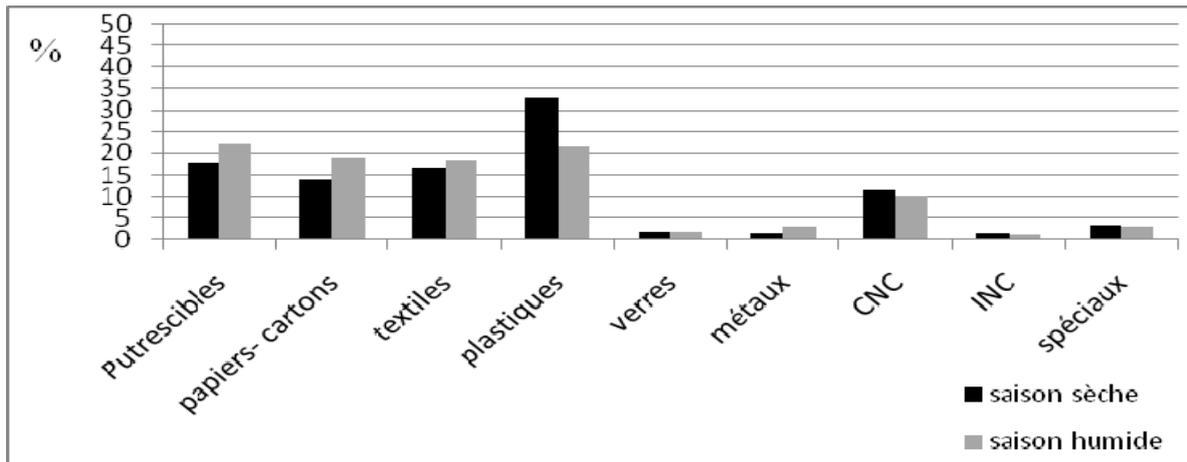


Figure 16 : Composition de la fraction >100 mm de l'année 1

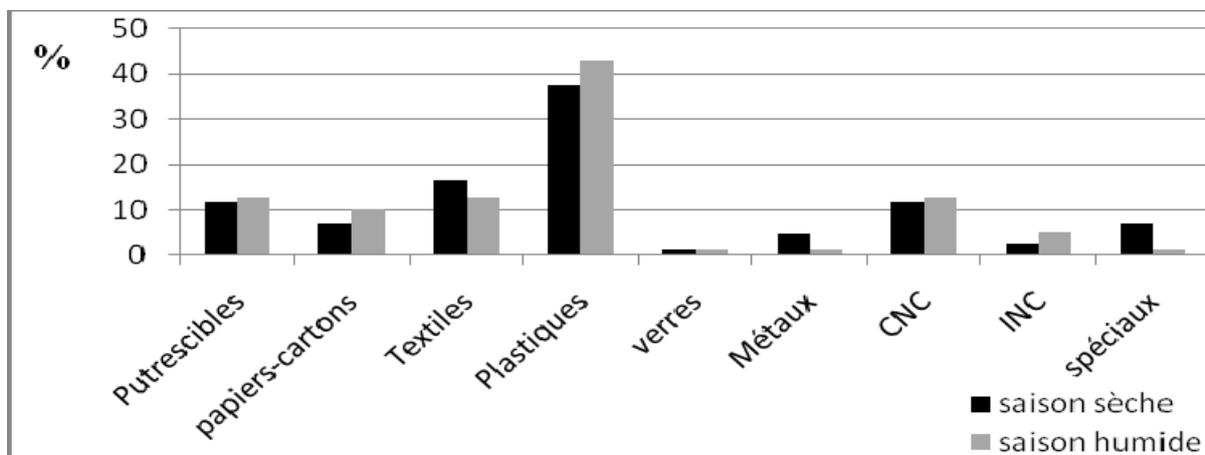


Figure 17 : Composition de la fraction >100 mm de l'année 2

Il est important de vérifier l'évolution des déchets au cours des années pour une même saison. Les figures 18 et 19 montrent la variation des déchets en saisons sèches et en saisons humides pour la fraction >100 mm.

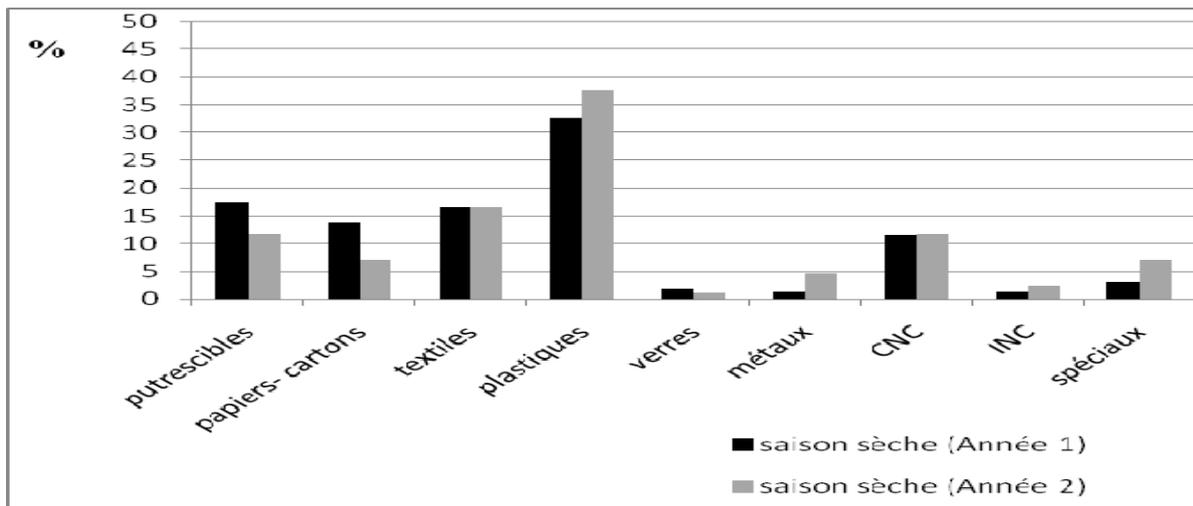


Figure 18 : Composition de la fraction >100 mm en saisons sèches.

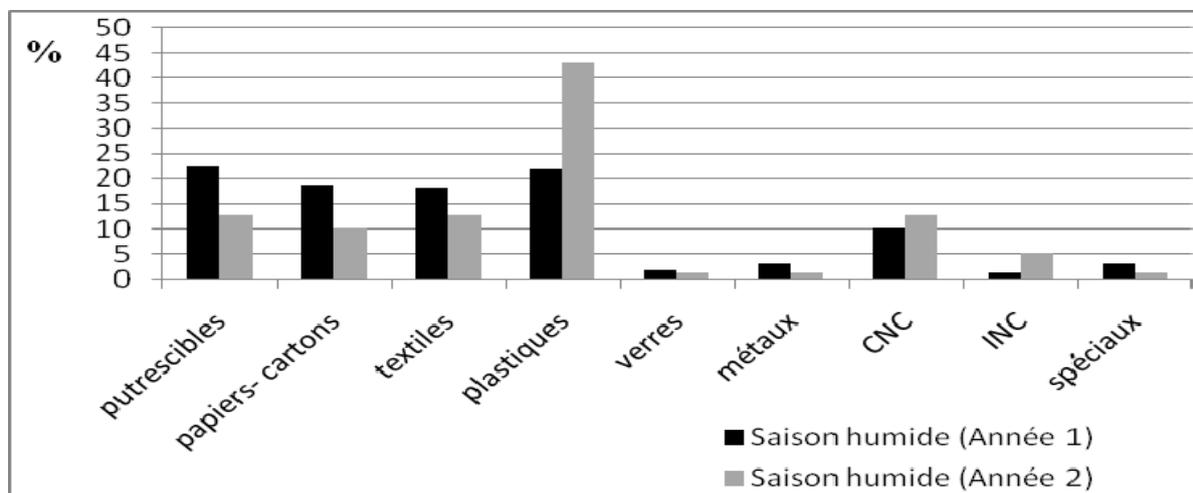


Figure 19 : Composition de la fraction >100 mm en saisons humides

Lorsqu'on compare les saisons entre les années pour cette fraction (cf. Figures 18 et 19), on observe une évolution presque identique pour les putrescibles et les papiers-cartons. En année 2, on observe une diminution des putrescibles et des papiers-cartons. La proportion des textiles reste constante entre les saisons sèches, soit 15 % ; par contre, une grande différence est observée entre les saisons humides pour cette même catégorie. La proportion des plastiques est remarquable, soit 33-37 % en saisons sèches contre 21-43 % en saisons humides. La proportion des CNC varie très peu, soit 10-12,7 %.

I.2.3.2. Fraction <100-20mm>

Pour la fraction comprise entre 100-20 mm, les putrescibles représentent en moyenne 40 à 50 % en année 1 (cf. Figure 20). Ce taux représente la part la plus importante. Les papiers-cartons représentent, en saison pluvieuse, 25 % contre 4 % en saison sèche au cours de cette même année 1. Les plastiques et les CNC restent autour de 10 %.

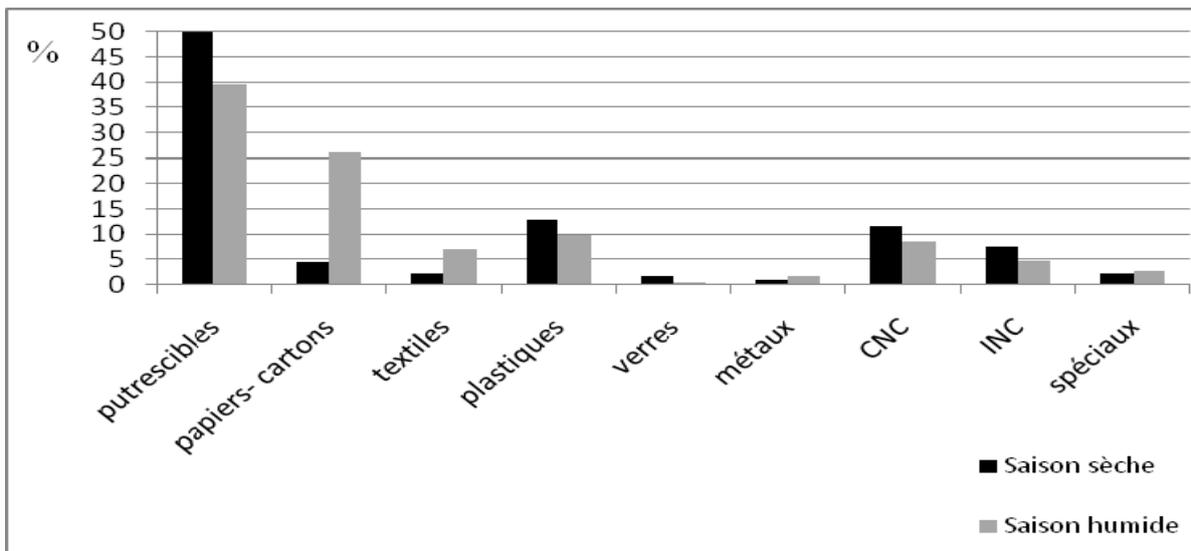


Figure 20 : Composition des déchets de la fraction 100-20 mm de l'année 1

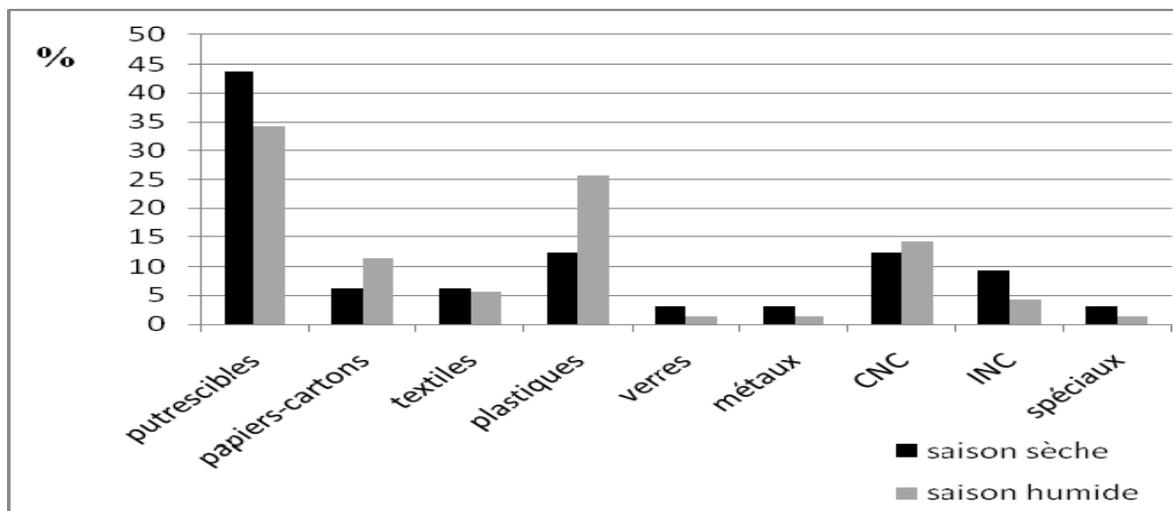


Figure 21 : Composition des déchets de la fraction 100-20 mm de l'année 2

Au cours de l'année 2, le taux des putrescibles a diminué dans les moyens quelle que soit la saison, soit 39 à 48 % (cf. Figure 21). On note à cet effet une augmentation de presque toutes les catégories par rapport aux saisons de la même année 2 et par rapport à l'année 1.

Les composants comme les métaux, les verres et les spéciaux sont moins présents dans les moyens comme dans les gros avec une faible proportion de 0,5 à 5 % environ. La composition confirme l'état de dégradation des déchets observé pour les différentes tailles.

Lorsqu'on compare la répartition des catégories entre les années, on constate que le taux des putrescibles en saison sèche de l'année 2 a diminué par rapport à la saison sèche de l'année 1 (cf. Figure 22), soit une différence de 13 %. On note une grande variation des plastiques entre les saisons humides, soit 9,7 % en année 1 contre 25,7 % en année 2. Pour la fraction 100-20 mm (cf. Figures 20, 21, 22 et 23), on note une part considérable des putrescibles, soit 42-50 % en saisons sèches contre 34-39 % en saisons humides. Les papiers-

cartons sont mieux ramassés en saisons sèches pour le chauffage à cause de la faible teneur d'humidité. Les INC sont plus présents dans la fraction 100-20 mm que la fraction >100 mm.

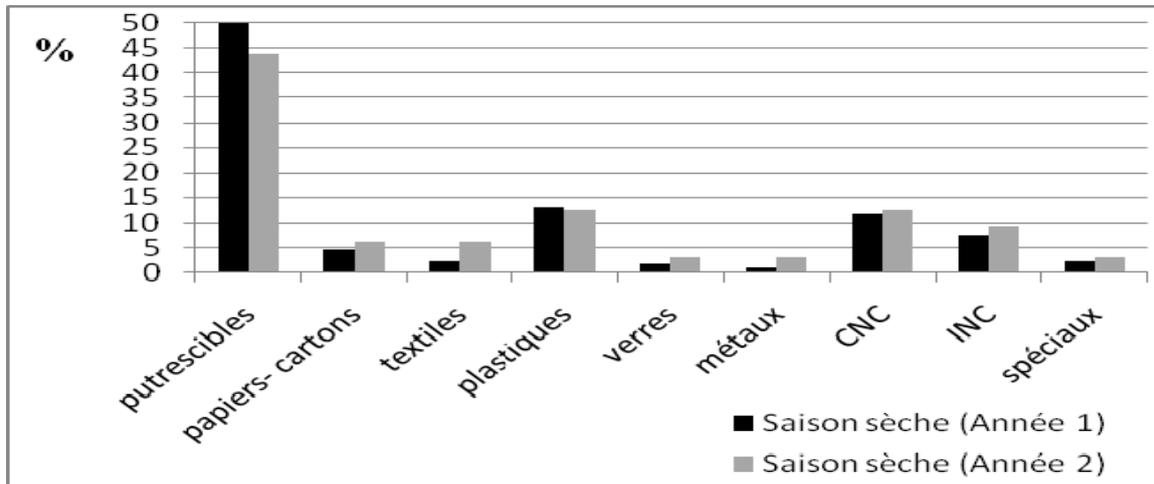


Figure 22 : Composition de la fraction 100-20 mm en saisons sèches

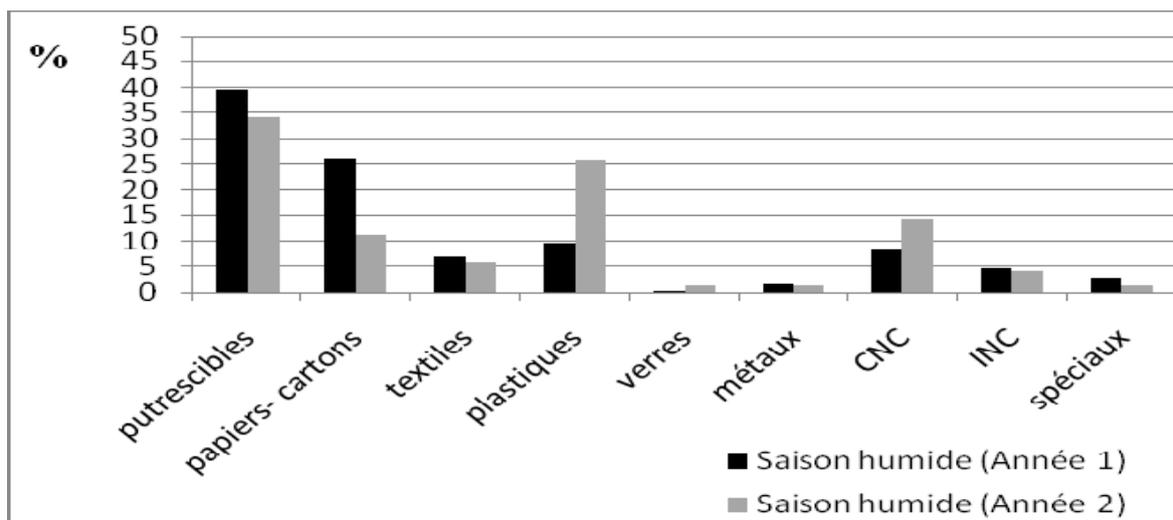


Figure 23 : Composition de la fraction 100-20 mm en saisons humides

I.2.3.3. Répartition globale

La répartition moyenne globale des ordures par catégorie, donnée par année aux figures 24 et 25, montre que la catégorie extra-fine domine en masse avec un taux moyen de 35 à 44 % sur déchets bruts. Cette catégorie est suivie des putrescibles et des fines 20-10 mm (10 à 17 %).

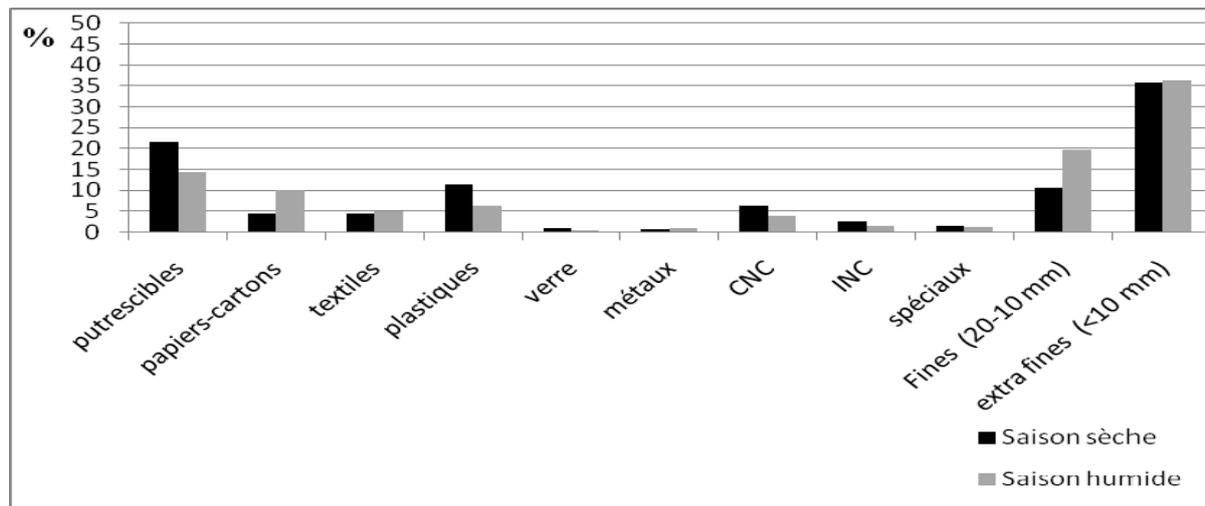


Figure 24 : Composition globale moyenne des déchets de Lomé en année 1

Le taux des putrescibles représente 14 à 22 % en année 1 (cf. Figure 24) contre 12 à 13 % en année 2 (cf. Figure 25). Les autres constituants varient légèrement les uns par rapport aux autres dans des proportions faibles avec toutefois un minimum de 0,6 % pour la fraction des spéciaux.

Au cours de cette année 2 (cf. Figure 25), on remarque que les taux des fines et extra fines restent constants, soit 13 % pour les fines et 44 % pour les extra fines. Contrairement à l'année 1, le taux des plastiques a augmenté en saison humide de l'année 2.

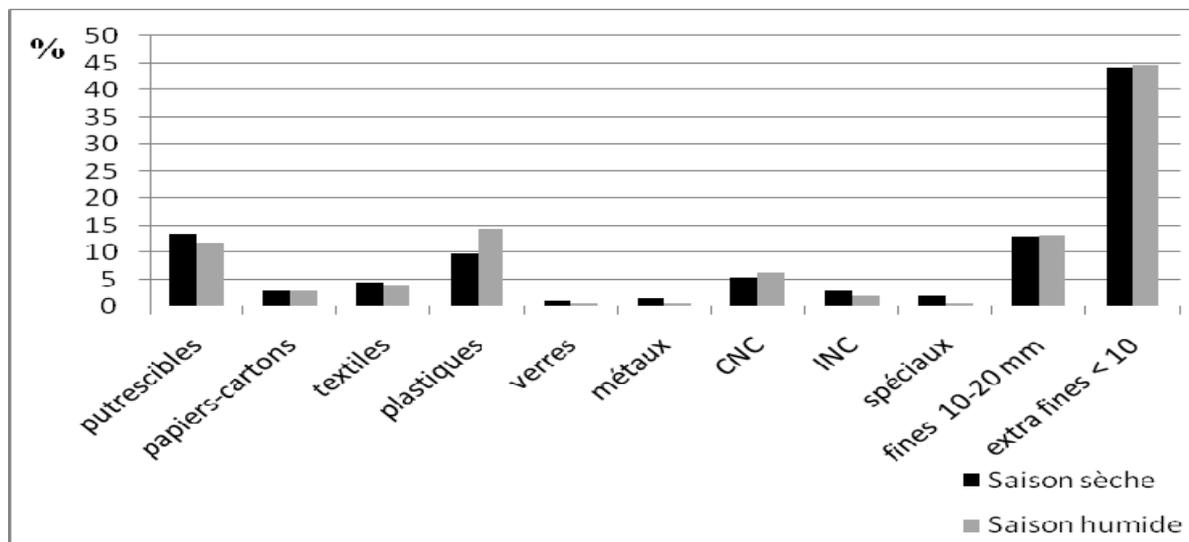


Figure 25 : Composition globale moyenne des déchets de Lomé en année 2.

Le tableau 27 présente la composition moyenne des deux années au cours des saisons sèches et humides. Le taux des extra fines a augmenté en année 2 contrairement au putrescibles.

Tableau 27 : Composition par catégorie de l'année 1 et 2 à la décharge finale

% matière humide	Année 1		Année 2	
	Saison sèche	Saison humide	Saison sèche	Saison humide
Putrescibles	21,7	14,4	13,3	11,8
papiers-cartons	4,4	10,2	2,8	2,8
Textiles	4,4	5,1	4,4	3,7
Plastiques	11,3	6,4	9,7	14,2
Verres	1,0	0,4	1	0,6
Métaux	0,6	0,9	1,6	0,6
CNC	6,2	4,0	5,2	6,1
INC	2,7	1,4	2,8	2
Spéciaux	1,4	1,2	2	0,6
 fines - (20-10 mm)	10,6	19,7	12,9	13
extra fines (<10 mm)	35,7	36,3	44,3	44,6
Total	100	100	100	100

On peut signaler que les catégories bouteilles en plastique et en verre et métaux en général, ont été récupérées tout au long de la filière de collecte. Certains éléments comme les plastiques représentent encore malgré la récupération une part non négligeable, ramenée à la masse totale de déchets, leur proportion reste encore comprise entre 6 et 14 %. Les quantités de textiles évoluent peu, leur dégradation totale est supposée atteinte selon la littérature au bout de 60 ans. On peut néanmoins signaler que ces différents résultats mettent en évidence les vitesses de dégradation de certaines catégories de déchets arrivant à la décharge finale et le taux de récupération de certaines catégories depuis la source de production jusqu'à la décharge finale. Quatre grandes classes de composés se distinguent : ceux qui sont rapidement biodégradables (putrescibles), les moyennement biodégradables (papiers - cartons), les lentement dégradables (textiles et CNC) et les réfractaires (plastiques métaux verres et INC) dont la majorité a été récupérée avant la décharge finale.

Les fractions extra fines et fines, regroupées, si on se réfère au tableau 27 ou aux figures 25 et 26, représentent en moyenne 46 % en saison sèche contre 56 % en saison humide de la masse brute de déchets générés quotidiennement à Lomé.

Il est reconnu par tous les acteurs de la filière déchets que l'un des obstacles majeurs dans la collecte des OM à Lomé est la quantité très importante de sable dans les ordures, ce qui rend leur traitement plus que problématique. Ce pourcentage des fines <20mm est relativement variable dans les villes des PED (Tezanou et al., 2001) comme le montre le tableau 28.

Tableau 28 : Proportion des fines dans les déchets ménagers

(Aloueimine et al., 2006; Tezanou et al., 2001)

Villes	Antananarivo	Ouagadougou	Dakar	Yaoundé	Nouakchott	France
% Fines < 20 mm	68	74	26	21	16	15

Les déchets spéciaux sont en majorité constitués de piles usagées, de médicaments périmés ou de matériel médical.

Le taux de putrescibles a diminué en saisons humides, ce qui peut être dû à un changement d'alimentation et à un début de la dégradation des déchets dans les centres de transit en éléments fins au cours de cette saison humide. La diminution des extra fines en saison pluvieuse est due au faible taux de ramassage du sable dans les ménages et surtout à un lessivage des déchets aux centres de transit avant leur transport vers la décharge finale.

En l'absence de politique locale visant la réduction des flux plastiques qui proviennent en majorité des emballages et des sachets, la présence de cette fraction de déchets qui est devenue un fléau dans les PED et particulièrement à Lomé serait liée à la conception même de l'habitat dans ces quartiers pauvres et au mode de consommation des populations. Il s'agit de concessions non protégées et donc exposées au vent qui pourrait apporter du plastique d'emballage présent en grande quantité dans les rues. A noter que les pertes durant les opérations de tri représentaient en moyenne 2,3 % sur les quatre campagnes de caractérisation réalisées. Elles variaient, en fonction des conditions climatiques (vent) entre 1,2 et 3,5 %.

I.3. Caractérisation des déchets collectés dans les ménages

I.3.1. Type d'échantillon

Les ménages concernés sont ceux qui sont abonnés auprès de l'ONG ENPRO; 92 % des ménages sont satisfaits du service d'enlèvement des OM et seulement 15 % ont une connaissance partielle sur le compostage.

Le ramassage s'effectuant deux fois par semaine et souvent une fois surtout en saison humide, les ménages n'étaient pas disposés à stocker les déchets. Aussi le nombre des ménages a diminué; sur 40 ménages enquêtés, 33 ont participé à l'opération. En moyenne, 1400 kg de déchets en saison sèche et 1900 kg en saison humide ont été collectés, puis quartés pour conserver successivement un échantillon de 350 Kg et 475 Kg pour la caractérisation.

I.3.2. Tri par taille

La répartition par taille des ordures ménagères sortant directement des ménages (cf.

Figure 26) présente un résultat contraire à ceux qu'on a rencontrés à la décharge finale.

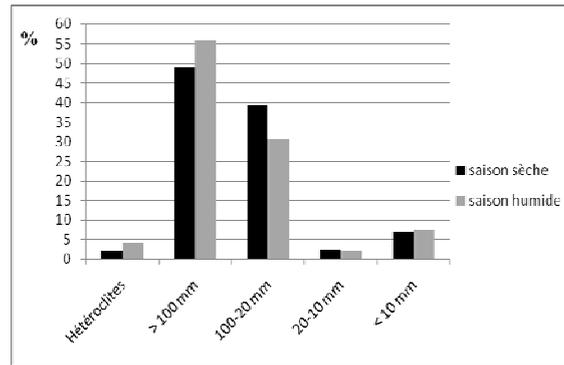


Figure 26a : Auprès des ménages

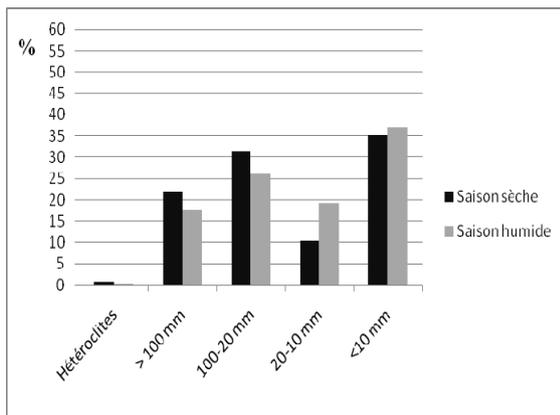


Figure 26b: Sur la décharge, année 1

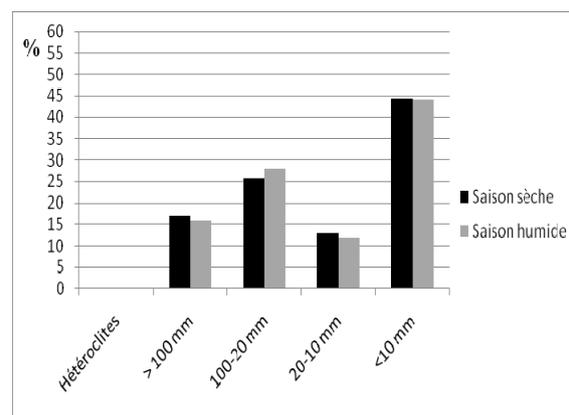


Figure 26c : Sur la décharge, année 2

Figure 26 : Répartition par taille des déchets prélevés

La fraction > 100 mm représente 50 à 55 % de la quantité totale des ordures ménagères, suivie de la fraction comprise entre 100 et 20 mm.

Contrairement à ce qu'on a obtenu à la décharge finale où la fraction <10 mm représente 35 % en moyenne en année 1 (cf. Figure 26b) et 44 en moyenne en année 2 (cf. Figure 26c), les déchets sortant des ménages ne contiennent que 7 % en moyenne de cette fraction. Aussi constate-t-on qu'au niveau de la décharge finale, le taux de la fraction >100 mm est plus élevé en saison sèche qu'en saison humide alors qu'au niveau des ménages c'est le taux de la saison humide qui est majoritaire pour cette fraction. Le taux de la fraction fine (20-10 mm) est autour de 2 % au niveau des ménages alors qu'il est de 10 à 19 % à la décharge finale.

I.3.3. Tri par catégorie

La figure 27 présente les résultats de deux campagnes de caractérisation physique des déchets échantillonnés auprès des ménages.

