



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES (DEA)
DE PHYSIQUE

Option : MECANIQUE ET PHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

Présenté par:
ALI MOUSSA MOINDZE

**CONTRIBUTION A LA JUSTIFICATION DE LA
VALORISATION ENERGETIQUE ET
AGRONOMIQUE DES ORDURES MENAGERES**

Soutenu publiquement le 13 Août 2003

Devant la Commission d'examen composée de

Président : Madame RANDRIAMANANTANY Zely, Professeur Titulaire

Rapporteur : Monsieur RAZAFIMAHEFA Alexandre, professeur Titulaire

Examineurs: Monsieur RAMANANTSIZEHENA Pascal, Professeur
Titulaire
Monsieur RAFANOMEZANTSOA Roger Marie
(Dr. rer. nat), Docteur d'Etat ès Sciences
Monsieur ANDRIANANTENAINA Bruno, Maître des
Conférences

A mon père MOUSSA MOINDZE et ma mère FATIMA TAMOU qui m'ont donné la possibilité d'acquiescer le bien précieux de ce monde (les études).

A mon grand frère MOUSSA MOHAMEDE MOINDZE et ma grande sœur ZAINABA MOUSSA MOINDZE, cette réussite est la votre.

A mes baux frères HAMIDOU ALI et ALI M'MADI , toutes mes reconnaissances.

A mon cousin ABBAS ALI et mes cousines ALAOIA ALI, FATIMA ALI et HAKIKA ALI, merci de votre contribution.

A mes petits frères et sœurs, merci de votre patience.

A tous mes amis, merci beaucoup.

Avant propos

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la formation pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies. Il a été effectué :

✧ au Laboratoire de Mécanique et Physique de l'Environnement (LMPE) du Département de physique de l'université d'Antananarivo, dirigé par monsieur RAZAFIMAHEFA Alexandre, professeur titulaire.

✧ au Département Energétique du Centre National des Recherches Industrielles et Technologiques (CNRIT) du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, dirigé par monsieur RANDRIANIRAINY Huchard.

J'espère qu'il sera utile à ceux qui travaillent dans le domaine de la gestion et de traitement des ordures ménagères partout dans le monde et à Madagascar en particulier.

Je profite de l'occasion pour témoigner toute ma reconnaissance et adresser mes sincères remerciements aux personnes, sans les quelles ce travail n'aurait été possible.

✧ Mes profondes gratitude et mes chaleureux remerciements vont à Monsieur RAZAFIMAHEFA Alexandre, professeur titulaire, responsable de la formation du DEA de Mécanique et Physique d'Environnement, d'une part, de m'avoir recruté comme membre de son équipe de recherche, d'autre part, d'avoir dirigé et assuré le bon déroulement de ce travail. Ses accueils chaleureux, son esprit compréhensif et ses conseils pertinentes, sans avoir épargné son temps qu'il m'a accordé tout au long de la réalisation de ce travail, m'ont été précieux.

Mes vifs et chaleureux remerciements vont à :

✧ Madame RANDRIAMANANTANY Zely, Professeur Titulaire, Responsable du Laboratoire de Thermodynamique, Thermique et Combustion d'avoir accepté de présider le jury d'examen.

✧ Monsieur RAMANANTSIZEHENA Pascal, Professeur Titulaire, de bien vouloir participer au jury de cette soutenance

✧Monsieur RAFANOMEZANTSOA Roger Marie (Dr rer. nat.), Docteur d'Etat ès Sciences, Directeur du Centre National des Recherches Industrielles et Technologiques, d'avoir accepté de participer au jury d'examen malgré ses nombreuses occupations.

✧Monsieur ANDRIANANTENAINA Bruno, Maître des Conférences, Chef du Département de Physique de la faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, d'une part, pour ses conseils pertinents dans l'élaboration de ce mémoire, et d'autre part, pour sa participation au jury d'examen.

Mes remerciements vont également

✧à Monsieur RANDRIAMANARINA Claude, ancien Directeur du Centre National des Recherches Industrielles et Technologiques, de m'avoir permis de suivre un stage de formation au sein de ce centre et de m'avoir proposé le thème de ce mémoire.

✧à Monsieur RANDRIANIRAINY Huchard, chef de service du Département Energétique du Centre National des Recherches Industrielles et Technologiques, de m'avoir permis de suivre un stage de formation au sein de son Département.

✧à Messieurs RAVONINJATOVO Achille Olivier et RANDRIAMBOLOLONA Sabin, pour m'avoir fait profiter de leurs connaissances, de leurs savoir-faire et de leurs expériences.

✧à toute l'équipe du Département d'énergétique du CNRIT pour leur accueil chaleureux et leurs précieux conseils.

✧à la famille MOUSSA MOINDZE pour leur soutien moral et financière tout au long de mes études.

Enfin à tous ceux et celles qui, de près ou de loin, m'ont aidé à réaliser ce travail, particulièrement à mes meilleurs amis.

Sommaire

	Pages
Introduction	1
Chapitre I : GENERALITE SUR LES ORDURES MENAGERES	3
1.1 Définition et origine des ordures	3
1.2 Composition des ordures ménagères	3
1.3 Collecte des ordures ménagères	4
1.4 Traitement des ordures ménagères	6
1.5 Nuisances et risques ordures ménagères	7
1.6 Valorisations des ordures ménagères	10
Chapitre 2 : TRAITEMENT PAR FERMENTATION BIOLOGIQUE	13
2.1 La fermentation méthanique	13
2.1.1 Conditions nécessaires pour la fermentation méthanique	13
2.1.2 Procédés de fermentation	16
2.1.3 Mécanismes de fermentations méthaniques	16
2.1.4 Cinétique de croissance microbienne	18
2.2 Le compostage	20
2.2.1 Tri des déchets	20
2.2.2 Caractéristiques des matières premières	21
2.2.3 Additifs du compostage	22
2.2.4 Processus du compostage	23
2.2.5 Différentes phases du processus aérobie	23
2.2.6 Déroulement du compostage	24
2.2.7 Quelques exemples de composts des ordures ménagères	25

2.2.8 Influence du compost sur le sol et les cultures	27
Chapitre3: MODELES MATHEMATQUES DE QUELQUES PARAMETTRES DE LA FERMENTATION METHANIQUE	29
3 1 Transfert de chaleur au niveau du substrat	29
3.1.1 Description du système	29
3.1.2 Hypothèses	31
3. 1.3 Mise en équation	31
3. 1.4 Expression des coefficients d'échanges thermiques	33
3.1.5 Algorithme	34
3.2 Temps de séjour du substrat à l'intérieur du digesteur	37
3.3 Dimensionnement d'un digesteur	39
3.3 1 Critères énergétiques	39
3.3. 2 Critères économiques	47
Chapitre 4 : ETUDE EXPERIMENTALE ET ANALYSE DES RESULTATS	48
4. 1 Description du système	48
4 .1 .1 Matières premières	48
4. 1. 2 Travaux de labo	48
4. 2 Analyse et commentaire des résultats	50
4. 2. 1 Intérêt énergétique de la mise en digesteur	50
4. 2. 2 Intérêt agronomique de la valorisation des déchets ménagers	61
4. 3 Avantages de valorisation des ordures ménagères sur l'environnement	65
4. 3. 1 Elimination des odeurs et des pollutions des eaux	65
4. 3. 2 Elimination des gaz à effet de serre	66
Conclusion	67
Annexe 1 Avantages des différents types de collectes	
Annexe2_Principes généraux de l'incinération	
Annexe3 Caractéristiques des types des digesteurs	
Annexe 4 Additifs du compost	
Annexe 5 Programme en Borland C++	
Annexe 6 Schéma principale des activités de la valorisation des ordures ménagères	

Liste des abréviations

Abréviation	Signification	Unités
A_w	Volume retenu par absorption dans les déchets	$[m^3]$
A_h	Concentration d'acide acétique non ionisé	$[g.l^{-1} \text{ ou } g/m^3]$
B_a	Base totale agronomique	
C_h	Construction du tas	
C_m	Concentration en micro polluante	$[g.m^{-3}]$
D	Taux de dégradation	$[j^{-1}]$
D_m	Coefficient de diffusion du sol	$[m^2.j^{-1}]$
E	Volume perdu par évaporation	$[m^3]$
E_t	Volume perdu par évapotranspiration	$[m^3]$
$gradX$	Gradient des matières organiques	
H	Hauteur de la surface d'infiltration	$[m]$
K	Coefficient de perméabilité du sol	$[m.j^{-1}]$
K_{da}	Taux de lyse de la biomasse acidogène	$[j^{-1}]$
K_{dm}	Taux de lyse de biomasse méthanogène	$[j^{-1}]$
k_m	Constante de saturation de production de méthane	$[gl^{-1}]$
K_{im}	Constante d'inhibition d'acide acétique sur production de méthane	$[g.l^{-1}]$
L_v	Volume du lixiviat pendant l'exploitation	$[m^3]$
L	Longueur de la surface d'infiltration	$[m]$
MF	Matières fermentescibles	
MP	matières premières	
MO	Matières Organiques	
MS	Matières sèches	
N_c	Nombre des constituants	
OMS-OTH	Organisation mondiale de la santé omnium technique	
ρ	Masse volumique des ordures ménagères	$[Kg/m^3]$

P_{CH_4}	Production du biogaz	[L ou m ³]
P_v	Volume des précipitations	[m ³]
P_i	Volume de liquide dans les pores	[m ³]
pH	Potentiel d'hydrogène	
p_s	Production spécifique du biogaz	[m ³ .Kg ⁻¹ de MS]
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur [Kcal/unité d'énergie substituée]	
PCI _i	Pouvoir Calorifique Inférieur du constituant i [Kcal/unité de l'énergie i]	
Q	Débit d'entré et de sortie du substrat	[m ³ .j ⁻¹ ou ℓ.j ⁻¹]
Q _{oc}	Masse d'ordures collectées	[Kg]
Q _t	Débit de lixiviat	[m ³ .j ⁻¹]
Q _{am}	Quantité de chaleur dégagée par les réactions biologiques	[W.m ⁻³ ouJ.Kg ⁻¹]
Q _s	Quantité du substrat	[Kg]
n, a et b	Coefficients stœchiométriques	
R	Volume perdu par ruissellement	[m ³]
R _s	Volume retenu par le sol et les déchets	[m ³]
rH	Potentiel d'oxydoréduction	
R _i	Retournement du tas à la i ^{ème} fois.	
rx	vitesse spécifique de transformation du substrat par unité de volume	[g j ⁻¹]
T _c	Capacité d'échange	
T _{rH}	Temps de production du biogaz	[j]
T _c	Température du ciel	[°c]
T _a	Température du milieu ambiant	[°c]
T _{so}	Température du sol	[°c]
T _p	Température de la paroi	[°c]
T _{si}	Température de la surface interne	[°c]
T _s	Température de la libre du substrat	[°c]
S	Somme des cations échangés	
SAMVA	Service Autonome de l'Assainissement et de la Maintenance de la Ville d'Antananrivo	
S _p	Section de passage	[m ²]

S_o	Surface interne	$[m^2]$
S_g	Surface de gauche	$[m^2]$
S_t	Surface libre du substrat	$[m^2]$
V	Vitesse de déplacement du substrat	$[m.j^{-1}]$
$V_{var-int}$	Vitesse de variation interne	$[g.j^{-1}]$
V_{mmax}	Vitesse maximale de production de méthane par les bactéries Méthanogènes	$[g.jour^{-1}]$
$V_{.PCH4}$	Vitesse de production du biogaz	$[m^3.j^{-1}]$
V_t	Taux de saturation	
V_{ent}	Vitesse d'entrée du substrat dans le digesteur	$[g.j^{-1}]$
V_{tran}	Vitesse de transformation du substrat	$[g.j^{-1}]$
V_{sort}	vitesse de sortie du substrat	$[g.j^{-1}]$
X_s	Concentration du substrat sortant	$[g.l^{-1}]$
X	Concentration du substrat à l'instant t	$[g.l^{-1}]$
X_o	Concentration du substrat entrant	$[g.l^{-1}]$
X_a	Concentration de la biomasse acidogène	$[gl^{-1}]$
X_m	Concentration de la biomasse méthanogène	$[gl^{-1}]$

α_s	Quantité d'énergie à substituer.	[unité de source d'énergie]
β_i	Constituant i du biogaz	
τ_d	volume du digesteur	[m ³ ou L]
τ_{oc}	Volume d'ordure collecté	[m ³]
μ_a	Vitesse spécifique de décroissance de biomasse acidogène	[j ⁻¹]
μ_m	Taux spécifique de croissance de biomasse méthanogène	[j ⁻¹]
τ_d	volume du digesteur	[m ³]
τ_s	Volume du substrat	[m ³]
I	Emission de méthane dans l'atmosphère d'où le signe moins	[g ou m ³]
II	Réduction des émissions de carbone émis par suite d'utilisation du biogaz à la place d'un combustible	[g ou m ³]
III	Séquestration du carbone par le sol	[g ou m ³]
IV	Préservation du carbone séquestré dans les sols et les biomasses des forêts	[g ou m ³]
V	Emission de peroxyde d'azote évité par non défrichement des Forêts	[g ou m ³]
VI	Absorption de méthane par les forêts non défrichées.	[g ou m ³]

Introduction

Les ordures ménagères sont l'ensemble des diverses matières, perdant une partie ou la totalité de leur valeur initiale. Elles proviennent de la vie domestique, de la collectivité, du secteur touristique et de certaines activités des individus. Elles font l'objet d'un rejet.

Au cours de son existence, l'homme a ses propres besoins qui le poussent à produire des ordures ménagères. Leur quantité et leur qualité varient suivant le niveau et le genre de vie de la société. Leur lieu de stockage peut faire l'objet d'un travail important. Elles entraînent plusieurs nuisances sur la vie de la population et sur l'environnement si des mesures adéquates ne sont pas prises à temps.

Dans le souci de préserver l'environnement des études et recherches ont été déjà effectuées sur les ordures.

-RAHARIJHON (1) a présenté une étude sur l'élimination et la gestion des déchets urbain d'Antananarivo. Il a montré l'état des ordures dans la capital et à conseiller leur traitement par compostage.

-NAOILIDINE (2) a fait une étude sur l'élimination des déchets aux Comores. Son étude est basée sur le traitement par enfouissement.

- RAKOTOMIRAHO et al (3) ont présenté les résultats de traitement des ordures ménagères, de la commune de tanjombato, par compostage.

- L'Office National de l'Environnement de Madagascar (4) a publié une note sur l'état des ordures et à conseiller leur valorisation.

- Dans le Bulletin Africain N°10, Bio ressource + Energie (5), les différents types de traitement et les possibilité de valorisation selon le traitement utilisé sont mentionnés.

Les résultats des études, mentionnées ci-dessus, montrent que diverses techniques de traitement ont été conçues. Elles sont pourtant onéreuses.

Actuellement, le problème de la maîtrise de l'énergie suscite des débats socio-économique, politiques et environnementaux. Par ailleurs, les études et recherches sont orientées vers la

valorisation des matières organiques en général par production du biogaz. Quelques essais de valorisations des ordures ménagères ont été déjà effectués à Yaoundé-Camérone (5) et en France (6).

De ce fait les problèmes liés aux ordures ménagères peuvent être résumés comme suit.

- Quel est l'impact des ordures ménagères sur l'environnement et sur la population ?
- Quels seraient les effets considérables de leur traitement habituel ?
- Quels sont les types de valorisation les plus adaptables à la population, du point de vue technique et économique ?

Le thème fondamental de ce mémoire est la valorisation énergétique et agronomique des ordures ménagères c'â d la production du biogaz et du compost. Ce pendant, nous n'avons pas abordé tous les problèmes liés à ces valorisations, notamment les problèmes économiques.

A part notre souhait de contribuer à l'amélioration de la gestion et du traitement des ordures, le choix de notre thème est guidé par:

- le problème de la maîtrise de l'énergie,
- les effets négatifs de l'utilisation des engrais chimiques.

Dans notre méthodologie de travail, nous avons parcouru les étapes suivantes.

- une revue bibliographique pour voir l'état actuel des ordures et les traitements habituels,
- des travaux expérimentaux pour la production de biogaz.

Le présent mémoire comporte donc quatre chapitres.

Le premier chapitre concerne la généralité des ordures ménagères.

Dans le deuxième, nous avons parlé du traitement par Fermentation biologique des ordures ménagères.

Dans le troisième chapitre nous avons fait un modèle mathématique de certains paramètres physiques nécessaires à la fermentation méthanique.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous avons présenté les résultats expérimentaux suivi à des analyses et des interprétations.

Chapitre I

GENERALITE SUR LES ORDURES MENAGERES

1-1 Définition et origine des ordures

Selon J. COLLARDOT [4], on appelle « ORDURES MENAGERES » l'ensemble des diverses matières, perdant une partie ou la totalité de leur valeur initiale. Elles résultent de la vie domestique, de la collectivité, du secteur touristique et de certains déchets résultants de l'activité des individus (artisanats...).

1-2 Composition des ordures ménagères

La composition des déchets est hétérogène. Elle varie selon plusieurs facteurs: niveau de vie des habitants, zone de collecte, type d'habitat et de saison [1]. Il y a deux types de composition: physique et chimique.

La connaissance de ces compositions est essentielle et contribue au mode de stockage, de transport et de traitement des ordures. Elle permet également de déterminer l'impact des déchets mal gérés sur l'environnement, de choisir une bonne méthode d'évacuation et de déterminer les possibilités de récupération des ressources.