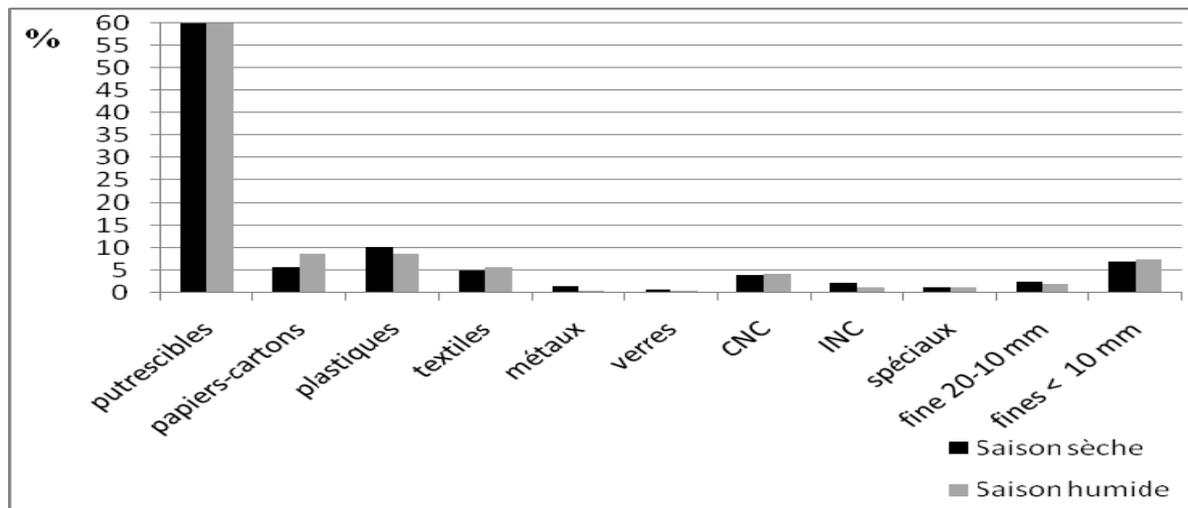


Figure 27 : Répartition des déchets par catégories

Sur la figure 27 on note que le taux des putrescibles est de 60 % en moyenne suivi des plastiques 8 – 10 %. Les matériaux recyclables ou récupérables comme les métaux, les papiers-cartons, les bouteilles (plastiques, verres) sont moins de 5 %. La proportion des CNC n'est pas négligeable car la majorité des ménages ont pour source d'énergie le bois et le charbon de bois. La différence la plus élevée est relevée au niveau des papiers-cartons et des plastiques. Ceci pourrait être fortement lié à la prise d'échantillon.

Les résultats de ces deux campagnes de caractérisation auprès des ménages permettent d'envisager la valorisation des déchets biodégradables par compostage dans les quartiers sur les centres de transit.

I.4. Composition moyenne des déchets solides de Lomé

Dans le but d'évaluer les résultats obtenus durant cette étude de caractérisation et de valider le traitement proposé qu'est le compostage dans les quartiers, on a cherché à représenter la moyenne des campagnes de caractérisation sur la décharge finale par saison sur la figure 28 avec une erreur standard en vue de la comparer à la campagne de caractérisation auprès des ménages (cf. figure 27). Il ressort de cette étude qu'une grande partie des déchets allant à la décharge finale est constituée de fraction < 20 mm. On constate que les autres catégories comme papiers-cartons, textiles, plastiques, CNC sont plus présentes sur la décharge finale. Ce qui est logique puisque les putrescibles diminuant, les pourcentages des autres fractions non biodégradables augmentent.

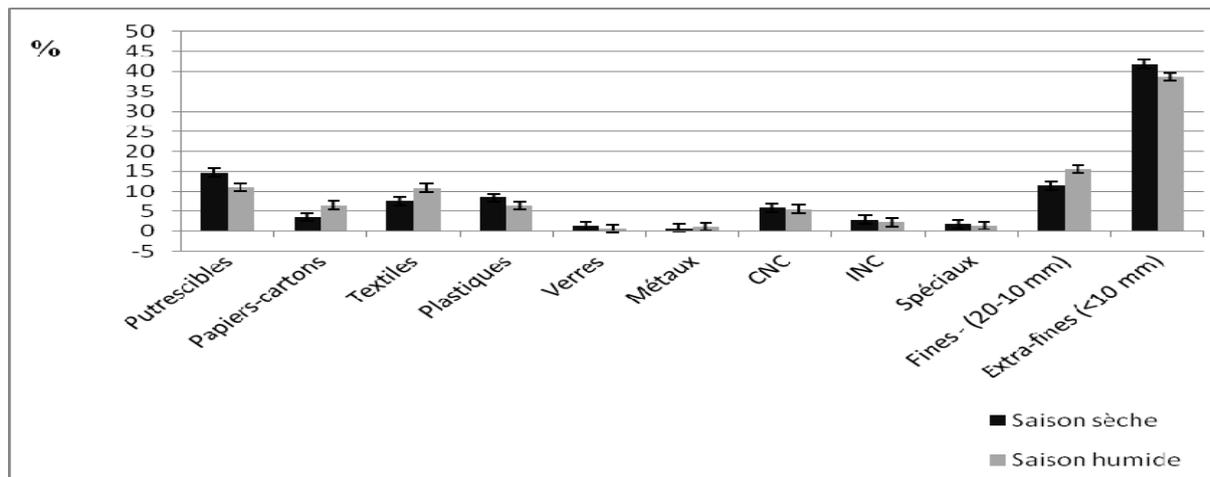


Figure 28 : Moyenne de la campagne de caractérisation physique à la décharge finale

Les plastiques, les papiers-cartons, les métaux et les verres présentent les différences les plus élevées. Bien qu'il y ait l'influence de la récupération de ces matériaux sur ces résultats, il est tout de même important de signaler que ces différences pourraient aussi être attribuées à l'échantillonnage (Morvan, 2008). Ces résultats peuvent servir de base pour toute politique de gestion, mais ils devront être affinés dans le futur et l'échantillonnage dans ce cas doit tenir compte de ce que l'on cherche car il n'y a pas de règle établie mais une démarche à suivre (Morvan, 2008) afin de minimiser les incertitudes.

Etant donné que la récupération de certains matériaux (métaux, bouteilles, cartons, bois) dans les déchets se poursuit tout au long du circuit des déchets même à la décharge finale où on continue par récupérer les vivres comme les pains et les fruits, il était intéressant d'évaluer quantitativement la contribution de ce mode de valorisation dans la réduction des flux à traiter par les collectivités locales.

I.5. Caractéristiques physico-chimiques

Pour envisager certaines filières de valorisation, quelques paramètres globaux ont été analysés. Il s'agit de la densité, de l'humidité, des teneurs en matière organique et en métaux lourds.

I.5.1. Paramètres physiques

I.5.1.1. Densité

La densité des OM a été déterminée pour les déchets arrivant à la décharge finale et pour les déchets sortant directement des ménages.

Plusieurs mesures ont été réalisées pour la détermination de la densité de ces déchets. Au niveau de la décharge finale, deux mesures ont été effectuées. La première mesure,

effectuée 10 fois, est réalisée à l'aide de seaux de 20 litres remplis puis pesés; la deuxième a consisté à utiliser le pont bascule pour peser les bennes tasseuses de volume connu. Au niveau des déchets sortant des ménages, 10 mesures sont effectuées à l'aide du seau de 20 litres. La moyenne des résultats obtenus à l'aide de seaux sont dans le tableau 29.

Tableau 29 : Densité en T/m^3 des ordures par pesée manuelle

		Déchets sur la décharge finale		Déchets produits par les ménages	
Catégories	Mesures	Déchets bruts	Putrescibles	Déchets bruts	Putrescibles
Saison sèche	Moyenne	0,58	0,51	0,55	0,54
	Ecart type	0,05	0,04	0,04	0,05
	Variance	0,01	0,01	0,01	0,02
Saison pluvieuse	Moyenne	0,67	0,57	0,60	0,65
	Ecart type	0,06	0,04	0,05	0,05
	Variance	0,01	0,01	0,01	0,01

Les valeurs obtenues pour 20 mesures au niveau du pont bascule (cf. Tableau 30) à l'entrée de la décharge finale ne concernent que les déchets bruts arrivant à cette décharge.

Tableau 30 : Densité en T/m^3 des ordures pesées au pont bascule

Mesures	Densité (T/m^3)	
	Saison sèche	Saison humide
Moyenne	0,44	0,64
Ecart type	0,16	0,15
Variance	0,03	0,04
Max	0,72	0,81
Min	0,19	0,46

Compte tenu de l'hétérogénéité des déchets, les mesures effectuées se sont révélées très variables en saison sèche mais plus homogènes en saison humide. La valeur moyenne obtenue par pont bascule est faible et en contradiction avec les valeurs obtenue par pesée en saison sèche. Elle reste dans la gamme des valeurs des PED (0,25-0,5) d'après Cointreau-Levine (1997). En saison humide on note une valeur de 0,67 et 0,64 par pesée au pont bascule.

I.5.1.2. Humidité

Déchets de la décharge

L'humidité est déterminée pour la majorité des 9 catégories de déchets en respectant la proportionnalité de celles-ci dans les différentes granulométries. Afin d'éviter l'éventuelle évaporation de l'eau, le séchage des échantillons a été effectué dans le laboratoire GTVD

aussitôt après le tri. L'analyse de l'humidité a été effectuée sur les déchets par catégorie pendant les différentes campagnes saisonnières. Les résultats n'ont pas mis en évidence de différences significatives en fonction de la saison. L'humidité moyenne des ordures ménagères de Lomé est très faible à cause des faibles teneurs en putrescibles en partie dégradés sur les centres de transit.

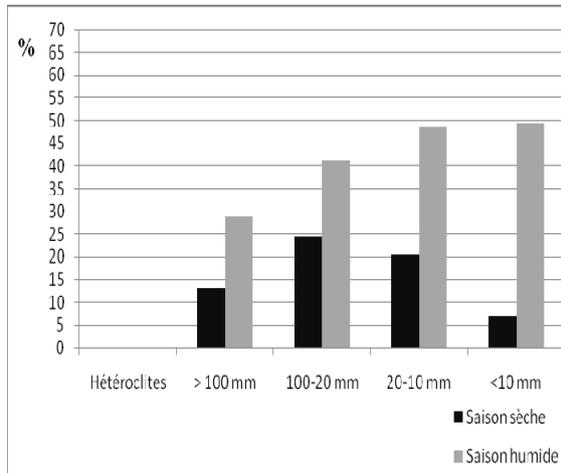


Figure 29a: Humidité année 1

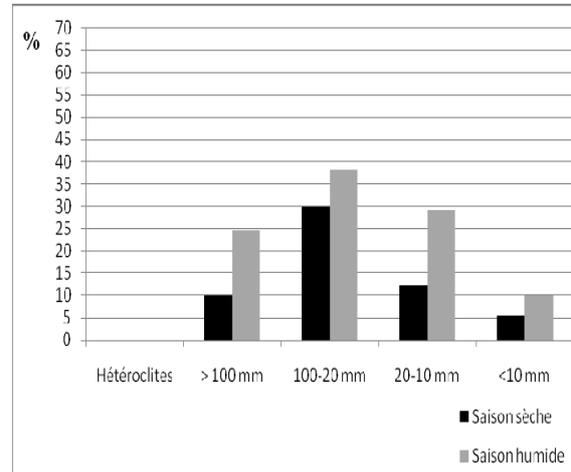


Figure 29b: Humidité année 2

Figure 29 : Humidité dans les différentes fractions des déchets sur la décharge

Lorsqu'on observe l'évolution de l'humidité sur les figures 29 on constate que les taux d'humidité des moyens et fines sont les plus élevés en saison sèche au cours de la première année alors qu'en saison pluvieuse de la même année, les fines et extra fines atteignent chacune près de 50 % d'humidité. Dans la deuxième année, l'humidité des extra fines est moins de 10 % en saison sèche comme pluvieuse. La fraction 100-20 mm n'a pas connu une variation significative de cette année 2 par rapport à l'année 1. Ceci est dû au fait que cette fraction est constituée majoritairement par des putrescibles provenant des ménages et que leur teneur influe sur le taux d'humidité de la fraction. Pour la fraction supérieure à 100 mm, c'est la composition des plastiques et leur teneur en humidité qui influence l'humidité de cette fraction. A tout ceci s'ajoutent les conditions météorologiques où la saison pluvieuse de l'année 1 a été longue ainsi que la saison sèche de l'année 2. Ceci est à l'origine du taux élevé d'humidité des fractions extra fines de l'année 1 étant donné qu'au cours de la première année les déchets passent plus de temps dans les centres de transit.

Les figures 30 et 31 représentent les teneurs en humidité des différentes catégories de la fraction >100 mm.

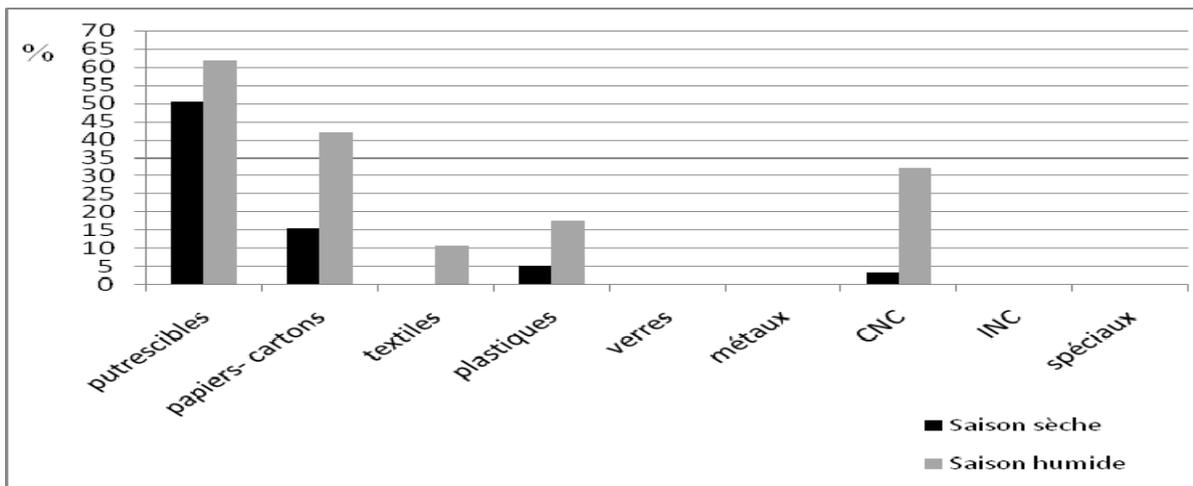


Figure 30 : Variations d'humidité par catégorie dans la fraction >100 mm de l'année 1

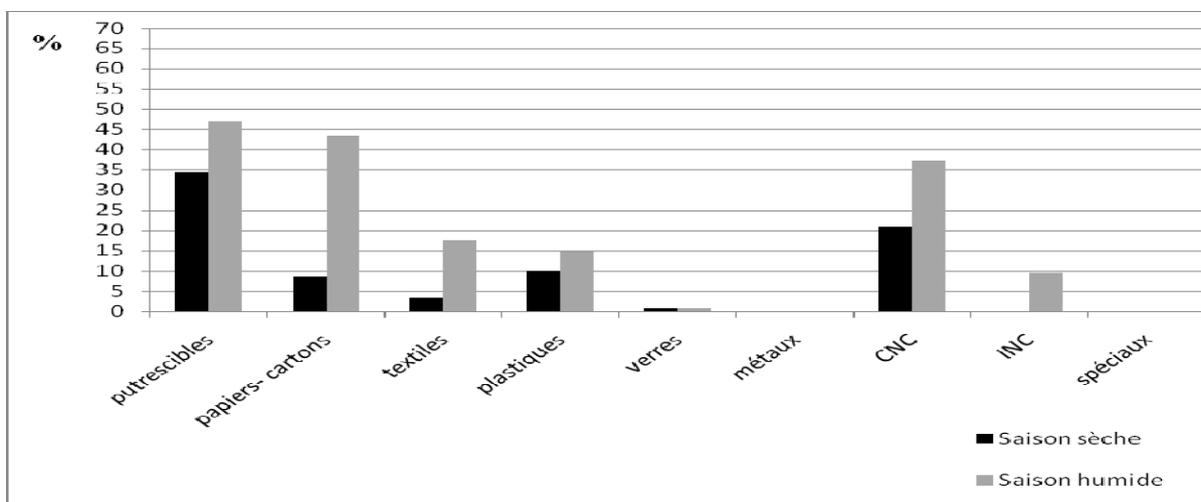


Figure 31 : Variations d'humidité par catégorie dans la fraction >100 mm de l'année 2

Bien que l'humidité des putrescibles reste élevée, soit entre 50 et 62 % de l'année 1 (cf. Figure 30), cette catégorie n'est pas la plus importante. Le taux d'humidité de la fraction > 100 mm est de 13,1 % en saison sèche contre 28,8 % en saison pluvieuse pour l'année 1 alors qu'elle est de 10,1 % en saison sèche contre 24,6 % en saison pluvieuse de l'année 2. Les taux d'humidité nuls des catégories comme les verres, les métaux, les INC et les spéciaux ont influencé l'humidité globale de la fraction. Les figures 32 et 33 présentent les teneurs en humidité de la fraction 100-20 mm.

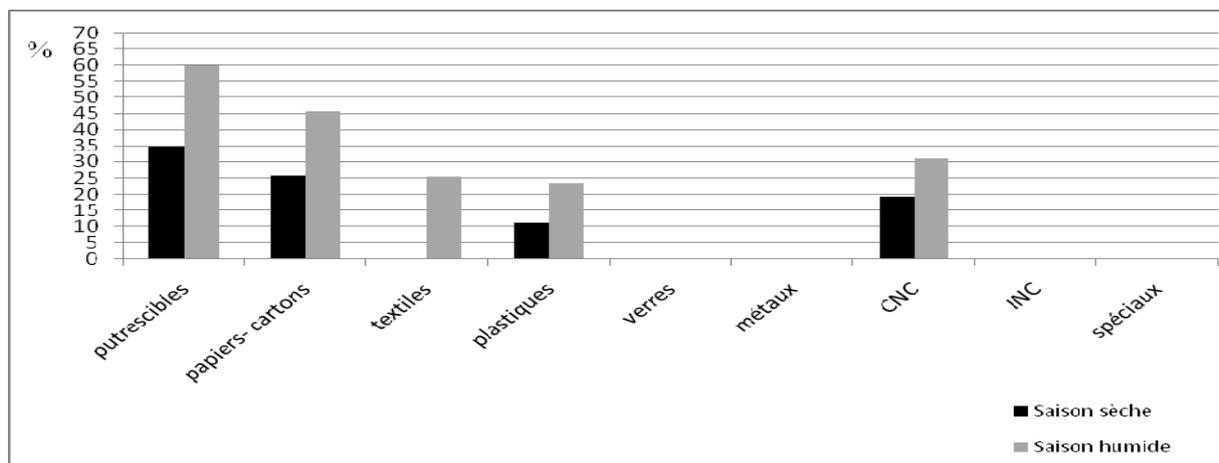


Figure 32 : Variations d'humidité par catégorie dans la fraction 100 -20 mm de l'année 1

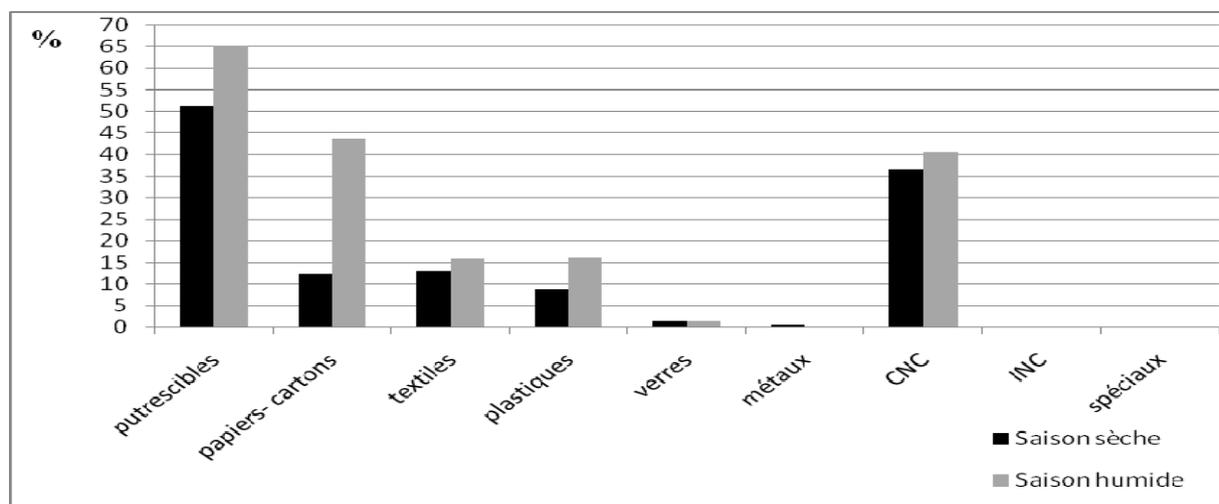


Figure 33 : Variations d'humidité par catégorie dans la fraction 100 -20 mm de l'année 2

Le taux d'humidité des saisons sèches pour l'année 1 et l'année 2 est respectivement de 35 % et de 50 % pour les putrescibles (figure 33 et 34). Ce taux d'humidité de l'année 2 serait probablement dû à la longueur de la période de la saison humide de l'année 1. On observe une différence de 5 % au cours des saisons pluvieuses. L'humidité des CNC est près de 40 % en année 2 alors qu'elle est de 20 à 30 % en année 1 bien que l'année 2 soit moins pluvieuse. Ceci est dû au fait qu'en année 2, les CNC sont majoritairement constitués de petits bois humides des arbres fruitiers. L'humidité globale pour cette fraction est 24,4 % en saison sèche contre 41,4 % en saison pluvieuse au cours de l'année 1 alors qu'elle est de 29,9 % en saison sèche contre 38,2 % en saison pluvieuse de l'année 2. Le tableau 31 résume les valeurs moyennes de l'humidité dans les différentes fractions de déchets.

Les fractions des fines (20-10 mm et extra-fines) ont une humidité de 49,3 % en saison humide contre 10 % en saison sèche (cf. tableau 31). L'humidité globale en année 1 des ordures ménagères arrivant sur la décharge finale est de 15,1 % en saison sèche contre 43,2 %

en saison pluvieuse.

En année 2 l'humidité des fines a diminué considérablement en saison pluvieuse, soit 14,1 % (cf. tableau 31). L'humidité globale des campagnes de l'année 2 est de 13,4 % en saison sèche contre 22,5 % en saison pluvieuse.

Tableau 31 : Valeurs moyennes de l'humidité dans les différentes fractions de déchets

Humidité moyenne	Saison sèche %				Saison humide %			
	Gros	Moyens	Fins	Global	Gros	Moyens	Fins	Global
Année 1	13,1	24,4	10	15,1	28,8	41,4	49,3	43,2
Année 2	10,1	29,9	7	13,3	24,6	38,2	14,1	22,5
Moyenne	11,6	27,4	8,5	14,2	26,7	39,8	31,7	32,8

Ce faible taux est dû à la faible quantité des putrescibles malgré leur teneur en eau élevée. La décomposition de la matière organique est inhibée en saisons sèches car la teneur en eau est en dessous de 20 % (Tiquia et al., 1998) et reste dans la gamme de l'optimum en saisons pluvieuses (Haug, 1993). La fraction des fines n'ayant pas la possibilité de retenir l'eau à cause de ces constituants (sable et gravier en majorité) crée un écart entre les deux saisons humides des deux années du projet.

En outre, à cause du faible taux d'humidité dans les déchets, la différence de poids entre déchets humides et déchets secs est relativement faible. Si l'on prend les déchets globalement, cette différence par rapport aux déchets des autres villes de la région doit sa justification, une fois de plus, à la faible teneur en putrescibles des ordures arrivant à la décharge finale de Lomé (10-21 %) comparées à celles d'autres pays (Abbase, 1996; Charnay, 2005; Guibbert, 1998; Henry et al., 2006; Tezanou et al., 2001). Cette fraction peut atteindre 80 % à 95 % de la masse des OM dans certains pays en raison de leur taux d'humidité très important. Il en va de même pour les catégories qui constituent en grande partie ces déchets (plastiques et fines). Ainsi, les déchets ménagers arrivant à la décharge finale de Lomé se caractérisent par une faible humidité, par rapport à la plupart des déchets des PED, à cause du faible taux de putrescibles qu'ils contiennent et un fort taux de sable qui n'a pas la capacité de retenir aussi longtemps l'eau dans ces espaces lacunaires.

Déchets des ménages

L'humidité est déterminée ici immédiatement après la caractérisation physique sur des échantillons de déchets reconstitués. Le tableau 32 présente les teneurs en humidité des déchets dans les ménages.

Tableau 32 : Valeurs moyennes de l'humidité des déchets dans les ménages

%H	Saison sèche	Saison Humide
Echantillon 1	60,8	69,9
Echantillon 2	65,7	73,6
Echantillon 3	61,3	68,7
Moyenne	60,6	70,7

Le taux d'humidité des ordures ménagères au niveau des ménages est très fort, 60,6 % en saison sèche et 70,7 % en saison pluvieuse. Bien que le taux d'humidité de chaque catégorie n'ait pas été déterminé dans cette partie, il est fort probable que ce taux soit lié à la forte teneur des putrescibles (Chitsan, 2008; de Guardia and, al., 2010).

I.5.2. Paramètres chimiques

I.5.2.1. Teneur en matière organique, MO%

Déchets de la décharge

Les mesures des teneurs en matière organique ont été réalisées sur les putrescibles, les papiers-cartons, les CNC, les fines, les extra-fines des déchets par la détermination de la perte au feu (ou solide volatil). Les analyses ont été triplées. Le tableau 33 présente les teneurs en matière organique des différentes catégories. On trouve une teneur élevée pour les putrescibles, les papiers-cartons et les CNC. Les fines en contiennent moins de 40 % et les extra fines moins de 10 % en année 1

Tableau 33 : Teneur en MO dans différentes catégories à la décharge finale

MO % (/ MS)		Putrescibles	Papiers-cartons	CNC	Putrescibles	Papiers-cartons	Fines	Extra-fines
Année	Saison	>100mm			100-20mm		20-10mm	<10mm
Année 1	Sèche	80,6	74,2	68,2	70	77,3	36,9	8,8
	Humide	79,5	73	65,7	71	67,3	35,6	9,5
Année 2	Sèche	75	88,9	78,6	83,3	77,9	33,3	8,1
	Humide	79	77,4	80,5	77	77,9	49,3	7,2

/ MS : par rapport à la matière sèche

Le taux de la MO est au dessus de 50 % pour toutes les catégories sauf pour les fines et les extra fines. La teneur en MO des putrescibles >100 mm a légèrement diminué en saison sèche de l'année 2 par rapport à l'année 1. Par contre, on note une légère augmentation des

putrescibles comprise entre 100 et 20 mm de l'année 2 par rapport à l'année 1 quelles que soient les saisons. On note aussi que cette teneur est supérieure en saison humide de l'année 2 par rapport à l'année 1 pour les fines, soit 35 % en année 1 contre 49 % en année 2. Par contre pour les extra fines, on note une teneur faible en année 2 par rapport à l'année 1 alors que cette fraction représente la part la plus importante en année 1 comme en année 2 d'après les résultats des caractérisations physiques.

D'une manière générale ces différents types de résultats sont proches, ce qui montre que la composition en matière organique des catégories étudiées est constante et ne dépend pas des conditions climatiques. Les petites variations observées correspondent à la nature des catégories de déchets qui sont contaminées par du sable. Malgré la forte teneur de la matière organique dans les putrescibles le taux moyen global de la matière organique des déchets susceptibles d'être valorisés par compostage et arrivant à la décharge finale est de 23-25 % en année 1 et 21-33 % en année 2 contre 59 % dans les déchets selon ADEME (1999), 85 % à l'île Maurice et 80% en Tanzanie (Mbulingwe et Kassenga, 2004; Mohee, 2002). Ce serait dû à la faible teneur de la matière organique dans les extra fines (compris entre 8-9 %) alors qu'elle constitue la fraction la plus importante en termes de quantité. Les extra fines contiennent probablement un fort pourcentage de minéral (sable, gravier).

Déchets des ménages

Le tableau 34 présente les teneurs en matière organique des ordures ménagères auprès des ménages, obtenues directement sur un échantillon de déchets reconstitués.

Tableau 34 : Teneur en MO des déchets dans les ménages

MO % (/ MS)	Saison sèche	Saison Humide
Echantillon 1	69,5	78,8
Echantillon 2	82,3	81,1
Echantillon 3	65	78,7
Moyenne	72	79,5

/ MS : par rapport à la matière sèche

La teneur en matière organique moyenne après collecte est entre 72-80 %. Le traitement des déchets à la source ou dans les quartiers diminuerait le fort taux de ramassage du minéral (46-56 % du gisement généré) des centres de transit vers la décharge finale. Ceci permettrait de proposer le compostage dans les quartiers ou à la limite dans les centres de transit comme le traitement privilégié.

I.5.2.2. Teneur en carbone organique total, COT, %

Elle est recherchée sur les fractions fines et extra fines et sur déchets reconstitués. Le tableau 35 présente le taux moyen en COT en année 2, en saison sèche et en saison pluvieuse.

Tableau 35 : Valeurs moyennes du COT des déchets

		COT (%)	
		Saison sèche	Saison humide
Décharge	Déchets reconstitués	10,3	10,6
	Fines	18,4	26,2
	Extra fines	3,1	3,9
Ménages	Déchets reconstitués	41,6	42,5

Cette faible teneur du COT dans les déchets reconstitués à la décharge est due à la forte proportion du sable. Par contre dans les ménages, la teneur en COT est de 42 % en moyenne pour les ordures ménagères.

I.5.2.3. Teneurs en métaux lourds, mg.kg⁻¹ MS

L'ordre suivant des métaux les plus fréquemment retrouvés dans les ordures ménagères à Lomé est le suivant : Fe>Pb>Ni>Cd. Le tableau 36 présente les teneurs en ces métaux dans la fraction extra fine. Il est toutefois important de signaler que cet ordre est établi sans les fractions réputées par leur charge en métaux lourds: les métaux, les déchets spéciaux et le verre en plus des combustibles non classés. Le fer reste le métal le plus présent dans les déchets en général avec des quantités de l'ordre du gramme par kilogramme de déchets secs (Flyhammar et Hankansson, 1999). Les valeurs des charges polluantes par métal se situent, pour la plupart d'entre elles, dans les gammes de valeurs trouvées pour les OM en général. L'interprétation de ces résultats nécessite la connaissance des conditions statistiques dans lesquelles ces gammes de valeurs ont été obtenues en particulier la composition initiale du déchet par catégorie. En effet, l'apport polluant en métaux lourds étant variable en fonction des catégories, ces résultats permettent d'identifier ceux des métaux présentant un fort potentiel de pollution pour l'environnement.

Tableau 36 : Teneurs en métaux lourds de la fraction fine

mg.kg ⁻¹ MS	Fe	Pb	Ni	Cd
Fines <10 mm	2105	516	35	3

I.6. Quantités d'OM générées

En tenant compte des résultats des différentes campagnes de caractérisation, il était intéressant de projeter dans le futur l'évolution de la situation des déchets à Lomé. L'établissement de ces projections de données doit être un outil d'aide à la décision.

I.6.1. Quantités de déchets générés par grands types de filières

La répartition des déchets en fonction de leur éventuel mode de gestion est essentielle pour le choix et la mise en place d'une filière d'élimination (cf. tableau 37). Les données du tableau 37 reposent sur l'hypothèse de la composition obtenue des déchets de la décharge.

Tableau 37 : Distribution des ordures ménagères par mode de gestion

Types	Valorisables		Compostables		Combustibles		Stockables	
	sèche	humide	sèche	humide	sèche	humide	sèche	humide
Catégories	Putrescibles, Papiers cartons, Plastiques, Verres, Métaux		Putrescibles, Papiers-cartons		Putrescibles, Papiers-cartons, Textiles, Plastiques, CNC		Toutes les catégories peuvent être stockées, exceptée les spéciaux (<1%)	
Composition %	28-39	30-32	16-26	15-25	35-48	39-40	98-99	99
Flux*, T/J	234-236	251-268	134-218	126-209	293-402	326-335	820-829	829

*Production par habitant: 0,91kg/hab/j et en tenant compte du fait que les déchets de 919.609 habitants arrivent journalièrement à la décharge finale.

I.6.1.1. Déchets valorisables

Le développement de filières de valorisation des déchets peut diminuer les quantités à gérer par la communauté urbaine de Lomé de 28-39 % en saisons sèches et 30-32 % en saisons humides de leur masse totale (cf. tableau 37). La valorisation des putrescibles en compost, du papier-cartons en brique sont des voies possibles. Bien qu'une partie soit souvent récupérée pour le fumage des poissons, les papiers-cartons sont souvent brûlés ou enfouis sur les décharges, alors que les besoins en énergie de chauffe restent importants. L'objectif serait de transformer ces papiers cartons, après macération, moulage et séchage, en brique, servant de combustibles pour les ménagères et les fours pour la cuisson des briques

de terre cuite. La réutilisation du verre non cassé est pratiquée aujourd'hui chez les populations. Il peut être renforcé grâce à des campagnes de sensibilisation et à la promotion de débouchés tel que la réutilisation des emballages (bouteilles de jus, boîtes de conserves, etc.).

Quant au recyclage du plastique, c'est plus aléatoire. La solution pour réduire sa pollution serait d'interdire leur usage, ce qui s'avère toujours difficile, voire impossible, compte tenu des intérêts économiques en jeu localement. La stratégie proposée est d'inviter les utilisateurs à ne plus jeter ces déchets dans la nature. Cela passe par une sensibilisation, bien sur, au respect de l'environnement, mais plus sûrement en donnant à ces sacs une valeur marchande en les valorisant en produits secondaires. Des études ont permis de démontrer qu'il était possible de les transformer, par fusion, avec adjonction de sable ou non, en divers produits d'excellente qualité, comme des panneaux de signalisation, des pavés de sol, des dalles de caniveaux et de latrines. Les autres débouchés comme la fabrication de cordes, de tapis, de produits obtenus par tressage, de jouets etc. ont été abandonnés, leur rapport qualité/prix n'ayant pas été jugé satisfaisant. On peut aussi les incinérer et utiliser l'énergie de combustion qui en résulte pour faire tourner des moteurs ou produire de l'électricité.

Enfin, l'expérience montre qu'avant de s'engager dans ce type de filières de valorisation, il est bon de s'assurer qu'il y a un marché rémunérateur et que les consommateurs potentiels s'approprieront le produit. Dans l'état actuel des choses et dans un contexte climatique comme celui de Lomé, la valorisation du plastique de type PE en des nouveaux sacs et en pavés avec récupération et traitement des gaz de combustion peut être une solution pérenne.

I.6.1.2. Déchets compostables

La fraction compostable représente 16-26 % en saisons sèches et 15-25 % en saisons humides de la quantité totale des déchets (cf. tableau 37) arrivant à la décharge finale. La production journalière est comprise entre 134 et 218 tonnes en saisons sèches et entre 126 et 209 tonnes en saisons humides.

Le développement de la filière de valorisation des déchets bruts par compostage sur le site de la décharge finale est problématique en raison du fort pourcentage de minéral (sable, gravier).

I.6.1.3. Déchets combustibles

Les composants combustibles représentent 35-48 % en saison sèche et 39-40 % en saison humide des ordures produites à Lomé. En dépit de l'important taux de plastiques, le

fort taux de sable constitue un inconvénient pour l'incinération éventuelle des déchets arrivant à la décharge finale, sans oublier le problème de l'élimination des déchets ultimes (mâchefers et cendres).

En outre, le taux d'humidité des déchets limite ce mode de gestion. De même, les coûts inhérents à ce mode de traitement, les exigences relatives à la préservation de la santé publique et de l'environnement sont d'autant de facteurs limitant le choix de l'incinération comme technique de traitement des déchets à Lomé.

I.6.1.4. Déchets stockables

Pratiquement tous les déchets peuvent être stockés soit 99 % de la quantité totale car il est simple, technologiquement et l'investissement est faible. Mais la mise en décharge si elle est largement pratiquée dans de nombreuses villes des PED, constitue un grand risque de pollution de l'environnement, auquel s'ajoutent en dehors des problèmes de conception, des difficultés d'exploitation des sites et de contrôle de nombreux paramètres, composition des déchets entrants, flux de lixiviat et de biogaz etc.

I.6.2. Quantités maximales de déchets générés par filières possibles

La quantité de déchets putrescibles produit dans les ménages tous les jours est considérable. On trouve que cette production est de 502 tonnes environ par jour en saison sèche et 519 tonnes par jour en saison humide (cf. tableau 38). La production des papiers-cartons par jour est de 47 tonnes en saison sèche et 74 tonnes en saison humide. Celle des plastiques est de 84 tonnes en saison sèche et 72 tonnes en saison humide. La production des fines est autour de 80 tonnes par jour. La production retrouvée, des métaux, des verres, des plastiques et même des papiers-cartons, ne reflète pas la réalité car les ménages constituent la première source de récupération des matériaux recyclables.

Tableau 38 : Flux par types de déchets produits chez les ménages

Saison	Compostables		Recyclables			Stockables	
	T/J		T/J			T/J	
	Putrescibles	Papiers-cartons	Plastiques	Métaux	Verres	CNC, INC, textiles, spéciaux,	Fines <20 mm
sèche	502	47	84	13	7	103	80
humide	504	74	72	4	3	100	80

Au niveau de la décharge finale (cf. tableau 39), on retrouve une inversion de la situation liée à une augmentation de la quantité des fines par jour, 388-479 tonnes saison

sèche et 469-482 tonnes en saison humide. La quantité des putrescibles produits par jour n'est que de 111-182 tonnes en saison sèche et 99-121 tonnes en saison humide si l'on se réfère à la production dans les ménages.

Tableau 39 : Flux par types de déchets sur la décharge

Saison	Compostables		Recyclables			Stockables	
	T/J		T/J			T/J	
	Putrescibles	Papiers - cartons	Plastiques	Métaux	Verres	CNC, INC, textiles, spéciaux,	Fines <20 mm
Sèche	111-182	23-37	81-95	5-13	8	121-123	388-479
Humide	99-121	23-85	54-119	5-8	3-5	98-103	469-482

La production des plastiques est plus élevée à la décharge finale. Ceci est dû au mode de consommation et au coût très faible de ces sachets ce qui entraîne leur abandon.

I.7. Le compostage des déchets de Lomé : quelles filières possibles ?

Après leur collecte (en porte-à-porte) par les ONG, aujourd'hui les déchets sont acheminés vers un site de transit d'où ils sont transférés par les services techniques communaux plus ou moins rapidement. On peut envisager plusieurs voies possibles d'élimination en tenant compte des projections futures :

- la récupération de certaines catégories de déchets (plastiques, métaux, verres) par les récupérateurs du secteur informel ;
- la valorisation par compostage des bio-déchets sous la responsabilité des autorités municipales ou des ONG dans les quartiers ou du moins sur les sites de transit.

On peut proposer plusieurs schémas possibles de valorisation des déchets produits dans les quartiers de Lomé. La figure 34 présente les différents scénarii du type de compostage avec récupération des matériaux: soit un compostage centralisé formel ou informel organisé sur la décharge finale, soit un compostage décentralisé informel organisé sur les centres de transit. Les centres de compostage 1 et 2 (cf. figure 34) sont considérés comme les centres décentralisés. La particularité du centre 2 est qu'il a la possibilité de regrouper la matière première d'autres centres de transit. Le centre de compostage 3, par rapport à sa position, sur la décharge finale est considéré comme centralisé. Dans tous les cas, il y a la possibilité de récupérer les matériaux recyclables mais avec une quantité plus faible au niveau du centre 3.

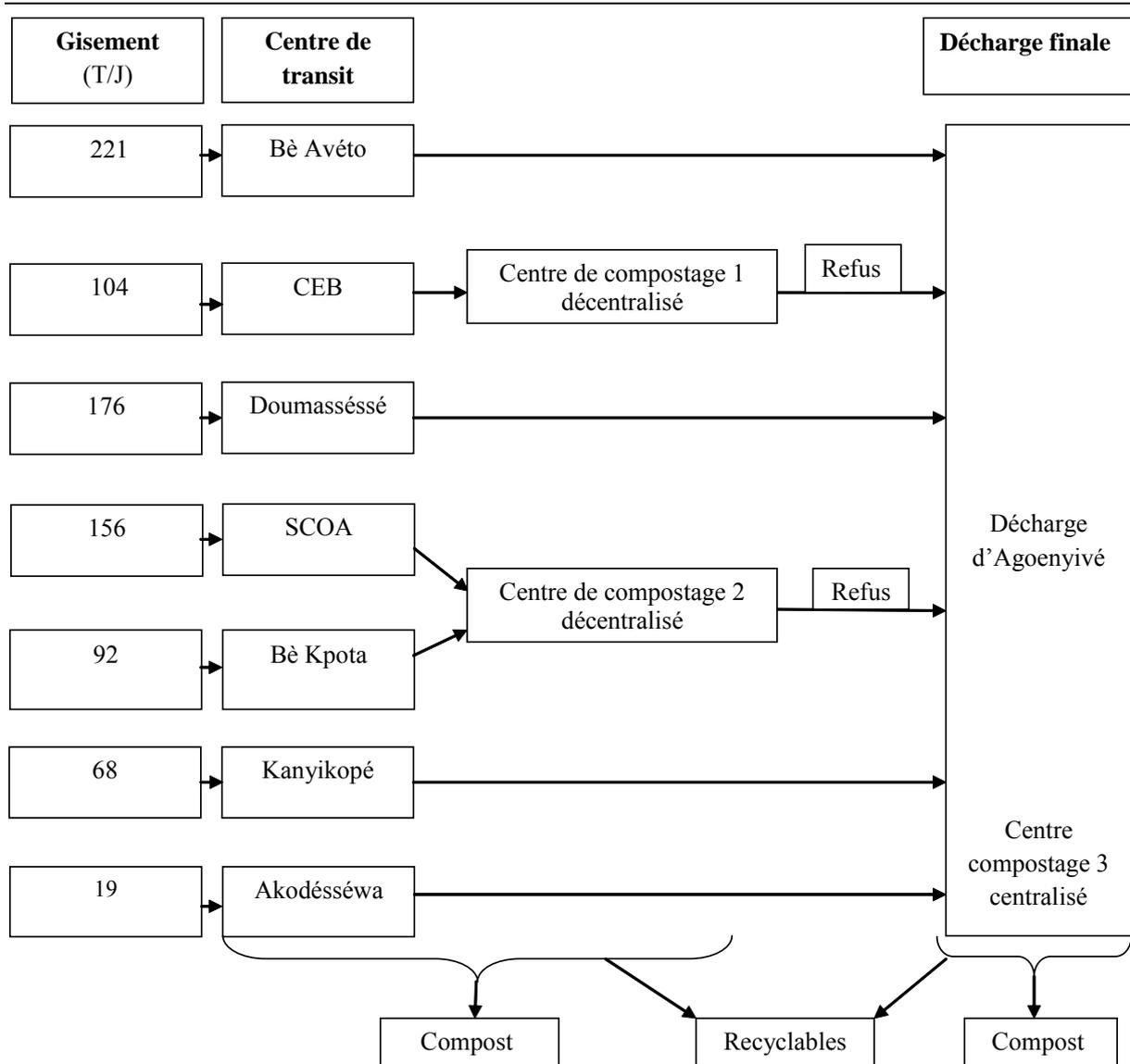


Figure 34 : Choix du type de compostage

Conclusion

Dans le contexte des PED, l'un des problèmes majeurs relatifs à la gestion des ordures ménagères, qui constituent 90 % environ des DUS, est le manque cruel de données de caractérisation de ces rejets. Les données ainsi obtenues soit au niveau des décharges finales soit au niveau des ménages représentent la base même de toute politique de gestion. Ce sont ces données de référence à partir desquelles les projections de l'évolution des déchets peuvent être établies car elles reflètent la réalité des quantités générées et potentiellement évacuées et enfouies. Par ailleurs, le faible coût pour la réalisation des campagnes de caractérisation est un atout important pour les collectivités locales, qui peuvent réactualiser périodiquement les résultats en fonction des changements dans le niveau de vie et le mode de consommation des populations.

A Lomé le gisement total d'ordures ménagères est d'environ 836 tonnes par jour, d'une densité moyenne de $0,54 \text{ T.m}^{-3}$; ces ordures sont composées de 9 catégories, les fines dominant dans les déchets arrivant à la décharge finale (46-56 % du poids total humide) mais au niveau des déchets sortant des ménages, le taux des putrescibles prédominent, soit 70-80 % du poids total humide. L'humidité minimale des déchets biodégradables et le taux de la matière organique de cette fraction (80 %) sont des atouts pour le compostage.

Chapitre II : Eude de la pré-collecte des déchets ménagers

Un point fondamental, lorsqu'on désire mettre en place une structure de traitement des déchets est d'être sûr de la quantité que pourra rejoindre le centre de traitement, et par conséquent il est indispensable de rendre pérenne la pré-collecte des déchets et le cas échéant de l'optimiser. Dans ce but il faut utiliser les indicateurs les plus pertinents pour évaluer la pré-collecte. C'est l'objet de ce chapitre. Jusqu'en mars 2010, les ONG chargées de la pré-collecte à Lomé pouvaient collecter dans tous les quartiers. Mais à partir de cette date la collecte est effectuée par zone et chaque zone est sous la responsabilité d'une ONG qui assure la pré-collecte. Ainsi les ONG peuvent augmenter le nombre des abonnés tout en éradiquant tous les dépotoirs sauvages dans leur zone. Ce chapitre évalue l'efficacité de pré-collecte dans la zone d'Agbalépédogan, un des quartiers de Lomé et compare les résultats avec d'autres données internationales.

II.1. Quartiers couverts par la pré-collecte

Au total la pré-collecte est assurée dans 35 quartiers dont la liste est présentée dans le tableau 40. D'autres quartiers reçoivent des services spécifiques directs de la part des services techniques communaux comme la « Résidence du Benin » et les quartiers administratifs. Les quartiers sont regroupés autour des centres de transit qui sont au nombre de sept. Les ménages dans les quartiers reculés trouvant toujours d'espace sont réticents à l'abonnement et peu de ménages sont couverts dans ces zones. Plusieurs ONG dont la liste est présentée dans le tableau 40, interviennent pour la pré collecte dans d'autres quartiers non cités officiellement. C'est le cas par exemple du quartier Avédzi où intervient aussi l'ONG ENPRO. La population dans le quartier Agbalépédogan est estimée à 30187 habitants avec 6037 ménages. Les ordures collectées dans cette zone sous la responsabilité d'ENPRO transitent par le centre de CEB avant d'atteindre la décharge finale d'Agoenyivé. ENPRO possède aujourd'hui un peu plus de trois milles abonnés soit à peu près 50 % des ménages dans la zone d'Agbalépédogan en plus des services qu'elle effectue dans le quartier Avédzi. D'une façon globale, dans la ville de Lomé, les redevances varient entre 500 FCFA et 15000 FCFA (0,8 € à 23 €) par mois et sont fonction du nombre de personnes par ménage et aussi du niveau de vie illustré par la taille de l'habitation.

Tableau 40 : Présentation des quartiers de Lomé ainsi que des ONG chargées de la pré-collecte et des centres de transit

N°	Quartiers couverts	ONG	Population estimée	Nombre de ménages	Centres de transit
1	Totsi	AME	32943	6589	CEB
2	Agbalépédogan	ENPRO	30187	6037	CEB
3	Aflao Gakli	AJEPE	25168	5034	CEB
4	Soviépé, Avenou Batomé	IMAGE	25730	5146	CEB
5	Bè Klikamé, Akossombo	JACE	18016	3603	Doumasséssé
6	Doumasséssé	JDQ Villeneuve	29051	5810	Doumasséssé
7	Abové, Cassablanca, Tokoin Solidarité	OR DUR	29735	5947	Doumasséssé
8	Dogbéavou, Gbonvié	EGEM Lomé	31022	6204	Doumasséssé
9	Saint Joseph, Tokoin Lycée, N'tifafakomé	ITDH	25033	5007	Doumasséssé
10	Tokoin Hôpital, Tokoin Ouest	Ets 7	28463	5693	Doumasséssé
11	Tokoin Tamé, Tokoin Forever	WELCOME	18063	3613	SCOA
12	Tokoin Wuiti	FIS	25195	4839	SCOA
13	Hédzranawoe 1	INCH ALLAH	30668	6134	SCOA
14	Hédzranawoe 2	FIS	30669	6134	SCOA
15	Tokoin N'kafu	WAZO	24918	4984	SCOA
16	Attiégou	PVP	21300	4300	SCOA
17	Kélégougan	Ets E2D	22005	4500	SCOA
18	Bè Kpota 1	AJROSE	26193	5238	Bè Kpota
19	Bè Kpota 2	JED	26194	5238	Bè Kpota
20	Amfamé 1	LE REFLET	23995	4799	Bè Kpota
21	Amfamé 2	ALOVE	25000	5000	Bè Kpota
22	Adakpamé, Akodésséwa Kponou	ALOVE	31951	6390	Kanyikopé
23	Akodésséwa Kpota	Ets AJES	18039	3608	Kanyikopé
24	Kanyikopé	Ets ENAV TOGO	25167	5033	Kanyikopé
25	Zone portuaire, Akodésséwa	ENTRECOBA	21174	4235	Akodésséwa
26	Bè Hédzé, Wété	LE REFLET	38685	7737	Bè Avéto
27	Gbényédzi	WAZO	25330	5066	Bè Avéto
28	Ablogamé	CODEGAB	15238	3048	Bè Avéto
29	Bè	AROMSED	25244	5049	Bè Avéto
30	Bè Ahligo, Kotokou Kondji, Anto Nétimé	INCH ALLAH	25886	5177	Bè Avéto
31	Souza Nétimé	AMEKOS	36206	7241	Bè Avéto
32	Bè Apéyéme, Bassadji	Ets Vis-à-vis	21376	4333	Bè Avéto
33	Lomnava, Kpéhénou	Le GEANT	24179	4836	Bè Avéto
34	Amoutivé, Doulassamé	PREL	30369	6074	Bè Avéto
35	Tokoin Gbadago, Tokoin Elavagno	GOD'S POWER	32217	6443	Doumasséssé
	Total		919609	184119	

Le taux d'abonnement est compris entre 30% et 90% des ménages dans les zones.

II.2. Evaluation de la pré-collecte dans les quartiers de Lomé

II.2.1 Quartier d'Agbalépédogan

Dans ce quartier d'Agbalépédogan, les non abonnés représentent environ 47 % de la population totale, par conséquent environ 13 tonnes de déchets non collectés traînent par jour dans ce quartier aux abords des rues, dans les bas fonds ou ailleurs

Il était nécessaire de définir un certains nombre d'indicateur de performance de la pré collecte qui puissent servir pour évaluer son efficacité et éventuellement servir d'outils pour l'améliorer.

- Taux d'abonnement, TA. $TA \% = \frac{A}{H} . 100$
- Taux de collecte, TC. $TC \% = \frac{C}{P_H} . 100$
- Rendement de collecte, RC. $RC \% = \frac{C}{P_A} . 100$
- Coût de collecte :
 - ✓ ONG : CFA (€) / tonne
 - ✓ Population : CFA (€) / mois
- Ratio de production = R= 0,91 kg/habt/j

$$P_A = P_H \cdot \frac{TA}{100} \text{ en kg/J}$$

$$P_H = H \cdot R \text{ en kg/J}$$

A : nombre d'abonnés ; H : nombre d'habitants ; C : quantité de déchets collectés ; P_H : quantité de déchets produits ; P_A : quantité de déchets produits par les abonnés.

Tableau 41 : Indicateurs de pré-collecte dans le quartier Agbalépédogan

	Population		Abonnés de l'ONG	
Nombre d'habitants	30.187,-		16.126,-	
Nombre de ménages	6.037,-		3.225,-	
Ordures ménagères	Ratio, kg/hab/j	0,91	Taux d'abonnement	53,42 %
	Quantités produites, kg/j	27.470,-	Quantités produites, kg/j	14.673,-
	Quantité collectée, kg/j	12.000,-	Quantités collectées kg/j	12.000,-
	Taux de collecte	44 %	Rendement de collecte	82 %
Foyer	Personnes par ménage	5	Personnes par ménage	5
Salaire minimum	€/ménage/mois	43	€/ménage/mois	43
	CFA/ménage/mois	28.000,-	CFA/ménage/mois	28.000,-
Redevance (moyenne) d'abonnement			€/ménage/mois	3
			CFA/ménage/mois	1.900,-
Coût de collecte	€/mois	17.512,-	€/tonne	27
	CFA/mois	11.470.300,-	CFA/tonne	17.554,-

La collecte est assurée deux fois par semaine, en porte à porte, pour tous les ménages

abonnés. Le taux d'abonnement est de 53,4 % (cf. Tableau 41). Dans la pratique les deux minis tracteurs effectuent au total 6 voyages par jour dans le compte de l'ONG ENPRO. Or un mini tracteur porte une charge d'environ 2 tonnes soit au total 12 tonnes dans une journée. Le rendement de la collecte est égal au rapport de la quantité collectée sur la quantité produite par les abonnés. On trouve un rendement égal 82 %. Le taux de collecte est le rapport de la quantité collectée sur la quantité produite par le quartier. Il n'est que de 44 %. Le coût de collecte est la somme liée à la quantité par tonne collectée dans le mois, soit réellement collectée s'il s'agit des abonnés, soit produit s'il s'agit du quartier. Les redevances des ménages pour le service ne sont pas uniformes. Au niveau de l'ONG ENPRO, les redevances varient entre 1500 CFA (2 €) et 10 000 CFA (15 €), variables en fonction du niveau de vie des ménages. La valeur donnée dans le tableau 40 est une moyenne. On peut noter que l'ONG a des contrats de 500 FCFA (0,8 €) et des cas sociaux où le service est effectué gratuitement. Si l'on prend le nombre d'abonnés, on retrouve une recette de 6 127 500 FCFA (9355 €). Les dépenses (cf. Tableau 42) ont permis de déterminer les frais réels de la collecte exprimés en CFA (€) par tonne. Les frais de collecte équivalent à la somme liée à la quantité par tonne produit par les abonnés qui devrait être collectée.

Tableau 42 : Evaluation des frais de collecte de l'ONG ENPRO

		€	CFA
Gains mensuels	Abonnements	9.355,-	6.127.500,-
Dépenses	Salaires	3.422,-	2.241.300,-
	Maintenance	899	588.745,-
	Crédit	1.450,-	950.000,-
	Carburant	1.524,-	998.125,-
	Autres	1.202,-	787.500,-
	Total	8.497,-	5.565.670,-
	Frais de collecte	/Tonne collectée	24

La différence entre le coût de collecte et les frais de collecte est de 3 € la tonne. Aucune perte n'est enregistrée au cours de cette année pour la pré- collecte, au contraire un bénéfice de 3 € par tonne peut être dégagée.

II.2.2. Comparaison avec d'autres quartiers

Le coût de service de la collecte n'est pas le même dans tous les quartiers. Le tableau 43 compare le service rendu par trois ONG. Selon le mode d'habitation, les quartiers Tokoin hôpital et Tokoin ouest se situent en pleine ville et donc présentent un niveau de vie plus haut que Agbalépédogan et de Soviépe.-Avenou-Batomé Le taux d'abonnement ainsi que le coût d'enlèvement suivent cette croissance. Mais le service rendu aux abonnés est fort au niveau de tous les ONG.

Tableau 43 : Etude comparée du service de trois ONG

	Agbalépédogan	Tokoin Hôpital et Ouest	Soviepé, Avenou , Batomé
ONG	ENPRO	SEPT	IMAGE
Population	30.187,-	28.463,-	25.730,-
Ménages	6.037,-	5.693,-	5.146,-
Ménages abonnés	3225	4.554	1.492,-
Déchets produits par les abonnés	14.673,-	20.721,-	6.789,-
Déchets collectés, Kg/j	12.000,-	19.477,-	5.431,-
Taux d'abonnement, %	53,42	80	29
Rendement de collecte,%	82	94	80
Redevance, €/ménage/mois	3€	3,2 €	2 €
CFA/ménage/mois	1.900,- CFA	2.100,-CFA	1.200,- FCFA

II.2.3. Comparaison avec d'autres données internationales

La collecte dans tous les pays suit un schéma spécifique mais reste proche pour les PED. Le tableau 44 compare les données d'autres PED à celle obtenus à Lomé dans le quartier d'Agbalépédogan

Tableau 44 : Etude comparative de la qualité du service

	Agbalépédogan Lomé (Togo)	Algérie*	Yogyakarta** (Indonésie)	Dhaka** (Bangladesh)	Asmara** (Erytrée)
Type de collecte	Porte à porte	Porte à porte	Porte à porte	Porte à porte	Porte à porte
Population abonnés	16.126,-	-	7.800,-	-	-
Quantité (T) collecté/jour	16	-	-	16,6	18
Charge horaire (T/h/éboueur)	0,4	2,25	-	-	-
Nombre d'heure de travail (h)	5	2	-	-	-
Nombre de ménage desservi /J	750	-	1.570,-	-	-

*MATET, 2008 ; ** Zurbrugg et al., 2005

Le nombre d'abonnés à Agbalépédogan représente un peu plus du double comparé à

celui de Yogyakarta. Le tonnage collecté journalièrement reste proche de celui de Dhaka et Asmatra. La charge horaire comparée à la moyenne en Algérie est très faible bien que le nombre d'heure de travail à Agbalépédogan soit le double de celui d'Algérie ; la raison en est le type de véhicules, des bennes tasseuses automatisées en Algérie, et des remorques tractées certes mais remplies manuellement pour Lomé. Le service à Agbalépédogan pourrait être amélioré en augmentant la charge horaire, en utilisant des bennes tasseuses, mais moins utiles dans les quartiers difficiles d'accès. Dans l'immédiat il serait plus judicieux d'augmenter le nombre de ménages abonnés, ce qui passe par l'information et par la sensibilisation des usagers et par l'éradication des dépotoirs sauvage dans le quartier.

Chapitre III: Etude expérimentale d'optimisation du procédé de compostage

Le compostage des ordures ménagères est progressivement devenu une réalité dans les PED. Dans la plupart de ces pays comme à Madagascar, au Cameroun, en Inde et au Bangladesh (Zubugg, 2005), cette filière de valorisation s'est développée de façon artisanale répondant aux conditions d'installation de ladite filière comme le préconisent plusieurs études ces dernières années. Des associations de quartiers, des groupes de jeunes, des municipalités ont expérimenté cette méthode avec succès. Ceci a permis d'assainir des zones urbaines tout en procurant du travail à plusieurs personnes pour le traitement des déchets mais aussi pour développer l'agriculture.

Au Togo, aucune donnée n'existait sur la quantité et la qualité des déchets encore moins sur les ordures ménagères. La connaissance des substrats à composter est l'un des paramètres essentiels pour assurer l'obtention d'un compost sain et intéressant d'un point de vue agronomique. La première partie du projet a révélé un certain nombre de points surtout en terme de quantité et de qualité des putrescibles et des fines par rapport aux saisons et aux années et à différents endroits de la chaîne de production jusqu'à la mise en décharge finale. La matière organique putrescible contient en proportions très variables et sous des formes plus ou moins accessibles aux microorganismes aussi bien des produits facilement putrescibles tels que les sucres, les graisses, les protéines, etc., et d'autres dont la décomposition biologique est beaucoup plus lente comme l'hémicellulose, la cellulose, la lignine, etc. et ces matières peuvent être d'origine animale ou végétale. Suivant leurs origines, les composts peuvent avoir différentes compositions et donc différentes qualités fertilisantes. C'est pourquoi, vu les résultats des campagnes de caractérisation physique, quatre types de compost ont été élaborés. Les principaux paramètres indicateurs du bon déroulement du compostage ainsi que ceux déterminant la maturité et la compatibilité avec l'environnement ont été également étudiés.

Les déchets compostés dans les cuves A et B sont des matières putrescibles collectées dans les ménages avec ajout des matières d'origine minérale comme le fumier et le phosphate naturel dans la cuve B. Les déchets compostés en andains sont des déchets des centres de transit. Le tri des hétéroclites n'a pas été déterminé dans ces andains. L'aération dans tous les processus est effectuée à l'air libre par retournement. La durée de fermentation (phase mésophile et thermophile) varie en fonction du volume du tas et de sa composition. La durée de maturation (phase de refroidissement et de stabilisation de la matière organique est de 8 semaines pour le compostage en cuve et de 12 semaines pour le compostage en andains (cf. Tableau 45).

Tableau 45 : Schéma de la filière expérimental de compostage

Type	Tri		Fermentation semaines	Maturation semaines	Affinage	Observations
	Substrats	Recyclable				
Cuve A	Putrescibles (120 kg)	Ferraille, plastiques, verres	4	8	□ 10 mm	3 arrosages et 3 retournements
Cuve B	Putrescibles + Fumier + Phosphate naturel (152 kg)	Ferraille, plastiques, verres	4	8	□ 10 mm	2 arrosages et 3 retournements
Andain C	Déchets bruts triés (1650 kg)	Ferraille, plastiques, verres	8	12	□ 10 mm	4 arrosages et 5 retournements
Andain D	Déchets bruts triés (1420 kg)	Ferraille, plastiques, verres	8	12	□ 10 mm	3 arrosages et 6 retournements

III.1. Suivi du procédé de compostage

III.1.1. Humidité, H%

L'eau est nécessaire aux microorganismes et sa teneur ainsi que la nature de sa liaison avec les constituants du compost conditionnent la capacité de démarrage du processus de compostage et la création d'un biotope favorable au déroulement des processus biologiques. Tous les substrats en décomposition dans les cuves ou en andains ont été suivis et la teneur en eau a été maintenue à 40-50 % pendant le processus. Des composts ont été moins arrosés en raison du taux d'humidité des substrats en saisons pluvieuse et sèche. Les besoins en eau sont présentés dans le tableau 46.

Une teneur en eau trop faible limite le développement microbien, et dans le cas d'une humidité trop élevée, l'eau sature les espaces lacunaires et étouffe les micro-organismes (Kulcu et Yaldiz, 2004). Elle peut augmenter suite à la production d'eau nécessaire aux réactions d'oxydation de la matière organique. Par contre, elle peut diminuer suite à l'évaporation lors de la phase thermophile, et suite au dessèchement au cours du retournement. Le tableau 45 présente la quantité d'eau consommée au cours du processus de compostage. Le compost B a consommé moins d'eau que le compost A bien que le tonnage initial de A dépasse celui de B. Le compost C a consommé plus d'eau que le compost D à

cause du taux d'humidité initial des ordures ménagères avant le tri qui est de 66 % pour le compost D et 54 % pour C, ce qui a amené à sécher le substrat D avant le tri des indésirables. Les substrats des andains C et D n'ont pas la même origine et ne sont pas lancés à la même date.

Tableau 46 : Quantité d'eau consommée par les 4 types de compost

	Saison prédominante	Volume d'eau m ³	Tonnage initial T	Besoins en eau m ³ /T
cuve A	sèche	0,17	0,120	1,4
cuve B	sèche	0,18	0,152	1,2
andain C	humide	1,84	1,148	1,6
andain D	humide	0,62	1,025	0,6

III.1.2. Température, T°C

La température quotidiennement enregistrée pendant le procédé de compostage a montré les deux phases du processus: mésophile et thermophiles. La température dans les cuves a atteint 55°C et 60°C (figure 35a et figure 35b). La température maximale est entre 60-70°C dans les andains (figure 35c et figure 35d). Ces résultats sont semblables à ceux rapportés par Miyuki (Miyuki et al, 2005).

Après le premier retournement dans les cuves, la température varie très peu. Ceci est dû à la quantité initiale du substrat composté. Les temps de retournement ne correspondent pas exactement à une durée fixe. Le retournement est effectué quand la température ne varie plus ou est proche de la température ambiante. La bibliographie est très fournie sur les conditions optimales pour hygiéniser un compost. Venglovsky et al., (2005) rapportent qu'une température supérieure à 55°C permet l'hygiénisation, entre 45 et 55°C favorise la biodégradation et entre 35 et 40°C, elle améliore la diversité des micro-organismes.