1.2.1 Composition physique

Selon des analyses d'échantillonnage d'ordures ménagères, effectuées par l'organisation mondiale de la santé –omnium technique (OMS-OTH) à Madagascar, en 1975, les ordures ménagères de la ville d'Antananarivo sont caractérisées par [1] :

40% de matières fines (diamètre inférieur à 20 mm)

39% de matières fermentescibles (MF) qui sont des matières végétales et animales

15% de matières combustibles, constituées par de cartons, de chiffons, d'os, de plastiques, de débris des combustibles classés et non classés ...

6% des matières inertes telles que les pierres, les métaux, les verres, les débris incombustibles non classés...

1.2.2 Composition chimique

Les ordures ménagères sont formées essentiellement de matières organiques et d'eau: 60%. Elles contiennent également des éléments minéraux à faible dose comme l'azote (0,40 – 0,50 %), le phosphore sous forme d'anhydride phosphorique P_2O_5 (0,30 – 0,40 %), la chaux CaO

(5,00 %), la Potasse K_2O , le soufre, le magnésium, la silice, l'oxyde de fer et la soude [4].

1.3 Ordures ménagères à Antananarivo

Selon le Service Autonome de l'Assainissement et de la Maintenance de la Ville d'Antananarivo (SAMVA), la production d'ordures ménagères à Antananarivo renivohitra, est estimée à 400g/habitant/jour soit 600 tonnes/jour pour les 1.500.000 d'habitants. Ce qui produit 219.000 tonnes/an.

Pour s'en débarrasser, les méthodes utilisées sont les suivantes [7] :

Ramassage public :	15,10 %
Jetées dans la nature :	20,90 %
Brûlées par le ménage :	40,00 %
Enterrées par le ménage :	23,60 %
Autres :	0,40 %

La masse d'ordures collectée par jour est calculée par :

$$Q_{oc} = \rho \cdot \tau_{oc} \quad (1)$$

Où

$\rho = 600 \text{ Kg/m}^3$, masse volumique des ordures

τ_{oc} : volume collecté dont la valeur est calculée par la relation.

$\tau_{oc} = \text{Nombre de camions} \cdot \text{Nombre de voyages} \cdot \text{Capacité /jour}$.

1.3 .1 Ramassage des ordures

C'est la commune urbaine d'Antananarivo qui a la responsabilité du maintien de la salubrité publique. Elle travaille en commun avec la société privée SAMVA pour l'enlèvement des déchets, dans les bacs à ordures, et ce dans les meilleures conditions pour l'environnement.

La société s'occupe directement des poubelles placées au niveau des quartiers. Mais la précollecte reste à la charge des citoyens. Différentes manières sont alors adoptées.

a--Collecte porte à porte

Cette technique est utilisée dans les pays développés. Elle concerne surtout les centres administratifs, les quartiers résidentiels d'un certain standing [1]. Les ménages entreposent leurs ordures dans une poubelle conçue à cet effet. La collecte s'effectue par camion qui s'arrête devant chaque ménage abonné. Un manœuvre verse le contenu de la poubelle dans le camion et laisse la poubelle devant la porte de l'abonné. Une fois le camion plein, on déverse les ordures dans une décharge ou un site de transfert.

b--Collecte centralisée par poubelle

Chaque ménage regroupe ses ordures dans une poubelle familiale. Un membre de la famille va ensuite les déverser dans la poubelle publique du quartier. Le service de ramassage va se charger de la suite.

c--Collecte par des moyens légers

Les ordures sont rassemblées le jour même du ramassage devant la concession. Ce type de collecte est assuré en général par de petites structures privées : groupements d'intérêt économiques (GIE), association, petites entreprises privées, organismes non gouvernementaux (ONG) et des structures informelles [1].

d-- Collecte sélective

Elle s'effectue porte à porte et concerne des types de déchets bien ciblés.

A Antananarivo, ce type de collecte concerne surtout les vieux vêtements, les bouteilles en verres, les aluminiums, les appareils électroménagers...

Elle peut être faite sur tous les types de déchets par apports volontaires des citoyens. Ces derniers doivent trier au préalable leurs déchets et les porter ensuite aux points de regroupement.

1.3.2 Avantages des différents types de collecte

Chacune de ces collectes présente aussi bien des avantages que des désavantages. Ils sont résumés en annexe 1.

1.4 Traitement des ordures ménagères

Le traitement consiste à éliminer les ordures de façon hygiénique, moins coûteuse et plus commode. Trois modes de traitements sont alors pratiqués.

a- Incinération

C'est une technologie relativement complexe avec de lourds investissements dûs à l'importation des combustibles liquides complémentaires.

Le coût de l'opération et les pertes d'énergies font que l'incinération industrielle n'est pas rentable. L'annexe 2 donne des renseignements sur les procédés suivis dans cette méthode.

b- Décharges

Elles font partie des moyens de traitement les plus utilisés. Deux techniques sont alors appliquées [4]:

Les décharges brutes : Il s'agit de déverser les ordures sur le sol sans prendre des précautions particulières.

Les décharges contrôlées : Cette technique fut mise en place par M. PARTRIDGE en 1935 [4]. La décharge s'effectue en respectant les règles suivantes afin de réduire les effets négatifs sur l'environnement.

Elle se fait par couches successives en contrôlant la température. Les couches sont nivelées et limitées par des talus réglés assez inclinés. Le dépôt doit être compact et recouvert d'une couverture.

L'amélioration de cette technique peut se faire en broyant les ordures. Il permet d'avoir: une homogénéisation des déchets, une uniformisation des granulométries, une réduction du volume, une élimination des risques d'incendies et une possibilité d'aménagement des décharges en espace vert.

c- Fermentation biologique

Elle consiste à activer la transformation naturelle et artificielle qui se produit dans les décharges. Elle permet d'obtenir du « compost », produit utilisé en agriculture. Ce processus est extrêmement complexe. Il est dû à la modification des conditions ambiantes (aération, humidité, température) en favorisant le développement des micro-organismes, nécessaires à la fermentation [1]. Deux méthodes sont alors utilisées :

✧ Fermentation anaérobie : La décomposition se fait en l'absence d'oxygène. C'est une fermentation lente, pouvant durer plusieurs mois voire plusieurs années. Elle s'appelle alors fermentation naturelle.

Les produits de cette décomposition sont le CO₂, une quantité de matières organiques et un volume considérable de gaz de méthane (CH₄).

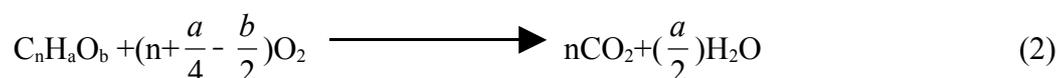
✧ Fermentation aérobie : Elle s'effectue en présence d'oxygène.

Il y a une fermentation aérobie simple, qui peut durer quatre à six mois dans des conditions ambiantes normales et une fermentation aérobie accélérée d'une durée de trois semaines à trois mois moyennant l'apport d'additifs supplémentaires.

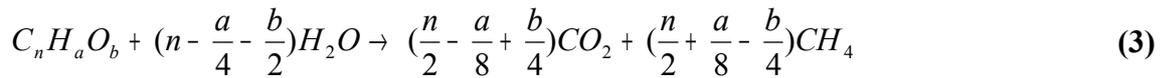
1.5 Nuisances et risques dues aux ordures ménagères

La décomposition des matières organiques (C_nH_aO_b) des ordures ménagères s'effectue selon les réactions suivantes :

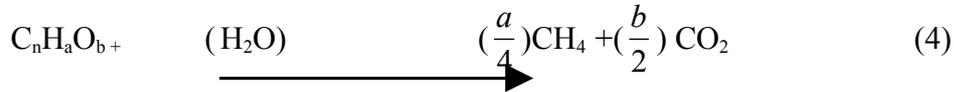
En présence d'oxygène O₂



En présence de l'eau H₂O, l'équation stœchiométrique de BUSUELL [8] est :



ou



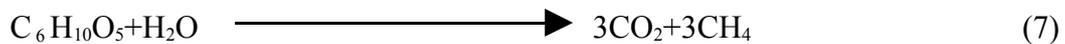
Avec $n = \frac{a}{4} + \frac{b}{2}$

Les matières organiques (MO) sont composées de celluloses, de lipides et de protides. Ces celluloses et particulièrement les glucoses simples se décomposent de la manière suivante.

Les glucoses:



Les celluloses



La quantité d'eau ainsi générée forme le lixiviat dont la quantité augmente avec les précipitations et les liquides que contiennent les déchets déposés dans les décharges.

Ce lixiviat est formé pendant l'exploitation et après la fermeture du site de décharge [2].

Pendant l'exploitation, Il est estimé par

$$L_v = P_v + P_i - E - A_w \quad (8)$$

Où

L_v : volume du lixiviat;

P_v : volume des précipitations ;

- P_i : volume de liquide dans les pores ;
 E : volume perdu par évaporation ;
 A_w : volume retenu par absorption dans les déchets.

Après fermeture du site, la quantité de lixiviat devient :

$$L_v = P_v - E_t - R - R_s \quad (9)$$

Où :

- E_t : volume perdu par évapotranspiration ;
 R : volume perdu par ruissellement ;
 R_s : volume retenu par le sol et les déchets.

Si ce lixiviat n'est pas récupéré et traité, il s'infiltré dans le sol

1.5.1 Nuisances de proximité à effet immédiat

Elles sont liées à l'activité des sites, à la modalité de leur exploitation et au fonctionnement interne des décharges [1].

- La décomposition des déchets, l'écoulement du lixiviat et les fumées de brûlage entraînent de mauvaises odeurs.
- L'inflammabilité des gaz, notamment le méthane, provoque des risques d'incendies.
- Des animaux tels que les mouches, les moustiques, se concentrent autour du site.
- Les organismes pathogènes et la décomposition des produits toxiques favorisent la propagation des épidémies.

1.5.2 Risques causés par les déchets

Les déchets et leur dégradation engendrent plusieurs effets. Les émanations de gaz provoquent un défrichement de la zone et une dégradation du paysage. Les effets toxiques et les nuisances olfactives peuvent causer une pollution de l'air et les maladies respiratoires.

Les débordements et les infiltrations du lixiviat entraînent une pollution des eaux de surface et souterraine. Elle est due à l'altération biologique et physico-chimique des eaux et à la diffusion des micros polluants.

L'infiltration du lixiviat se fait suivant l'équation de DARCY [9]

$$Q_t = K \cdot S_p \cdot \frac{H}{L} = K \cdot S_p \cdot I \quad (10)$$

Où :

Q_t : débit des lixiviats ;

K : coefficient de perméabilité du sol ;

S_p : section de passage du lixiviat;

$I = \frac{H}{L}$: pente,

L : la longueur de la surface d'infiltration

H : la hauteur de la surface d'infiltration

Quant à la diffusion des micros polluantes dans le sol qui contient de l'eau, elle se fait suivant la loi de FICK [9].

Si on appelle x_i le rayon de diffusion et x_j la profondeur, on a :

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_m \cdot \frac{\partial C_m}{\partial x_j} \right) \quad (11)$$

Où:

C_m : concentration en micro polluante [$M \cdot L^{-3}$] ;

D_m : coefficient de diffusion du sol [$L^2 \cdot T^{-1}$].

1.6 Valorisations des ordures ménagères

Les traitements habituels des ordures engendrent des nuisances ont encore considérables. De plus les technologies appropriées sont cependant onéreuses. Il est donc indispensable de valoriser les déchets. Le tableau 1 suivant donne les différents types de valorisations suivant le traitement utilisé.

Deux produits sont alors récupérables: l'énergie par production du biogaz ou récupération de la chaleur et l'engrais organique.

Tableau 1 : Différents types de valorisations des ordures ménagères

Types de traitements	Procédures utilisées	Coproductions importantes	Devenir des coproductions	Valorisations	Bilan des émissions des GES [5]
Décharges	Décharges brutes	Emission de bio méthane	Emission dans l'atmosphère	Néant	Emission du méthane
			Récupération partielle ou totale du biogaz	Torchère Energie	REM REM et du CO ₂ des CF
	Décharges contrôlées	Carbone stabilisé	Stockage à long terme dans la décharge	Néant	Néant
			Récupération des matières organiques	Engrais organiques	-RD - RUEC
Fermentation biologique	Compostage	Compost	Amendement organique		-RD -RUEC -RE de N ₂ O -PCSF -PCEMF
	Mise en digesteur	Bio méthane	Récupération totale du biogaz	Energie	-RD -REM et des CO ₂ des CF
		Résidus organiques de l fermentation	Récupération des matières organiques	Engrais organique	-RD -RUEC -RE de N ₂ O -PCSF -PCEMF
Incinération	Chaleur	chaleur	Chaleur	Chaleur	REM et des CO ₂ des CF
				Electricité	
	Carbonisation améliorée	Gaz	Gaz pyrolytique	chaleur	REM et des CO ₂ des CF
Matières sèches		Matières sèches	Briquètes		

Où

GSE: gaz à effet de serre

REM:	réduction des émissions de méthane
CF:	combustibles fossiles
RD:	réduction de la déforestation
RUEC:	réduction de l'utilisation des engrais chimiques
RE :	réduction des émissions
PCSF:	préservation du carbone stocké en forêt
PCEMF:	préservation de la capacité d'émission du méthane par les forêts

Nous constatons que le traitement par fermentation biologique permet de produire de l'énergie et de l'engrais organique. Nous adoptons cette technique de traitement pour la valorisation énergétique et agronomique des ordures ménagères.

Chapitre 2

TRAITEMENT PAR FERMENTATION BIOLOGIQUE

Le choix de cette technique de traitement est dû à sa facilité d'adoption à tout moment et à tout endroit, et aux coûts que nous estimons abordables.

L'amélioration du traitement des ordures ménagères par fermentation biologique se fait de deux manières : la méthanisation et le Compostage.

2.1 La méthanisation

C'est une fermentation anaérobie concernant des matières organique facilement biodégradables [10], [11], [12], [13]. Elle nécessite les conditions suivantes.

2. I. 1 Conditions nécessaires pour la fermentation méthanique

Le bon fonctionnement d'une installation de méthanisation dépend de plusieurs paramètres, notamment [8], [14], [15] [16], [17], [18], [19] et [20].

a- L'anaérobiose

_C'est le paramètre primordial pour la production et la récupération du biogaz.

b- La dilution

Il faut déterminer la densité du substrat avant la fermentation. Une proportion volumique de 1/1 à 1/3 est favorable pour la fermentation méthanique.

c- Le potentiel d'hydrogène: pH

Lors des différentes phases de la digestion, le pH fluctue entre 6,50 à 8,0 [16]. Un $\text{pH} < 6,5$ peut signifier une trop forte concentration en acides gras volatils et donc une inhibition de la phase méthanogénèse. Et un $\text{pH} > 8,0$ provoque la formation d'hydrogène (H_2), d'hydrogène sulfuré (H_2S) et d'ammoniac (NH_4), donc une inhibition de la fermentation.

d- La température

La fermentation anaérobie ne peut avoir lieu que pour une température comprise entre 10°C et 65°C . Les activités des bactéries dépendent étroitement de la température. Selon cette dernière, trois zones sont distinguées.

Une zone psychrophile de cinétique bactérienne très lente et de température comprise entre 15°C et 25°C .

Une zone mésophile de température de 25°C à 45°C avec une activité rapide des bactéries.

Enfin une zone thermophile de température comprise entre 45°C et 65°C avec une cinétique élevée des bactéries.

Les zones les plus favorables de la méthanisation sont la mésophile et la thermophile.

Le tableau 2 suivant donne la comparaison de ces deux zones.

Tableau 2 : Comparaison des zones mésophile et thermophile

zone mésophile	zone thermophile
-Moins de vapeur d'eau dans le gaz	-Beaucoup de vapeur d'eau dans le gaz
-Moins de CO_2 dans le gaz	-Plus de CO_2 dans le gaz
-Davantage d'espèces microbiennes méthanogènes	-Faible espèces microbiennes en méthanogènes
-Utilisation des calories à bas niveau	-Utilisation des calories à haut niveau
-Temps de rétention élevé	-Temps de rétention réduit
-Forte formation des résidus	-Faible formation des résidus
-Présence des micro-organismes pathogènes	-Destruction des micro-organismes pathogènes
-Complexité des conditions anaérobioses	-Complexité des conditions anaérobioses
	Réactivité plus grande : réduction du temps de

Le maintien d'une température constante dans le digesteur est par mis les facteurs qui engendrent une production constante du biogaz. L'étude des pertes de chaleur, par conduction, convection et rayonnement, au niveau du bio digesteur est importante.

e- Le temps de rétention du substrat à méthaniser

Ce paramètre est déterminant pour le dimensionnement et le coût du digesteur. Il dépend :

De la composition du substrat en matières sèches et de la qualité requise de l'effluent
Des conditions de fonctionnement retenues telles que le type de digesteur et la température.

f- Le potentiel redox

Rakotondramiarana [16] avance que, selon des essais effectués sur des cultures pures, les bactéries méthanogènes agissent à bas potentiel redox : -330mV à -300mV. Il faut éviter l'introduction d'éléments oxydants dans le digesteur tout en assurant une bonne étanchéité.

g- Le rapport Carbone Azote: C/N

Ce rapport doit être inférieur ou égal à 35 avec un optimum à 30.

✧S'il est très grand, les bactéries ne peuvent pas utiliser tout le carbone présent. Les processus sont alors peu efficaces.

✧S'il est très petit, il y a accumulation de l'azote sous forme d'ammoniac. Ce qui produit un effet toxique pour les bactéries.

Quant aux ordures ménagères brutes, ce rapport varie de 25 à 35.

i- L'agitation

Elle permet d'améliorer la productivité en assurant une bonne homogénéité du contenu du digesteur. Elle favorise les échanges thermiques et assure également la dégazéification du

substrat. Une telle opération peut se faire manuellement, mécaniquement ou par simple ré-circulation du gaz ou de l'effluent.