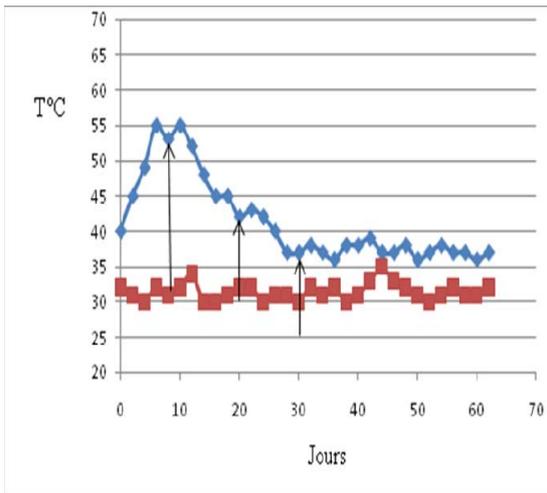


Figure 35a : Température du compost A

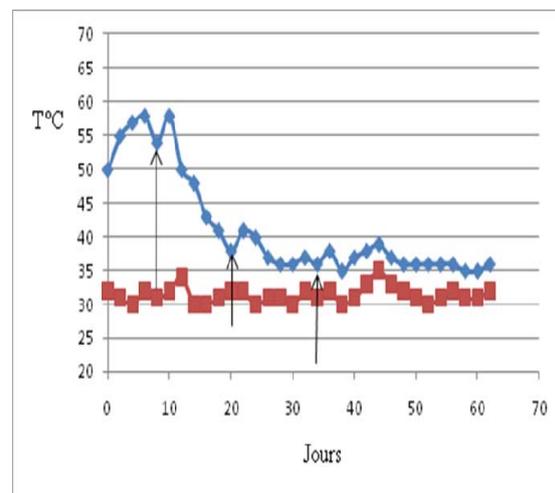


Figure 35b: Température du compost B

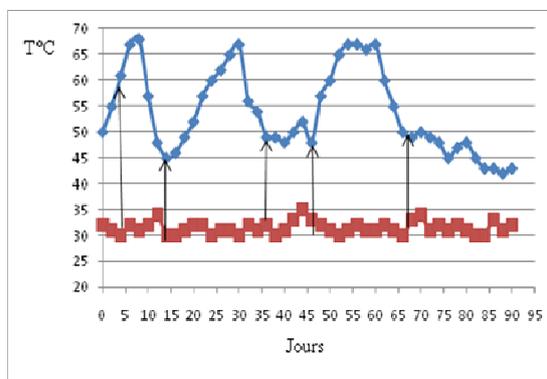


Figure 35c : Température du compost C

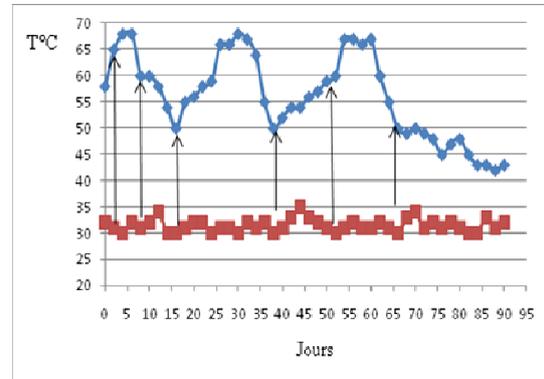


Figure 35d : Température du compost D

Figure 35 : Evolution de la température pendant le compostage comparée à celle de la température ambiante (points rouges sur les figures)

Bien que la température des composts A et B soit montée très peu après le deuxième retournement, un troisième retournement a été effectué afin de vérifier si la décomposition est terminée car un épuisement en oxygène pourrait aussi induire une baisse d'activité des micro-organismes entraînant une production de méthane, ce qui peut être corrigé par des apports complémentaires d'oxygène par retournement. De plus, si la température baisse trop longtemps, il existe un risque de réinfection dû à l'action de certains pathogènes en état de latence (Hamer, 2003). Avec le maintien de l'humidité entre 40-50 %, les retournements ont aussi confirmé qu'il reste très peu de substrats en voie de dégradation.

La montée de la température à chaque retournement au niveau du compost C et D (figure 35c et figure 35d) jusqu'à 60 jours montre que les micro-organismes sont encore en activité, qui en oxydant la matière organique des substrats libèrent ainsi l'énergie contenue dans les liaisons chimiques des molécules constitutives. Une partie de cette énergie contenue

dans les liaisons chimiques de la matière organique est récupérée par leur métabolisme mais une part importante est perdue et dissipée dans l'atmosphère. Une température minimale est nécessaire à l'activité des microorganismes et à la dégradation.

Dans tous les cas aucune inhibition ni ralentissement d'activité n'ont été observés car la température des quatre composts n'est ni voisine de 20°C ni supérieure à 82°C.

III.1.3. Evolution du pH et de la matière organique

L'acidité agit spécifiquement sur la microflore responsable de la décomposition des déchets organiques initiaux. Le pH imposé par la matière première évolue au gré du déroulement du processus. Si pour les composts A et B, par faute de moyen le pH n'a pas pu être déterminé au début du processus de chaque tas, il a pu l'être ensuite. Pour la plupart des tas le pH est resté entre 8 et 9 à partir de la 6^{ème} semaine pour le compost A et B, 5^{ème} semaine pour le compost C et 2^{ème} semaine pour le compost D. Il y a donc très peu de production d'acides organiques et donc très peu des substances contenant des sucres simples. Le pH est resté basique par production du gaz ammoniacal (Bernal et al., 1998) associé à la dégradation de protéines libérant des amines et à la décomposition d'acides organiques (Haug, 1993 ; Mustin, 1987).

Les ordures ménagères contiennent de cendres de bois et de charbon de bois car le bois et le charbon de bois constituent les sources d'énergie pour la plupart des ménages. Ceci a été confirmé au cours des campagnes de caractérisation physique où le taux de CNC est élevé. Trois des quatre composts ont un pH au-dessus de 9, ce qui pourrait être lié à la teneur en cendres dans les ordures ménagères. La teneur en potassium dans les différents composts dans le tableau 47 confirme aussi cette observation. Cette valeur de pH pourrait induire la perte d'ammoniac (Chang et al, 2010), ce qui conduirait donc à des faibles valeurs d'azote observées dans tous les composts excepté dans le compost B (tableau 47) qui a un pH = 8,7; il s'établit un équilibre entre l'ion, NH_4^+ et l'ammoniac, NH_3 . NH_4^+ et NH_3 sont en équilibre à une valeur de pH d'environ 9,2 fonction de la variation de l'alcalinité pendant le procédé de compostage (Dimitri et al., 2005).

Aucune acidification du milieu en début de procédé n'est apparue même pour le compost D où le pH est déterminé à partir de la première semaine contrairement aux résultats rapportés lors des travaux de Forster et al., (1993). Cette phase d'acidogène est très courte et par conséquent difficile à analyser. Cependant, une acidification du milieu aurait pu être attribuée à une oxydation incomplète de la matière organique conduisant à la production d'acides gras organiques en conditions anaérobies. Cela confirme que ces essais se sont

déroulés dans des conditions satisfaisantes d'aération. La matière organique diminue au cours du processus (tableau 47). Il faut noter que la biodégradation de la matière organique est réalisée lors des phases thermophiles et de maturation.

Les mesures réalisées entre la phase thermophile et de refroidissement montrent une faible dégradation de la matière organique, ces données étant conformes à un déroulement normal du compostage. Cependant quel que soit le compost étudié, les profils de dégradation sont relativement proches. Lors de ces différentes phases, plusieurs enzymes permettent la biodégradation de macromolécules facilement décomposables par des réactions de rupture de liaisons atomiques et d'oxydation suivies d'une phase de stabilisation dominée par une intense activité microbiologique qui s'accompagne d'une élévation de température (phase thermophile). Par la suite, la production de chaleur diminue et la température baisse progressivement pour se stabiliser à des températures inférieures à 40° C, indiquant l'épuisement du milieu en molécules simples et dominée par les processus d'humification (phase de maturation) et pouvant durer plusieurs mois.

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 matière organique inférieures à celles des déchets bruts. La diminution relative de matière organique (rapport entre la masse de matière organique perdue et la masse de matière organique initiale) est très variable et dépend des conditions de compostage, de sa durée et des caractéristiques de la matière première. Cette perte est de 23 à 24 % pour le compost C et D, 29 à 30 % pour le compost A et B.

Remarque : Etude comparative de deux modes de détermination de la MO

La matière organique joue un rôle important dans la fertilité du sol. Les deux principales méthodes pour déterminer la teneur en matière organique d'un échantillon de compost consistent en une oxydation par le bichromate par voie humide (méthode Walkey Black) et une combustion à 550°C (méthode de la perte au feu).

Le tableau 48 récapitule les résultats obtenus par ces méthodes d'évaluation de la matière organique pour les 4 composts en fin de maturation. On note une différence de 0 à 1,6 % pour les différents composts. Cette différence est due au fait que la matière organique par perte au feu correspond souvent dans les échantillons, surtout lorsque la température d'incinération est trop élevée, à la matière organique synthétique et à certains composés minéraux.

Tableau 47 : Evolution dans le temps du pH et de la MO des composts

Durée	Semaine	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Paramètres	Compost										
pH (u.pH)	A		ND		ND		9,10		9,20		9,20
	B		ND		ND		8,75		8,85		8,90
	C			ND		9,30		9,60		9,60	
	D	7,75	8,00		9,45		9,45		9,45		
MO (%) /MS	A		71		69,6		33,6		34,5		34,5
	B		42,1		38,7		27,9		27,1		25,1
	C		59	58,2		32,2		29,1		27,0	
	D		45,5		38,5		35,4		33,6		

ND: non déterminé

Tableau 48 : Comparaison des deux mesures de la teneur en matière organique

Type de compost	Méthode 1 : Oxydation % / MS	Méthode 2 : Perte au feu % /MS	Δ
Compost A	32,8	34,1	1,3
Compost B	31,0	31,4	0,4
Compost C	25,9	27,5	1,6
Compost D	29,3	30,6	1,3

/ MS : par rapport à la matière sèche

En effet, à température élevée, les carbonates présents dans l'échantillon de compost peuvent se décomposer en CO₂ augmentant ainsi la teneur en matière organique.

III.2. Bilan matière

La figure 36 présente les bilans matière obtenus pour les différents types de compost (pour un criblage <10 mm). Les ordures ménagères contiennent des matériaux recyclables comme les métaux, les papiers-cartons et les plastiques qui pourraient être triés et valorisés. L'humidité initiale des déchets pour les composts A et B était autour de 65%. Les déchets des composts A, B et D ont d'abord été séchés afin de diminuer la teneur en eau. On note une diminution de 29-30% de la masse humide des composts A et B. Le taux d'humidité du produit fini est de 34-35%. Pour le compost C, l'andain a été lancé sans séchage initial. On obtient un compost mûr autour de 31% pour les composts fins C et D par rapport à la matière compostée.

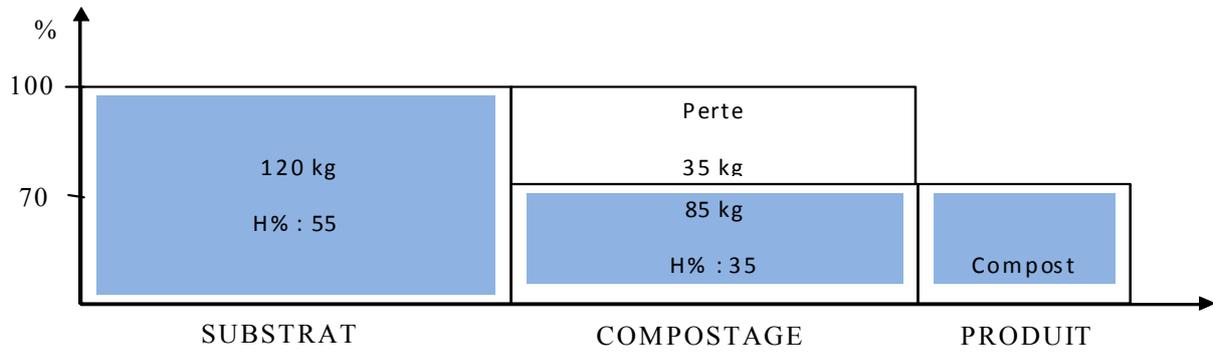


Figure 36a : Compost A

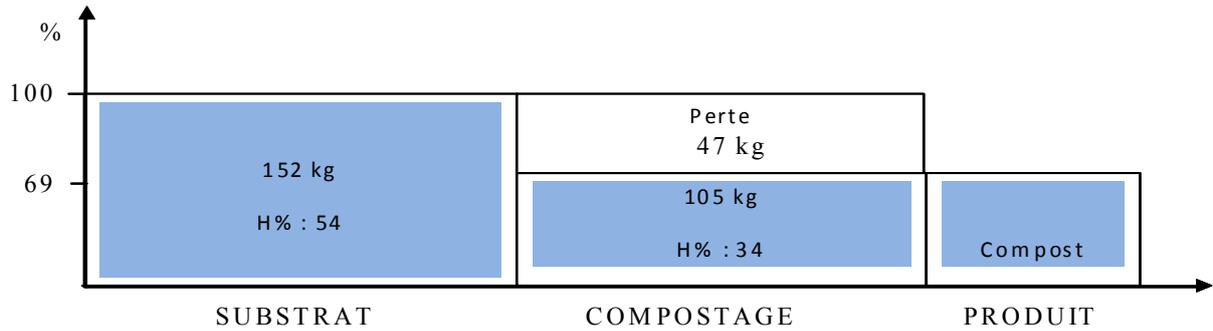


Figure 36b : Compost B

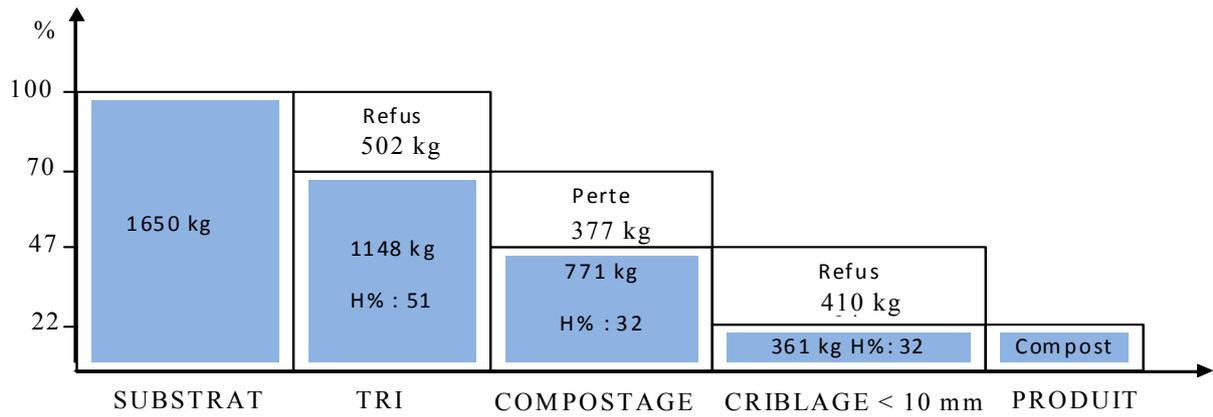


Figure 36c : Compost C

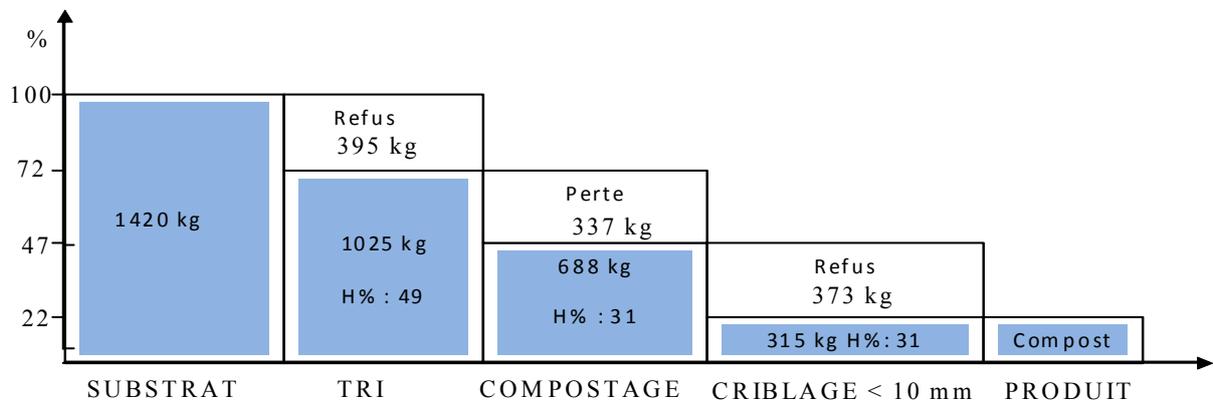


Figure 36d : Compost D

Figure 36 : Bilans matière des quatre procédés de compostage

Perte : gaz (CO₂ + H₂O), liquide (MO dans le lixiviat)

Une partie du refus de tri est recyclée et l'autre déposée sur le centre de transit (cf. Figure 37). Le refus de criblage peut être ré-introduit (recirculation) sur un nouveau tas de compost où il favorisera la fermentation par ensemencement des microorganismes qui sont encore présents dans ces refus et par présence de matériaux structurants.

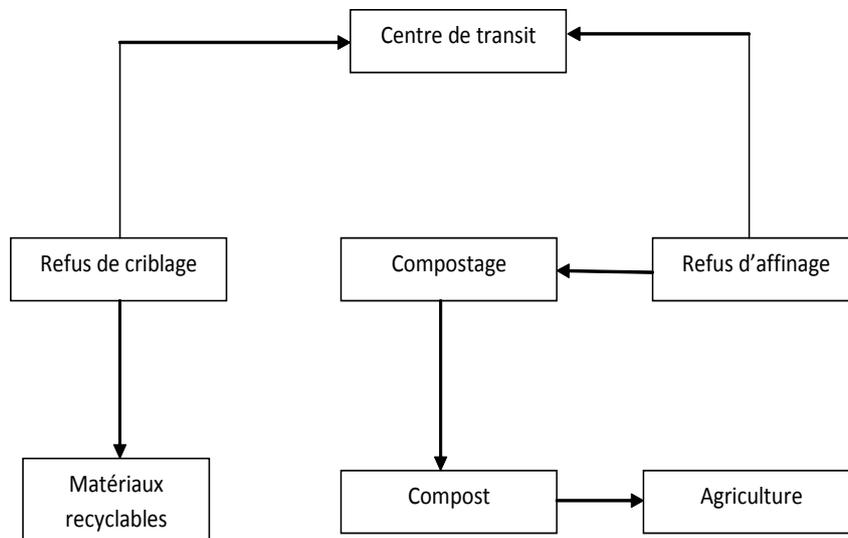


Figure 37 : Schéma explicatif du devenir des refus

III.3. Paramètres en fin de compostage

III.3.1. Teneur en carbone organique

Les teneurs en carbone obtenues par oxydation au bichromate sont présentées dans le tableau 49. Ces teneurs sont dans la gamme des valeurs de la norme AFNOR et de certains composts dans d'autres PED.

Tableau 49 : Teneurs en Carbone organique en fin de maturation dans les composts A, B, C et D

	Compost A	Compost B	Compost C	Compost D	Compost Labé*	Compost **	NFU 44 – 051
C _{org} (%)	19	18	15	17	16,2/13,8	20,3/23,2	≥ 10

* Matejka.et al., 2001; **Waste Concern, 2001

La teneur en carbone organique diminue au cours du compostage, il est utilisé par les microorganismes du milieu et minéralisé en partie en dioxyde de carbone (CO₂). La création accidentelle de poche anaérobie peut entraîner des émissions de méthane (CH₄) liées à des métabolismes de type fermentaire. Il n'y a pas d'émission d'acides gras volatils qui pourraient se produire dans les composts en cours de fermentation dans le cas d'une oxydation

incomplète du carbone organique, car les pH sont basiques.

III.3.2. Teneur en éléments fertilisants

Bien que la réglementation au Togo ne spécifie pas de s'assurer de la qualité agronomique du compost, ces éléments sont évalués afin de juger de l'apport du compost au sol.

L'azote est le deuxième élément le plus présent dans la matière organique. Les faibles valeurs de NTK (cf. tableau 50) sont en relation avec les valeurs de pH (8,7-9,4). Au cours du compostage, l'azote organique du substrat est minéralisé en ammonium (NH_4^+), et nitrate (NO_3^-) lorsque la nitrification va jusqu'à son terme. Cet azote minéral est réincorporé dans le métabolisme microbien au cours du compostage mais aussi dans la matière organique des composts lors de leur humification et libérée dans la matrice sous forme d'azote minéral. La minéralisation devient prédominante en fin de compostage s'accompagnant d'une augmentation de la teneur en NO_3^- qui peut être lessivé par l'eau de pluie. On observe donc généralement l'augmentation de la concentration en azote total dans la matière sèche résiduelle. La mesure de l'azote NTK n'évalue que les formes réduites de l'azote, c'est à dire l'azote organique et l'azote ammoniacal, et reflète la décomposition des déchets organiques.

Les teneurs en matière organique en fin de maturation restent ≥ 20 comme le préconise l'Ecolabel Européen.

Le compost B présente la plus forte teneur du phosphore total Pt, il est suivi du compost A, ce qui est logique compte tenu de l'ajout de phosphates naturels dans le substrat initial. Les taux qu'on pouvait attendre dans le cas d'un compostage des ordures ménagères de Lomé à échelle industrielle sont ceux des composts C et D parce qu'ils sont obtenus avec les OM bruts après le tri des indésirables

Tous les composts présentent une teneur élevée (cf. Tableau 50) des autres nutriments comme Na, Mg, K et Ca, ce qui est un avantage pour l'utilisation dans l'agriculture. Les éléments N, P et K sont les nutriments principaux nécessaires à la production végétale. Sauf besoin spécifique élevé de la part de certaines plantes ou carences marquées du sol, l'apport de ces trois éléments en plus de Mg et de Ca est généralement suffisant pour couvrir les besoins de fertilisation des cultures.

Tableau 50 : Composition en nutriments /MS des 4 composts A, B, C, D

Paramètre		Compost A	Compost B	Compost C	Compost D	Compost Labé *	Compost **	Ecolabel Européen
pH	u.pH	9,3	8,7	9,3	9,4	8,2/8,8	7,8	
N	N-NTK %	0,8	0,9	0,8	0,7	1,4/0,88	1,0/2,0	□ 3
MO	%	34	31	27	30	32/34	35/40	≥ 20
P	mgP ₂ O ₅ /g	13,6	44,7	8,0	11,8	10,9/10,2	9,4/91,5	
Na	mgNa ₂ O/g	7,5	4,0	9,4	-	-	-	
K	mgK ₂ O/g	17,3	19,8	15,1	-	11,1/10,8	6,0/31,3	
Mg	mgMgO/g	2,8	3,1	4,2	3,2	8,1/6,8	-	
Ca	mgCaO/g	16,2	38,5	35,1	36,7	63,8/51,2	-	

* Matejka.et al., 2001; **Waste Concern, 2001

III.3.3. Rapport C/N des composts produits

Le rapport C/N présenté dans le tableau 51 est élevé à cause des teneurs faibles en azote et reste comparable à d'autres composts des ordures ménagères (Chitsan et al., 2008; Matejka et al, 2001 ; Waste Concern, 2001), mais loin de la valeur préconisée de la norme NFU 44 - 051. Chitsan et al., (2008) considèrent la valeur 20 du rapport C/N comme un indice de maturité pour le compostage des déchets de cuisine. Les valeurs élevées de C/N sont liées aussi à la méthode en couche utilisée (Chang et al., 2010). Ce rapport ne devrait pas être considéré au sens premier comme un indicateur de maturité du compost surtout si les teneurs en carbone sont obtenues par une oxydation au bichromate par voie humide ou par la perte au feu, deux méthodes qui dosent la matière organique synthétique (plastiques, textiles) et non synthétique.

Tableau 51 : Valeur du rapport C/N des composts produits

	Compost A	Compost B	Compost C	Compost D	¹ Compost	² Compost	³ Compost	NFU 44-051
C/N	24	20	19	24	11/16	11,6/20,3	20	13

¹ Matejka.et al., 2001; ² Waste Concern, 2001; ³ Chitsan et al., 2008

Une large gamme de C/N est mentionnée dans la littérature pour les composts, on trouve par exemple pour des composts en fermentation, des rapport C/N variant de 10 (Bernal et al., 1998; Gagnon et al., 1999) à 80 (Roletto et al., 1985b). Le rapport diminue au cours du compostage pour atteindre des valeurs comprises entre 8 et 25, ce qui s'explique par le fait que les microorganismes consomment plus de carbone que d'azote (Bernal et al., 1998; Eggen

et Vethe, 2001). Ceci confirme que les rapports C/N trouvés pour les quatre composts restent élevés mais conformes. Vis-à-vis des autres nutriments (Na, P, K, Ca), on considère généralement que leurs teneurs ne doivent pas être limitantes et elles sont rarement mesurées.

III.3.4. Teneurs en éléments trace métalliques, ETM

Le but de ces analyses est de connaître leur teneur dans le compost avant son utilisation pour évaluer leur potentiel toxique. Seuls quelques ETM aux caractéristiques spécifiques ont été retenus. Le cadmium, le plomb et le nickel sont des éléments toxiques. Ils sont fréquemment retrouvés dans les ordures ménagères des P.E.D à cause de leur utilisation comme éléments constitutifs des piles. On observe des teneurs en plomb, présentées dans le tableau 52, au-dessus des normes fixées par la norme française NFT 44 051. Les sources de Pb sont variées : les papiers-cartons, les CNC, les vernis, les peintures, etc. Les autres teneurs sont en dessous de la norme. Les ordures ménagères contiennent les déchets de jardins. Les teneurs en ETM dans la fraction organique et donc dans les composts pourraient aussi provenir de la couche d'humus, de la terre végétale des jardins (Veeken et al., 2002; Nilsson, 1972; Coughtrey, 1979), entraînée dans les ordures des ménages.

Tableau 52 : Concentration de quelques polluants métalliques dans les composts A, B, C et D

Eléments (mg/kg MS)	Compost A	Compost B	Compost C	Compost D	Valeurs France*
Pb	460	380	480	290	180
Ni	40	14	20	18	60
Cd	1	1	2	2	3

* AFNOR, (2005)

La toxicité du plomb se manifeste par des troubles du système nerveux, en particulier chez l'enfant, et l'affection du foie et des reins. Mais sous quelle forme se trouve-t-il dans les composts? Mobilisable car facilement échangeable et oxydable, ou non car piégé dans une phase inerte, Il est donc important de rechercher si le plomb sera relargué ou mobile une fois le compost enfoui, et s'il constitue une source de pollution des sols et de toute la chaîne alimentaire.

III.3.5. Teneurs en impuretés + MO oxydable au chlore

La méthode normalisée par AFNOR (2004) par attaque à l'eau de javel permet d'évaluer la part des impuretés dans les composts (plastiques, papiers-cartons, métaux, CNC, INC). Dans le compost A, la matière organique oxydable (MOO) représente 29,22 % (cf.

figure 38a). La matière organique non oxydable représente la part la plus importante, soit 70,78 %. La figure 38 présente la composition des impuretés dans les composts.

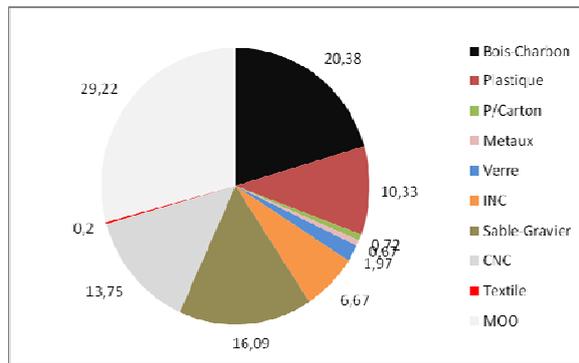


Figure 38a : Compost A

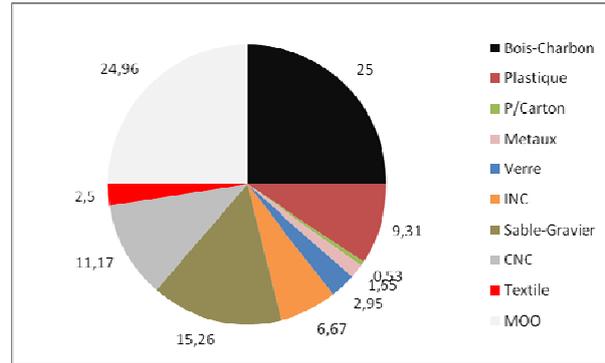


Figure 38b : Compost B

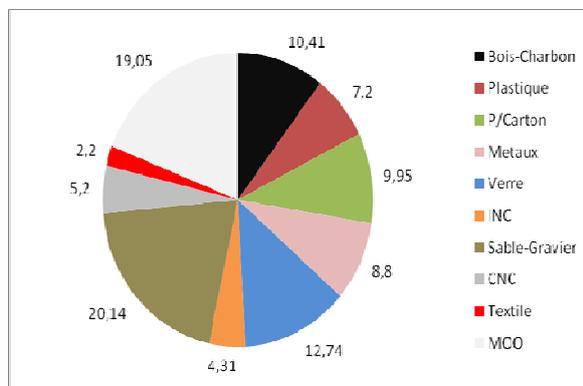


Figure 38c : Compost C

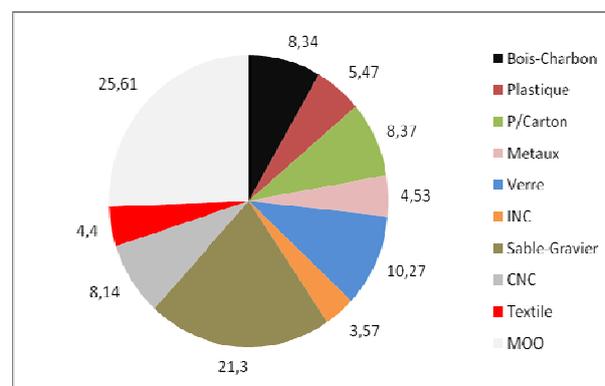


Figure 38d : Compost D

Figure 38 : Teneur en impureté et en MOO des composts

Tout comme pour le compost A, la matière organique non oxydable du compost B (figure 38b) représente la part la plus importante, soit 75,03 % du pourcentage total. Le sable et le gravier représentent eux seuls 15,26 % suivis des bois-charbon, des plastiques, des CNC.

Dans le compost C le taux de matière organique non oxydable est de 80,95 % avec 20,14 % de sable-gravier, 12,74 % de verre et 10,41 % de bois-charbon (figure 38c). Ce compost est l'un de ceux élaborés avec les ordures ménagères bruts après le tri des indésirables. Il est donc important de mettre l'accent sur la phase de tri surtout lorsque ce compost fera l'objet d'une commercialisation. Le taux de la matière organique oxydable est de 25,61 % dans le compost D (figure 38d). Dans tous les composts le taux de la matière organique obtenu par perte au feu est supérieur à celui de la matière organique détruite par l'eau de javel (cf. Tableau 53). Les teneurs en plastiques, en verres et en métaux sont élevées par rapport à la limite tolérée \square 2 % MS (AFNOR, 2005). Les bois, les CNC, papiers-cartons, textile ont brûlé au cours de la calcination ou de la perte au feu, ce qui pose encore une fois la signification de la mesure de la teneur en matière organique dans les composts

urbains, par la mesure de la perte au feu.

Tableau 53 : Teneurs en MO comparées par perte au feu et par attaque au chlore des composts A, B, C et D

Type de compost	Perte au feu % / MS	Attaque au chlore % / MS	Δ
Compost A	34,1	29,2	4,9
Compost B	31,4	25,0	6,4
Compost C	27,5	19,0	8,5
Compost D	30,6	25,6	5

/ MS : par rapport à la matière sèche

III.4. Test de lixiviation : mesure du relargage du plomb

Ce test est réalisé afin de déterminer le potentiel de relargage du plomb dans les composts. Ils permettent d'estimer la pollution aisément soluble. La lixiviation des polluants des déchets ou du compost est contrôlée par plusieurs facteurs externes. Ces facteurs comprennent la nature chimique du compost, particulièrement en termes de pH, de propriétés réductrices et de teneur en matière organique dégradable, la nature du lixiviat (solution d'élution) et le temps de contact du lixiviat avec le déchet ou le compost du fait que le mécanisme de contrôle de la lixiviation du polluant est la solubilité ou la diffusion. Le test de lixiviation réalisé sur les composts au bout de 5 jours a permis de déterminer la capacité maximale de relargage depuis la matrice solide vers la solution (éluat) correspondant à la pollution susceptible d'être remobilisée et transférée aux plantes à court ou à moyen terme. Le tableau 54 présente les résultats de l'extraction du plomb par l'eau, le chlorure de calcium et l'EDTA à pH = 7.

Tableau 54 : Extraction simple du Pb au bout de 5 jours

	Teneur du Pb en mg.Kg ⁻¹			
	Eluat A	Eluat B	Eluat C	Eluat D
Eau distillée	0,02	0,03	0,04	0,02
CaCl ₂ 0,01M	0,03	0,04	0,05	0,04
EDTA 0,05M pH = 7	0,10	0,13	0,15	0,11

Suite à l'application des méthodes d'extractions simples, l'EDTA semble avoir un effet important sur le relargage du plomb. Les fractions extraites par les extractions ménagées à l'aide d'eau distillée et de CaCl₂ sont faibles. La fraction mobilisable est en revanche importante avec l'EDTA soit 0,10 mg/kg pour le compost A; 0,13 mg/kg pour le compost B; 0,15 mg/kg pour le compost C et 0,11 mg/kg pour le compost D. Cette différence entre les

deux types d'extraction traduit une forte rétention du plomb dans les composts, mais un risque de mobilisation non négligeable à long terme. De plus Pb^{++} est un cation chimisorbé et est réputé extractible par l'EDTA indépendamment du pH (Ben Hriz et al., 2010).

Ensuite une nouvelle extraction simple a été réalisée, et cette fois la teneur en Pb a été suivie en fonction du temps. Sept flacons ont été préparés (24H, 48H, 72H, 96H, 120H, 144H et 168H) pour chaque compost. Tous les flacons sont mis en agitation au moyen d'un plateau d'agitation réglé à 150 tours/min. Les éluats de chaque compost sont filtrés et Pb est dosé par SAA flamme après minéralisation à l'eau régale.

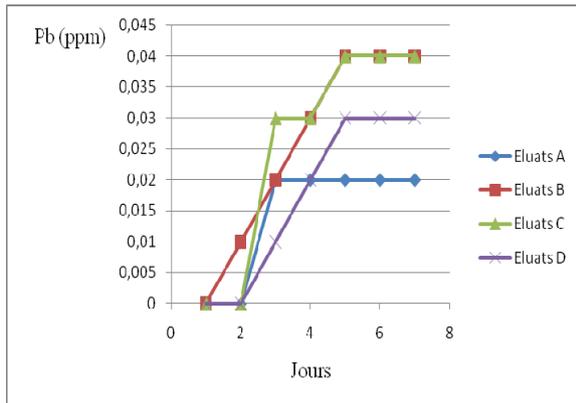


Figure 39a : Extraction avec de l'eau distillée

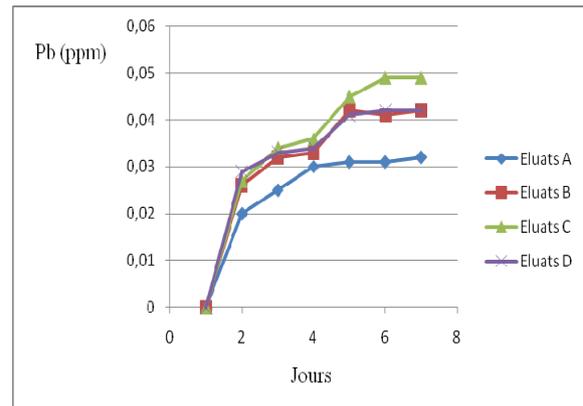
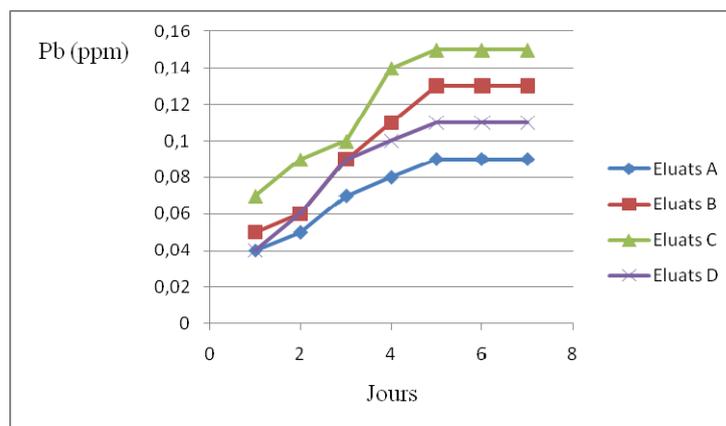
Figure 39b : Extraction avec CaCl₂

Figure 39c : Extraction avec l'EDTA

Figure 39 : Extraction du Pb avec différentes solutions

La figure 39a montre que les extractions avec l'eau distillée sont maximales au cinquième jour. La figure 39b montre que les extractions avec CaCl₂ sont progressives et atteignent le maximum au bout du 6^{ème} jour. Mais on note un taux de relargage plus grand que celui obtenu avec l'eau distillée. La figure 39c montre que l'EDTA extrait plus Pb que les deux autres solutions.

Deux schémas sont possibles : soit le compost est riche en hydroxyde métallique et peut participer à la rétention du plomb par échange cationique ou par absorption, soit il est riche

en matière organique au point d'emprisonner ou de retenir le métal par complexation.

On remarque que plus le taux de matière organique est élevé, plus le taux d'extraction est faible. La rétention de Pb est très forte lorsque le taux de la matière organique est élevé. La majeure partie de Pb semble fixée sur la matière organique comme le montre les résultats à partir du quatrième jour d'extraction des figures 39. La complexation par la matière organique conduirait donc à une fixation stable, origine de la faible mobilité de Pb. La rétention de Pb peut se produire non seulement sur la matière organique mais aussi sur les hydroxydes métalliques, soit par échange cationique, soit par fixation sur les carbonates. Dans le cas de l'ion Pb^{2+} , dont le rayon ionique (199pm) est supérieur à celui de l'ion calcium (99pm), il n'y a pas de substitution de Ca^{2+} au cours de l'extraction avec $CaCl_2$ (cf. tableau 54), mais formation d'un sel de carbonate orthorhombique.

Ce résultat montre que de nombreux paramètres interviennent dans la mobilité des éléments trace métalliques. Les constituants du sol et donc du compost jouent un rôle important dans le processus de rétention (matière organique, hydroxydes métalliques, phosphates et carbonates). Leurs teneurs sont susceptibles d'affecter le transfert des polluants. La complexité des mécanismes biologiques, physiques et chimiques régissant le transfert des polluants dans le sol implique une grande prudence quand on pense au taux du plomb qu'accumuleraient les plantes après épandage du compost.

Les formes chimiques d'un métal dissous peuvent être séparées en quatre catégories suivant la nature de l'agent complexant considéré. La figure 40 illustre les différentes formes de complexation que le Pb noté M pourrait présenter.

L'équation de conservation de la masse, pour le métal M dissous, est donc de la forme :

$$M_T = M^{n+} + \sum_i M_j(OH)_i^{n-i} + \sum_i M_j(L_{inorg})_i^{n-i} + \sum_i M_j(L_{org})_i^{n-i}$$

Métal ionique libre hydraté : M^{n+}

Métal sous forme d'hydroxydes : $M_j(OH)_j^{n-1}$

Métal complexé par des ligands inorganiques : $M_j(L_{inorg})_j^{n-1}$

Métal complexé par des ligands organiques : $M_j(L_{org})_j^{n-1}$

Un certain nombre de ligands, inorganiques ou organiques, vont conditionner la spéciation du plomb par la formation de complexes plus ou moins stables. Pour chaque ligand, la complexation entre un métal M et un ligand L peut être décrite par la réaction d'équilibre suivante:



Cette réaction est caractérisée par une constante thermodynamique de complexation/stabilité,

notée K , exprimée par l'équation:
$$K = \frac{[M_i L_j]}{[M]^i [L]^j}$$

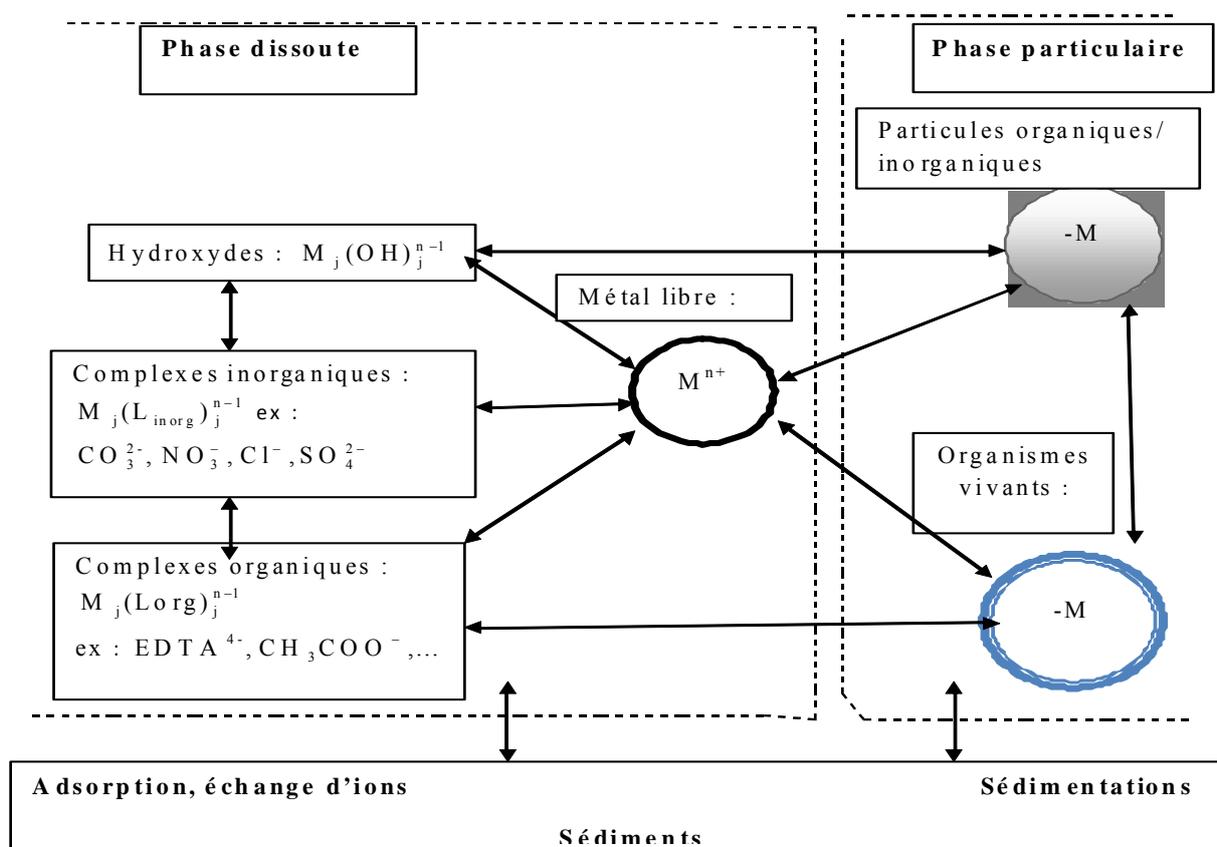


Figure 40 : Différents formes possibles de complexation du plomb

Dans la catégorie des complexes inorganiques, les complexes du métal se forment avec les anions du milieu comme les chlorures, les sulfates, les nitrates, les carbonates. Cette complexation dépend aussi des paramètres physiques (température, pression, ...) et chimiques (pH, force ionique, concentrations en éléments majeurs, ligands complexants, ...).

Dans la catégorie des complexes organiques, d'autres ligands sont impliqués en relation avec la matière organique du compost. Les groupements complexants (ou sites) présents ont un rôle prépondérant puisqu'ils peuvent complexer fortement les métaux présents dans les composts et modifier leurs formes chimiques dominantes, donc leur réactivité vis-à-vis des plantes une fois les composts enfouis. L'origine, la structure, la composition et les propriétés physiques et chimiques de la matière organique sont très hétérogènes et souvent évolutives. La matière organique complexante regroupe donc aussi bien des molécules de structures et de réactivités simples, présentant peu de groupements fonctionnels, que des macromolécules de grande taille, possédant une densité forte en sites potentiellement complexants, de propriétés très variées. De même, une variation de pH peut entraîner une complexation ou une décomplexation des métaux par la matière organique. Il serait important de caractériser la

matière organique afin de quantifier correctement son impact sur les métaux et en particulier le plomb et bien d'autres éléments (HAP, pesticides, ...), souvent toxiques pour les plantes et l'homme.

III.5. Mesure de la maturité et de la stabilité du compost

Un compost stable et mature conduira à une minéralisation réduite du carbone apporté en parallèle à un relargage régulier de l'azote organique associé. Un compost non mûr trop riche en carbone facilement assimilable provoquera une surconsommation d'azote par les bactéries du sol. Différents paramètres peuvent être utilisés pour déterminer la stabilité et maturité du compost. La stabilité du compost est estimée en terme d'activité microbienne (taux de respiration ou libération d'énergie) et la maturité du compost est déterminée par l'odeur, la germination des plantes tests ou la composition chimique. Un compost stable ne signifie pas nécessairement qu'il soit mature puisqu'il peut encore avoir un effet inhibiteur ou phytotoxique sur la croissance des plantes. Etant donné les origines diverses des matières initiales à composter, des méthodes de compostage utilisées et des conditions d'obtention du compost, ces différents paramètres ne sont pas souvent cohérents; ainsi différents auteurs suggèrent qu'aucun critère n'est adéquat isolément. S'il n'existe aucun test standard pour évaluer chaque critère, stabilité et maturité, on peut citer certains autres qui sont souvent utilisés en dehors de la composition du compost qui doit respecter des standards, le test respirométrique AT4 à 4 jours et l'indice de germination IG.

III.5.1. Test respirométrique, AT4

Pour la mesure de l'AT4, la méthode de mesure de la DBO des liquides par le système oxytop® a été appliquée. Le manuel d'utilisation prévoit un facteur de dilution, applicable en fonction du volume d'échantillon introduit. Connaissant le volume total du flacon et le volume d'échantillon introduit, le volume d'air peut être déduit. Ainsi, le facteur de dilution est transposable au volume d'air dans le flacon selon l'équation suivante :

$$y = 0,5772 \cdot \exp(0,0087x).$$

La densité du compost comprise entre 0,5 et 0,6 permet de relier ce facteur de correction au compost pour connaître sa consommation en O₂. Les études réalisées par Charnay et al., (2005) ont montré que la masse introduite et l'intensité de la consommation en O₂ est variable. Elle augmente entre 10g et 30 g, puis diminue fortement pour des masses supérieures. Ce constat est sans doute lié à un effet de masse, dû à la non agitation des flacons, passant alors en fermentation anaérobie. Ils ont montré que l'écart est trop important pour des masses supérieures à 30 g et que les masses inférieures ou égales à 10 g sont peu

représentatives de l'échantillon. La masse utilisée est de 20 g humidifiée entre 45% et 55%.

Le compost A est le compost obtenu à partir des OM sélectives. La figure 44 montre qu'on obtient une augmentation progressive avec des pentes très faibles. Le compost A criblé à 10 mm, présente logiquement une faible consommation d'oxygène (cf. figure 41a), nettement plus faible que celle du substrat constitué d'ordures ménagères sélectivement constituées de matières putrescibles.

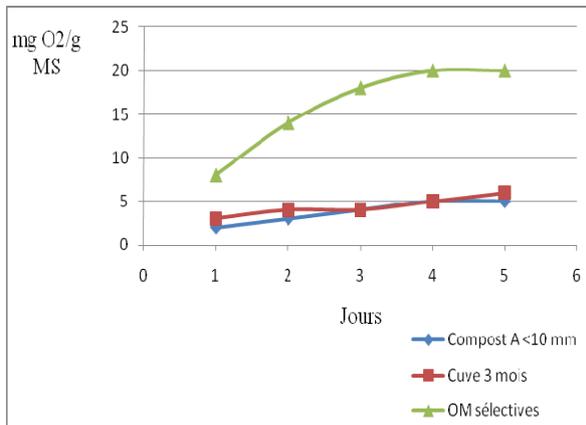


Figure 41a : Compost A

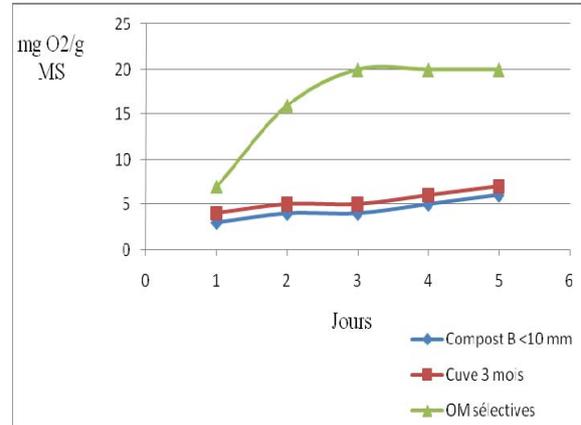


Figure 41b: Compost B

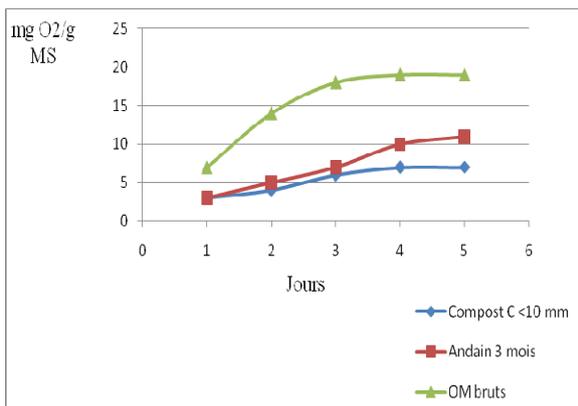


Figure 41c: Compost C

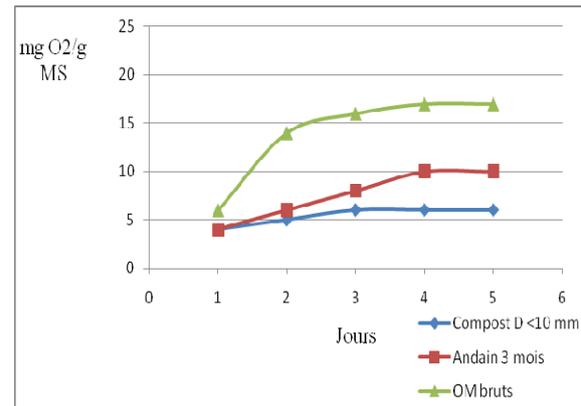


Figure 41d: Compost D

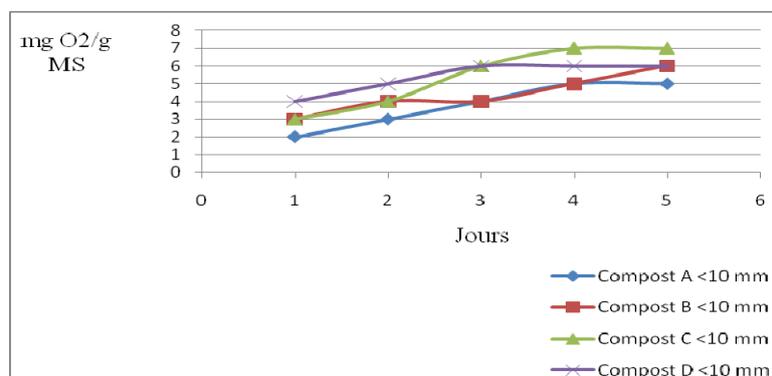


Figure 41e : Composts A, B, C, D

Figure 41 : Consommation d'O₂ par les composts A, B, C et D

Le compost B est le compost constitué de putrescibles, de phosphates naturels et de

fumier. Pour ce type de substrat, la figure 41b montre beaucoup d'analogie avec le compost A. Les composts C et D sont obtenus à partir des ordures ménagères bruts après le tri des indésirables. La figure 41c montre une consommation pratiquement constante pour le quatrième et le cinquième jours pour le compost criblé, la courbe présentant pour le compost criblé une pente plus faible que pour le compost non criblé. Les courbes de la figure 41d, sont très comparables aux précédentes, et illustrent que les composts produits sont déjà fortement stabilisés mais moins que les composts A et B. Les consommations en O₂ sont progressives quel que soit le stade de traitement du déchet. Cette consommation est très forte pour les ordures ménagères. Sur la figure 41e on note que le compost B présente une pente plus faible successivement que A, D et C. C'est dire que le compost B présente un état de maturité plus avancé que A et que A plus avancé que D et que D plus avancé que C. Toutes les courbes obtenues pour les quatre composts présentent des pentes très faibles par rapport à celles obtenues pour les ordures ménagères. Le tableau 55 résume la consommation d'oxygène au quatrième jour des composts A, B, C, D.

Tableau 55 : Mesures comparées des AT4 des 4 composts produits et des substrats initiaux en mgO₂/g MS

Compost A	Compost B	Compost C	Compost D	Compost urbain *	Compost urbain **
5,2	6,1	7,4	6,8	9	7,9
Substrat A	Substrat B	Substrat C	Substrat D	OM brutes *	OM stabilisé PTMB ***
20,6	20,9	18,5	17,1	22	< 20

*Charnay, 2005 ; **Annabi M., 2005 ; ***Binner et Zach, 1998

PTMB : Prétraitement Mécanique et Biologique

Le suivi de l'évolution de la consommation en O₂ permet donc de connaître l'état d'avancement dans le traitement et par voie de conséquence l'état de maturité du compost. Elle reste une solution facile et simple pour une estimation de l'état de maturité d'un compost. Les inconvénients de cette méthode sont du domaine pratique: l'introduction de l'échantillon solide dans le flacon et l'ajustement de l'humidité. Pour obtenir une valeur comprise entre 45 et 55 %, de nombreux essais et contrôles s'avèrent nécessaires, rendant l'opération longue.

III.5.2. Indice de germination, IG

La phytotoxicité est un des caractères des composts étudiés qui permet le mieux

d'évaluer l'impact des composts sur la végétation dans l'optique de la valorisation agronomique. Pour évaluer la phytotoxicité des composts produits, les effets des extraits aqueux des composts sur la germination des graines de maïs (*Zea mays*), de niébé (*unguiculata de Virgna*) et de cresson (*Lepidium sativum*) ont été évalués en mesurant IG, l'indice de germination. Les valeurs moyennes de dix répétitions, présentées dans le tableau 56, constituent un indicateur de la toxicité des composts. Les composts produits sont non toxiques pour le maïs, le niébé et le cresson.

Un compost est considéré comme non toxique lorsque son IG excède 50 % (Zucconi et al, 1981). L'indice de germination présente des taux élevés par conséquent une teneur très basse des substances toxiques telles que l'acide acétique. L'acide acétique peut empêcher la germination des graines de cresson à partir d'une concentration de 300 mg/kg (De Vleeschauwer et al, 1981). La diminution de la germination des graines par l'acide acétique a été rapportée pour le cresson et le maïs par Keeling et al. (1994). Ainsi, l'indice de germination pour ces graines excède 50 %, ceci indique que les composts produits sont stables et mûrs.

Tableau 56 : Valeur moyenne de l'indice de germination (IG)

IG	Types de graines	Compost A	Compost B	Compost C	Compost D
%	<i>Zea mays</i> (maïs)	76	78	81	87
	<i>Vigna unguiculata</i> (niébé)	86	77	78	80
	<i>Lepidium sativum</i> L (cresson)	79	75	86	82

Un compost non mûr entraînerait une diminution du taux d'oxygène et du potentiel oxydo-réducteur du sol qui peut provoquer la création d'un milieu anaérobie et réducteur. Ces conditions vont favoriser la mobilisation des métaux ou conduire à des réactions inhibitrices ou phytotoxiques (Bustamante et al., 2008), liées à la production d'ammoniac, d'oxyde d'éthylène ou d'acides organiques.

Chapitre IV: Etude de la valorisation agronomique du compost produit

L'objectif de cette étude est d'établir et d'évaluer les performances agricoles de trois différents types de compost à base d'ordures ménagères, d'effectuer une comparaison entre les performances des trois différents types de compost et celle de la fiente de poules sur les rendements de la carotte et de la betterave.

IV.1. Analyses des sols.

Le tableau 57 présente l'analyse de certaines teneurs du sol de l'ESA (Ecole Supérieure d'Agronomie) de l'Université de Lomé noté S₁ et du sol de la parcelle dans la zone portuaire noté S₂.

Tableau 57 : Pédologie des sols utilisés pour les essais agronomiques

Sols	pH	MO (%) / MS	NTK(N mg/ Kg) / MS	K (mgK ₂ O/g) / MS	P (mgP ₂ O ₅ /g) / MS	Type de sol
S ₁	7,5	2,5	nd	0,3	1,1	Sableux, un peu noir
S ₂	6,8	1,1	0,1	1,1	0,4	Sableux clair

nd : non déterminé

Le pH des sols est de 7,5 pour S₁ et 6,8 pour S₂. La teneur en azote NTK est de 0,1 pour le sol S₂. Les teneurs en matière organique, en potassium et en phosphore sont faibles.

IV.2. Teneur en nutriments

Les teneurs en azote, en magnésium et en calcium sont faibles pour les 4 composts (cf. Tableau 58) par rapport à celles obtenues par Matejka et al (2001) et Waste Concern (2001). Les teneurs en phosphate et en potassium sont dans la gamme des valeurs obtenues par Waste Concern. A part le sodium, le compost B présente une teneur des autres nutriments plus grande que les autres composts.

Tableau 58 : Composition chimique de la matière sèche des 4 composts A, B, C, D

Paramètres / MS		Compost A	Compost B	Compost C	Compost D	Compost Labé *	Compost **
N	%	0,8	0,9	0,8	0,7	0,9/1,4	1,0/2,0
P	mgP ₂ O ₅ /g	13,6	44,7	8,0	11,8	10,9/10,2	9,4/91,5
Na	mgNa ₂ O/g	7,5	4,0	9,4	-	-	-
K	mgK ₂ O/g	17,3	19,8	15,1	-	11,1/10,8	6,0/31,3
Mg	mgMgO/g	2,8	3,1	4,2	3,2	8,1/6,8	-
Ca	mgCaO/g	16,2	38,5	35,1	36,7	63,8/51,2	-

* Matejka.et al., 2001; **Waste Concern, 2001

IV.3. Essais des composts en champ

Le tableau 59 indique les différents traitements effectués et les apports de composts, d'engrais au sol dans la ferme de l'Ecole Supérieure d'Agronomie (ESA) à l'Université de Lomé.

Tableau 59 : Désignation des différents traitements des essais agronomiques sur S_1

Traitements	Désignation	Apport			
		Dose (T/ha)	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)
$T_0 = C_0D_0$	Témoin absolu		-	-	-
$A = C_{OMT}$	Compost d'ordures ménagères triés à la dose D_1^*	20	160	118,8	287,1
$B = C_{OMTe}$	Compost d'ordures ménagères triés enrichi au fumier et au phosphate naturel à la dose D_1^*	20	180	390,3	328,6
$C = C_{OMB}$	Compost d'ordures ménagères brutes à la dose D_1^*	20	160	69,8	250,6
$T_1 = F. P.$	Fiente de poules à la dose D_1^*	20	200	80	120
$T_2 = N_{15}P_{15}K_{15}$	Engrais à la dose selon la formule $N_{15}P_{15}K_{15}$	0,1	150	150	150
$T_3 = N_{30}P_{30}K_{30}$	Engrais à la dose selon la formule $N_{30}P_{30}K_{30}$	0,2 de $N_{15}P_{15}K_{15}$	300	300	300
$T_4 = N_{60}P_{45}K_{45}$ **	Engrais à la dose selon la formule $N_{60}P_{45}K_{45}$	0,3 de $N_{15}P_{15}K_{15} + N_{15}$ (apporté par l'urée)	450 + 32,6	450	450

* $D_1 = 20$ t / ha,

**ajout d'urée 32,6 kg/ha à 46% de N

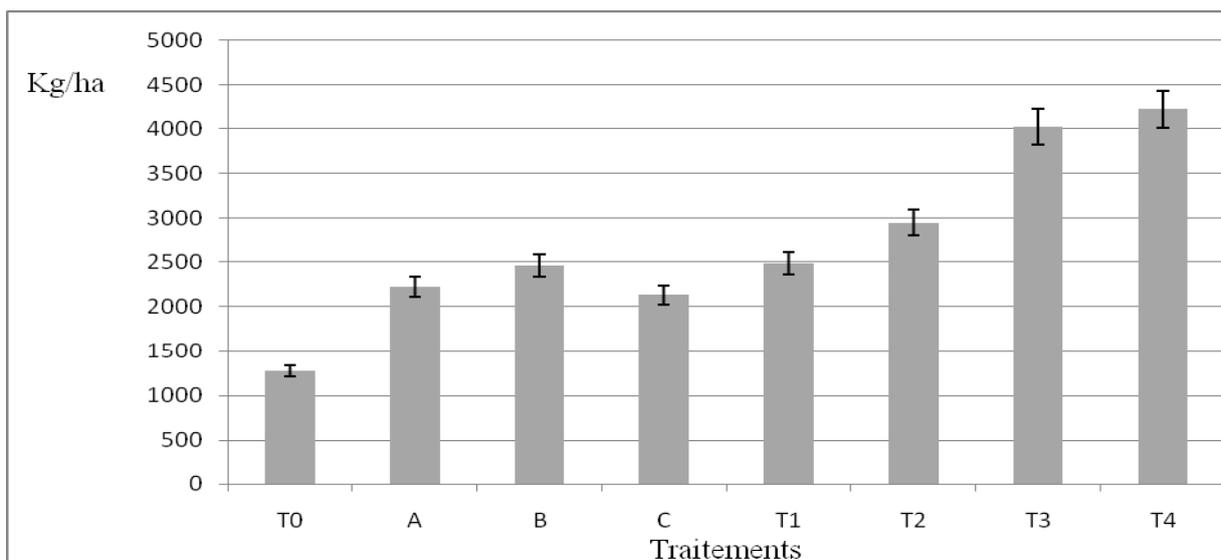


Figure 42 : Rendements comparés des différents amendements pour la production de la carotte

Le compost produit a apporté un rendement significatif pour la carotte (cf. Figure 42). Ils correspondent respectivement, au témoin (1278 kg/ha) et aux essais avec composts A (2221 kg/ha), B (2463 kg/ha) et C (2135 kg/ha). Le rendement du fumier (T1) est de 2495 kg/ha. Ce rendement est très proche du compost B. Les essais avec T2, T3, T4 ont été réalisés avec des engrais NPK, et ont donné un rendement meilleur pour T3 et T4, mais moindre pour T2. Les composts en plus de leur rendement agissent sur la structure du sol, contrairement aux engrais NPK.

Pour vérifier ce résultat des composts, un autre test est réalisé sur une parcelle S₂ de la zone portuaire. Le tableau 60 présente les traitements effectués et les apports des composts au sol.

Tableau 60 : Désignation des différents traitements des essais agronomiques sur S₂

Traitements	Désignation	Apport			
		Dose (T/ha)	N (kg/ha)	P (k/ha)	K (kg/ha)
T₀ = C₀D₀	Témoin absolu	-	-		
A = C_{OMT}	Compost d'ordures ménagères triés à la dose D ₁ *	20	160	118,8	287,1
B = C_{OMTe}	Compost d'ordures ménagères triés enrichi au fumier et à au phosphate naturel à la dose D ₁ *	20	180	390,3	328,6
C = C_{OMB}	Compost d'ordures ménagères brutes à la dose D ₁ *	20	160	69,8	250,6
T₁ = F. P.	Fiente de poules à la dose D ₁ *	20	200	80	120
A + T₁	Mélange compost A 50% - fumier 50% à la dose D ₁ *	20	180	99,4	203,5
B + T₁	Mélange compost B 50% - fumier 50% à la dose D ₁ *	20	190	235,1	224,3
C + T₁	Mélange compost C 50% - fumier 50% à la dose D ₁ *	20	180	74,9	185,3

*D₁ = 20 t / ha

Les résultats de cette étude menée chez les agriculteurs de la zone portuaire sont plus concluants (cf. Figure 46). Le rendement du traitement T₀ représente la moyenne des rendements des parcelles qui n'ont reçu ni du compost ni du fumier. Par rapport au témoin tous les composts ont donné un rendement de plus de 8000 kg/ha. Le rendement le plus élevé est celui du traitement B+T₁ (cf. figure 46) car le compost B est obtenu à partir des ordures

ménagères, du fumier et de phosphate naturel. Le traitement T_1 est à base du fumier uniquement. Son rendement dépasse celui des composts A, B et C. Mais les mélanges de compost et de fumier donnent un rendement meilleur. Les ONG en charge du compostage et de sa commercialisation devraient donc agir sur le prix et les avantages du compost par rapport au fumier afin de convaincre les agriculteurs.