2.1.2 Procédé de fermentation

La texture, la teneur en matières sèches et la rhéologie des matières à fermenter supposent l'utilisation d'une technologie bien adaptée.

Il existe trois grands types de digesteurs dont les caractéristiques sont donnés en annexe 3.

2.1.3 Mécanisme de fermentation méthanique

Contrairement aux autres substrats, la dégradation anaérobie des matières organiques des ordures ménagères peut se faire sans introduction d'eau. Elle se fait selon l'équation suivante.



Où

MP représente les matières premières.

La quantité d'eau libérée réagit avec le substrat pour activer la fermentation suivant l'équation (6).

Cette dégradation met en jeu différents groupes de micro-organismes anaérobies qui accomplissent la fermentation méthanique. Quatre étapes résument les transformations effectuées [14], [15], [16], [17], [18] [19] et [20].

2.1.3.1 Hydrolyse du substrat

Les composés organiques sont dépolymérisés et transformés en molécules plus simples par l'action des bactéries hydrolitiques. La matière organique (MO) est détruite par les enzymes produites par les bactéries, puis fermentée en monomères (acides volatiles, sucres simples et acides aminés) selon l'équation suivante.



Où : Q_{am} est la quantité de chaleur dégagée par les réactions biologiques. Elle est exprimée en [J.Kg⁻¹] ou [W.m⁻³] et a comme valeur 0,53 W.m⁻³ [21].

Et MO : la matière organique.

Les réactions biologiques exothermiques provoquent une élévation de la température. Cette dernière est très considérable au centre du substrat et diminue progressivement en s'éloignant de ceci. Ce gradient thermique est l'origine de la circulation interne d'eau évoquée précédemment.

2.1.3.2 Acidogenèse

Les monomères ainsi formés en hydrolyse sont transformés en acides organiques (formique, acétique, propinique, butyrique, valérique, lactique,...), en alcools (méthanol, éthanol,...), en gaz carbonique et en hydrogène.

2. I.3.3 Acétogenèse

C'est une étape primordiale. Elle transforme une partie des produits acidogenèse (alcool, aldéhyde,...) en acide acétique, en hydrogène, en gaz carbonique et en formate.

Les réactions biologiques, effectuées lors de cette phase, permettent d'éviter l'accumulation des acides gras volatils (AGV), autres que l'acide acétique. Ces acides, ayant des concentrations trop élevées, deviennent inhibiteurs à la méthanisation.

2. I.3.4 Méthanogenèse

C'est la phase ultime de la méthanisation. Les bactéries méthanogènes, organismes strictement anaérobies, réalisent la synthèse du méthane à partir de l'hydrogène, du gaz carbonique (CO_2), de l'acétate et du formate.

La figure suivante nous donne une description systémique des différentes phases biochimiques de la fermentation méthanique.

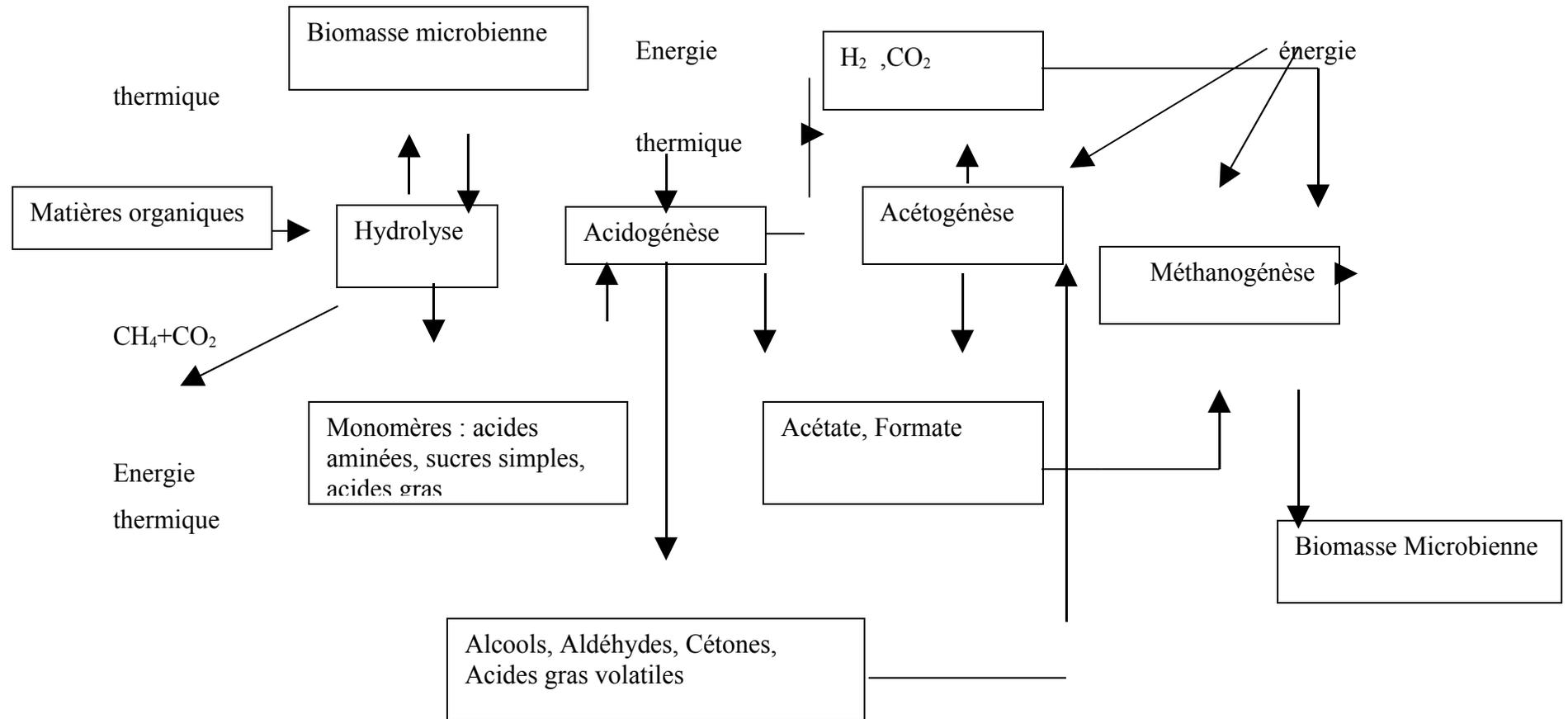


Figure 1 : Schéma systémique du mécanisme de la fermentation anaérobie

2.1.4 Cinétique de la croissance microbienne

Rakotondramiarana [16] a repris le modèle de Hill, Bart, Havlik, Moletta. Ce modèle prend en considération la production de méthane en deux étapes: l'hydrolyse/ acidogénèse de l'acétate et l'acétogénèse/ Méthanogénèse.

2.1.4.1 Variation de la biomasse acidogénèse.

D'après Hill, Bart Havlik, Moletta et al, elle est régie par :

$$\frac{dX_a}{dt} = \mu_a X_a - K_{da} X_a \quad (14)$$

X_a : concentration de la biomasse acidogène (gl^{-1})

μ_a : vitesse spécifique de décroissance de biomasse acidogène (jour^{-1})

K_{da} : vitesse de décroissance de la biomasse acidogène (jour^{-1})

2.1.4.2 Variation de la biomasse méthanogène

Au cours du temps, cette variation est donnée par l'équation :

$$\frac{dX_m}{dt} = X_m (\mu_m - K_{dm}) \quad (15)$$

X_m : concentration de la biomasse méthanogène [gl^{-1}]

μ_m : vitesse spécifique de croissance de biomasse méthanogène [jour^{-1}]

K_{dm} : vitesse de décroissance de biomasse méthanogène [jour^{-1}]

2.1.4.3 Vitesse de production du méthane

Selon le modèle de Moletta et al [16] la vitesse de production du méthane est:

$$V_{P_{CH_4}} = \frac{dP_{CH_4}}{dt} = V_{m.\max} \cdot X_m \left[\frac{A_h}{A_h + K_m} \right] \left[\frac{K_{im}}{K_{im} + A_h} \right] \quad (16)$$

Où :

$V_{m\max}$: vitesse maximale de production de méthane par les bactéries méthanogènes [$g \cdot g^{-1} \cdot jour^{-1}$]

A_h : Concentration d'acide acétique non ionisé [$g \cdot l^{-1}$]

k_m : Constante de saturation de production de méthane [$g \cdot l^{-1}$]

K_{im} : Constante d'inhibition d'acide acétique sur production de méthane [$g \cdot l^{-1}$]

La production du méthane est :

$$P_{CH_4} = V_{P_{CH_4}} \cdot T \quad (17)$$

$V_{P_{CH_4}}$ est la vitesse de production du biogaz, exprimé en [$g \cdot l^{-1} \cdot jour^{-1}$],

T est temps de production du biogaz exprimé en [jour] et

P_{CH_4} est la production du biogaz exprimée en [$g \cdot l^{-1}$] ou en [m^3].

2.2 Compostage

Le compostage consiste à fermenter dans des conditions contrôlées des déchets organiques en présence ou non de l'oxygène de l'air.

2.2.1 Tri des déchets

Ce type de traitement oblige une sélection des matières fermentescibles (MF) en éliminant les métaux, les verres, les plastiques, les os, les piles etc....

Ce triage peut se faire manuellement ou industriellement en séparant les matières fermentescibles des matières combustibles et des matières inertes. Par exemple le triage industriel, à ITRADEC- BELGIQUE [22], suit les étapes suivantes.

a-Séparation magnétique

Les ordures sont réparties sur une bande transporteuse. Un overband (électro-aimant ou aimant permanent) capte les particules ferreuses et les évacue hors des ordures.

b-Séparation granulométrique

Elle consiste à isoler les fractions combustibles et les matières fines non fermentescibles. Le principe est basé sur la différence de dimensions. Les matières fines ont un diamètre inférieur à 20mm, alors que les matières combustibles ont en général une dimension supérieure à 50mm. Le criblage des ordures, dans une maille de 50mm, donne comme refus essentiellement des matières combustibles alors que l'utilisation d'une maille de 20mm de diamètre fait sortir les matières fines.

c- Séparation densimétrique

Les fermentescibles sont séparées des matières inertes plus denses. Lorsqu'elles sont placées sur des tables densimétriques, et soumises à un courant d'air ascendant, les matières les plus denses se déposent sur le fond alors que les plus légères montent à la surface. Si la table est soumise à une vibration, les produits qui se déposent sur le fond remontent la pente. Les plus légères s'écoulent vers le bas.

2.2.2 Caractéristiques des matières premières

Les matières premières utilisables sont soit de nature organique émanant du système de production soit de nature minérale.

Leur utilisation présente les caractéristiques suivantes [14] et [17].

a- Matières essentiellement organiques

Il s'agit des produits ou des déchets d'origine végétale ou animale. Toutes les substances organiques sont compostables. Le compostage dépend de plusieurs facteurs.

✧ Le rapport Carbone Azote: C/N

Le carbone et l'azote sont les éléments nutritifs du compost. Un rapport idéal peut être obtenu en ajoutant des matériaux riches ou pauvres en azote (N₂) selon le cas. S'il y a des carences en phosphore ou en potasse, il faut les compenser.

✧ La stabilité structurale

C'est le comportement des matières premières au cours du compostage. Certaines (déchets des légumes...) perdent rapidement leur coexistence, alors que d'autres (bois de taille, écorces...) en conservent un peu plus longtemps.

Une bonne aération nécessite des masses de matières premières suffisamment poreuses.

✧ L'humidité

Le bon déroulement du compostage exige un taux d'humidité compris entre 60 % et 70 % en milieu sec et 50 % et 55 % en milieu humide.

b-Matières essentiellement minérales

Les matières minérales ne contenant aucune matière carbonée sont utilisées comme additifs dans des matières organiques à composter. Elles sont déterminées par leur teneur en éléments nutritifs qui conditionnent la valeur fertilisante du compost.

2.2.3 Additifs du compostage

Ce sont des matériaux complémentaires. Ils sont de nature organique ou minérale [17] et sont utilisés comme éléments nutritifs ou activateurs du compost.

a- Objectifs principaux des additifs

Ils sont utilisés pour améliorer la rapidité du compostage ainsi que la qualité du produit. Les différentes sortes d'additifs, leur composition et leur utilisation sont données en annexe 4.

b- Les activateurs

Comme certains additifs, les activateurs ont pour rôle d'accélérer les différents processus du compost. Deux types d'activateurs sont utilisés : les activateurs à base de plantes

médicinales et les activateurs à base de bactéries ou de microorganismes.

2.2.4 Processus du compostage

Il y a pratiquement deux processus de compostage: aérobie et anaérobie [17] et [23].

2.2.4.1 Compostage en anaérobie

Dans une fosse d'un mètre de profondeur, les matières fermentescibles sont posées couche par couche de 20 cm d'épaisseur, alternativement avec des excréments d'animaux. Elles sont couvertes avec de la terre. Et on ajoute assez d'eau pour accélérer l'opération. La décomposition des matières premières est lente et dure à peu près six mois.

2.2.4.2 Compostage en aérobie

Il consiste à ranger toutes les matières dans une compostière. La condition d'aérobie est obtenue en effectuant plusieurs retournements et en arrosant fréquemment suivant le taux d'humidité des tas.

2.2.5 Différentes phases du processus aérobie

Le processus de compostage aérobie s'effectue en trois phases [1], [17] et [23].

a- Phase de dégradation

Au cours de cette phase, la température au centre des tas monte jusqu'à 70°C. Cette augmentation résulte des réactions biologiques à la fois aérobies et anaérobies qui se produisent dans les tas. Elle détruit les germes pathogènes, et les graines des mauvaises herbes. Ce sont des décomposeurs primaires. Des champignons, des bactéries, et des actinomycètes dominent l'activité microbienne. Ils sont utilisés par des décomposeurs secondaires comme nourritures. A l'intérieur du tas de compost, une chaîne trophique règle le dynamisme microbien. Les nématodes et les vers jouent un rôle prépondérant. Ils stimulent la croissance des nouvelles colonies bactériennes.

b-Phase de transformation

Pendant cette phase, la température s'abaisse considérablement. Cette chute est liée aux pertes de chaleurs provoquées par les propriétés thermiques du substrat et aux conditions limites environnantes. D'autres bactéries ou champignons prennent la relève pour parfaire la décomposition.

c-Phase de maturation

La température se stabilise aux environs de la température ambiante. Les matières organiques deviennent stables. Des vers de terres, des acariens et des collemboles apparaissent.

La couleur du compost devient chocolat.

Le graphe 2 suivant montre la variation de la température en fonction du temps

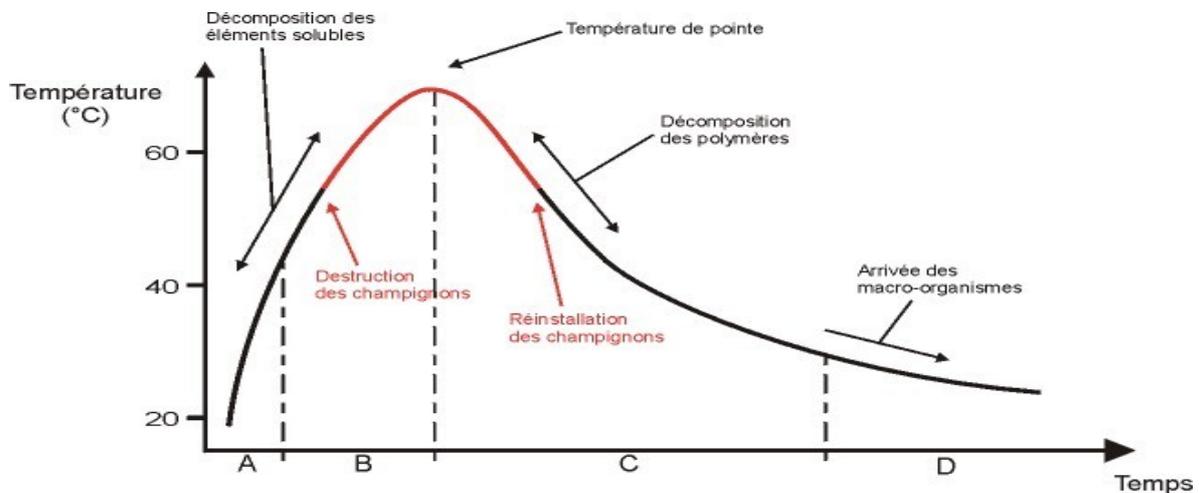


Figure 2 : variation de la température du compostage [24]

2.2.6 Déroulement du compostage

Le compostage doit suivre les étapes de préparation de la compostière, des matières premières (broyage, homogénéisation et humidification des matières) et de l'andain. Ce dernier a pour rôle d'éviter le contact entre la terre et la matière première, d'aérer le compost et d'éviter la diminution des rendements lors des retournements.

La répartition des matières premières se fait en mettant les plus dures en bas et les moins dures en haut. Il est nécessaire d'espacer les différentes couches par des additifs ou d'inoculums.

Des retournements des tas sont obligatoires. Ils sont effectués selon les formules suivantes [17]:

$$C_h + 2 \text{ jours} + R_1 + 4 \text{ jours} + R_2 + 8 \text{ jours} = \text{Compost frais} \quad (18)$$

Où

C_h est la construction du tas

R_i est le retournement ou brassage du tas à la $i^{\text{ème}}$ fois.

Le compost frais est obtenu après deux semaines de fermentation.

$$\text{Compost frais} + R_3 + 16 \text{ jours} = \text{engrais organique} \quad (19)$$

L'engrais organique peut être obtenu après quatre semaines. Avec une phase de maturation de deux semaines, le temps de compostage est au moins de six semaines.

On fait un retournement de tas quand la température commence à diminuer. Elle change ainsi de phase et passe par un minimum.