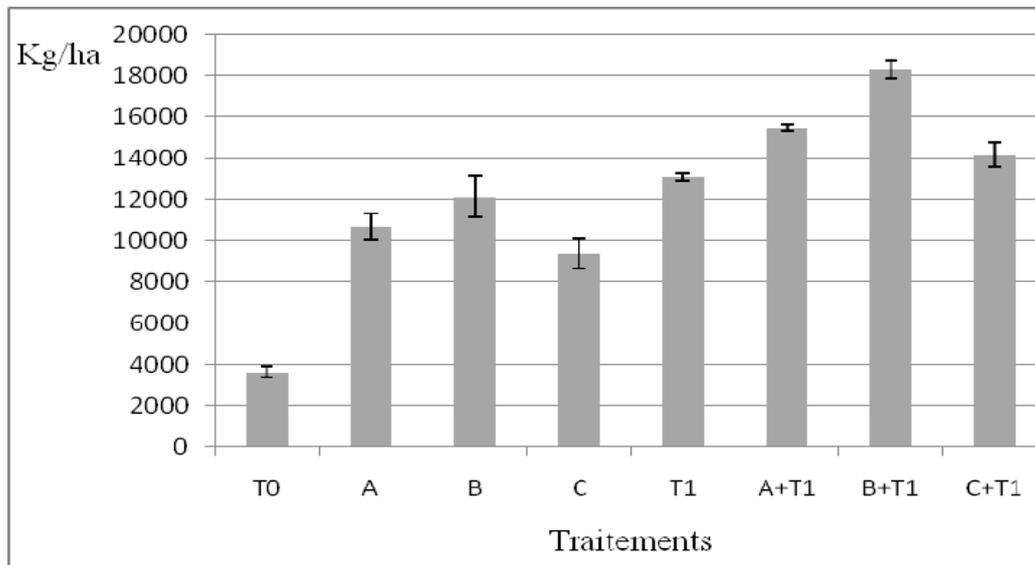


Figure 43 : Rendements comparés des différents amendements pour la production de la betterave

Les résultats obtenus montrent que les composts produits sont de qualité agronomique comparable à ceux produits dans d'autres pays. C'est pourquoi ces essais en champs effectués et présentés dans les figures 42 et 43 comme ceux effectués par Matejka (2001) montrent une augmentation des rendements avec l'utilisation du compost.

La production de composts de type A, C ou D obtenus à base d'ordures ménagères sans ajout des matières d'origine minérale pourrait être proposée aux ONG et ne ferait pas objet d'autres coûts supplémentaires pour l'amendement des sols. La vente de compost pourrait participer à l'augmentation des revenus des ONG en charge de la pré-collecte.

Chapitre V: Quelle filière pérenne de compostage dans les quartiers de Lomé ?

Au vu des résultats de la caractérisation physique et de l'expérimentation du procédé de compostage, ce chapitre propose un modèle de plateforme artisanale dans un premier temps et informelle pour traiter un flux journalier de 5 T/j, ce qui correspond à environ 24 % du flux total de déchets collectés par l'ONG. Cette première expérience pilote pourra ensuite être poursuivie en augmentant les capacités du centre ou en dupliquant la plate-forme dans d'autres quartiers. Ce chapitre intégrera aussi une étude de marché locale du compost produit en fonction de ses qualités agronomiques et des matériaux recyclables. Les matériaux recyclables comme les métaux, les papiers-cartons et certains plastiques (fûts, films) seront au maximum triés en fonction de leur taille qui doit permettre un tri manuel. Mais il n'a pas été possible de réaliser une étude de marché détaillée des matériaux recyclables compte tenu des fluctuations des coûts de reprise de ces matériaux. Le compost produit sera destiné à l'agriculture périurbaine dont le maraîchage. Ce projet de centre de tri-compostage informel décentralisé permettra également la création d'emplois pour les jeunes du quartier après leur formation. Par ailleurs le projet s'appuiera sur les activités de recherche du laboratoire de l'université pour apporter des améliorations technologiques pour les différentes étapes du compostage comme par exemple le tri des ordures, l'aération des andains pendant la fermentation, l'affinage du compost produit ou le contrôle du procédé tout le long de la filière dans le but de la préservation de la qualité du produit.

V.1. Aspect socio-culturel et politique

La population renfloue les bas-fonds par les ordures, pensant les transformer en des sites viables. L'absence de production de compost s'explique par l'insuffisance de la sensibilisation de la population pour cette réutilisation des ordures qui jouit d'un préjugé négatif alors que plusieurs ONG en charge de la pré collecte des ordures ménagères, pourraient avec la participation des ménages, intégrer le compostage dans leur chaîne d'élimination des ordures. Les autorités locales doivent redéfinir leur politique de gestion des ordures en associant le traitement et non se limiter à la simple collecte en vue de répondre aux nouvelles directives. La mairie de Lomé est engagée dans cette politique de gestion des déchets et a donné une autorisation à l'ONG ENPRO pour la mise en place d'un centre de tri-compostage. Il est prévu que le coordonateur de ce centre soit l'interlocuteur privilégié avec les autres acteurs et puisse rendre compte de la situation au Maire. Dans les nouvelles objectives de valorisation par compostage l'ONG ENPRO a déposé une Note d'Identification

de Projet (NIP) au niveau du ministère de l'Environnement et vient d'obtenir la lettre de non objection dans le but de pouvoir monter par la suite le dossier crédit carbone. Ce dossier viendra soutenir ce projet pour une période de 10 ans renouvelable deux fois, ce qui est un atout pour pérenniser le centre.

V.2. Conception d'une plateforme de compostage

V.2.1. Choix de la ligne de production de compost

Le procédé choisi pour la plateforme (cf. figure 44) est le tri-compostage ; cette plateforme sera installée sur le centre de transit qui reçoit déjà des ordures ménagères de la pré-collecte. La caractérisation des déchets générés à la source a permis de distinguer trois grands types de constituants : - compostables, 70 % (putrescibles et papiers cartons), - recyclables triables, 12 % (métaux, papiers-cartons et plastiques récupérables), - refus, 18 % (hétéroclites, non recyclables et sable (fines <10mm)). La figure 46 présente les différentes étapes du procédé.

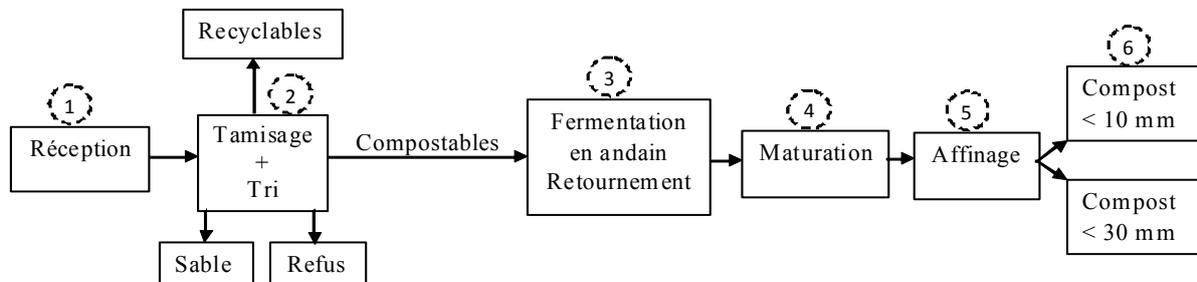


Figure 44 : Schéma de la ligne de compostage artisanal ($\leq 5T/J$)

Le bilan matière présenté au chapitre 3 a montré qu'en moyenne 70% de déchets sont compostables, un compost en fin de maturation de 47% et compost de 22% après criblage à 10 mm. Le tableau 61 présente la composition et le volume occupé par le tas au cours des différentes phases du procédé.

Tableau 61 : Données pour le dimensionnement de la plateforme déterminées à partir du bilan massique

	Substrat	Recyclables	Refus et sable	Compostables		Compost <10 mm	Compost <30 mm
				Fermentation en andain	Maturation en andain		
Tonnage	5 T	~ 0.5 T	~1T	~3,5 T	~2,4 T	~1,1 T	~2,2 T
Dimensions approximatives		V=nd stockage dans fût de 200L	V=nd stockage puis transfert	V=7m ³	V=3 m ³	1 m ³	2 m ³
				5 andains par semaine sur 6 semaines	5 andains sur 8 semaines	Ensachage et stockage	Ensachage et stockage
Remarques	réception			Retournement manuel	Statique	Box de stockage	Box de stockage
Besoins	2 jours de stockage			Surface bétonnée Couverture et apport d'eau	Surface bétonnée		

Etape 1 : Les minis tracteurs déchargent leur contenu sur une aire de réception d'environ 20 m². La plate-forme doit disposer de la place nécessaire au stockage de deux jours d'apport de déchets. Le revêtement de sol peut être bétonné ou par souci d'économie limité au sol latéritique damé, pour éviter les intrusions de fines minérales.

Etape 2 : La zone de tri est surélevée par rapport au niveau du sol. Elle consiste en une table de tri criblée de trous de 10 mm de diamètre (cf. figure 45), nécessaires pour éliminer le sable éventuel, autour de laquelle se disposent 8 trieurs soit 0,625T/j/trieur. Les recyclables (métaux, plastiques, papiers-cartons) sont récupérés par tri positif et disposés dans trois fûts de 200 litres, tandis que les compostables restent sur la table et sont mis en andains directement (tri négatif).

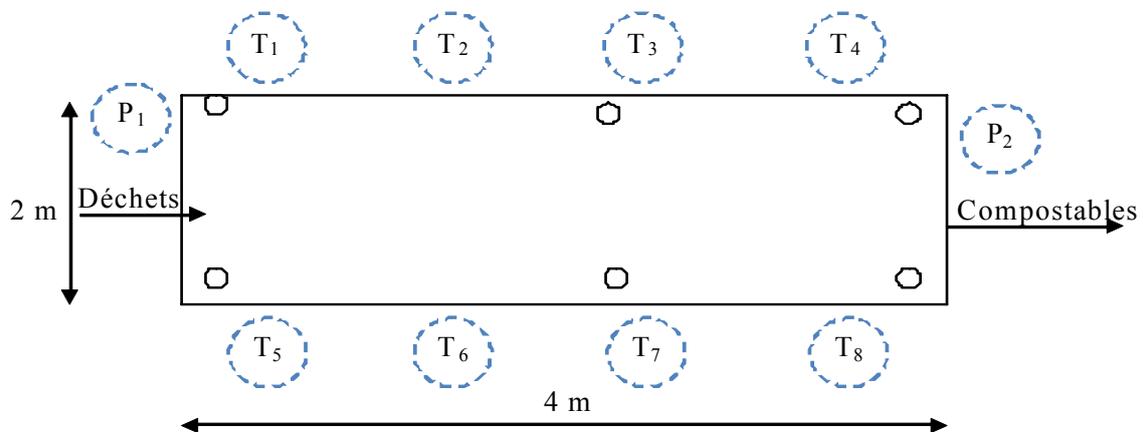


Figure 45 : Table de tri d'une unité de compostage artisanal ($\leq 5T/J$)

T₁, T₂, ..., T₈ représentent les 8 trieurs; P₁ et P₂ sont les deux pourvoyeurs.

Etape 3 : La phase de fermentation va permettre la biodégradation de la matière organique à une température élevée. Elle va durer 7 à 8 semaines avec des retournements manuels. L'apport d'eau éventuel se fera au moment des retournements. Chaque jour un andain sera constitué.

Etape 4 : La durée de maturation est d'environ 8 à 12 semaines. La zone de maturation doit pouvoir accueillir 3 mois de compost.

Etape 5 : L'affinage est réalisé manuellement sur le produit après maturation à l'aide d'un crible oblique simple avec des mailles variables en fonction des besoins (10 ou 30 mm).

Etape 6: L'ensachage du compost criblé est prévu dans des sacs de 20 à 25 litres pour sa commercialisation.

V.2.2. Dimensionnement de la plateforme.

Le tableau 62 présente le dimensionnement de l'espace et matériels de toutes les différentes

étapes du procédé.

Tableau 62 : Dimensions des différentes étapes

Étapes	Réception	Tri manuel	Fermentation	Maturation	Affinage	Ensachage
Fonctions	Aire	Table de tri	Andain	Andain	Crible	Aire et box
Unité	1	1	40	20	1	1 et 2
Type et dimensions	Surface plane bétonnée ou latérite damée S= 60 m ²	Plan de travail S= 8 m ² L: 4 m l: 2 m H: 1 m	Section triangulaire S=2 m ² H: 2m B: 2m L: 3,5m V=7m ³ P= 3,5T	Section triangulaire S=2 m ² H: 2m B: 2m L: 3,5m V= 7m ³ P= 7T	Crible oblique rectangulaire S=1,5 m ² α: 45° L:1,5 m l: 1 m	Sacs en PEHD 20 Kg V=25 L et pesée
Personnels J⁻¹	Pourvoyeurs 2	Trieurs 8	Andaineurs 2		Cribleurs et Ensacheurs 2	
Surface totale au sol	60 m ²	20 m ²	7*7*5*2 =490 m ²	7*4*5*2 =280 m ²	10 m ²	S = 10 m ² box=2*10 =20 m ²

La figure 46 montre la disposition des andains et les sens de retournement.

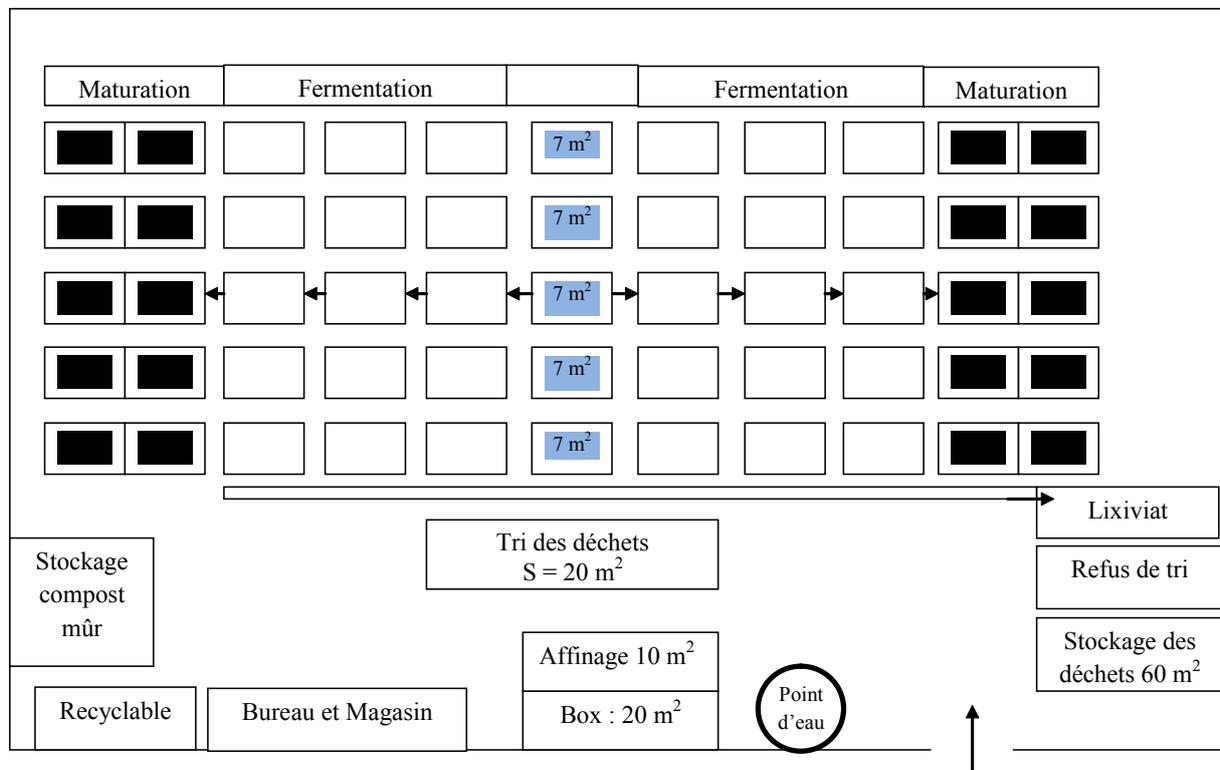


Figure 46 : Plateforme de compostage et disposition des andains

La figure 47 illustre les modes chronologiques de retournement des andains.

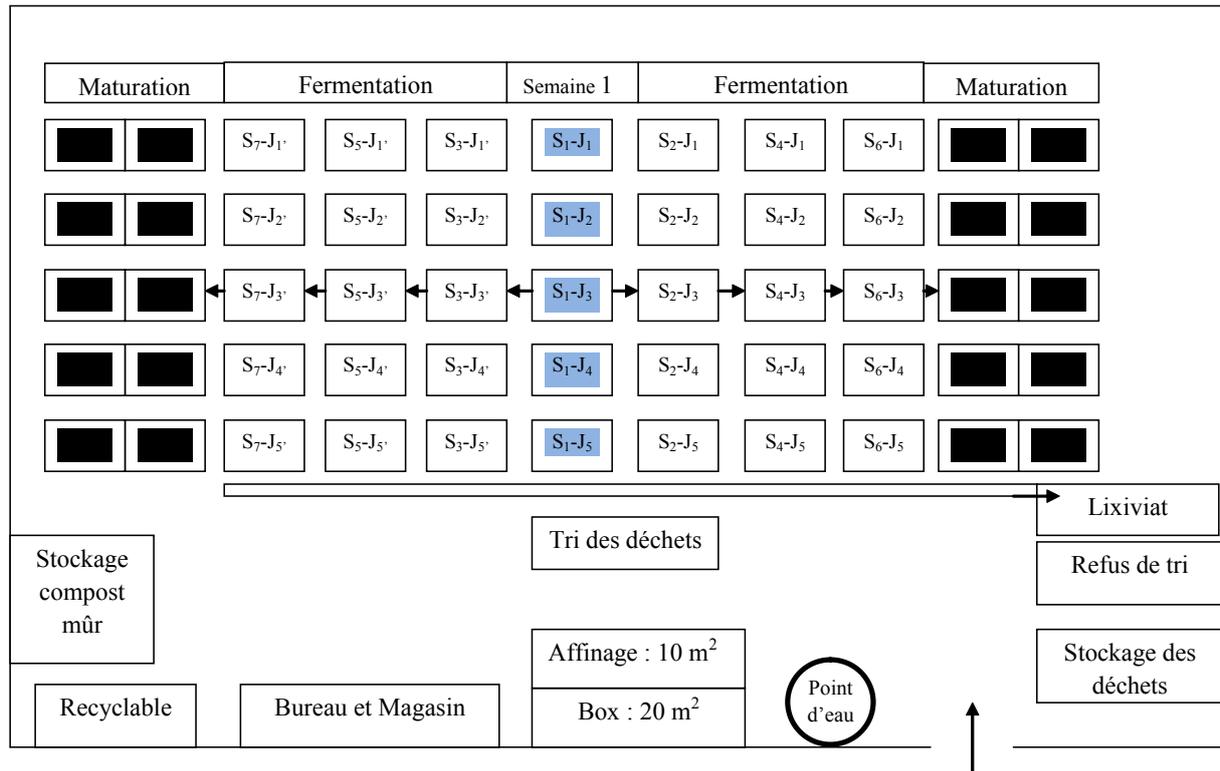


Figure 47 : Distribution des différents retournements des andains sur la plateforme de compostage

S_{1-J_1} : Tas du jour 1 de la première semaine de démarrage de l'andain;

S_{2-J_1} : Tas du jour 1 de la première semaine retourné après une semaine;

S_{3-J_1} : Tas d'un autre jour 1 retourné après une semaine correspondant à la troisième semaine du démarrage.

etc.....

S_{1-J_5} : Tas du jour 5 dans la première semaine de démarrage de l'andain

S_{3-J_5} : Tas d'un autre jour 5 retourné après une semaine correspondant à la troisième semaine de démarrage.

Toutefois si le tas vient à manquer d'oxygène, un retournement supplémentaire sera effectué.

Pour les tas de la première semaine, le premier retournement se fera à la deuxième semaine libérant les premiers andains. Les autres retournements de ces tas en cours de fermentation se feront toutes les deux semaines. Si le criblage est de 10 mm, on aura une production minimale de 22 tonnes de compost par mois d'après le tableau 62. Le tableau 63 résume la surface nécessaire pour une installation durable.

Tableau 63 : Répartition des différentes surfaces nécessaires de la plateforme de compostage
($\leq 5T/J$)

Dénomination	Nombre	Dimensions m ²	Surface utile m ²
Aire de réception des déchets bruts	1	60	60
Aire de tri des déchets bruts	1	20	20
Aire de stockage recyclables	1	10	10
Aire de stockage refus	1	10	10
Aire de fermentation	andains	7*7*5=245	245*2=490
Aire de maturation	andains	7*4*5=140 m ²	140 *2=280
Aire de criblage	1	10	10
Box de stockage de compost mûr	2	2*10	20
Point d'eau	1 ou 2		
Bureau + Matériel	1	150	150
Garage véhicules	1	60	60
Surface de circulation			1000
SURFACE TOTALE			2110

V.3. Suivi d'exploitation

Le tableau 64 résume, pour les objectifs fixés c'est-à-dire le fonctionnement de la plateforme et la qualité du compost produit, les indicateurs les plus pertinents, la fréquence et la méthode préconisée pour leur mesure. Les résultats obtenus doivent être comparés aux résultats attendus d'après les prévisions ou la bibliographie.

Tableau 64 : Indicateurs de suivi de fonctionnement de la plateforme

Objectif	Indicateur	Fréquence	Méthode
Bilan de fonctionnement			
Caractérisation des déchets entrants		Campagne initiale approfondie puis ponctuelle (1x/an)	Tri par taille et par catégories
Quantité de déchets entrants	Masse ou volume	continue	Pesée ou conversion volume / masse (mesure densité)
Suivi de la fermentation	température	quotidien	thermométrie
	humidité	A chaque retournement	A la poignée ou en étuve (méthode normalisée)
Rendement en compost	T/T déchets entrants	continue	Pesée
Rendement en recyclables (global et par matériau)	T/T déchets entrants	continue	Pesée
Taux de refus (par étape de tri)	T/T déchets entrants	périodique	Pesée
Taux de MO dans les refus	% MO (/ MS)	Mesure ponctuelle	Examen visuel Séchage et tri manuel
Consommation énergétique	KWh/ T ou l de carburant / T de déchet entrant	mensuel	Lecture de compteur
Consommation en eau	m ³ /T de déchet entrant	mensuelle	Lecture de compteur
Besoins en personnel (si possible par étape)	Heures de travail / T de déchets entrants	mensuelle	Relevés d'heures de travail
Incidents et accidents (par type : travail, mécanique,...)	Nombre	mensuelle	Carnet de bord
Gestion des lixiviats (le cas échéant)	Volume produit (m ³)		Volumétrie (recueil en fût ou en bâche, en continu)
Suivi qualité compost			
Humidité	H ₂ O / MB	A chaque tas	Séchage en étuve à 105°C
Densité vrac	T / m ³	Saisonniers	Mesure en seau, sans tassement
Teneur en matière organique	Teneur en MOT	Saisonniers	Perte au feu par calcination à 550°C
Teneur en éléments fertilisants	N Total, P ₂ O ₅ , K ₂ O, CaO	Saisonniers	Méthodes normalisées
Teneur en oxygène	g. O ₂ /h	Saisonniers	Sonde à oxygène
Maturité	CAE finale	Saisonniers	Montée en température en vase Dewar
id	Phytotoxicité	À chaque tas	germination petites graines sensibles (ex : cresson)
id	AT4	À chaque tas	Test respirométrie
Impuretés	Teneur en verre et plastiques	Saisonniers	Séchage, criblage et tri ou méthode normalisée (NF U 44 164)
Teneur en sels et acidité	Conductivité et pH	Saisonniers	Conductimétrie et potentiométrie
Eléments traces métalliques	Hg, Cd, Cr, Cu, Zn, Pb, Ni	Annuelle	Sur échantillon moyen annuel, par SAA

V.4. Débouché et commercialisation du compost

L'enquête a été effectuée en janvier, février et juillet 2010 sur un échantillon de 50 maraîchers dont la distribution est présentée dans le tableau 65. La première phase a été réalisée en janvier et février 2010. La deuxième phase en juillet 2010 en collaboration avec les consultants de Gévalor (Association française pour la gestion durable et la valorisation des déchets et des matières premières minérales, <http://www.gevalor.com>).

Tableau 65 : Résultats des enquêtes auprès des maraîchers utilisateurs d'engrais organiques et chimiques

	Zone portuaire		Togblékopé		
Hommes	10		7		
Femmes	20		13		
Total	50				
	Amendements utilisés				
	Fumiers de volailles	Déchets putrescibles	Coques et cendres de graines de coton	Engrais chimique NPK	Compost urbain
Provenance	Majoritairement venus du Ghana	Ménages	NIOTO	Marché de Lomé	Université de Lomé
Coût (FCFA/ 20 kg)	1.200,-	gratuit	gratuit	11.000,-	Essais
Mode d'amendement	Epandage avant ou après semi	Enfouissement et mis en jachère de la parcelle	Enfouissement et mis en jachère de la parcelle		Epandage Avant semi à 20 T/ha
Taux d'utilisation (%)	100	15	20	27	10
Rendement	Engrais <input type="checkbox"/> Fumiers <input checked="" type="checkbox"/> Compost <input checked="" type="checkbox"/> Coques <input type="checkbox"/> Putrescibles des ordures				

Le coût de l'engrais représente une barrière pour son utilisation bien que son rendement soit meilleur que celui des autres amendements, ce qui est un atout pour le compost. Les coques de graines de coton et leur cendre sont les déchets de la Nouvelle Industrie des Oléagineux du Togo (NIOTO) après extraction d'huile. Seuls les maraîchers disposant de grandes surfaces cultivables procèdent à l'enfouissement des putrescibles et des coques. Bien que le compost présente d'autres avantages, son prix de vente proposé par l'ONG exploitant de la plateforme doit tenir compte du coût du fumier afin de promouvoir et l'imposer sur le marché. Le compost pourrait être vendu autour de la moitié du prix du fumier dès le début de

fonctionnement de la plateforme, soit 700 FCFA comme cela a été le cas à la fin des essais chez les 10 % des maraîchers. Sans amendement des sols destinés à l'agriculture, le rendement de production agricole (carotte, betterave, maïs, mil, haricot,...) est faible chez certains agriculteurs du Nord Togo qui représentent près de 90 % de leur population. Ils constituent un potentiel important pour le marché du compost en dehors des maraîchers.

V.5. Aspect financier

Un sac de compost pèse environ 20 kg et coûte 700 FCFA (moins de 1,1 euro). Une tonne de compost correspond à 50 sacs et coûtera au moins 35 000 FCFA (53 euros environ) comparés à une tonne de fumier qui coûte 60 000 FCFA (91 euros environ). Les agents à recruter devant avoir une formation de marketing et devront convaincre les utilisateurs de composts sur la base des recherches scientifiques et des essais agronomiques.

Lorsque la plateforme atteindra sa production journalière de compost, elle produira à la fin de chaque mois 22 tonnes de compost. Ce qui correspond à un coût minimal de 770.000FCFA (1175 euros environ) par mois lorsqu'on aura atteint la capacité nominale de 5 tonnes par jour. Le tableau 66 présente le coût de fonctionnement de la plate forme. Pour le personnel, le coût est établi sur la base du smig du Togo et de la qualification des travailleurs.

Tableau 66 : Evaluation du coût de fonctionnement de la plateforme

Frais		Coût mensuel		Coût annuel	
		CFA	Euro	CFA	Euro
Personnels	Pourvoyeurs et trieurs	300.000,-	458	3.600.000,-	5.496,-
	Andaineurs	60.000,-	92	720.000,-	1.099,-
	Cribleurs et ensacheurs	60.000,-	92	720.000,-	1.099,-
	Gardien	30.000,-	46	360.000,-	550
	Contrôleur	50.000,-	76	600.000,-	916
Consommables	Eau et électricité	150.000,-	229	1.800.000,-	2.748,-
	Bureau	15.000,-	23	180.000,-	275
Communication Information	Communication	10.000	15	120.000,-	183
	Information	50.000	76	600.000,-	916
Divers		50.000,-	76	600.000,-	916
Total		725.000,-	1.107,-	8.700.000,-	13.282,-

Ce coût de fonctionnement n'englobe pas le coût d'installation.

Le coût d'installation (aménagement du site et équipement) est estimé à 6.566.500 FCFA

(10.025 euros)

La plateforme aura donc à la fin de chaque mois un bénéfice de 45.000 FCFA (68 euros environ) dans la vente du compost, si on ne tient pas compte du coût d'installation.

Plus on augmentera la production journalière, plus le bénéfice va augmenter. Le nouveau projet de compostage prévoit d'atteindre une capacité minimale de traitement de 21 tonnes par jour de déchets bruts. D'autres revenus pourraient augmenter ce bénéfice comme la vente des matériaux recyclables, participation des ménages dans la collecte, la subvention par les privés et le montage d'un dossier crédits carbone ; ceci contribuera à supporter d'autres coûts (entretien de l'emplacement et les équipements, achat des consommables, dépenses supplémentaires liées à l'eau et à l'énergie, salaires et gestion, etc.).

Cette unité de compostage atteindra une capacité de traitement de 6000 tonnes de déchets bruts humides au bout de deux ans, pour progresser ensuite vers une capacité de 20 000 tonnes à la fin de la 10ème année. Elle permettra de réduire des émissions de gaz à effet de serre de l'ordre de 60 000 tonnes de CO_{2eq} en 10 ans. Au bout de deux ans, elle devra être capable de s'autofinancer. L'ensemble des financements et recettes reçus, ainsi qu'un suivi scientifique rigoureux au cours des deux premières années permettront la pérennisation de la plate-forme de compostage.

CONCLUSION GENERALE

Ce programme a été réalisé dans le cadre d'un projet de recherche CORUS N°6126 dans le cadre d'un partenariat entre le laboratoire GTVD de l'Université de Lomé et le laboratoire GRESE de l'Université de Limoges. Ce projet vise à valoriser les déchets urbains générés dans les quartiers de la ville de Lomé sur la base des données scientifiques actualisées et fiables.

Les résultats de la recherche bibliographique montrent qu'il manque toujours des informations sur la connaissance des déchets dans les PED. Les voies de valorisation ne sont toujours pas étudiées dans la plupart de ces pays par faute de recherche sur l'étude du gisement des déchets urbains et sur leurs modes d'élimination. Cette faiblesse en matière de caractérisation des déchets est la source des nombreuses erreurs et d'échecs cuisants dans leurs modes d'élimination. Les rares pays qui ont abordé la valorisation par compostage se sont trouvés confrontés à des difficultés dues à une importation de technologies de compostage utilisées dans les pays du nord et pas toujours adaptées dans les pays du sud.

Concernant l'étude du gisement, la revue bibliographique a mis en exergue plusieurs méthodes d'échantillonnage qui est la base d'une caractérisation fiable. Les grandes hétérogénéités et variabilités climatiques, urbaines et socio-économiques des déchets générés rendent inopérantes les méthodes développées dans les contextes des pays industrialisés. Les particularités des déchets urbains des pays du sud imposent une démarche méthodologique basée sur des mesures et des analyses réelles d'échantillons représentatifs, selon des protocoles précis et adaptés à la nature et aux contextes locaux.