La Figure 3 suivante a permis, par interpolation, d'obtenir la figure 2 précédente [24].

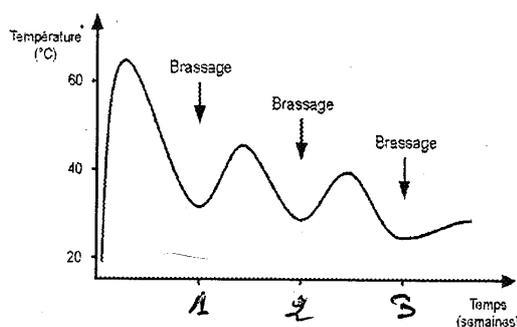


Figure 3 : variation de la température en fonction des retournements

2.2.7 Quelques exemples de composts des ordures ménagères

Comme le montre le tableau 1, la valorisation agronomique des ordures ménagères peut être réalisée suivant différents procédés : décharge contrôlée, compostage et mise en

digesteur. Les deux derniers procédés permettent de réduire le temps de décomposition tout en assurant une bonne condition d'hygiène. Citons, à titre d'exemples, le compost classique, le lombricompost, le compost industriel et les résidus de fermentation.

2.2.7.1 Compost classique

C'est un engrais organique fabriqué à partir d'un processus aérobie suivant le déroulement indiqué par le paragraphe 2.2.6

2.2.7.2 Lombricompost

C'est un processus dont le déroulement suit deux phases essentielles : élevage des vers (ensemencement et entretien) et récupération de l'humus de vers ou lombricompost [3].

Les vers vont naître et croître dans des lits pour produire le lombricompost. Il faut introduire de nouveau substrat riche en matières organiques dans la compostière pour la nourriture des vers. On récupère ensuite le lombricompost.

2.2.7.3 Compost industriel

A Andralanitra, le compost industriel suit quatre phases comme le montre la figure suivante [1].

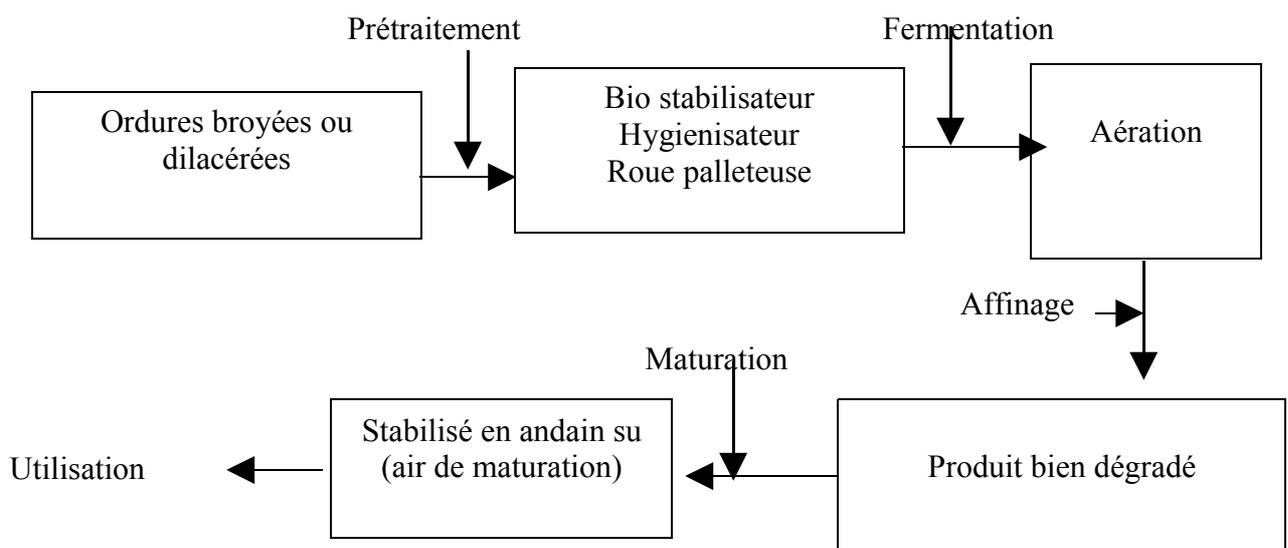


Figure 4: Schéma du compost industriel

✧ Le prétraitement permet de séparer les déchets en différentes catégories selon leurs natures, le moyen de traitement et leur taille.

✧ la fermentation se fait en présence de l'air avec un retournement tous les trois jours. Elle dure deux mois pour une fermentation accélérée.

✧ L'affinage consiste à réduire la granulométrie des ordures. Il favorise le contact entre les particules lourdes et les particules légères.

✧ La maturation est une phase de repos. Elle est entrecoupée de plusieurs retournements.

2.2.7.4 Résidus de la fermentation méthanique

Lors de la méthanisation, la décomposition des matières organiques est beaucoup plus poussée. Le digestat organique ainsi récupéré peut servir d'amendement organique après un court compostage.

2.2.8 Influence du compost sur le sol et les cultures

Les propriétés physico-chimiques des sols sont fonction des proportions relatives des éléments constitutants. Elles dépendent également de la façon dont ces éléments sont associés pour former la pédologie du sol, l'humus et le complexe absorbant [25].

Le compost joue un rôle important surtout pour les deux derniers éléments.

a- Humus et acide humique

Les humus (complexes colloïdaux humiques) sont les résultats des débris végétaux et animaux tombant sur la terre sous forme de matières organiques. Ils se minéralisent en éléments solubles ou gazeux. Ces humus sont caractérisés par le taux de saturation, le pH, le taux d'humidification, le rapport $N_{\text{minérale}}/N_{\text{total}}$ et le rapport C/N.

En effet le compost est mieux placé pour être utilisé comme humus et / ou acide humique des sols.

b- Complexe absorbant

Les colloïdes électronégatifs du sol retiennent autour de leurs molécules des cations tels que : H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ . Ils prélèvent également du NH_4^+ , de Mn^{2+} , de Cu^{2+} , d' Al^{3+} en quantité plus faible.

Ces cations sont échangeables. Et après une analyse du sol et des cultures permettant de définir et d'évaluer la teneur en matières minérales, on fait l'apport d'engrais chimique ou organique.

Selon le ministère de la coopération et du développement français [25], l'état du complexe d'absorption est défini à partir de la capacité d'échange (T_{ch}), de la somme des cations échangeables (S) et du taux de saturation (V_t). C'est à dire :

$$V_t = 100 \cdot \frac{S}{T_{ch}} \quad (20)$$

Il est défini également par l'acidité actuelle (pH) le potentiel d'oxydoréduction (rH) et les bases totales agronomiques (B_{ta}) estimées par :

$$B_{ta} = \text{bases échangeables} + \text{réserve.} \quad (21)$$

Ces dernières donnent les quantités d'éléments fertilisants en réserve dans le sol. Ils ne sont pas immédiatement utilisés par la plante.

Les caractéristiques physico-chimiques du sol montrent alors que l'utilisation d'engrais chimique nécessite l'analyse du sol et des cultures. Ces analyses permettent de savoir le type et la quantité d'ions à apporter. Alors que le compost se comporte comme un humus naturel. Son utilisation ne présente aucun risque. Nous la conseillons donc fortement.

Chapitre3

MODELE MATHEMATIQUES DE QUELQUES PARAMETRES DE LA FERMENTATION METHANIQUE

Ce modèle concerne certains paramètres physiques de la méthanisation que nous jugeons importants, notamment: la température, le temps de rétention hydraulique et le volume de l'installation.

3.1 Transfert de chaleur au niveau du substrat

Le rôle important que joue la température sur la méthanisation nécessite l'étude des échanges thermiques s'effectuant au niveau du digesteur que nous avons fabriqué.

3.1.1 Description de l'appareil

L'appareil que nous avons conçu est un digesteur de forme cylindrique. Il est fabriqué en tôle d'acier et fonctionne en semi continu. Le substrat transite par la trémie de remplissage et sort par l'ouverture du bouchon. Des pales assurent le brassage et le déplacement du substrat à l'intérieur du digesteur par une manivelle (figure5).

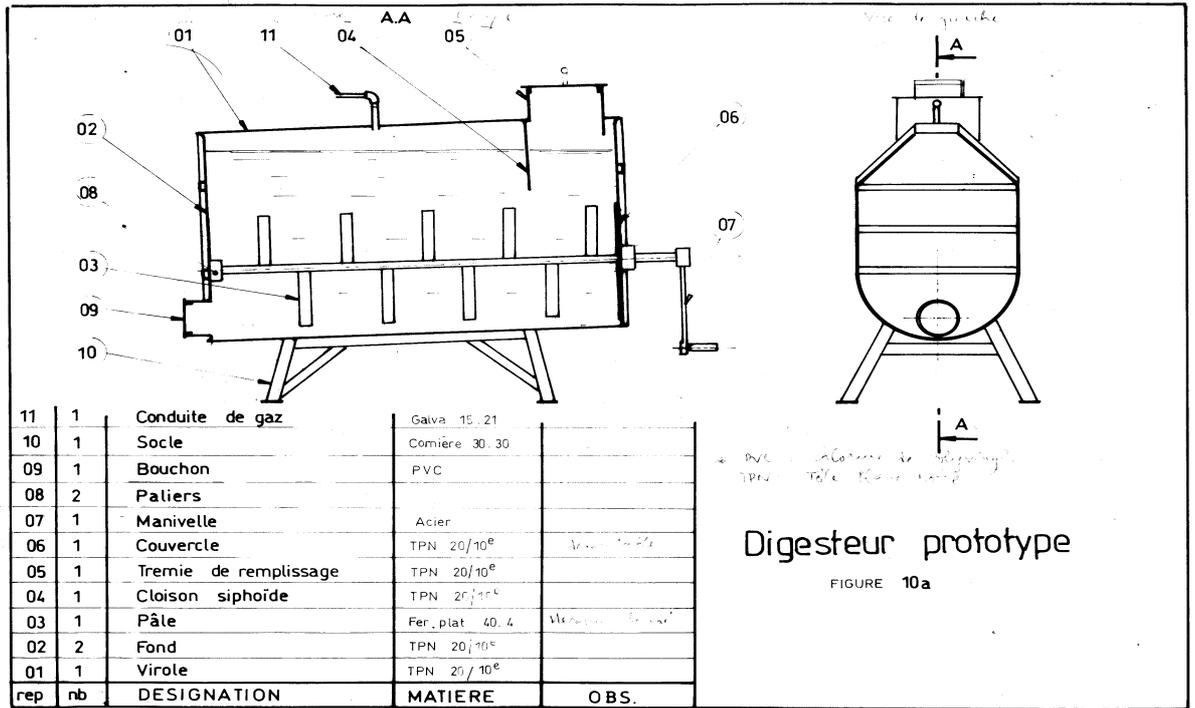


Figure 5 digester prototype

Les pertes de chaleur se font à travers la surface latérale comme le montre la figure 6 suivante.

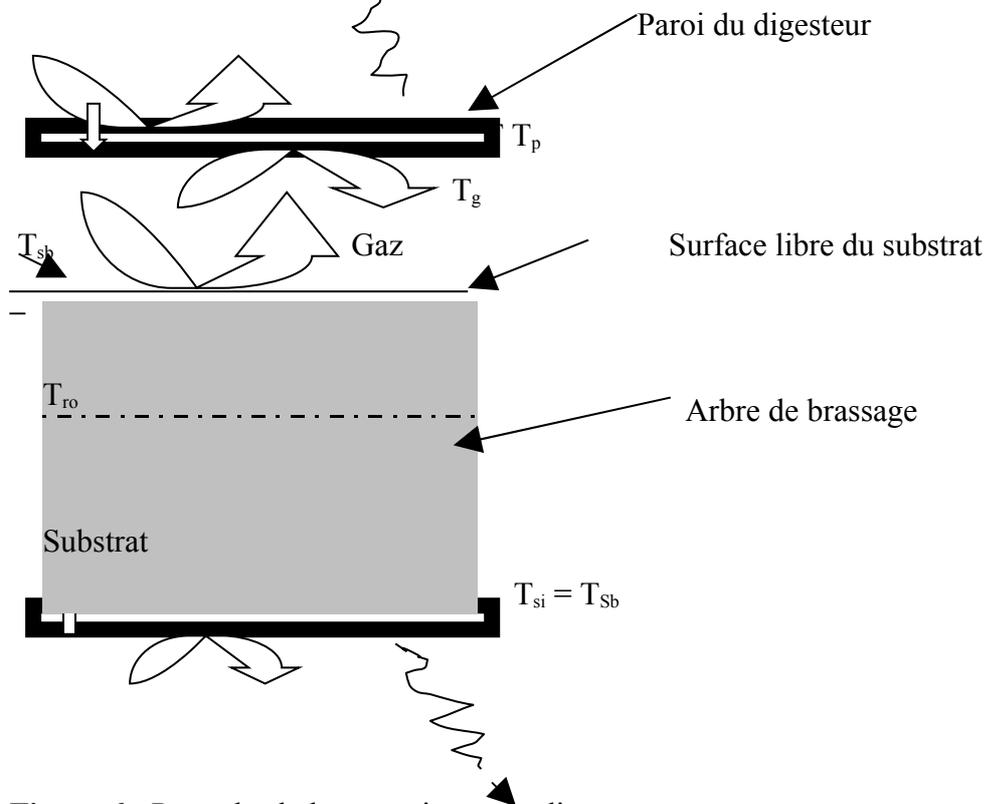


Figure 6 : Perte de chaleur au niveau du digester.

3.1.2 Hypothèses

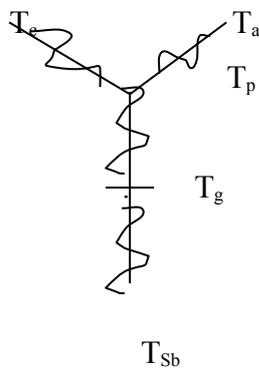
Dans notre étude, nous considérons les hypothèses suivantes :

- Régime permanent $\frac{\partial}{\partial t} = 0$
- Grande conductivité : la paroi entourant l'espace de gaz de surface S_g a une température uniforme $T_p = T_{pe} = T_{pi}$. Et la paroi en contact avec le substrat de surface S_o a une température uniforme $T_{si} = T_{se}$.
- La température de la surface libre du substrat S_1 est $T_{sb} = T_{si}$ (température de la surface latérale S_o).
- La distribution de la température à l'intérieur du substrat varie suivant le rayon. Elle est uniforme sur une surface cylindrique de rayon r_i donné.
- Le coefficient de convection entre la surface interne S_g et le gaz est le même que ce du gaz et la surface libre S_1 du substrat
- Les températures du ciel T_c , du milieu ambiant T_a et du sol T_{so} sont supposées connues et égales.
- Nous négligeons les phénomènes de rayonnement à l'intérieur du digesteur.

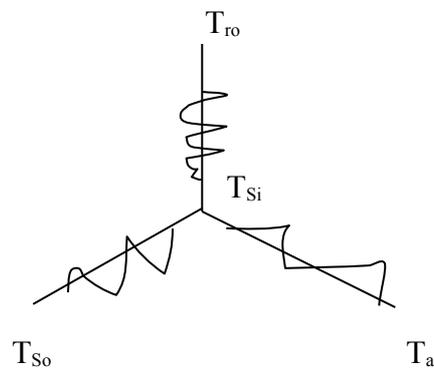
3.1.3 Mise en équation

Les pertes de chaleur se font à travers la surface interne S_g et la surface latérale S_o .

Nous avons donc les schémas électriques équivalents suivants.



Surface interne S_g



Surface latérale S_o

Figure 7 : Analogie électrique des pertes de chaleurs

Au niveau de la surface interne, les pertes de chaleurs se font selon l'équation suivante.

$$h_{ra} \cdot S_g (T_c - T_p) + h_{va} \cdot S_g (T_a - T_p) + h_{vg} \cdot S_g (T_g - T_p) = 0 \quad (22)$$

Or à l'espace libre du digesteur, les échanges de chaleur se font selon l'équation suivante.

$$S_\ell h_{vg} (T_{Sb} - T_g) + S_g h_{vg} (T_p - T_g) = 0 \quad (23)$$

La température du gaz est alors:

$$T_g = \frac{T_p \cdot S_g + T_{Sb} \cdot S_\ell}{S_g + S_\ell} \quad (24)$$

L'équation (22) devient, en prenant $T_c = T_a = T_{so}$

$$(h_{ra} + h_{va})(T_a - T_p) + (T_{Sb} - T_p) \left(\frac{h_{va} \cdot S_\ell}{S_g + S_\ell} \right) = 0 \quad (25)$$

A travers la surface latérale, les échanges de chaleurs se font de la manière suivante.

$$S_o h_{va} (T_a - T_{si}) + h_{ra} S_o (T_{so} - T_{si}) + \lambda_s (R_i - r_o) (T_{ro} - T_{si}) = 0 \quad (26)$$

Avec $T_{si} = T_{Sb}$, nous avons :

$$S_o (h_{ra} + h_{va}) (T_{so} - T_{Sb}) + \lambda_s (R_i - r_o) (T_{ro} - T_{Sb}) = 0 \quad (27)$$

La distribution de la température à l'intérieur du substrat suit l'équation de Poisson [26]

$$\Delta T + \frac{Q_{an}}{\lambda_s} = 0 \quad (28)$$

Où :

Q_{an} : est la chaleur interne dégagée par le substrat en anaérobiose. Elle est dissipée par les réactions biologiques. Pour une température donnée, elle a comme valeur $0,53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$.

λ_s : conductivité du substrat. Elle a comme valeur : $0,3 \text{ w} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [11].

En intégrant cette équation avec les conditions aux limites suivantes :

$$\left(\frac{\partial}{\partial r}\right)_{r=0} = 0 ; \text{ et } T(r = R_i) = T_{si} = T_{sb}$$

Où r_o est le rayon de l'arbre de brassage et R_i le rayon interne du cylindre.