Les campagnes de caractérisation ont été menées durant deux saisons (sèche et humide) et sur deux ans 2009 et 2010. Les zones d'étude étaient la décharge finale de la ville de Lomé en prenant en compte les déchets provenant des sept centres de transit officiellement reconnus et, le quartier d'Agbalépédogan, avec les déchets collectés auprès des ménages. Le protocole d'échantillonnage a permis la représentativité des échantillons, il est basé sur des caractéristiques propres aux déchets locaux et aux cas particuliers des centres de transit qui assurent le relais entre la pré-collecte assurée par les ONG et le transport vers la décharge finale. La caractérisation physique a été réalisée suivant 4 fractions granulométriques (gros >100mm, moyens <100-20mm>, fines <20-10mm> et extra fines <10mm) et 9 catégories (putrescibles, papiers-cartons, textiles, plastiques, verres, métaux, CNC, INC et les spéciaux). Les déchets urbains générés à Lomé sont, comme dans tous les PED, d'origines diverses, ménages, artisans, petites entreprises, centres de soin etc.) Un ensemble d'analyses physico-chimiques (H%, MO%, COT, teneurs en métaux) nécessaires ont été réalisées et ont permis d'obtenir les indications nécessaires aux choix du traitement.

Avec des densités importantes de 0,44 à 0,67 et avec une production de 0,91 kg/hab/j, les déchets montrent une composition spécifique avec une forte proportion de la fraction fine (<20mm), en moyenne de 46 % en saisons sèches et 56 % en saisons humides pour les déchets arrivant à la décharge finale, alors qu'elle est de moins de 10 % dans les ménages. Une forte proportion de sable est donc ramassée avec les déchets dans les centres de transit et transportée vers la décharge finale. La proportion des putrescibles à la décharge finale est comprise entre 10 % et 15 %, alors qu'elle varie de 60 à 70 % des déchets produits dans les ménages. Le taux d'humidité des déchets est fort dans les ménages, mais faible à la décharge finale. Quant à la matière organique, son faible taux à la décharge finale est lié à sa teneur (8-9 %) dans la fraction fine, alors qu'elle constitue la fraction la plus importante en termes de quantité. Pour les métaux, à part le fer dont la quantité reste la plus importante dans les déchets, la teneur en plomb est aussi très élevée dans les déchets, soit 516 mg/kg.

Au vu des résultats de la caractérisation, la filière compostage apparaît comme une évidence pour le traitement des déchets dans les quartiers. Cette filière, pour être pérenne, doit aborder tous les aspects techniques, culturels et socio-économiques, en relation avec les conditions locales dans les quartiers périurbains pauvres de Lomé. Elle a pris en compte en plus de la production, la pré-collecte, le compostage informel et l'utilisation agronomique du produit fini. Un ensemble d'outils, d'indicateurs et de paramètres ont été répertoriés pour permettre à tous les acteurs de la filière compostage de contrôler tous les processus impliqués.

En ce qui concerne la pré-collecte dans le quartier pilote, le taux d'abonnement représente 53%. Le coût de collecte est de 27 €/tonne et le frais de collecte est de 24 €/tonne pour une charge horaire faible pour le personnel (0,4T/H/J).

L'étude expérimentale du procédé de compostage a permis l'optimisation de la ligne de production et de la qualité du compost obtenu. Deux types de compostage ont été comparés en cuves et en tas (andains) ainsi que quatre types de substrat à base d'ordures ménagères et en mélange avec le fumier et le phosphate naturel. Les besoins en eau au cours du compostage varient de 0,6 à 1,6 m³ par tonne de déchets compostés. Les valeurs de pH en fin du processus, dans les composts sont basiques (8-9) ce qui a pour conséquence une perte d'azote sous forme d'ammoniac et un rapport C/N relativement fort. Cette perte d'azote au cours du processus est aussi liée à l'émission de N₂O, N₂ and NO_x. Plusieurs auteurs considèrent qu'un compost mûr pourrait avoir un rapport C/N autour de 20 (Chen et al., 2005) ou compris entre 6 et 21 (Mbuligwe and al., 2002) ou entre 13,7 et 32 (Aulinas Masó et Bonmati Blasi, 2008). Un rapport C/N élevé entraînerait une minéralisation de l'azote de ce fait réduirait la teneur d'azote dans le sol tandis qu'un rapport C/N faible libérerait une grande quantité de sel basique soluble rendant de ce fait le sol réducteur et affecterait la croissance des plantes. La

forte teneur en cendres dans les déchets peut être la cause de ces valeurs de pH, ce qui a été confirmé en fin de maturation par les teneurs élevées en potassium.

Le bilan matière en fin du procédé se présente comme suit : pour les cuves (0,69 – 0,71 tonne de compost par tonne de déchets compostés) et pour les andains (0,25 – 0,26 tonne de compost par tonne de déchets compostés), dans le cas d'un compost fin <10mm. Les taux de recyclables sont de 6 % pour les déchets préalablement triés compostés dans les cuves et de 12 % pour les déchets bruts compostés en andain.

Les teneurs en matière organique se situent en fin de maturation entre 27 % et 34 %. Ces valeurs sont dans la gamme des valeurs préconisées par l'Ecolabel Européen.

La concentration des polluants métalliques a été déterminée : seule la teneur en plomb est au dessus des normes de compost habituellement observées. Un test de lixiviation a été effectué en vue de vérifier si le plomb sera transféré aux plantes après épandage des composts. On remarque que, plus le taux de la matière organique est élevé, plus le plomb est retenu. Le plomb semblerait être retenu sur la matière organique et sur les hydroxydes métalliques. La teneur d'un métal dans un compost varie en fonction de la maturité du compost. Au cours du processus de compostage la concentration de la matière humique augmente quand la teneur en matière organique diminue. Plus cette concentration est forte plus les métaux sont piégés diminuant leur biodisponibilité (Hargreaves et Al, 2008). Le risque est donc faible en terme de phytotoxicité après amendement des sols (Farrel et Jones, 2009). Le compost peut donc stabiliser ou immobiliser les métaux en phase solide. Mais toutefois mieux le tri sera effectué avant le compostage, plus le risque de contamination de la chaîne alimentaire sera faible. La complexité des mécanismes biologiques, physiques et chimiques dans le sol implique une grande prudence. Une étude sur la biodisponibilité des métaux par des plantes types s'avère nécessaire pour le futur.

Le test AT4 donne des valeurs entre 6 et 7 mgO₂/g(MS), inférieures aux valeurs limites. De plus l'IG est supérieur à 50%. Ce qui montre que les composts sont mûrs. Les résultats des essais agronomiques sur sols des composts sont très satisfaisants pour les rendements de plusieurs plantes (carotte et betterave), ce qui est un avantage pour les maraîchers et les agriculteurs qui ont des difficultés pour se procurer un amendement organique ou minéral (fumier, engrais, etc.) (Petric et al., 2009).

Sur la base de ces résultats une plate forme de tri-compostage pouvant traiter, dès son démarrage 5 tonnes de déchets bruts par jour, a été étudiée et proposée, en partenariat avec une ONG, ENPRO chargée de la pré-collecte, qui pourrait ainsi augmenter ses revenus. Cette étude opérationnelle après la phase de recherche scientifique, a permis,

- la détermination des indicateurs les plus efficaces pour optimiser la pré-collecte : taux d'abonnement, taux et rendement de collecte, coût de collecte (€/tonne), etc.
- le dimensionnement d'une plateforme artisanale (≤ 5 tonnes/j), optimisant son fonctionnement et la qualité du compost produit, par la mise en place d'outils et d'indicateurs de suivi et de qualité.

Un projet de développement pour la mise en place de cette plateforme de compostage a été rédigé en collaboration avec l'ONG ENPRO et déposé au niveau du Fond Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) et du Programme de Petites Initiatives (PPI) ; il vient d'être financé par le FFEM et par le PPI pour la construction de la plateforme et pour son fonctionnement sur deux ans, à hauteur de 50.000,- Euros.

Par ailleurs des recherches devront se poursuivre afin d'améliorer les résultats et surtout envisager d'autres voies telles que la valorisation des recyclables en l'occurrence l'élaboration des briquettes avec les papiers-cartons ou les pavés avec les plastiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

- Aboulam, S., 2005. Recherche d'une méthode d'analyse du fonctionnement des usines de tri-compostage des déchets ménagers. Fiabilité des bilans matière. Thèse de l'INPT N° 2216.
- ADEME, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, France, 1993. Méthode de caractérisation des ordures ménagères, MODECOM TM – Manuel de base – édité par l'Ademe Centre d'Angers, Septembre 1993 - Réf 1601 - Coll., « Connaître pour agir », 64p
- ADEME, 1998. "Le compostage des déchets organiques des ménages en Allemagne - Etat de l'art et retours d'expérience." Paris, France.188.
- ADEME, 1999. Les installations de stockage de déchets ménagers et assimilés : techniques et recommandations. ADEME Editions, Paris, 106 pages.
- ADEME, 2000. Déchets municipaux 2 ème édition. ADEME édition, Paris, 11 pages.
- ADEME, 2001. "Déchets organiques - Essai agronomique de plein champ d'un compost de déchets verts (résultats 8e année d'expérimentation)." Paris, France.
- ADEME, 2005 a. Gestion des déchets ménagers ; Etude de préfiguration de la campagne nationale de caractérisation des ordures ménagères ; Rapport intermédiaire : les objectifs Version définitive. <http://www.sinoe.org/espaceInfos/rubrique/consultDoc.php?IDDOC=86&PHPSESSID=dd36cc942daf00cd6f799e4de2b1fa78>
- ADEME, 2005 b. Mieux connaître les déchets produits à l'échelle du territoire d'une collectivité locale ; Guide Méthodologique ; Version Expérimentale ; 111 pages.
- ADEME, 2008. Guide pratique sur le compostage. ADEME édition, Paris, 20 pages.
- AFNOR, 1996. Déchets : Caractérisation d'un échantillon de déchets ménagers et assimilés ; Eds AFNOR ; 24 pages.
- AFNOR, 2001. Caractérisation des déchets : Dosage du carbone organique total (COT) dans les déchets, boues et sédiments ; NF EN 13137, X 30-404.
- AFNOR, 2004. Amendements organiques et supports de culture Méthode d'analyse des composants inertes dans un compost ; Eds AFNOR ; 14p.
- AFNOR, 2005. Amendements organiques et supports de culture : dénominations, spécifications et marquage ; Eds AFNOR ; 16p.
- 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.
- Aina, M., Matejka, G., Thonart, P., Hillisgmann, S., 2007. Caractérisation physico-chimique de l'état de dégradation de déchets stockés dans une décharge sèche (zone semi- aride): site expérimental de Saaba (Burkina Faso). Déchets, Sciences et Techniques n°47 / Juillet-Aout-Septembre 2007
- Albiach, R., Canet, R., Pomares, F., Ingelmo, F., (2001) Organic matter components and aggregate stability after the application of different amendments to a horticultural soil. *Bioresource Technology*, 76, 125-129.
- Albrecht, R., 2007. Co- compostage de boues de station d'épuration et de déchets verts : nouvelle méthodologie du suivi des transformations de la matière organique
- Aloueimine, S. O., Matejka, G., Zurbrugg, C., SIDI, M., MEO, 2006 a. Caractérisation des ordures ménagères à Nouakchott – Partie 1 : Méthode d'échantillonnage. Déchets, Sciences et Techniques n° 44, décembre 2006.
- Aloueimine, S. O., Matejka, G., Zurbrugg, C., SIDI, M., MEO, 2006 b. Caractérisation des ordures ménagères à Nouakchott – Partie 2 : Résultats en saison sèche et en saison humide » Déchets, Sciences et Techniques n° 44, décembre 2006.
- 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
- Annabi, M., 2005. Stabilisation de la structure d'un sol limoneux par des apports de composts d'origine urbaine: relation avec les caractéristiques de leur matière organique. Thèse INA Paris-Grignon.
- ANPE, 1998. Agence Nationale de la Protection de l'Environnement. TUNISIE - Etude d'exécution de l'unité de compostage des ordures ménagères de Sousse. Rapport technique d'exécution. Etude préparée pour l'ANPE par SWECO International (Suède) et MEDIEN (Tunisie) – Septembre 1998, 151p.
- ANPE, 1999. Agence Nationale de la Protection de l'Environnement. TUNISIE - Etude d'exécution de l'unité de compostage des ordures ménagères de Sousse. Rapport technique d'exécution. Etude préparée pour l'ANPE par SWECO International (Suède) et MEDIEN (Tunisie) – Janvier 1999, 75p.
- ANPE, 2000. Agence Nationale de la Protection de l'Environnement. TUNISIE - Etude d'exécution de l'unité de compostage des ordures ménagères de Sousse. Rapport technique d'exécution. Etude préparée pour l'ANPE par SWECO International (Suède) et MEDIEN (Tunisie) – Décembre 2000, 81p.
- ANPE, 2004. Agence Nationale de la Protection de l'Environnement, Tunisie - Evaluation technico-économique des procédés de traitement des déchets ménagers en Tunisie. Phase II – Opportunités offertes pour le traitement des déchets municipaux en Tunisie – Plan d'action, Etude réalisée pour l'ANPE par GIRUS/ Midi Environnement/ SMART Consult – Juin 2004, 79p.
- ANRED, 1986. Agence Nationale pour la Récupération et l'Élimination des Déchets, France – Rôle et fonctionnement des décharges dans les agglomérations des PED - Programme Rexcoop, 1986, 167 p.
- ANRED, 1992. Agence Nationale pour la Récupération et l'Élimination des Déchets, France- Contribution à une évaluation des flux et filières des déchets dans les Pays du Sud – Déchets solides municipaux des PVD/Etude pays par pays – (les Transformeurs), Janvier 1992, 115p.
- Arinola, O.G., Arinola, A.M., 1995. "Solid waste in urban and rural areas of Ibadan, Nigieria : composition, treatment and public health concerns." *Compost Science & Utilization* 3 (3): 80-83.
- Arykan, O., Ozturk, I., Demir, I., 1997. Changes in MSW quality and influence on waste management in Istanbul, Metropolitan city. *Proceedings Sardinia 97, Sixth International Landfill Symposium – Cagliari, Italy: 13-17 October 1997.*, pp 449-456.
- Asomani-Boateng, R., Haight, M., Furedy, C., 1996. "Community composting in west Africa." *Biocycle* 38 (01): 70-71.
- Atlas Economique Mondial, 2007. PIB et PNB de l'Afrique sub-saharienne. *CIA's World Fact Book*.
- Aulinas Masó, M., Bonmati Blasi, A., 2008. Evaluation of composting as a strategy for managing organic wastes from a municipal market in Nicaragua. *Bioresource Technology* 99 (2008) 5120-5124.
- Aye, L., Widjaya, E.R., 2006. Environmental and economic analysis of waste options for traditional markets in Indonesia, *Waste Management* vol. 26, no. 10, pp. 1180-1191

B

- Barrena, R., Turet, J., Busquets, A., Farrés M., Font X., Sánchez A., 2010. Respirometric screening of several types of manure and mixtures intended for composting. *Bioresource Technology*. doi:10.1016/j.biortech.2010.09.011.
- Bayer, E. A., Shimon, L. J. W., Shoham, Y., Lamed, R. 1998. Cellulosomes--Structure and Ultrastructure. *Journal of Structural Biology* 124, 221-234.

- Belyaeva, O.N., Haynes, R., 2009. Chemical, microbial and physical properties of manufactured soils produced by co-composting municipal green waste with coal fly ash. *Bioresource Technology* 100 (2009) 5203–5209.
- Ben Hriz, I., Mediouni, H., Kacem, M., Mgaidi, A., 2010. Caractérisation de la mobilisation des polluants inorganiques dans des sols pollués. Acte de colloque Egypte E3D-2010.pp.41-48
- Bernache, G. 2003. The environmental impact of municipal waste management : the case of Guadalajara metro area. *Resources Conservation & Recycling* 00: 1-15.
- 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.
- Berthier, H. C., 2003. Garbage, work and society. *Resources, conservation and recycling*, 39(3), 193-210
- Bertolino, R., Lardinois, I., 1998. "Grass roots composting in urban centers." *Biocycle* 39 (06): 67-68.
- Binner, E., Zach, A., 1998. Biological Reactivity of Residual Waste in dependence on the duration of Pretreatment. In *The 3rd Swedish Landfill Symposium*, Lulea, Sweden, 1998, 21p.
- Bionet, 2002. "Biological waste treatment in Europe - Technical and market development." In: [en ligne]. Disponible sur: www.bionet.net.
- Blanchette, R. A. 1995. Degradation of the Lignocellulose Complex in Wood. *Canadian Journal of Botany* 73, S999-S1010.
- Bolan, N. S., Adrianob, D. C., Natesana, R., Koob, B.-J. 2003. Effects of Organic Amendments on the Reduction and Phytoavailability of Chromate in Mineral Soil. *Journal of Environmental Quality* 32, 120-128.
- Bresson, L. M., Koch, C., Le Bissonnais, Y., Barriuso, E., Lecomte, V. 2001. Soil surface structure stabilization by municipal waste compost application. *Soil Science Society of America Journal* 65, 1804-1811.
- Brewer, L.J., Sullivan, D.M. 2003. "Maturity and stability evaluation of composted yards trimmings." *Compost Science & Utilization* 11 (2): 96-112.
- Brunetti, G., Plaza, C., Clapp, C.E., Senesi, N., (2007) Compositional and functional features of humic acids from organic amendments and amended soils in Minnesota, USA. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(6), 1355-1365.
- 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.

C

- Cambardella, C.A., Richard, T.L., Russell, A., (2003) Compost mineralization in soil as a function of composting process conditions. *European Journal of Soil Biology*, 39(3), 117-127.
- Canet, R., Pomares, F., 1995. "Changes in physical, chemical and physicochemical parameters during the composting of municipal solid waste in two plants in Valencia." *Bioresource Technology* 51: 259-264.
- C.C.Q.C, 2001. "Compost maturity index." CALIFORNIA COMPOST QUALITY COUNCIL. 26.
- 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
- CEN, 2004. Commission Européenne de Normalisation - Characterisation of waste – Sampling of waste materials: Framework for the preparation and application of a

- sampling Plan - norme en projet : prEN 14899 - CEN TC292/WG1.
- Celik, I., Ortas, I., Kilic, S., (2004) Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxerert soil. *Soil and Tillage Research*, 78(1), 59-67.
- 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.
- Chang, J.I., Chen, Y.J., 2010. Effects of bulking agents on food waste composting. *Bioresource Technology* 101 (2010) 5917–5924
- Changa, C.M., Wang, P., Watson, M.E., Hoitink, H.A.J., Michel, F.C., 2003. "Assessment of the reliability of a commercial maturity test kit for composted manures." *Compost Science & Utilization* 11 (2): 125-143.
- Chen, M.J., Liao, C.Z., Tsai, Y.F., 2005. Manual and Case Studies of Composting Technology and Equipment. Issued by the Taiwan Green Productivity Foundation, Prepared for the Industrial Development Bureau, Ministry of Economic Affairs, Taiwan.
- Chikae, M., Ikeda, R., Kerman, K., Morita, Y., Tamiya, E., 2006. Estimation of maturity of compost from food wastes and agro-residues by multiple regression analysis. *Bioresour. Technol.*, 97: 1979-1985
- Chitsan, L., 2008. A negative-pressure aeration system for composting food wastes. *Bioresource Technology* 99 (2008) 7651–7656
- 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
- Commission européenne DG ENV, 2002. Brochure sur le compostage. Expériences réussies de compostage et de collectes sélectives.
- Cointreau-Levine, 1996. Privatisation de la gestion des déchets solides dans les pays en développement. Intervention au Séminaire Régional IAGU-GREA-AOPDM « Déchets solides en milieu urbain d'Afrique de l'ouest et centrale – vers une gestion durable », Abidjan, 14 au 16 février 1996, 16p.
- Cointreau, S., 2006. Occupational and Environmental Health Issues of Solid Waste Management; Special Emphasis on Middle- and Lower-Income Countries. Urban papers The World Bank Group WASHINGTON, D.C. 57 pages.
- Copper, B.J., 2008. "Stability (Biodegradability)." In: [en ligne]. Disponible sur: http://www.ecn.nl/docs/society/horizontal/hor7_stability.pdf. (Consultée en 2008).

D

- 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.
- Debout, L., 2010. Le partenariat informel/entreprise, le cas de la réforme de la gestion des déchets au Caire (Egypte). Acte de colloque Egypte E3D-2010.pp.115-120.
- Debosz, K., Petersen, S.O., Kure, L.K., Ambus, P., (2002) Evaluating effects of sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties. *Applied Soil Ecology*, 19(3), 237-248.
- de Guardia, A., Mallard P., Teglia C., Marin A., Le Pape C., Launay M., Benoist J.C., Petiot C., 2010. Comparison of five organic wastes regarding their behaviour during composting: Part 1, biodegradability, stabilization kinetics and temperature rise. *Waste Management* 30 (2010) 402–414.
- Dimitri, P.K., Robert, K. H., 2005. Carbon dioxide and ammonia emissions during

- composting of mixed paper, yard waste and food waste. *Waste Management* 26 (2005) 62-70.
- Diop, O., 1988. Contribution à l'Etude de la Gestion des Déchets Solides de Dakar: Analyse systématique et aide à la décision, thèse de doctorat N°757, Département de Génie Rural et Géométrie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 292 pages.
- Dix, N. J., Webster, J., 1995. *Fungal Ecology*, Chapman & Hall eds, pp. 549, Cambridge.
- DGCL-DEA, 1991. Direction Générale des Collectivités Locales- Direction de l'Eau et de l'Assainissement, Maroc - Principes et pratiques pour la gestion rationnelle des déchets solides municipaux – Document réalisé pour le Ministère de l'Intérieur Marocain avec le soutien de l'Agence Américaine pour le Développement International (USAID), 1991, 82p.
- 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.
- Dulac, N., 2001. "The organic waste flow in integrated sustainable waste management." Gouda, Hollande, Waste.50
- Domingo, J. L., Nadal, M., 2009. Domestic waste composting facilities: A review of human health risks. *Environment International* 35 (2009) 382–389.

E

- Enda, 1998. Preceup, Volet recherché capitalisation, Pratiques efficaces de gestion des déchets solides dans les villes d'Asie, une analyse régionale, Siddhi-Enda
- Erdin, E., 1999. "Recent experience on composting in the town Izmir of Turkey." dans "International conference on biological treatment of waste and the environment (ORBIT 99)". Weimar, Germany.

F

- Fardeau, J.C., 2000. "Estimation de la biodégradabilité des éléments nutritifs contenus dans les produits résiduaux organiques." *Ingénieries EAT* 21: 15-28.
- Farrel, M., Jones, D.L., 2009. Critical evaluation of municipal solid waste composting and potential compost markets. *Bioresource Technology* 100 (2009) 4301-4310.
- 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).
- F.C.Q.A.O, 1994. "Methods book for the analysis of compost." *Kompost Information*. B. ed.
- 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.
- Flyhammar, P., et Hankansson, K., 1999. The release of heavy metals in stabilized Municipal Solid Waste. *The Science of the Total Environment*. 243/244: 292-303.
- Folléa, V., Brunet, F., Benrabia, N., Bourzai, M. P., Faucompre, P., 2001. "Revue comparative des modes de gestion des déchets urbains adoptés dans différents pays de la ZSP." Agence française du Développement. octobre 2001. 24.
- Forster, J. C., Zech, W., Wurdinger E., 1993. "Comparison of chemical and microbial methods for the characterization of the maturity of composts from contrasting sources." *Biol. Fertil. Soils*, 16:93-99.
- François, V., 2004. Détermination d'indicateurs d'accélération et de stabilisation de déchet ménagers enfouis. Etude de l'impact de la recirculation de lixiviats sur colonnes de déchets, thèse de doctorat N°8-2004, Université de Limoges.

- Francou, C. 2003. Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains : Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage – Recherche d'indicateurs pertinents, Thèse de Doctorat, Institut national agronomique Paris-Grignon, 289p.
- Furedy, C., 2000. "Cities in Portugal and Turkey set up composting facilities." *Biocycle* 41 (02): 82.

G

- Gamage, W., Vincent, S., Outerbridge, T., 1999. "Low-tech composting on an Island." *Biocycle* 40 (04): 79-80.
- 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.
- Gillet, 1985. *Traité de gestion des déchets solides et son application aux pays en voie de développement – Copenhague : OMS-PNUD, 1985- Tomes 1 et 2. 980 pages.*
- Gnanih, V., Dara, S., Gnanih, Y., 1997. "Recherche expérimentale : amélioration de la filière compostage au CTOM - Bénin." Tohouè, Bénin, Centre de traitement des ordures ménagères CTOM / EMMAUS. Secrétariat d'état à la coopération française et a la francophonie. ADEME. 29 mars 1997. 25.
- Godden, B. 1986. "Les tests enzymatiques et chimiques de maturité des composts." *Compost Information* 22: 20-24.
- Gonzalez Del Carpio, C., 1998. "Composting has promising future in Mexico." *Biocycle* 39 (12):76-77.
- Grossmann, J., 2003. "Mesures d'urgences pour une remise à niveau de la station de compostage de Blida" Rapport de la coopération technique algero-allemand entre le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE) et la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH - Programme Gestion de l'Environnement. Mars 2003. 56p.
- Guittonny-Larchevêque, M., 2004. Valorisation d'un compost de boues urbaines en garrigue pour le reboisement : Comportement des jeunes arbres d'une plantation et modifications de la dynamique de la végétation naturelle après amendement, Thèse de Doctorat, Université Paul Cezanne, 227p.

H

- Hamer, G., 2003. "Solid waste treatment and disposal: effects on public health and environmental safety." *Biotechnology Advances* 22: 71-79.
- Hammel, K. E. 1997. Fungal Degradation of Lignin In Driven by nature: plant litter quality and decomposition., Cadisch, G.; Giller, K.E. eds, pp. 432, United Kingdom.
- Hargreaves, J.C., Adl, M.S., Warman, P.R., 2008. A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 123 (2008) 1-14.
- Haruta, S., Nakayama, T., Nakamura, K., Hemmi, H., Ishii, M., Igarashi, Y., Nishino, T. 2005. Microbial diversity in biodegradation and reutilization processes of garbage. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 99, 1-11.
- Hassen, A., Belguith, K., Jedidi, N., Cherif, A., Cherif, M. & Boudabous, A. 2001. Microbial characterization during composting of municipal solid waste. *Bioresource Technology* 80, 217-225.
- Haug, R.T. 1993. "The practical handbook of compost engineering." Boca Raton, Florida.717.
- Hogg, D., Barth, J., Favoino, E., Centemero, M., Caima, V., Amlinger, F., Devliegher, W.,

- Brinton, W.F., Antler, S., 2004. "Comparison of compost standards within the EU, North America and Australia." In: [en ligne]. Disponible sur: www.wrap.org.uk. (Consultée en juin 2010)
- Hoornweg, D., Thomas, L. 1999. "What a waste: Solid waste management in Asia." Washington D.C, The World Bank.
- Houot, S., Rose, J., 2002. « Déchets (agricoles, urbains, industriels) », Prospective SIC 2002 Synthèse de l'atelier n° 8 ; Division « Surfaces et Interfaces Continentales » ; INSU.

I

- Iannotti, D.A., Pang, T., Toth, B.L., Elwell, D.L., Keener, H.M., Hoitink. H.A.J., 1993. A quantitative respirometric method for monitoring compost stability. *Compost Sci. Util.* 1, 52- 65.
- INM, 2003. Institut National de Météorologie– Relevés météorologiques à la Station de Tunis-Carthage, sur la période 1987-2002

J

- John, N.M., Adeoyé, G.O., Sridhar, M.K.C., 1996. "Compost pelletization eases end use in Nigeria." *Biocycle* 37 (06): 55-56.
- Peigne, J., Girardin, P., 2001. Compostage et environnement. d'ABioDoc et du CETAB+

K

- Kathirvale, S., Muhud Yunus, M.N., Sopian, K., Samsuddin, A.H., Rahman, R.A., 2003. Modeling the heating value of Municipal Solid Waste, *Fuel* 82(2003)1119-1125
- 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.
- Kelly, E.J., 2002a. Solid Waste Biodegradation Enhancements and the Evolution of Analytical Methods Used to Predict Waste stability, Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Kelly, E.J., Novak, J.T., Prillaman, N., Shearer, B.D., Goldsmith, C.D., Hater, G. R., 2002b. Relationships between analytical methods utilised as tools in the evolution of landfill bioreactor stability, 37 pages.
- Kirk, T. K., Farrell, R. L., 1987. Enzymatic Combustion - the Microbial-Degradation of Lignin. *Annual Review of Microbiology* 41, 465-505.
- Kolédzi, K.E., Baba, G., Feuillade, G, Matejka, G, 2010. Caractérisation physique des déchets solides urbains à Lomé au Togo, dans la perspective du compostage décentralisé dans les quartiers. *Déchets, Sciences et Techniques*. Soumise et acceptée.
- Kpabou, Y., 2007. Evaluation quantitative des ordures ménagères de la ville de Lomé, cas des quartiers Résidence du Bénin et Tokoin-Forever. DEA Université de Lomé.

L

- Lagier, 2006. Etude des macro molécules de lixiviat : Caractérisation et comportement vis-à-vis des métaux. Thèse de Doctorat. N°72 Université de Limoges.
- Lanini, S., 1998. Analyse et modélisation des transferts de masse et de chaleur au sein des

- décharges d'ordures ménagères. Thèse de Doctorat N°1412. Institut National polytechnique de Toulouse.
- Larbi, M., 2006. Influence de la qualité des composts et de leurs extraits sur la protection des plantes contre les maladies fongiques. Thèse, Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL, CH-Frick; l' Université de Neuchâtel. <http://orgprints.org/8935/>
- Lasaridi, K.E., Stentiford, E.I., 1998. "A simple respirometric technique for assessing compost stability." *Water Research* 32 (12): 3717-3723.
- Li, S., 2002. Junk-buyers as linkage between waste sources and redemption depots in urban China: The case of wuhan. *Resources, Conservation and Recycling*, 36(4), 319-335.
- Liang, C., Das, K.C., Mc Clendon, R.W., 2003. "The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a solids composting blend." *Bioresource Technology* 86: 131-137.

M

- Mairie de Lomé, 2008. Prestation de pré collecte des déchets solides urbains dans les quartiers de Lomé et de vidanges des poubelles publiques. Dossier d'appel d'offres-DST.
- Magdi, T.A., Horiuchi, T., Oba, S., 2004. Composting of rice straw with oilseed rape cake and poultry manure and its effects on faba bean (*Vicia faba* L.) growth and soil properties. *Bioresource Technol.*, 93, 2, 183-189.
- Matejka, G., Barbier, J., De Las Heras, F., Klein, A., Paquetteau, F., Kebe, A., 2001. Composting of urban refuse in Labé (Guinea): process optimization and agricultural value; Cagliari (Sardinia) Eighth International Waste Management and Landfill Symposium (CISA : Environ. Sanitary Engineering Centre) 1 - 5 Oct. 2001.
- Mbulugwe, S.E., Kassenga, G.R., 2004. Feasibility and strategies for anaerobic digestion of solid waste for energy production in Dar Es Salaam city, Tanzania, *Resources, Conservation and Recycling* 42 (2004) 183 – 203.
- 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
- MEAT, 2003. Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire, Tunisie - Rapport national de l'environnement tunisien, de l'année 2002, mai 2003, 142p.
- Medina, M., 1998. "Scavenger cooperatives in developing countries." *Biocycle* 39 (06): 70-72.
- Medina, M., 2000. Scavenger cooperatives in Asia and Latin America. *Resources, conservation and recycling*, 31(1), 51-69.
- Meoun, N., Le Clerc, F., 1999. Identification de sources des métaux lourds dans les OM ; Creed.
- Mester, T., Field, J. A., 1997. Optimization of manganese peroxidase production by the white rot fungus *Bjerkandera* sp. strain BOS55. *FEMS Microbiology Letters* 155, 161- 168.
- METAP-PRGDS-Maroc, 2004. Programme d'Assistance Technique pour l'Environnement Méditerranéen – Projet Régional de Gestion des Déchets Solides, Rapport Pays - Maroc, préparé par le consortium international GTZ-ERMKGW, mai 2004, 51p.
- METAP-PRGDS-Palestine, 2004. Programme d'Assistance Technique pour l'Environnement Méditerranéen – Projet Régional de Gestion des Déchets Solides, Rapport Pays - Palestine, préparé par le consortium international GTZ-ERMKGW, avril 2004, 55p.
- METAP-PRGDS-Syrie, 2004. Programme d'Assistance Technique pour l'Environnement

- Méditerranéen – Projet Régional de Gestion des Déchets Solides, Rapport Pays - Syrie, préparé par le consortium international GTZ-ERMGKW, août 2004, 32p.
- METAP-PRGDS-Tunisie, 2004. Programme d'Assistance Technique pour l'Environnement Méditerranéen – Projet Régional de Gestion des Déchets Solides Rapport Pays - Tunisie, préparé par le consortium international GTZ-ERMGKW, janvier 2004, 42p.
- METAP-PRGDS-Algérie, 2005. Programme d'Assistance Technique pour l'Environnement Méditerranéen-Projet Régional de Gestion des Déchets, Analyse et recommandations en matière de recouvrement des coûts de la gestion des déchets municipaux en Algérie, avril 2005, 85p.
- Miquel, M. 2001. "Rapport sur les métaux lourds et leur effets sur l'environnement et la santé." Paris, Sénat. 365.
- Miyuki, C., Ryuzoh, I., Kagan, K., Yasutaka, M., Eiichi, T., 2005. Estimation of maturity of compost from food wastes and agro-residues by multiple regression analysis; *Bioresource Technology* 97 (2006) 1979-1985.
- Mustin, M., 1987. *Le Compost, Gestion de la Matière Organique*, F. Dubusc eds, pp. 957, Paris.
- Müller, C., 2006. Decentralised composting in developing countries – Financial and technical evaluation. Diplomarbeit, Sandec, Dübendorf, 85 p.
- Mohee, R., 2002. Assessing the recovery potential of solid waste in Mauritius; *Resources, Conservation and Recycling* 36(2002) 33-43.
- MODECOM, 1993. *Méthode de caractérisation des ordures ménagères / 2^{ème} édition*, ADEME éditions, Paris, 64 pages.
- Morvan, B., 2000. "Méthode de caractérisation des déchets ménagers : analyse sur produit sec." *Déchets - Sciences et Techniques* 20: 9-11.
- Morvan, B., Blanquart, J.P., Aboulam, S., 2008. Optimisation de l'échantillonnage des déchets ménagers. Application pratique de la méthode de tri sur sec. *Déchets-Revue Francophone d'Ecologie Industrielle-N°49-1er Trimestre*.
- Mouchacca, J., 1997. Thermophilic fungi: biodiversity and taxonomic status. *Cryptogamie: Mycologie* 18, 19-69.