Nous avons :

$$4\lambda_s (T_{ro} - T_{si}) + q^o \cdot (r_o^2 - R_i^2) = 0 \quad (29)$$

3. 1.4 Expression des coefficients d'échanges thermiques

Echange par convection

Selon HOTTEL et WOERTZ [26] le coefficient d'échange avec le milieu extérieur est :

$$h_{va} = 5,67 + 3,86 v \quad (30)$$

Où v est la vitesse du vent

Dans l'espace de gaz, ce coefficient devient :

$$h_{vg} = 5,67 \quad (31)$$

Echange par rayonnement

Le rayonnement entre 2 surfaces S_1 et S_2 portées à des températures T_1 et T_2 d'émissivité respectives ε_1 et ε_2 , admettent comme coefficient d'échange

$$h_r = F'_{12} \sigma (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2) \quad (32)$$

Où σ est la constante de Stefan

F'_{12} le facteur de forme entre les 2 surfaces, son expression est :

$$F'_{12} = \frac{1}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \cdot \frac{S_1}{S_2}} \quad (33)$$

3. 2.5 Algorithme de résolution de ce système

Nous supposons la longueur du digesteur assez longue par rapport au diamètre pour négliger les pertes de chaleur au niveau des surfaces des bases. L'algorithme de résolution est le suivant.

1/ Fixer les données

-Configuration géométrique

.Parois internes de surface: S_g

.Parois latérales de surface: S_o

. Surface libre: S_l

Epaisseur des parois: e

-Configuration physique

.Volume du bio digesteur: τ_d

.Masse volumique du substrat: ρ

.Conductivité thermique du substrat: λ_s

.Emissivité de la paroi: ε_i

-Paramètre de fonctionnement

.Débit massique de chargement du substrat

.Temps de séjour du substrat dans le bio digesteur

.Vitesse de dégradation du substrat

2/ Donner une valeur arbitraire à

-La température du milieu ambiant = La température du sol = La température du ciel

3/ Calculer les coefficients de transfert : h_{va} ; h_{ra} ; $h_{rg} = h_{vg}$

4/ Calculer les températures T_p ; T_g ; T_{sb} et T_{r0}

Le schéma synoptique de la résolution numérique des pertes de chaleur du digesteur est donné par la figure 8

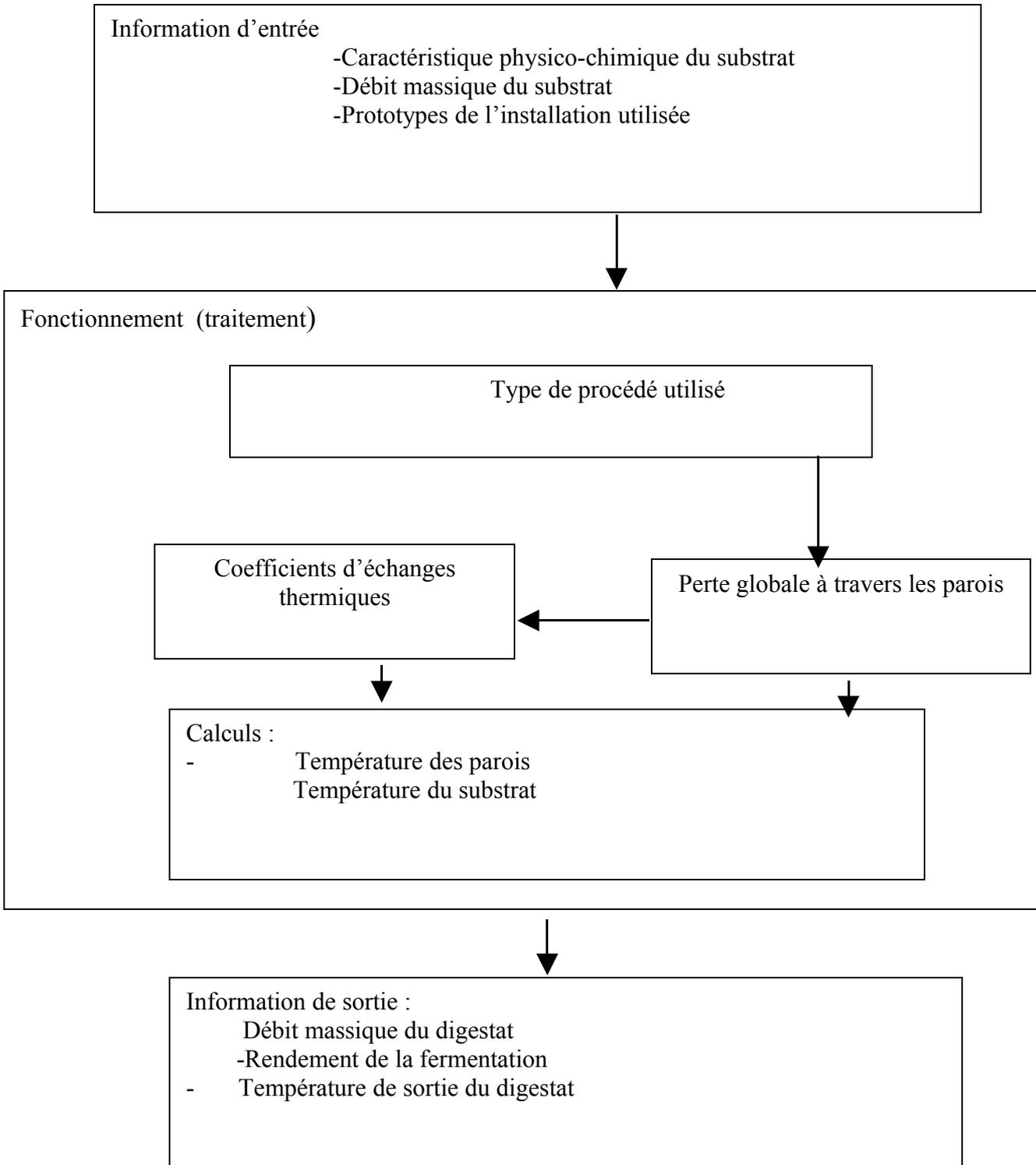


Figure 8 : schéma synoptique de la simulation numérique des pertes de chaleur

L'annexe 5 donne un programme de calcul numérique en Borland C++.

Les résultats de ce programme sont les suivant

RESOLUTION D'UN SYSTEME D'EQUATIONS LINEAIRES AX=B
METHODE DE GAUSS

Tableaux 3: Valeurs théoriques de la température à l'intérieur du digesteur

3-a Données

$h_{va}=5.67$; $h_{ra}=5$; $h_{vg}=5$; $Sl=0.4$;
 $Sg=0.47$; $\lambda_{das}=71.59$; $Ri=0.2$; $r_0=0.008$;
 $Q=0.53$;
 $Pi=3.14$

Résultats

Ta(°c)	20	25	30
Tp(°c)	20,00	25,00	30,00
Tsb(°c)	20,00	25,00	30,00
Tro(°c)	20,02	25,02	30,02
Tg(°c)	20,00	25,00	30,00

Faisons un changement de dimension.

3 -b Données

$h_{va}=5.67$; $h_{ra}=5$; $h_{vg}=5$; $Sl=10$;
 $Sg=11,77$; $\lambda_{das}=71.59$; $Ri=1$;
 $r_0=0.08$; $Q=0.53$;
 $Pi=3.14$

Résultats

Ta(°c)	20	25	30
Tp(°c)	20,00	25,00	30,00
Tsb(°c)	22,00	27,00	32,00
Tro(°c)	23,44	28,44	33,44
Tg(°c)	22,00	27,00	32,00

Nous changeons de nouveau les dimensions

3-c Données

$h_{va}=5.67$; $h_{ra}=5$; $h_{vg}=5$; $Sl=40$;
 $Sg=47.12$; $\lambda_{das}=71.59$; $Ri=2$;
 $r_0=0.08$; $Q=0.53$;
 $Pi=3.14$

Résultats

Ta(°c)	20	25	30
Tp(°c)	20,00	25,00	30,00
Tsb(°c)	20,01	25,01	30,01
Tro(°c)	21,77	26,77	31,77
Tg(°c)	20,00	25,00	30,00

Nous changeons de donnés sur les coefficients d'échanges thermiques et de dimension

3-d Données

$h_{va}=5.67$; $h_{ra}=10$; $h_{vg}=5$; $Sl=0.4$;
 $Sg=0.47$; $\lambda_{das}=71.59$; $Ri=0.2$;
 $r_0=0.008$; $Q=0.53$;
 $Pi=3.14$

Résultats

Ta(°c)	20	25	30
Tp(°c)	20,00	25,00	30,00
Tsb(°c)	20,00	25,00	30,00
Tro(°c)	20,02	25,02	30,02
Tg(°c)	20,00	25,00	30,00

3-e Données

$h_{va}=5.67$; $h_{ra}=10$; $h_{vg}=5$; $Sl=40$;
 $Sg=47.12$; $\lambda_{das}=71.59$; $Ri=2$; $r_0=0.08$;
 $Q=0.53$;
 $Pi=3.14$

Résultats

Ta(°c)	20	25	30
Tp(°c)	20,00	25,00	30,00
Tsb(°c)	20,01	25,01	30,01
Tro(°c)	21,77	26,77	31,77
Tg(°c)	20,00	25,00	30,00

Ces résultats théoriques nous montrent que le gradient de la température à l'intérieur du digesteur ne dépend ni de la température du milieu ambiant ni des coefficients d'échanges thermiques. Il dépend de la quantité des matières premières. Pour travailler à des hautes températures de fermentation, il faut une quantité importante de matières premières, d'où une grande installation. Le problème réside sur l'homogénéisation de la température. Il faut donc utiliser un système électromécanique pour le brassage.

3. 2 Temps de séjour du substrat à l'intérieur du digesteur

L'analyse systématique de l'ensemble du digesteur donne comme équation bilan de conservation de la matière, l'équation suivante [27]

$$V_{ent} + V_{tran} = V_{sort} + V_{var-int} \quad (34)$$

Où

V_{ent} : la vitesse d'entrée du substrat dans le digesteur [g j⁻¹]

V_{tran} : vitesse de transformation du substrat [g j⁻¹]

V_{sort} : vitesse de sortie du substrat [g j⁻¹]

$V_{var-int}$: vitesse de variation interne [g j⁻¹]

Avec

$$V_{ent} = Q \cdot X_o \quad (35)$$

$$V_{tran} = -\tau_s \cdot r_x \quad (36)$$

$$V_{sort} = Q \cdot X_s \quad (37)$$

$$V_{var-int} = \frac{d(\tau_d \cdot X)}{dt} = \tau_d \cdot \frac{dX}{dt} + X \cdot \frac{d\tau_d}{dt} \quad (38)$$

La quantité $\frac{d\tau_d}{dt}$ est nulle car le volume de digesteur est constant. Nous avons alors :

$$V_{\text{var-int}} = \tau_d \cdot \frac{dX}{dt} \quad (39)$$

L'équation (33) devient

$$Q \cdot X_o - \tau_s \cdot r_x = Q \cdot X_s + \tau_d \cdot \frac{dX}{dt} \quad (40)$$

Comme la concentration X varie dans le temps et subit une vitesse de déplacement v, nous allons alors utiliser la dérivée particulaire.

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\partial X}{\partial t} + \vec{v} \cdot \text{grad}X \quad (41)$$

En travaillant en régime permanent et en posant $D = \frac{Q}{\tau_s}$ et $T_{rH} = \frac{1}{D}$, l'équation (40)

s'écrit donc :

$$Q(X_o - X_s) = \tau_s r_x + \tau_d \cdot \vec{v} \cdot \text{grad}X \quad (42)$$

Or nous avons vu dans l'équation (52) que $\tau_d = 1,33\tau_s$, alors l'équation (42) devient :

$$T_{rH} = \frac{1}{D} = \frac{X_o - X_s}{r_x + 1,33\vec{v} \cdot \text{grad}X} \quad (43)$$

Où

Q : débit d'entrer [$\ell \cdot j^{-1}$]

X_o : concentration du substrat entrant [$g \cdot \ell^{-1} j^{-1}$]

τ_d : volume du digesteur [ℓ]

τ_s : volume du substrat dans le digesteur [ℓ]

r_x : vitesse spécifique de transformation du substrat par unité de volume. [$g j^{-1}$]

Q : débit de sortie du substrat [$\ell \cdot j^{-1}$]

X_s : concentration du substrat sortant [$g \ell^{-1} j^{-1}$]

X : concentration du substrat à l'instant t [$g \cdot \ell^{-1} j^{-1}$]

\vec{v} : est la vitesse de déplacement du substrat ;

D: le taux de dégradation [j^{-1}]; et

gradX: le gradient des matières organiques

Pour une installation fonctionnant en discontinue, la vitesse de déplacement du substrat \vec{v} est nulle. Donc le temps de rétention hydraulique est donc.

$$T_{rH} = \frac{1}{D} = \frac{X_o - X_s}{r_X} \quad (44)$$

La vitesse de déplacement \vec{v} et le gradient de concentration des matières organiques sont mesurables à l'aide d'appareil de suivi. Malheureusement ces derniers n'existent pas au laboratoire et aucune valeur théorique n'y existe. Le calcul numérique de T_{rH} n'est donc pas possible.

3. 3 Dimensionnement d'un digesteur

Le dimensionnement d'une installation de production de biogaz s'appuie sur deux critères :

3. 3. 1 Critères énergétiques

L'efficacité énergétique d'un digesteur est caractérisée par la vitesse de production du biogaz ($V_{P_{CH_4}}$) et la production spécifique du biogaz (P_s).

3. 3. 1. 1 Production du biogaz

La production du biogaz dépend des matières premières disponibles (Q_s) et de la vitesse de production de biogaz ($V_{P_{CH_4}}$).

Elle est définie par :

$$P_{CH_4} = V_{P_{CH_4}} \cdot T_{rH} \quad (45)$$

Où

$V_{P_{CH_4}}$: vitesse de production de biogaz

T_{rH} est le temps de rétention du substrat dans le digesteur.

Ou encore
$$P_{CH_4} = p_s \cdot Q_{MS} \quad (46)$$

Avec

P_s : production spécifique du biogaz

Q_{MS} : quantité des matières sèches.

En prenant τ_{mS} le taux moyen des matières sèches

$$Q_{MS} = \tau_{mS} \cdot Q_S \quad (47)$$

Avec Q_S la quantité du substrat utilisée

L'équation (44) devient:

$$P_{CH_4} = \tau_{mS} \cdot p_s \cdot Q_S \quad (48)$$

La combinaison des équations (43) et (46) permet d'écrire :

$$V_{P_{CH_4}} = \frac{\tau_{mS}}{p_s} \frac{Q_S}{T_{rH}} \quad (49)$$

Où:

τ_{mS} : taux de matières sèches

Q_S : quantité du substrat

p_s : paroduction spécifique du biogaz

T_{rH} : temps de rétention hydraulique

Les ordures ménagères que nous avons utilisées ont un taux moyen des matières sèches est 23%. Nous avons alors :

$$V_{P_{CH_4}} = 0,23 \cdot p_s \cdot \frac{Q_s}{T_{rH}} \quad (50)$$

Les tableaux 4 suivants donnent les valeurs théoriques de vitesse de production du biogaz $V_{P_{CH_4}}$ suivant différentes valeurs de la production spécifique du biogaz P_s , de la quantité de matière première Q_s et du temps de rétention T_{rH} .

Pour les températures d'expérience de 25°C et 30°C, nous prenons Q_s égale à 8Kg alors que pour 45°C, elle est égale à 5Kg pour éviter une accumulation intense des eaux de décomposition dans le digesteur.

Tableaux 4 : Comparaison des Valeurs théoriques et expérimentales de la vitesse de production du biogaz

Tableau 4 a: Pour T= 25°C, $Q = 8\text{Kg}$ et $p_s = 15,16\text{L/Kg}$, on a:

Temps de rétention T_{rH} (jours)	6	9	12	15	18	21	24	27	30	Valeurs moyennes	
$V_{P_{CH_4}}$ (L/jour)	théoriques	4,64	3,05	2,32	1,85	1,55	1,33	1,16	1,03	0,92	1,98
	expérimentale	4,43	3,55	2,65	2,65	1,77	1,33	0,88	0,44		2,21
Erreur (%)	4,52	14,08	12,45	30,18	12,42	0,00	24,13	57,28	100		10,40

Tableau4 - b: Pour T = 30°C, $Q = 8\text{Kg}$ et $p_s = 29,61\text{L/Kg}$, on a:

Temps de rétention T_{rH} (jours)	6	9	12	15	18	21	24	27	30	Valeurs moyennes	
$V_{P_{CH_4}}$ (L/jour)	théoriques	9,08	6,05	4,54	3,63	3,02	2,59	2,27	2,02	1,81	3,89
	expérimentale	7,09	5,32	3,55	2,65	2,21	2,21	1,33	0,88	0,44	2,85
Erreur (%)	21,91	12,06	21,80	26,99	26,82	14,67	41,40	56,43	75,69		26,73

Tableau 4 - c: Pour T = 45°C, $Q = 5\text{Kg}$ et $p_s = 92,52\text{L/Kg}$ on a:

Temps de rétention T_{RH} (jours)	6	9	12	15	18	21	24	27	30	Valeurs moyennes	
$V_{P_{CH_4}}$ (L/jour)	théoriques	17,73	11,82	8,86	7,09	5,91	5,06	4,43	3,91	3,54	7,59
	expérimentales	8,86	7,09	5,32	3,53	2,65	2,65	2,65	1,77	0,88	3,93
Erreur (%)	50,02	40,01	39,95	50,21	55,16	47,62	40,18	55,07	75,14	48,22	

Ces tableaux montrent que la vitesse de production du biogaz $V_{P_{CH_4}}$ est fonction du temps de rétention T_{RH} . Elle est importante pendant les six premiers jours et diminue au fur et à mesure que le temps passe. Au 35^{ème} jour, elle est quasiment nulle.

Nous avons fait des calculs d'erreur en considérant le rapport:

$$\frac{|V_{P_{CH_4}}(\text{théorique}) - V_{P_{CH_4}}(\text{Expérimentale})|}{\text{Maximum}\{V_{P_{CH_4}}(\text{théorique}), V_{P_{CH_4}}(\text{expérimentale})\}}$$

Nous observons que:

✧ A 25°C et 30°C, l'erreur entre les valeurs théoriques et expérimentales est inférieure ou égale à 40% jusqu'au 25^{ème} jour et supérieure au delà.

✧ A 45°C l'erreur est de 50% dès le début de la production. La moyenne d'erreur est de 46,16% jusqu'au 25^{ème} jour.

Même si la production est importante à ce niveau, les effets de la montée brusque de la température sont considérables. Nous les retrouvons dans le calcul d'erreur. Il faut donc que la température de fermentation monte progressivement afin que les micro-organismes puissent s'adapter à celle-ci.

3.3. 1. 2 Volume du digesteur τ_d

Le volume du digesteur dépend de la disponibilité en matières premières et des besoins énergétiques.

Le calcul du volume de l'installation est important. Il permet d'éviter une accumulation d'acides gras volatiles (AGV) qui sont des inhibiteurs à la production du biogaz et provoquent une baisse du pH et une augmentation de la teneur en H_2 et en CO_2 . Ce qui entraîne une diminution de la teneur en CH_4 .

Il est indispensable de laisser en moyenne un espace vide de 25% du volume total dans le digesteur. Cet espace sert de gazomètre et permet d'éviter les inconvénients précédemment mentionnés.

Le volume du digesteur τ_d , est exprimé en fonction de celui des matières premières τ_s :

$$\tau_d = \tau_s + 0,25.\tau_d \quad (51)$$

Où

τ_d : volume du digesteur

τ_s : volume des matières premières

soit :

$$\tau_d = 1,33. \tau_s \quad (52)$$

or :

$$\tau_s = \frac{Q_s}{\rho} \quad (53)$$

Où

Q_s est la masse des matières premières

ρ : sa masse volumique des matières premières

L'équation (52) devient :

$$\tau_d = 1,33. \frac{Q_s}{\rho} \quad (54)$$

La combinaison de (50) et (54) nous donne.

(55)

$$\tau_d = \frac{5,78.V_{PCH_s}.T_{rH}}{\rho.P_s}$$

Ce volume peut être calculé en fonction de l'énergie substituée.

Appelons α_s la quantité d'énergie à substituer par jour et PCI son pouvoir calorifique inférieur. En prenant 5500Kcal comme pouvoir calorifique inférieur du biogaz, le calcul de la vitesse de production du biogaz dans le digesteur nous donne.

$$V_{P_{CH_4}} = \alpha_s \cdot \frac{PCI}{5500} \quad (56)$$

Par conséquent, le volume du digesteur est, d'après (52) :

$$\tau_d = 5,87 \cdot \alpha_s \cdot PCI \cdot \frac{T_{rH}}{5500 \cdot \rho \cdot P_S} = 10^{-3} \alpha_s \cdot PCI \cdot \frac{T_{rH}}{\rho \cdot P_S} \quad (57)$$

A titre indicatif, la substitution de la consommation de 1Kg de bois par jour correspond à une vitesse de production du biogaz $V_{P_{CH_4}}$ de 0,78m³. En travaillant à 30°C, l'équation (55) donne un volume de l'installation τ_d de 6m³ et l'équation (57) donne un τ_d de 5,75m³. La quantité de matières premières utilisables est 4,5m³ soit 2,7tonnes.

A 45°C, cette quantité diminue considérablement. Le volume du digesteur τ_d devient 1,91m³ et la quantité de matières premières est de 862Kg. Ces résultats montrent bien l'importance de la température sur la production du biogaz et sur le dimensionnement du digesteur. Les tableaux 4 de la page 38 montrent qu'on peut travailler à ce niveau en utilisant une grande installation.

Pour le dimensionnement du prototype que nous avons conçu, nous avons utilisé la formule (54). L'utilisation de 100Kg d'ordures ménagères nécessitait un volume de 0,22m³.

3. 3.1.3 Algorithme de résolution

L'algorithme de résolution du dimensionnement du digesteur est le suivant :

1/ Fixation des données

-paramètres physiques

- Quantité de matières premières disponibles ;
- Teneur en matières sèches des matières premières
- Type de procédé utilisé
- Concentration en matières organiques des matières premières

-paramètres de fonctionnement :

- Température de fonctionnement
- Production spécifique.
- Vitesse du déplacement du substrat dans le digesteur

2/Calculs des vitesses

- Vitesse d'entrée du substrat V_{ent}
- Vitesse de transformation du substrat V_{tran}
- Vitesse de sortie du substrat V_{sort}
- Vitesse de variation interne du substrat $V_{var-int}$

3/Calcul du temps de rétention

4/Calcul de la vitesse de production

5/ Calcul du volume du digesteur.

Le schéma synoptique de la résolution numérique du dimensionnement d'un digesteur est donné par la figure 9.

Entrée des données

- Caractéristiques physiques du substrat
- Procédé utilisé
- Concentration en Matières Organiques des Matières Premières

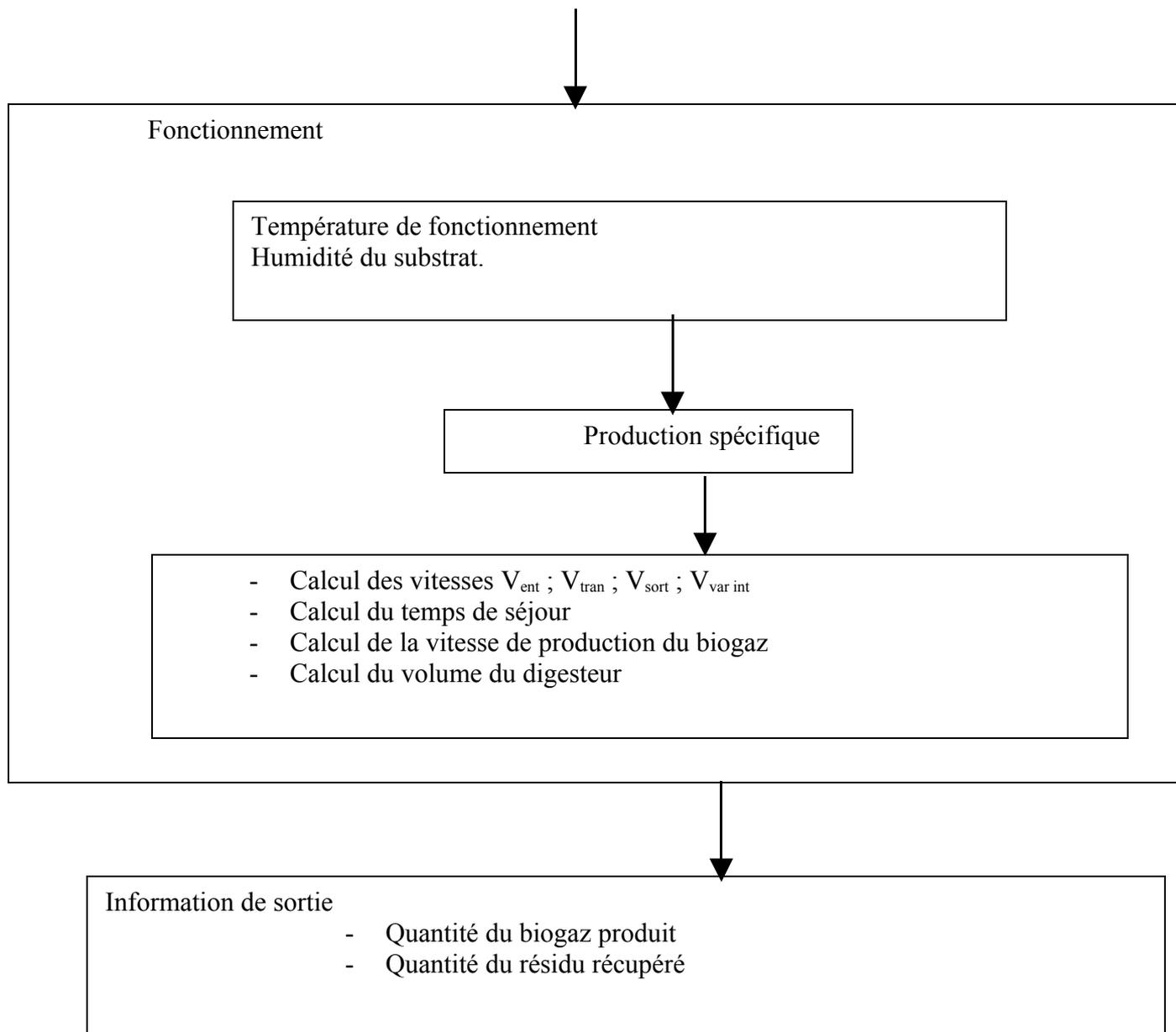


Figure 9 : schéma synoptique de la simulation numérique du dimensionnement

3. 3. 2 Critères économiques

L'intérêt économique d'une installation de production de biogaz est lié à la rentabilité de l'investissement initial. Or le prix spécifique de l'installation est défini comme étant le coût global du système énergétique rapporté au volume de l'installation. Pour avoir une meilleure rentabilité, il faut considérer le prix spécifique minimal rapporté à une production maximale. Cette rentabilité doit être comparée avec celle donnée par les autres énergies classiques. Pour être rentable, la conception d'une installation de production de biogaz doit être accompagnée d'une étude de faisabilité économique afin d'estimer le temps de retour de l'investissement engagé.

Chapitre 4

ETUDE EXPERIMENTALE ET ANALYSE DES RESULTATS

4. 1 Description du système

4. 1. 1 Matières premières

Les matières premières (MP) utilisées pour nos expériences sont les ordures ménagères. Nous avons utilisé comme additif des pailles pour ajuster le pH de fermentation à 7.

La collecte et le triage manuel des matières fermentescibles ont été effectués simultanément dans six poubelles des quartiers de Fiadanana Soanierano et de Tsimbazaza.

4. 1. 2 Travaux de laboratoire

Ils concernent la mise en digesteur des matières fermentescibles (MF) des ordures ménagères.

L'expérience a été effectuée au laboratoire du département d'énergétique du Centre National de Recherches Industrielles et Technologiques (CNRIT) suivant deux étapes : utilisation des digesteurs du laboratoire et d'un digesteur prototype.

a- Digesteurs du laboratoire

Le digesteur du laboratoire (figure 10) a pour rôle de déterminer, au préalable, la quantité de biogaz susceptible d'être obtenu à partir d'une quantité quelconque de matières

premières (MP). Il est constitué de huit bouteilles contenant les MP, d'un bassin de stockage remplis d'eau salée et de 8 tubes cylindriques servant de gazomètre. Ces trois types d'outils sont reliés entre eux à l'aide de tuyaux P.V.C.



Figure 10: Digesteur du Laboratoire

b/Digesteur prototype

Ce prototype est placé en milieu naturel. Il permet de confirmer les résultats donnés par le digesteur du laboratoire.

La texture et la rhéologie des matières premières utilisées nous amènent à choisir un procédé semi-continu, de forme cylindrique figure 5 de la page30.

Ce type de procédé peut être fabriqué en béton armé, en brique ou en tôle d'acier. Nous avons choisi ce dernier pour sa simplicité d'installation, sa démontabilité et ses faibles coûts.

L'homogénéisation du substrat et l'uniformisation de la température sont assurés par un brassage manuel (figure 5). L'arbre de brassage est muni de pales qui, lors du brassage, entraînent le déplacement du substrat vers la sortie.

Ce digesteur a une capacité de $0,220\text{m}^3$. Son chargement est de 100Kg d'ordures ménagères.

La production uniforme de biogaz nécessite un chargement de 30% de quantité du substrat (Q_s) soit l'équivalent de 30Kg d'ordures ménagères chaque semaine à partir du 10^{ème} jour du démarrage. Ce nouveau substrat doit être pré-fermenté avant son introduction dans le digesteur voir figure 5 de la page 33.

Le chargement s'effectue en même temps que l'évacuation d'une quantité équivalente à 30% de matières premières.

Cette quantité à évacuer est exprimée par :

$$Q_R = 0,135.Q_S \quad (58)$$

Elle subit un court compostage, classique de deux semaines environ, donnant ainsi un bon fertilisant du sol.

4. 2 Analyse et commentaire des résultats

4. 2. 1 Intérêt énergétique de la mise en digesteur

Le biogaz produit, lors d'une fermentation méthanique, est un mélange de CO_2 et de CH_4

L'intérêt énergétique de cette méthanisation dépend de la production et de la composition du biogaz

Selon des analyses effectuées en France, la composition d'un biogaz d'ordures ménagères contient [6] :

Tableau 5 : Composition du biogaz [6]

Eléments	Décharge équipée d'aspiration de gaz	Digesteur d'ordures ménagères
CH ₄ (%)	45	60
CO ₂ (%)	32	33
N ₂ (%)	17	1
O ₂ (%)	2	0
H ₂ O (%)	4	6
Aromatique (mg/m ³)	1	0 -200
H ₂ S (mg/m ³)	5 – 20	100 – 900
Organo-halogène (mg/m ³)	0 - 100	100 - 800

Le pouvoir calorifique des éléments constitutifs est donné par le tableau suivant.

Tableau 6 : PCI des éléments du biogaz [6]

constituants	KJ/Kg		KJ/m ³	
	PCI	PCS	PCI	PCS
CH ₄	50,02	55,506	35,874	39,809
H ₂	120,00	143,000	10,174	12,767
CO ₂	10,101	10,107	12,633	13,653
H ₂ S	15,24	16,535	23,148	25,116

Le PCI d'un biogaz constitué de N_c éléments se calcule par :

$$PCI = \sum \beta_i . PCI_i , \quad 1 \leq i \leq N_c \quad (59)$$

Où:

β_i : taux du constituant i

PCI_i : pouvoir Calorifique Inférieur du constituant i

N_c Nombre des constituants

Selon les mêmes analyses [6], lors de la méthanisation

✧ 30 – 60 % des masses initiales des déchets sont transformées en compost ;

✧ 11 – 15 % des masses initiales des déchets sont transformées en biogaz ;

✧ 20 – 40 % des masses initiales des déchets se composent d'eau excédentaire.

Cette quantité d'eau est facile à récupérer et à traiter pour un digesteur que pour une décharge.

4. 2. 1. 1 production de biogaz

Lors des expériences réalisées au CNRIT, dans des digesteurs de laboratoire, nous avons relevé les productions de gaz (tableau 7) avec un intervalle de prélèvement de 3 jours. Le choix des températures (15°, 25° et 30°C) est imposé par les conditions naturelles: climat... Nous avons chauffé le digesteur à 45°C pour voir les effets de la température sur la méthanisation. C'est à ce niveau qu'on a pu stabiliser celle-ci pendant les expériences. Dans les tableaux qui suivent, les chiffres 1, 2, 3, 4,.....signifient respectivement première, deuxième, troisième,intervalle de prélèvement.

Tableau 7 : Production des gaz

Masse de MP	Masse de Ms (Kg)	T (°c)	Pré fermentation (J)	Production de gaz (L)											
				Intervalles de 3 jours											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
5	1,15	15	4	15,96	5,32	3,99	2,66	1,33	1,33						
8	1,84	25	7	23,94	13,30	10,64	7,96	7,96	5,33	3,99	2,66	1,33			
8	1,84	30	4	33,25	21,28	15,96	10,64	7,96	6,65	6,65	3,99	2,66	1,33		
5	1,15	45	4	37,24	26,60	21,28	15,96	10,64	7,96	7,96	7,96	3,32	2,66		

Nous constatons que le temps de rétention et la décomposition des matières premières sont fonction de la température qui influence donc l'activité des micro-organismes. La figure 11 donne l'allure de production des gaz dans un digesteur selon la température utilisée.

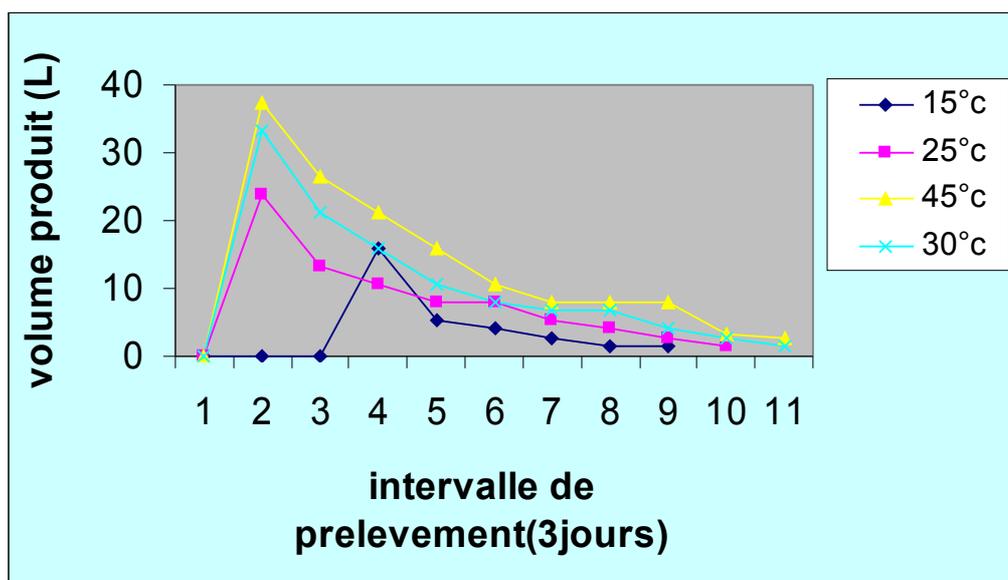


Figure 11: Production des gaz

La composition des gaz est déterminée par des procédés de brûlage. On brûle le gaz contenu dans les gazomètres. S'il s'allume on a de biogaz, sinon c'est le gaz carbonique qui domine.