N

- N'gnikan, E., Vermande, P., Tanawa, M., Wethe, J., 1997 – Une démarche intégrée pour la maîtrise de la gestion des déchets solides urbains au Cameroun - *Rev. Déchets Sciences & Techniques*, 1997, n°20, pp22-34.
- 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.
- Ngnikam, E., 2002. La maîtrise de la collecte et de traitement des déchets solides dans les pays en développement et réduction des émissions de gaz à effet de serre, rencontre de la coopération technologique nord-sud pour le développement durable et le climat organisées dans le cadre de POLLUTEC, Lyon 25 et 26 Novembre 2002, 22 pages.
- Nicolardot, B., Germon, J.C., Chaussod, R., Catroux, G., 1982. "Une technique simple pour déterminer la maturité des composts urbains." *Compost Information* 10: 4-8.
- Nordtest method, 1995. *Solid Waste, Municipal : Sampling and Characterisation* ; NT ENVIR 001, Tekniikantie, FIN-02150 ESPOO Finland ;ISSN 0238-4445 ; 12 pages.
- Nunan, F., 2000. "Urban Organic Waste markets: responding to change in Hubli-Dharward, India". *Pergamon, Habitat International* 24: 347-360.

O

- O.E.C.D, 1998. "Final guidance document for distinguishing waste from non- waste." Paris, France, Organisation de Coopération et de Développement Economique. 23-24 Avril 1998.
- Ojeda-Benitz, S., Armijo de Vega, C., Ramirez- Barreto, M.E., 2003. Characterization and quantification of household solid waste in Mexican city, *Resources, conservation and Recycling* 39(2003) 211-222
- 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 ».

P

- Pare, T., Dinel, H., Moulin, A.P., Townley-Smith, L., (1999) Organic matter quality and structural stability of a Black Chernozemic soil under different manure and tillage practices. *Geoderma*, 91(3-4), 311-326.
- Pagliai, M., Vignozzi, N., Pellegrini, S., 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage Research* 79, 131-143.
- Pascual, J.A., Garcia, C., Hernandez, T., 1999. "Comparaison of fresh and composted organic waste in their efficacy for the improvement of arid soil quality." *Bioresource Technology* 68: 255-264.
- Peireira-Neto, J.T., 2001. "Controlled composting developing countries." *Biocycle* 42 (2): 2
- Perla, M., 1997. "Community composting in developing countries." *Biocycle* 38 (06): 48-51.
- Petric, I., Sestan, A., Sestan, I., 2009. Influence of wheat straw addition on composting of poultry manure. *Process Safety Environ. Protection*, 87: 206–212.
- Pianamonti, F., Genevini, P., Petruzzelli, G. (1997). The problem of heavy metals in compost. *Informatore Agrario Supplemento*, 53: 44, 57-59.
- Project SWA-Tool, 2004. Developpement of a Methodological Tool to Enhance the precision et Comparability of solid waste (SWA-TOOL), European Commission, User Version 57pages.
- Poliquin, R., 2007. Projet d'établissement d'un lieu d'enfouissement technique à Danford Lake : usine de tri- compostage de Sorel Tracy.
- Poornima, D.G., Manjula, N.R., 2001. "Community participation in waste management - Experience of pilot projet in Bangalore, India." *Gouda, Waste*. September. 27.
- Puyuelo, B., Gea, T., Sanchez, A., 2010. A new control strategy for the composting process based on the oxygen uptake rate. Article in press *Chemical Engineering journal* (2010), doi:10.1016/j.cej.2010.09.011

R

- Rea, L.M., Parker, R.A., 1997. *Designing and Conducting Survey Research: A Comprehensive Guide*. 2nd Sub Edn., Josse-Bass Inc. Publishers, San Francisco; 1997.
- Rivero, C., Chirenje, T., Ma, L.Q., Martinez, G., 2004. "Influence of compost on soil organic matter quality under tropical conditions." *Geoderma* 123 (3-4): 355-361.
- Rynk, R., 2003. "The art in the science of composting." *Compost Science & Utilization*, 11, 2:94-95.
- Rytz, I., 2001. Assessment of a decentralised composting scheme in Dhaka, Bangladesh. Technical, operational, organisational and financial aspects. SANDEC. p.19.

S

- Salant, P., Dillmann, D.A., 1994. How to Conduct your Own Survey. Jon Wiley and Sons Inc., Toronto, ISBN: 978-0-471-01273-3
- Salou, H., 2005. Gestion des déchets ménagers dans les Pays En Développement : cas du Bourkina-Faso. Dégradation thermique de leur fraction combustible. Thèse de doctorat. Université de Ouagadougou.
- 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.
- Sandec, 2006. Decentralised Composting for Cities of Low-and Middle-Income Countries; pp 61-62 www.sandec.ch ISBN 978-3-906484-36-5
- Schumacher, B. A., 2002. Methods For The Determination Of Total Organic Carbon (Toc) In Soils And Sediments; United States Environmental Protection Agency Environmental Sciences Division National Exposure Research Laboratory; 25 pages.
- SENES Consultants Limited, 1999. Méthodologie recommandée pour la caractérisation des déchets dans le cadre des études d'analyse directe des déchets au Canada, Rapport préparé pour le sous comité de caractérisation des déchets du CCME ; 64 pages, 1999.
- Sebastia, J., Labanowski, J., Lamy, I., (2007) Changes in soil organic matter chemical properties after organic amendments. *Chemosphere*, 68(7), 1245-1253.
- Shaw, K., Day, M., Krzymien, M., Mohmad, R., Sheehan, S., 1999. The role of feed composition on the composting process. I. Effect on composting activity. *Journal of Environmental Science and Health A* 34 (6), 1341–1367
- Shin, H.S., Hwang, E.J., Gee, C.S., 1997. "Food residuals management in Korea." *Biocycle* 38 (10): 69-71.
- Sinsabaugh, R. L., Antibus, R. K., Linkins, A. E., 1991. An Enzymatic Approach to the Analysis of Microbial Activity During Plant Litter Decomposition. *Agriculture Ecosystems & Environment* 34, 43-54.
- Smars, S., Gustafsson, L., Beck-Friis, B., Jonsson, H., 2002. "Improvement of the composting time for household waste during an initial low pH phase by mesophilic temperature control." *Bioresource Technology* 84: 237-241
- Soclo, H.H., Aguewe, M., Adjahossou, B.C., Houngué, T., Azontondé, A.H., 1999. "Recherche de compost type et toxicité résiduelle au Bénin." *TSM* 9: 68-76.
- Sogreah Consultants, 2001. "Solid waste management study for Bangkok." Bangkok, Kingdom of Thailand, Bangkok Metropolitan Administration. May 2001.
- Soudi, B., 2001. Compostage des déchets ménagers et valorisation du compost. Cas des petites et moyennes communes au Maroc. (Actes édition), 102 p.
- Soumaré, M., Tack, F.M.G., Verloo, M.G., 2003. "Effects of a municipal solid waste compost and mineral fertilization on plant growth in two tropical agricultural soils of Mali." *Bioresource Technology* 86: 15-20.
- Stahlschimdt, V., 1984. "Can composting compete with controlled tipping?" *Biocycle* 25 (03): 34-35.
- Stevenson, F.J., 1994. Humic chemistry : Genesis, composition, Reactions, Second ed. Wiley, New York, USA.
- Stentiford, E.I., 1996. "Diversity of composting system." In *Science and Engineering of Composting*, de Bertoldi et al. ed. (Blackie Academic and Professional, Bologne).95

T

- Tchobanoglous, G., Theisen, Vigil, S., 1993. « Integrated Solid Waste Management, Engineering Principles and Management Issues » Mc Grow Hill, New York.

- Thonart, P., Diabaté, S. I., 2005. Guide pratique sur la gestion des déchets ménagers et des sites d'enfouissement technique dans les pays du sud. Publication de l'I.E.P.F.
- Tézanou, J., Koulidiati, J., Proust, M., Sougoti, M., Goudeau, J.C., Kafando, P., Rogaume, T., 2001. Caractérisation des déchets ménagers de la ville de Ouagadougou (Burkina Faso). Annales de l'Université d'Ouagadougou.
- 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/
- Tiquia, S.M., Tam, N.F.Y., 1998. "Composting pig manure in Hong Kong." Biocycle 39 (02): 78-79.
- Tuladhar, B., Bania, A., 1998. "Operating a compost plant in the Himalayan Kingdom." Biocycle 39 (08): 79-83.
- Tumuhairwe, J.B., Tenywa, J.S., Otabbong, E., Ledin, S., 2009. Comparison of four low-technology composting methods for market crop wastes. Waste Management 29 (2009) 2274–2281
- Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A., Itavaara, M., 2000. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. Bioresource Technology 72, 169-183.

U

- Unmar, G., Mohee, R., 2008. Assessing the effect of biodegradable and degradable plastics on the composting of green wastes and compost quality Bioresource Technology 99 (2008) 6738–6744
- UNCHS, 1992. Brief study of solid waste proposals for Dar es Salam. UNCHS sustainable cities project.
- URBAPLAN, 1996. Collecte des ordures ménagères de Lomé (TOGO). Proposition d'organisation finale. Lausanne / Suisse 36pages.

V

- Van Beukering, P., Sehker, M., Gerlagh, R., Kumar, V., 1999. "Analysing urban solid waste in developing countries : a perspective on Bangalore, India." Creed. Mars 1999. 36.
- Van Haaren, R., 2009. Large scale aerobic composting of source separated organic wastes: A comparative study of environmental impacts, costs and contextual effects. MS Thesis, Columbia University, New York. Unpublished Results. www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/haaren_thesis.pdf
- Von Blottnitz, H., Pehlken, A., Pretz, 2001. The description of solid wastes by particle mass instead of particle size distributions. Resources, Conservation and Recycling, 34, 193-207.

W

- Waas, E., Adjademé, N., Bideaux, A., Deriaz, G., Diop, O., Guené, O., Laurent, F., Meyer, W., Pfammatter, R., Schertenleib, R., Touré, C., 1996. "Valorisation des déchets ménagers organiques dans les quartiers populaires des villes africaines." Genève, Suisse, SKAT.142.
- Wahyono, S., Sahwan, F.S., 2000. "Low-tech composting in tropical countries." Biocycle 41 (02): 78-79.
- Waksman, S. A., 1936, Humus, origin, chemical composition and

- importance in nature, Baillière, Tindall and Cox, London.
- Wang, P., Chang, C.M., Watson, M.E, Dick, W.A., Chen, Y., Hoitink, H.A.J., 2004. Maturity indices for composted dairy and pig manures. *Soil Biol. Biochem.*, 36, 767–776.
- Wei, Y.S., Fan, Y.B., Wang, M.J., Wang, J.S., 2000. Composting and compost application in China, *Ressources, Conservation and Recycling* 30(2000)277-300.
- Wicker, A., 2000. Gestion des déchets dans « Statistiques pour la politique de l'environnement ». 27-28 novembre 2000, Munich.
- Wong, J.W.C., Ma, K.K., Fang, K.M., Cheung, C., 1999. "Utilization of a manure compost for organic farming in Hong Kong." *Bioresource Technology* 67(1): 43-46.

Y

- Yhedego, M., 1995. "Urban Solid Waste Management in Tanzania. Issues, Concepts and Challenges." *Resource, Conservation and Research* 14: 1-10.
- Yeye, M.S., 2002. "Introduction." dans " Séminaire - atelier francophone sur la gestion des déchets ménagers (Cahier-technique)". 18-20 novembre 2002, Saaba-Ouagadougou, Burkina Faso. 17-25.
- 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
- Yobouet, Y. A., Adouby, K., Trokourey, A., Yao, B., 2010. Cadmium, Copper, Lead and Zinc speciation in contaminated soils *International Journal of Engineering Science and Technology*. Vol. 2(5), 2010, 802-812
- Yoon-Seok, K., Jong-Bu, P., Sung-Su, C., Seung-Ho, H., 1999. "Processing Food Residuals And Sawdust In Taejeon". *Biocycle Journal of Composting & Organics Recycling*. 40: 70-71.

Z

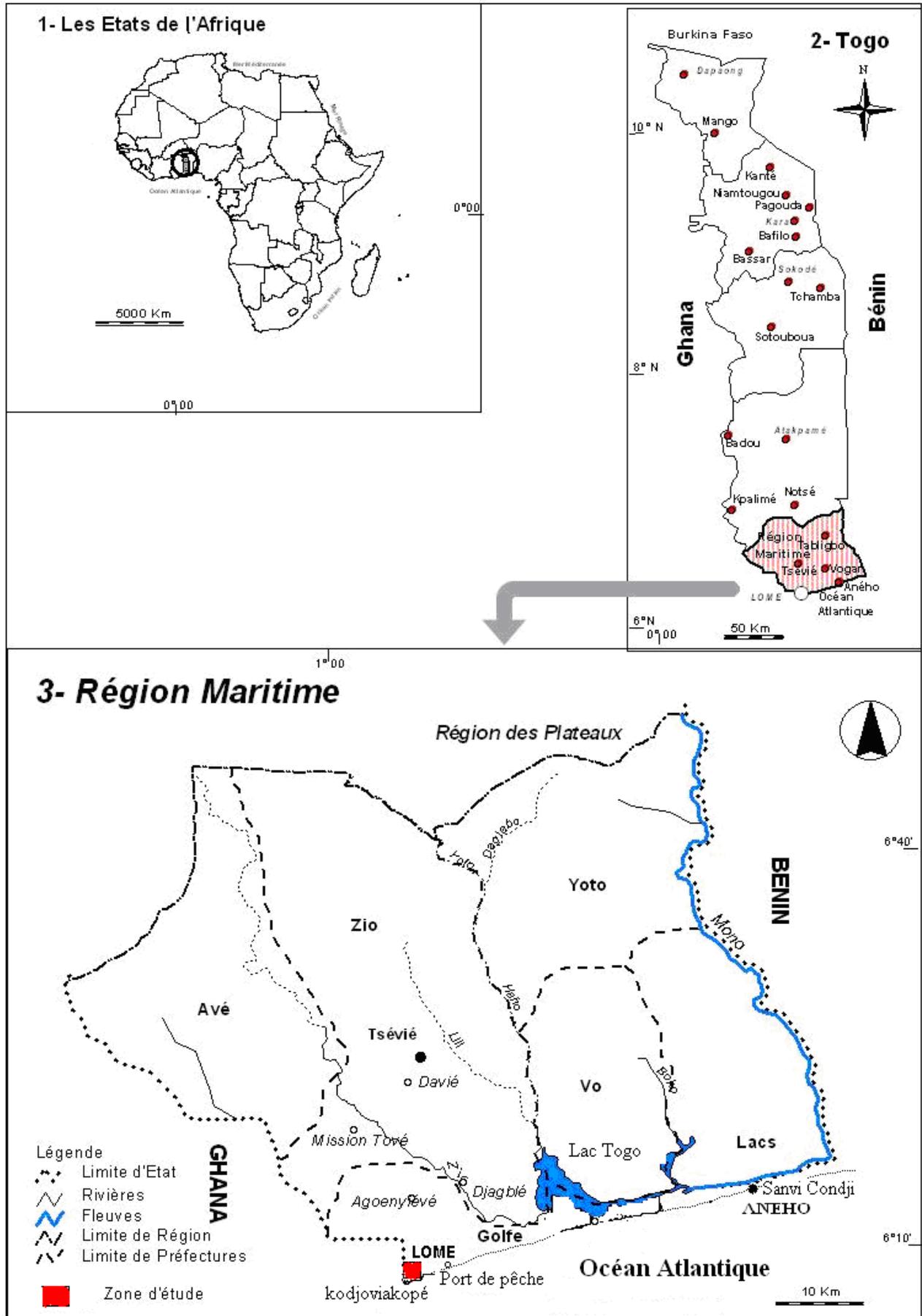
- Zaïri, M., Ferchichi, M., Ismail, A., Jenayeh, M., Hammami, H., 2004. Rehabilitation of Yahoudia dumping site, Tunisia, *Waste Management* 24 (2004) 1023-1034.
- Zucconi, F., Forte, M., Monaco, A., de Bertoldi, M., 1981. Biological evaluation of compost maturity. *BioCycle* 22 (2), 27-29.
- Zurbrugg, C., Ahmed, R., 1999. "Enhancing Community Motivation and Participation in Solid Waste Management." *SANDEC News* 4.
- Zurbrugg C. (2003a). "Markets for compost - a key factor for success of urban composting schemes in developing countries." dans " ISWA congress". 9-13 November 2003, Melbourne Australia
- Zurbrugg, C., Drescher, S., Patel, A.H., Sharatchandra, H.C., 2003b. "Taking a closer look at decentralised composting schemes - lessons from India." *Asian Society for Environmental Protection (ASEP)*.
- Zurbrugg, C., Drescher, S., Patel, A.H., Sharatchandra, H.C., 2004. "Decentralised composting of urban waste - an overview of community and private initiatives in India cities." *Waste Management* 24 (7): 655-662.
- Zurbrugg, C., Drescher, S., Rytz, I., Maqsood Sinha, A.H., Enayetullah, I., (2005) Decentralized composting in Bangladesh, a win-win situation for all stakeholders. *Resources Conservation and Recycling* 43 (3): 281-292.

Sites internet

- www.vincienvironnement.fr
www.ordif.com
www.ademe.fr
www.StudentsoftheWorld.info

ANNEXES

Annexe 1 : Carte de localisation de la zone d'étude



Annexe 2. Campagnes de caractérisations

Campagne 1 OM : brutes
de la ville de Lomé

ECHANTILLON	Kg				Kg
Masse	500,00			Hétéroclites	4

Origine Commune de Lomé

date 06/02/2009

Te 32-34°C

conditions climatiques temps clair et
ensoleillé

quartage oui M quartée 1000Kg

Pesée des masses >5Kg balance de GTVD ±0,5 Kg

Pesée des masses <5 Kg balance de précision du labo de chimie ± 0,1 g

Pesée des masses < 10g balance de précision du LEVAN ± 0,1 mg

FRACTIONS GRANULOMETRIQUES	M brute Kg	%	H%	M sèche Kg	% M humide	% M sec	MO % (ms)	MO Kg
Hétéroclites	4,00	0,8	0,0	4,0	0,8	0,9		0,0
> 100 mm	109,50	22,0	13,1	95,2	22,0	22,6	26,72	25,4
100-20 mm	156,50	31,5	24,4	118,3	31,5	28,1	37,58	44,5
20-10 mm	52,00	10,5	20,6	41,3	10,5	9,8	36,9	15,2
<10 mm	175,00	35,2	6,9	162,9	35,2	38,6	8,8	14,3
Total / moyenne	497,00	100	15,1	421,6825	100	100	23,59	99,461

pertes 3,00kg

TRI PAR CATEGORIES >100 mm	M brute Kg	%	H%	M sèche Kg	% M humide	% M sec	MO % (ms)	MO Kg
Fermentescibles	19,00	17,5	50,7	9,4	17,5	9,9	80,6	7,5
papiers- cartons	15,00	13,8	15,6	12,7	13,8	13,4	74,2	9,4
textiles- textiles sanitaires	18,00	16,6	0,0	18,0	16,6	19,1		
plastiques	35,50	32,7	5,2	33,7	32,7	35,7		
verres	2,00	1,8	0,0	2,0	1,8	2,1		
métaux	1,50	1,4	0,0	1,5	1,4	1,6		
CNC	12,50	11,5	3,2	12,1	11,5	12,8	68,2	8,3
INC	1,50	1,4	0,0	1,5	1,4	1,6		
spéciaux	3,50	3,2	0,0	3,5	3,2	3,7		
Total / moyenne	108,50	100,0	13,1	94,28	100,00	100,00	26,72	25,2

TRI PAR CATEGORIES 100 - 20 mm	M brute Kg	%	H%	M sèche Kg	% M humide	% M sec	MO % (ms)	MO Kg
Fermentescibles	87,50	56,5	34,7	57,1	56,5	48,8	70,0	40,0
papiers- cartons	7,00	4,5	25,7	5,2	4,5	4,4	77,3	4,0
textiles- textiles sanitaires	3,50	2,3	0,0	3,5	2,3	3,0		
plastiques	20,00	12,9	11,1	17,8	12,9	15,2		
Verres	2,50	1,6	0,0	2,5	1,6	2,1		
Métaux	1,50	1,0	0,0	1,5	1,0	1,3		
CNC	18,00	11,6	19,4	14,5	11,6	12,4		
INC	11,50	7,4	0,0	11,5	7,4	9,8		
Spéciaux	3,50	2,3	0,0	3,5	2,3	3,0		
Total / moyenne	155,00	100,0	24,4	117,13	100,00	100,00	37,58	44,0

Campagne 2		OM : brutes de la ville de Lomé	
ECHANTILLON	Kg		Kg
Masse	500,00		Hétéroclites 1,5
Origine	Commune de Lomé		
date	06-06-09		
Te	32°C - 33°C		
conditions climatiques	temps clair et ensoleillé		
quartage	oui	M quartée	1000 Kg

Pesée des masses >5Kg balance de GTVD ±0,5 Kg
 Pesée des masses <5 Kg balance de précision du labo de Chimie ± 0,1 g
 Pesée des masses < 10g LEVAN ± 0,1 mg

FRACTIONS GRANULOMETRIQUES	M brute Kg	%	H%	M sèche Kg	% M humide	% M sec	MO % (ms)	MO Kg
Hétéroclites	1,50	0,3	0,0	1,5	0,3	0,5		0,0
> 100 mm	86,50	17,4	28,8	61,6	17,4	22,0	27,71	17,1
100-20 mm	129,50	26,1	41,4	75,9	26,1	27,1	35,94	27,3
20-10 mm	95,50	19,2	48,8	48,9	19,2	17,4	35,6	17,4
<10 mm	183,50	37,0	49,5	92,7	37,0	33,0	9,5	8,8
Total / moyenne	496,50	100	43,2	280,539	100	100	25,15	70,5502

TRI PAR CATEGORIES >100 mm	M brute Kg	%	H%	M sèche Kg	% M humide	% M sec	MO % (ms)	MO Kg
Fermentescibles	19,00	22,4	62,1	7,2	22,4	12,3	79,5	5,7
papiers- cartons	16,00	18,8	42,0	9,3	18,8	15,8	73,0	6,8
textiles- textiles sanitaires	15,50	18,2	10,8	13,8	18,2	23,5		
plastiques	18,50	21,8	17,8	15,2	21,8	25,9		
verres	1,50	1,8	0,0	1,5	1,8	2,6		
métaux	2,50	2,9	0,0	2,5	2,9	4,3		
CNC	8,50	10,0	32,2	5,8	10,0	9,8	65,7	3,8
INC	1,00	1,2	0,0	1,0	1,2	1,7		
spéciaux	2,50	2,9	0,0	2,5	2,9	4,3		
Total / moyenne	85,00	100,0	30,8	58,78	100,00	100,00	27,71	16,3

TRI PAR CATEGORIES 100 -20 mm	M brute Kg	%	H%	M sèche Kg	% M humide	% M sec	MO % (ms)	MO Kg
Fermentescibles	51,00	39,5	59,8	20,5	39,5	27,5	71,0	14,6
papiers- cartons	33,50	26,0	45,7	18,2	26,0	24,4	67,3	12,2
textiles- textiles sanitaires	9,00	7,0	25,5	6,7	7,0	9,0		
plastiques	12,50	9,7	23,3	9,6	9,7	12,9		
verres	0,50	0,4	0,0	0,5	0,4	0,7		
métaux	2,00	1,6	0,0	2,0	1,6	2,7		
CNC	11,00	8,5	31,1	7,6	8,5	10,2		
INC	6,00	4,7	0,0	6,0	4,7	8,0		
spéciaux	3,50	2,7	0,0	3,5	2,7	4,7		
Total / moyenne	129,00	100,0	42,2	74,57	100,00	100,00	35,94	26,8

Campagne 3 OM brut de la ville de Lomé		ECHANTILLON		Kg				Kg
Origine date Te climat		Masse	250			Hétéroclites		
	OM de Lomé	quartage	oui		M quartée		1000	Kg
	12/02/2010							
	28° à 31°C							
	vent très fort ciel couvert							
FRACTIONS TAILLES	M brute Kg	%	H%	MS Kg	% M humide	% MS	MO % (sec)	MO Kg
Hétéroclites	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
> 100 mm	42,50	17,1	10,1	38,2	17,1	17,8	20,97	8,0
100-20 mm	64,00	25,8	29,9	44,9	25,8	20,9	41,74	18,7
<20 mm	142,00	57,1	7,0	132,1	57,1	61,4	13,45	17,8
Total / moyenne	248,5	100	13,3	215,2	100	100	20,7	44,5

>100 mm	M brute Kg	%	H%	MS Kg	% M humide	% MS	MO % (sec)	MO Kg
Putrescibles	5,00	11,8	34,5	3,28	11,76	8,57	75,0	2,5
papiers-cartons	3,00	7,1	8,5	2,75	7,06	7,19	88,9	2,4
plastiques	16,00	37,6	3,5	15,44	37,65	40,42	0,0	0,0
Textiles	7,00	16,5	10,1	6,29	16,47	16,47	0,0	0,0
métaux	2,00	4,7	0,7	1,99	4,71	5,20		0,0
verres	0,50	1,2	0,0	0,50	1,18	1,31		0,0
CNC	5,00	11,8	20,8	3,96	11,76	10,37	78,6	3,1
INC	1,00	2,4	0,0	1,00	2,35	2,62		0,0
spéciaux	3,00	7,1	0,0	3,00	7,06	7,85		0,0
Total / moyenne	42,50	100,0	10,1	38,20	100,00	100,00	20,97	8,0

100 -20 mm	M brute Kg	%	H%	MS Kg	% M humide	% MS	MO % (sec)	MO Kg
putrescibles	28,00	43,8	51,0	13,72	43,75	30,57	83,3	11,4
papiers-cartons	4,00	6,3	12,2	3,51	6,25	7,83	77,9	2,7
plastiques	8,00	12,5	13,0	6,96	12,50	15,51	0,0	0,0
textiles	4,00	6,3	8,7	3,65	6,25	8,14	0,0	0,0
métaux	2,00	3,1	1,5	1,97	3,13	4,39		0,0
verres	2,00	3,1	0,6	1,99	3,13	4,43		0,0
CNC	8,00	12,5	36,6	5,07	12,50	11,30	90,0	4,6
INC	6,00	9,4	0,0	6,00	9,38	13,37		0,0
spéciaux	2,00	3,1	0,0	2,00	3,13	4,46		0,0
Total / moyenne	64,0	100,0	29,9	44,87	100,0	100,00	41,7	18,7

<20mm	M brute Kg	%	H%	MS Kg	% M humide	% MS	MO % (sec)	MO Kg
Extra fines < 10	110,00	77,5	5,4	104,06	77,46	231,89	8,1	8,4
Fines 10-20	32,00	22,5	12,4	28,03	22,54	21,22	33,3	9,3
Total / moyenne	142,0	100,0	7,0	132,09	100,00	21,22	13,4	17,8

Campagne 4 OM brut de la ville de Lomé		ECHANTILLON						
				Kg				Kg
Origine date Te climat		Masse	250			Hétéroclites		
		OM de Lomé	quartage	oui	M quartée	1000	Kg	
		12/02/2010						
		23° à 28°C						
	vent très fort							
	ciel clair							
FRACTIONS TAILLES	M brute Kg	%	H%	MS Kg	% M humide	% MS	MO % (sec)	MO Kg
Hétéroclites	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
> 100 mm	39,50	15,8	24,6	29,8	15,8	15,4	23,49	7,0
100-20 mm	70,00	28,1	38,2	43,3	28,1	22,4	33,25	14,4
<20 mm	140,00	56,1	14,1	120,2	56,1	62,2	14,78	17,8
Total / moyenne	249,5	100	22,5	193,3	100	100	20,3	39,2

>100 mm	M brute Kg	%	H%	MS Kg	% M humide	% MS	MO % (sec)	MO Kg
Putrescibles	5,00	12,7	47,1	2,65	12,66	8,88	91,5	2,4
papiers-cartons	4,00	10,1	43,6	2,26	10,13	7,57	77,4	1,7
plastiques	17,00	43,0	17,7	13,99	43,04	46,98	0,0	0,0
Textiles	5,00	12,7	14,9	4,26	12,66	14,29	0,0	0,0
métaux	0,50	1,3	0,8	0,50	1,27	1,67		0,0
verres	0,50	1,3	0,0	0,50	1,27	1,68		0,0
CNC	5,00	12,7	37,2	3,14	12,66	10,54	90,2	2,8
INC	2,00	5,1	0,0	2,00	5,06	6,72		0,0
spéciaux	0,50	1,3	0,0	0,50	1,27	1,68		0,0
Total / moyenne	39,50	100,0	24,6	29,78	100,00	100,00	23,49	7,0

100 -20 mm	M brute Kg	%	H%	MS Kg	% M humide	% MS	MO % (sec)	MO Kg
putrescibles	24,00	34,3	65,3	8,33	34,29	19,24	66,3	5,5
papiers-cartons	8,00	11,4	43,6	4,51	11,43	10,42	77,9	3,5
plastiques	18,00	25,7	15,8	15,16	25,71	35,01	0,0	0,0
textiles	4,00	5,7	16,1	3,36	5,71	7,75	0,0	0,0
métaux	1,00	1,4	1,5	0,99	1,43	2,28		0,0
verres	1,00	1,4	0,0	1,00	1,43	2,31		0,0
CNC	10,00	14,3	40,5	5,95	14,29	13,75	90,0	5,4
INC	3,00	4,3	0,0	3,00	4,29	6,93		0,0
spéciaux	1,00	1,4	0,0	1,00	1,43	2,31		0,0
Total / moyenne	70,0	100,0	38,2	43,29	100,0	100,00	33,2	14,4

<20mm	M brute Kg	%	H%	MS Kg	% M humide	% MS	MO % (sec)	MO Kg
Extra fines < 10	110,00	78,6	10,0	99,00	78,57	228,71	7,4	7,3
Fines 10-20	30,00	21,4	29,2	21,24	21,43	17,66	49,3	10,5
Total / moyenne	140,0	100,0	14,1	120,24	100,00	17,66	14,8	17,8

Annexe 3. Planche photos





Annexe 4 : Analyses au laboratoire