Les productions cumulées de gaz et de biogaz d'ordures ménagères sont données par les tableaux 8 et 9 suivants.

Tableau 8 : production cumulée des gaz

Quantité de MS (Kg)	Température (°c)	Production de gaz (L)									
		Intervalles de prélèvement									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,15	15	15,96	21,28	25,27	27,93	30,59	31,92	33,25			
1,84	25	23,94	37,24	47,88	55,86	63,84	69,16	73,13	75,81	77,14	
1,84	30	33,25	54,53	70,49	81,13	89,11	95,76	102,41	106,40	109,06	110,39
1,15	45	37,24	63,82	85,12	101,03	111,72	119,70	127,68	135,66	140,98	143,64

Tableau 9: production cumulée des biogaz

Quantité de MS (Kg)	Température (°c)	Début de brûlage en intervalles	Production de gaz (L)								
			Intervalles de prélèvement								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,5	15	non									
1,84	25	3	7,98	15,96	21,28	25,27	27,93				
1,84	30	2	15,96	26,60	34,58	41,23	47,88	50,54	53,20	54,53	
1,15	45	1	26,20	47,88	63,81	74,48	81,13	90,44	98,42	103,74	106,40

Ces tableaux montrent l'effet de la température sur la quantité et la qualité du biogaz produit. La teneur en gaz carboniques CO₂ diminue quand la température augmente.

Les figures (13) et (14) de la page suivante montrent l'importance de la température sur la méthanisation. A 45°C le biogaz se produit dès le début de la fermentation. Pour les faibles températures 25°C à 30°C, le gaz carboniques est dominant. Il faut donc attendre le début des réactions biologiques dans la phase méthanogénèse pour avoir la méthanisation.

Le tableau 10 ci dessous donne le temps de préfermentation et de commencement de production de biogaz ainsi que les productions spécifiques de biogaz suivant la température utilisée.

Tableau 10 : Production et production spécifique des biogaz

MS (Kg)	T (°C)	Préfermentation (J)	Temps de production de gaz (J)	Début de brûlage (J)	Production de biogaz (L)	Production spécifique de biogaz L/Kg MS
1,15	15	4	21	Non	0	0
1,84	25	7	27	9	27,93	1517
1,84	30	4	30	5	5453	2963
1,15	45	4	33	3	106,64	92,73

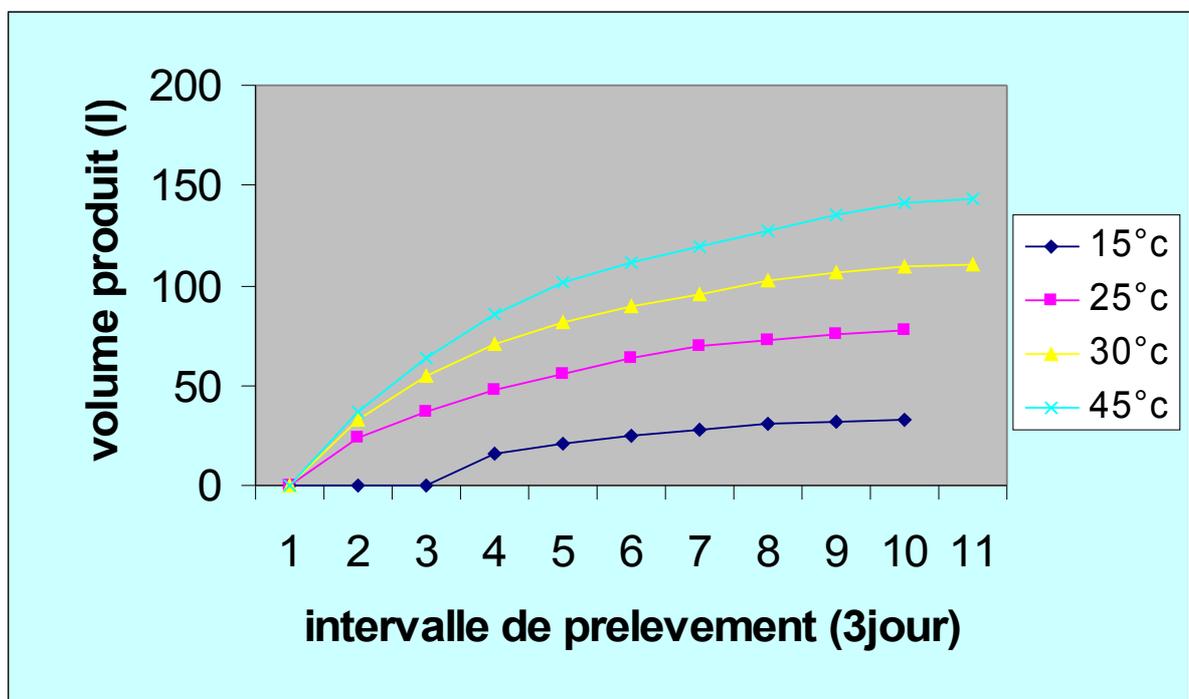


Figure 12: Production cumulée des gaz

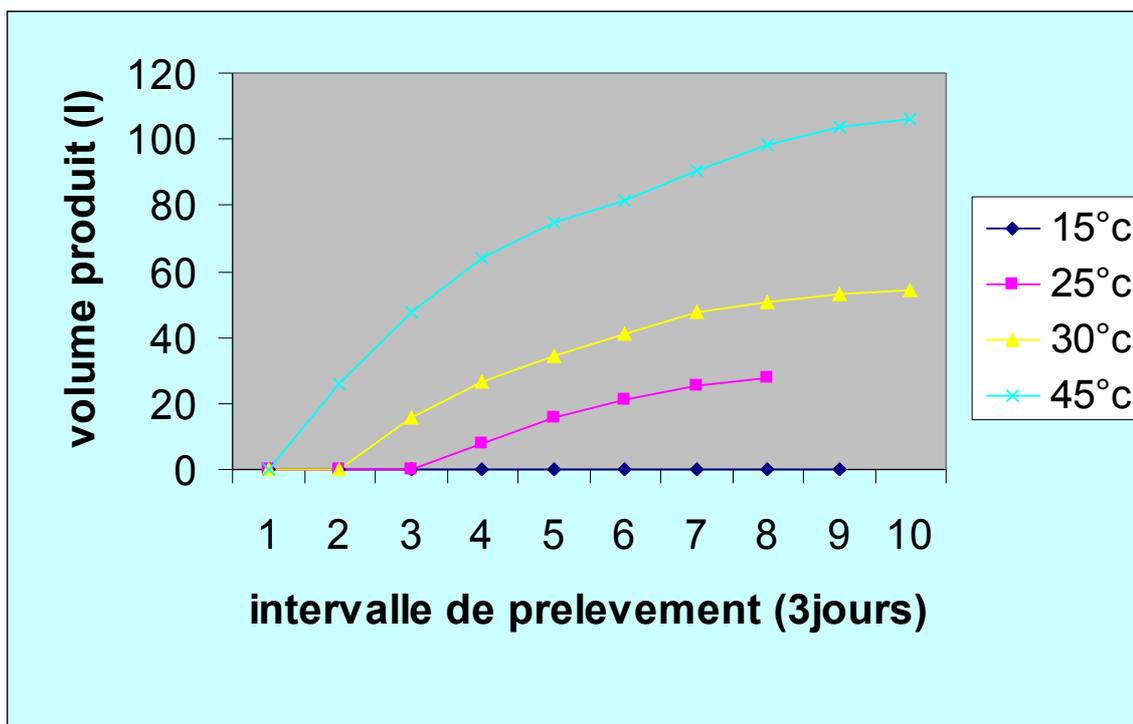


Figure 13: Production cumulée des biogaz

Le volume de production de biogaz est mesuré à l'aide d'un gazomètre. Ce dernier a un diamètre de 13 cm. Ce qui donne un volume de

$$\tau_g(\text{m}^3) = 1,33 \cdot 10^{-2} \cdot h \quad (60)$$

Avec h (cm) la mesure lue dans le gazomètre.

Nous avons du biogaz, quand le gaz commence à brûler. Sinon, la quantité de CO₂ domine dans le gaz. Les valeurs spécifiques données ci dessus sont calculées pour les biogaz.

Les circonstances naturelles, changement de saison et de climat, imposent des températures de fermentation comprises entre 25 et 35 pour des matières premières pré fermentées. Pour cette zone, la valeur minimale de production spécifique est de 22 L /kg de matières sèches pour une durée de quatre à cinq semaines.

Pour s'assurer de l'ordre de grandeur des résultats obtenus nous avons considéré les résultats du biogaz effectué au CAMEROUN. Les conditions climatiques étant normales, la mise en digesteur de 1000Kg d'ordures ménagères, avec un taux de matières sèches de 45%, a produit 45m³ de biogaz pendant quelques semaines [28], soit 100L/Kg de matières sèches. Ce qui coïncide bien avec les résultats que nous avons trouvés à 45°C.

Pour s'assurer de l'efficacité de la production du biogaz donné par les ordures ménagères, nous avons comparé les résultats de cette production avec ceux d'autres matières premières [17] (tableau11).

Tableau 11: production de biogaz par d'autres Matières Premières

Quantité de biogaz produite	Production de gaz (L)									
	Nombre d'intervalle									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Matières premières										
Bouse de vache	10,50	17,50	21,00	32,50	42,00	52,00	63,00	73,50	80,50	91,00

[14]										
Déchet porcin [14]	15,00	26,00	30,00	45,00	60,00	75,00	90,00	106,00	115,00	130,00
Jacinthe d'eau [14]	21,00	36,00	42,00	63,00	84,00	105,00	126,0	147,00	161,00	184,00
Ordures Ménagères à 30°C	15,96	26,60	34,58	41,23	47,88	50,54	53,20	54,53		
Ordures Ménagères à 45°C	26,20	47,88	63,81	74,48	81,13	90,44	98,42	103,74	106,40	

En considérant le temps de pré fermentation, les productions cumulées sont données par la figure (14) suivante.

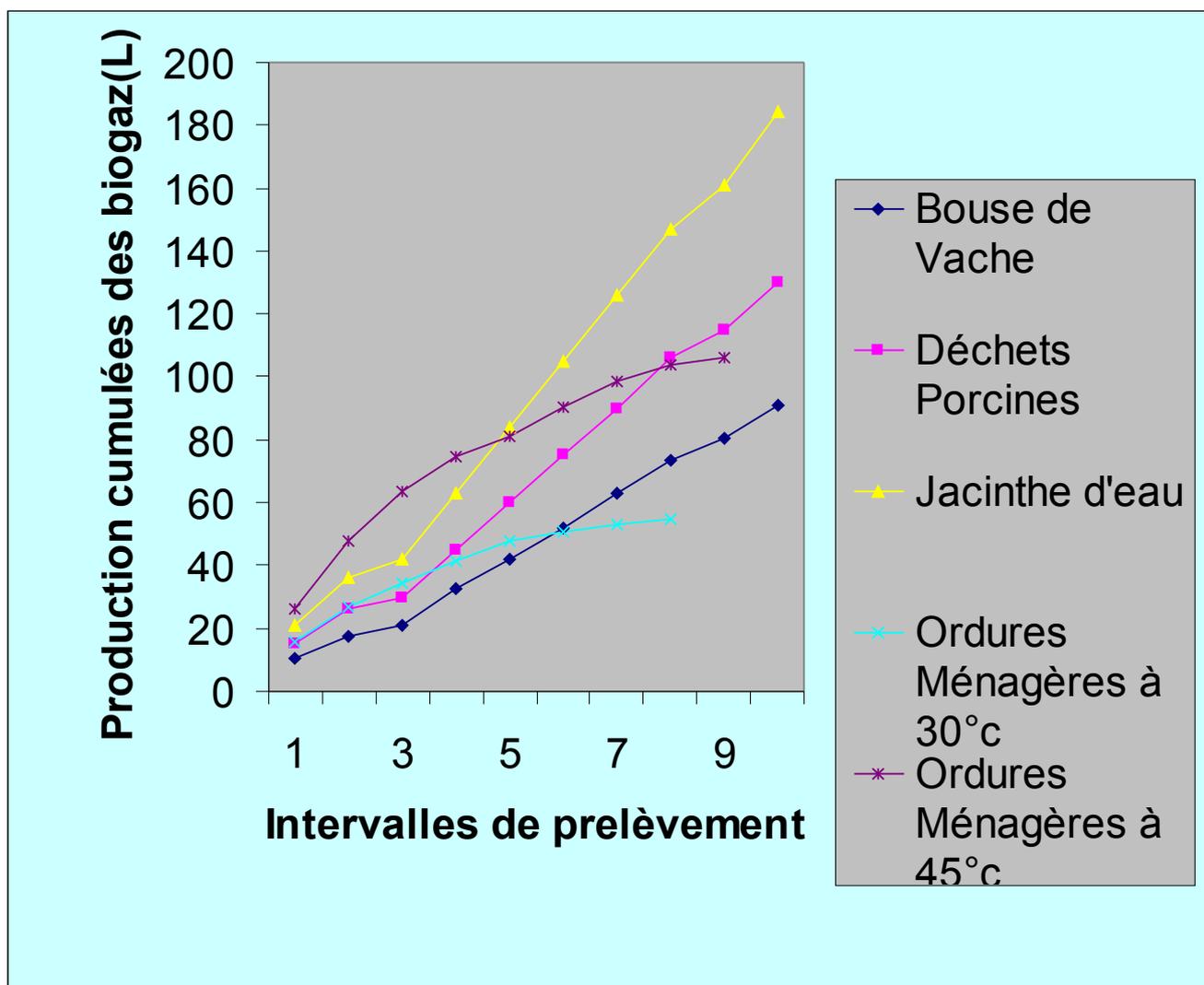


Figure 14: Comparaison des biogaz des différentes matières premières

Nous constatons que, mise a part, les jacinthes d'eau, la production de biogaz des ordures ménagères ne se diffèrent pas tellement de celle des autres matières premières. A 30°C,

elle est importante jusqu'au 10^{ème} jour . Alors qu'à 45°C, elle est très importante tout au long de la production.

Le temps de rétention est très petit pour les ordures ménagères. La production uniforme de biogaz exige un procédé semi continu.

4.2.1.2 Substitution aux autres sources d'énergies

L'intérêt énergétique du biogaz des ordures ménagères, est marqué par sa valeur de substitution aux autres sources d'énergies. Ce biogaz a un Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) comprise entre 5500 et 6500 Kcal/m³. Pour la substitution, les calculs effectués, sur une base de 100 Kg d'ordures ménagères, fermentées à 45°C, avec un PCI de 5500 Kcal /m³, donnent les résultats suivants:

La production est de 2,13m³. Ce biogaz substitue 2,93Kg de bois ou 1,56 Kg de charbon.

a/ Bilan énergétique de Madagascar

Le bilan énergétique de Madagascar est résumé dans le tableau suivant.

Tableau 12 : Bilan énergétique de Madagascar selon la monographie énergétique [28].

Sources d'énergies	Tous Secteurs	Domestique	Commerce	Transport	Industrie
Bois	84,80%	84,30%	4,50%		11,20%
Bagasse	2,70%				100%
Charbon minéral	0,30%				100%
Pétrole	10,60%	10,80%	0,30%	79,70%	9,10%
Electricité	1,70%	23,70%	21,00%		55,30%

Ce bilan montre la forte consommation de bois suivi très loin des produits pétroliers. Ce qui entraîne une augmentation de façon exponentielle de la déforestation.

L'utilisation des énergies nouvelles et renouvelables s'avère nécessaire pour diminuer ce fléau. Pour y contribuer, il est utile de procéder à la méthanisation des matières fermentescibles en général, et des ordures ménagères en particulier. Selon les résultats précédents, 100 Kg de matières fermentescibles d'ordures ménagères remplacent 2,93 Kg de bois. La ville d'Antananarivo produit 234 tonnes de matières fermentescibles par jour. Ce qui

produirait 4951,44 m³ de biogaz. Cette quantité peut remplacer 6,80 tonnes de bois soit l'équivalent de 3,63 tonnes de charbon de bois. Il est donc important de valoriser les ordures ménagères. Ces rendements peuvent encore être améliorés en purifiant le biogaz.

b/ Purification du biogaz

Elle a pour but d'augmenter le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) et d'éviter la corrosion des appareils utilisés. Le principe consiste à se débarrasser du CO₂, du H₂S et d'autres particules indésirables.

Un biogaz purifié a un PCI de 8800 Kcal/m³ avec un taux de méthane de 95%.

Cette technique est assez chère. Elle se fait selon 3 opérations : la déshydratation, la désulfuration, et la liquéfaction [29].

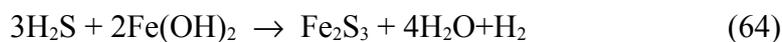
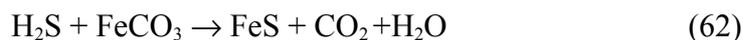
i/Déshydratation

Elle utilise un réfrigérant de gaz équipé d'un réservoir de récupération de l'eau condensée et un filtre à gaz.

ii/Désulfuration

Elle consiste à enlever le H₂S et quelques particules dans le biogaz. L'élimination de H₂S se fait à l'aide d'une bactérie anaérobie photosynthétique appelée *Chlorobium thiosulfatophilum*. La dégradation du H₂S par cette bactérie permet de produire du soufre élémentaire et de former de l'acide sulfurique.

Elle peut se faire encore à partir du Fer (Fe), du carbonate de fer FeCO₃ ou d'hydroxyde de fer Fe(OH)₂, selon les réactions suivantes.



iii/Séparation du CO_2 et du CH_4 : liquéfaction

La séparation du CO_2 s'effectue au moyen d'un procédé cryogénique effectué en même temps que la liquéfaction du méthane. Ces deux opérations se font dans un seul appareil à grande efficacité énergétique.

c/ Cycle de carbone

Lors d'un processus anaérobie, le carbone suit le cycle suivant :

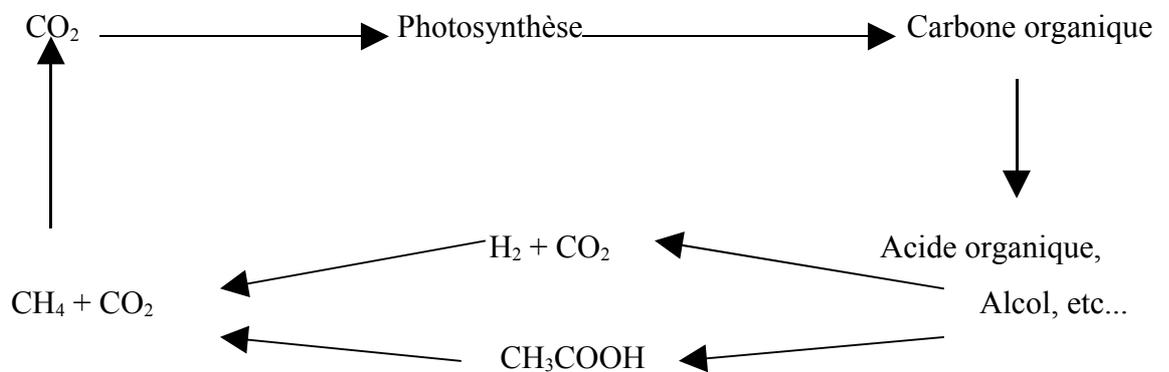


Figure 15 : cycle de carbone

La quantité de CO_2 libéré lors de la combustion du biogaz est très négligeable par rapport aux autres combustibles. La méthanisation n'a donc pas beaucoup d'impact sur l'effet de serre.

d/ Avantages de la mise en digesteur

La mise en digesteur des ordures ménagères permet d'améliorer la gestion des déchets, de diminuer les émissions des gaz à effet de serre et de produire des combustibles. Cette dernière favorise la valorisation des déchets, l'économie de devise et l'utilisation d'une source d'énergie renouvelable disponible à proximité. Donc elle réduit les dépendances énergétiques et diminue la consommation du bois et les travaux fastidieux des femmes et des

enfants (ramasseurs du bois de chauffe). Cette technique engendre une économie du temps, une récupération d'un bon fertilisant et la création d'emplois aux artisans locaux..

4.2.2 Intérêt agronomique de la valorisation des déchets ménagers

Le tableau 13 montre la production d'engrais organiques d'ordures ménagères à partir de différents processus. La teneur en éléments fertilisants de ces engrais et le rendement obtenu varient d'un processus à l'autre.

Tableau 13: teneur en élément fertilisant

teneur	Concentration en élément fertilisant suivant le type de compostage				
	Compost classique [3]	Lombricompost [3]	Compost industriel [1]	Compost domestique [24]	Résidu de la méthanisation
Humidité %	25,2	77,25	43,7	50-60	
PH	7,00	7,00	7,60	7,50-8,50	7,02
Carbone organique %	5,56	17,00	21,37	8,00-13,00	
Azote %	0,60	0,92	0,96	0,30-0,40	
C/N	9,92	18,30	22,30		
P ₂ O ₅ (ppm)	313	1220	91400	1500-4000	
KO ₂ (ppm)	4,32	3,64	2,38	2000-10000	
N ₂ /N _{2initial}	50%	50%	50%	50%	95%

La teneur en éléments fertilisants du digestat de fermentation méthanique dépend, en général, du court compostage effectué après la méthanisation. Mais la grande différence réside sur la teneur en azote. Cette dernière s'accompagne d'une perte d'au moins 50% pour un traitement aérobie alors qu'il se conserve jusqu'à 95% de la valeur initiale lors d'un traitement anaérobie.

Malgré le manque de données sur les fertilisants des résidus de la fermentation méthanique, ces derniers présentent, par rapport au compostage, les avantages suivants :

- Humidité adéquate
- Absence de retournement
- Réduction du temps de compostage
- Pas besoin d'apport d'additifs.

Mais la mise en digesteur fournit moins d'amendement organique, en quantité, que les procédés de compostage. La décomposition de la matière organique dans le digesteur est très poussée.

Les rendements quantitatifs des différents processus pour l'obtention d'engrais organique, d'ordures ménagères, sont donnés par le tableau suivant.

Tableau 14: Rendement quantitatif des compostages

Procédé utilisé	Compost classique	Lombri compost	Compost industriel	Compost domestique	Résidus de la mise en digesteur
Rendement quantitatif %	68-70	77-82			30-60

Le digestat a un rendement plus faible que les autres composts mais sa qualité est bonne.

4. 2. 2.1 Comparaison du compostage des Ordures Ménagères à d'autres composts

Le compostage peut se faire par diverses matières premières. Ces dernières contiennent des éléments minéraux comme l'indique le tableau 16

Tableau 15 : teneur en éléments minéraux des MP avant le compostage [30]

Teneur en MP	C%	N%	C/N	MO %	P%	K%	Ca%	Mg%
Mimosa	41,00	3,20	13,00	70,90	1,07	19,00	3,90	3,55
Fumier de mouton	22,30	1,62	14,00	38,50	4,39	11,00	0,71	
Résidu de Géranium	31,10	2,13	15,00	53,80	1,37	24,50	3,00	
Herbes	31,30	0,64	48,70		0,54	1,10		

Après compostage ces éléments deviennent.

Tableau 16 Eléments fertilisants d'autres composts [30]

teneur	Concentration en éléments fertilisants après compostage				
	Fumier de mouton	Mélange de déjection de porc et de bovin	Mimosa	Herbe	Résidus de géranium
Humidité %	-	93	-	-	-
PH	-	-	-	-	-
C%	2,23	2,82	8,20	25,00	6,22
N%	0,16	0,19	0,54	0,51	0,42
C/N	14,00	12,21	13,00	48,70	15,00
P ₂ O ₅ %	-	0,05	-	-	-
KO ₂ %	-	0,13	-	-	-
P%	0,04	-	0,021	0,04	0,03
K%	0,11	-	0,38	0,88	0,48
Ca%	0,01	-	0,078	-	0,15

La comparaison des résultats des tableaux 13 et 16 montre que le compost d'ordures ménagères est très efficace. Il a un C/N moyen et une bonne teneur en azote.

Ce compost contient des traces de métaux lourds (Zn, Cu Pb...), mais leurs quantités sont largement inférieures aux valeurs limites requises pour l'amendement organique. Son utilisation ne présente aucun risque pour l'environnement.

4.2.2.2 Intérêt du compost d'ordures ménagères

Le compostage constitue une bonne gestion du traitement d'ordures ménagères. Il présente en plus les avantages suivants [23]:

a/ structure du sol

L'apport des fertilisants dans le sol permet d'améliorer la structure du sol, de réduire l'effet du gel et d'érosion, d'augmenter l'absorption des rayons solaires et de **diminuer la dessiccation du sol**.

b / Effets physico-chimiques du sol

Ces effets sont marqués par la minéralisation progressive des plantes et la correction de l'acidification des sols.

c/ Effets sur la biologie

Ils sont marqués par une augmentation d'activité biologique du sol et par une limitation du développement d'organismes pathogènes. Ils favorisent le développement des racines.

4.3 Avantages de valorisation des ordures ménagères sur l'environnement

Ce sont les matières fermentescibles qui portent beaucoup de nuisance sur l'environnement. Leur mise en digesteur est le moyen le plus susceptible de réduire ces nuisances.

L'incinération est loin d'être à la portée de tout le monde. Les lourds investissements et les pertes d'énergie la rendent non fiable.

4.3.1 Elimination des odeurs et des pollutions des eaux

La mise en digesteur est le seul moyen d'éliminer les odeurs de la décomposition des matières organiques et la pollution des eaux de surface et souterraine

L'élimination de ces dernières est due à la récupération des jus pour le recycler et le traiter à part avant leur introduction dans la nature.

Au niveau d'une décharge non étanche et non équipée d'un système de collecte de jus, le bilan hydrique est donné par :

Précipitation + humidité des déchets + ruissellement vers le site = Evaporation + ruissellement vers l'extérieur + infiltration

En tenant compte de ce bilan, le compostage est loin d'être une solution contre la pollution des eaux souterraines à cause des infiltrations des jus de décomposition et des eaux d'arrosage. Ces eaux apportent bien un grand nombre de micropolluants.

4. 3. 2 Elimination des gaz à effet de serre

Les déchets solides font partie des principales sources de gaz à effet de serre. Selon un rapport du Ministère de l'Environnement Malagasy [31] ces déchets sont responsables d'une émission totale de 6,26 Gg de CH₄ dont 98% sont produits dans la décharge d'Andralanitra en 1994.

Le calcul de l'élimination des gaz à effet de serre par traitement des ordures ménagères est donné par la formule suivante [5].

$$G_t = -I + II + III + IV + V + VI \quad (65)$$

Où

G_t élimination de l'émission pendant une période donnée qu'est en général de 20 ans.

- ☆ I : émission de méthane dans l'atmosphère, d'où le signe moins
- ☆ II : réduction des émissions de carbone émis par suite d'utilisation du biogaz à la place d'un combustible fossile
- ☆ III : séquestration du carbone par le sol due à l'amendement organique dérivé des ordures ménagères et à la décharge lorsque les ordures ménagères sont mises en décharge
- ☆ IV : préservation du carbone séquestré dans les sols et les biomasses des forêts par suite de la réduction des besoins de défrichage
- ☆ V : émission de peroxyde d'azote évité par non-défrichage des forêts
- ☆ VI : absorption de méthane par les forêts non défrichées.

Le tableau 1 de la page 13 montre que:

☆ lors du compostage, de la mise en digesteur et de l'incinération, il n'y a pas d'émission de méthane dans l'atmosphère donc $I = 0$.

✧Quant à la séquestration du carbone, c'est au niveau de la décharge que celle-ci se trouve très abondante. Elle est suivie du compostage et très loin la mise en digesteur.

✧La réduction des émissions du peroxyde d'azote N_2O se fait par compostage et par mise en digesteur. Le compostage est plus fiable que la mise en digesteur.

Conclusion

Nous avons effectué des expériences sur la production de biogaz des ordures ménagères. Nous avons notamment examiné l'effet de la température de fermentation, paramètre important dans le processus de méthanisation. Les études expérimentales que nous avons réalisées confirment que la connaissance de la température de fermentation est l'une des informations utiles pour l'optimisation de la technologie de méthanisation. Ces études expérimentales, complétées par des études théoriques de la recherche bibliographique montrent bien:

✧L'influence de la température de fermentation, d'une part, sur le temps de rétention hydraulique des matières premières à fermenter, d'autre part, sur la quantité et la qualité du biogaz produit et

✧L'amélioration de la technologie par optimisation de la température.

Nous avons conçu un modèle mathématique de quelques paramètres que nous jugeons importants pour la méthanisation, notamment la température, le temps de rétention hydraulique et le volume de l'installation. Les résultats de ce modèle montrent bien la complexité du système de méthanisation. En effet un modèle simplifié comme ce que venons de concevoir ne suffit pas pour expliquer les phénomènes. D'autres paramètres physico-chimique et biologiques

doivent être pris en considération. Ce modèle est donc à parfaire, en tenant compte de ces paramètres.

Toutefois les résultats de production de biogaz des ordures ménagères sont importants. Ils sont comparables à ceux des autres matières premières. De plus, le traitement des ordures par méthanisation est un des moyens les plus efficaces. Il permet d'éliminer les odeurs de dégradation des matières premières, de récupérer le lixiviat pour le traiter avant de l'introduire dans la nature.

Pour la valorisation agronomique des ordures, nous nous sommes servi des données théoriques existants.

Les résultats du compostage effectué à Andralanitra et à la commune de Tanjombato montrent bien que le compost d'ordures ménagères est un bon fertilisant du sol. Il a un bon teneur en azote et un rapport C/N moyen.

Le traitement des ordures ménagères par fermentation biologique, méthanisation et compostage, est le moyen le plus efficace, accessible partout et à tout moment. Il permet la récupération des sous produits tels que le biogaz et l'engrais organique. C'est une technique productrice qui mérite d'être exploitée d'avantage dans le pays. Pour y parvenir, les autorités devront mener :

- ✧ une politique d'information, d'éducation et de communication sur l'impact environnemental des ordures ménagères et les effets bénéfiques de leurs valorisations

- ✧ adopter un plan national d'élimination des déchets, incluant les aspects techniques, économiques, juridiques et institutionnels.

- ✧ porter une assistance technique et économique aux personnes impliquées dans ce domaine.

Ce travail a été effectué dans le but d'apporter des améliorations, avec des récupérations des sous produits, aux traitements des ordures ménagères, sans tenir compte des considérations économiques. Néanmoins, nous estimons que ces techniques de traitements, méthanisation et compostage, sont exploitables pour un projet d'installation à grande échelle à des coûts compétitifs. En effet une étude de faisabilité économique d'une telle installation est nécessaire.

Pour ce faire la suite logique de ce travail consisterait à parfaire le modèle mathématique que nous avons conçu afin d'avoir des informations pertinentes sur l'amélioration du système de méthanisation. Pour cela quelques appareils de suivi automatique de certains paramètres doivent être conçus, notamment:

- ✧ Un appareil de suivi automatique de la décomposition des matières organiques,
- ✧ Un appareil de suivi automatique de la vitesse du déplacement du substrat, en cas d'un procédé continu ou semi continu,
- ✧ Un appareil de suivi automatique de transfert de chaleur,

Tous ceci afin d'avoir des informations pertinentes sur la température, l'humidité, la structure et la composition du substrat qui sont des paramètres interdépendants du milieu réactionnel.

ANNEXES

Annexe 1 Avantages et désavantages des différents types de collectes

Annexe 2 Principes généraux de l'incinération

Annexe 3 Caractéristiques des types des digesteurs

Annexe 4 Additifs du compost

Annexe 5 Programme en Borland C++

Annexe 6 Schéma principale des activités de la valorisation des ordures ménagères

Annexe 1 Avantages et désavantages des différents types de collectes

Type de collecte	Avantages	Désavantages
Collecte porte à porte par camion	<ul style="list-style-type: none"> - Bien desservis dans les centres villes et les quartiers résidentiels - Moins d'efforts des bénéficiaires 	<ul style="list-style-type: none"> -Très coûteux -Exigence des larges routes praticables à tout moment dans les quartiers -Insuffisance des moyens de transports couvrant tous les besoins de l'agglomération -Forte consommation d'essence par la multitude d'arrêt et de départ du camion -Peu adapté aux quartiers populaires
Collecte centralisée par poubelle	<ul style="list-style-type: none"> -Moins coûteux -Adaptable pour tous les quartiers selon le choix du site 	<ul style="list-style-type: none"> -Disposition d'une poubelle tous les 50 à 100m -Vidange régulier de la poubelle -Nécessité d'une petite rampe d'accès aux poubelles -Désengagement de la population dans la suite des travaux
Collecte par moyens légers	<ul style="list-style-type: none"> --Clarté entre bénéficiaires et non bénéficiaires -Perception du service rendu -Faible effort pour l'abonné -Applicable dans tous les quartiers -Augmentation des employeurs -Implication des artisans locaux 	<ul style="list-style-type: none"> -Exigence des mini-postes de transferts -Exigence d'une bonne coordination entre le service public service privé ou service informel -Risque de transformation du site de transfert en décharge
Collecte sélective	<ul style="list-style-type: none"> -Récupération facile des matières valorisables -Bonne maîtrise et gestion des matières non ou pas encore 	<ul style="list-style-type: none"> -Très coûteux pour la population -Demande beaucoup d'effort de la population -Très coûteux encore devant les services

valorisables	de ramassages
Implication des artisans locaux	
-Facilité des traitements envisagés	

Annexe 2 : Principes généraux de l'incinération

L'incinération suit les étapes suivantes

Préparation des matières premières:

Différenciation des phases

- ✧ Déchets solides
- ✧ Déchets semi solides
- ✧ Déchets liquides

Alimentation de l'enceinte

- ✧ Liquides (pompage / injection)
- ✧ Pâtes (injection / vis)
- ✧ Solides (vis / transport pneumatique)

Préparation du mélange pseudo-homogène du substrat

- ✧ Dispersion liquide / liquide (émulsions)
- ✧ Dispersion liquide / solide (slurry)
- ✧ Dispersion liquide / gaz (mousses)
- ✧ Dispersion liquide / gaz /solide (mousses chargées)

Formulation amont du substrat

- ✧ Facilité de manutention
- ✧ Homogénéisation du produit vis-à-vis de critères de combustion
- ✧ Possibilité de co-incinération
- ✧ Possibilité d'abattages in situ

Et l'incinération se fait selon les modes des destructions thermiques suivantes.

Incinération à l'air

- ✧ Réaction exothermique

- ✧ Grand excès d'air
- ✧ Combustion complète
- ✧ $900 < T < 1000^{\circ}\text{c}$
- ✧ Volumes modérés de fumées (CO_2 , H_2O , N_2 , O_2 )

Gazéification

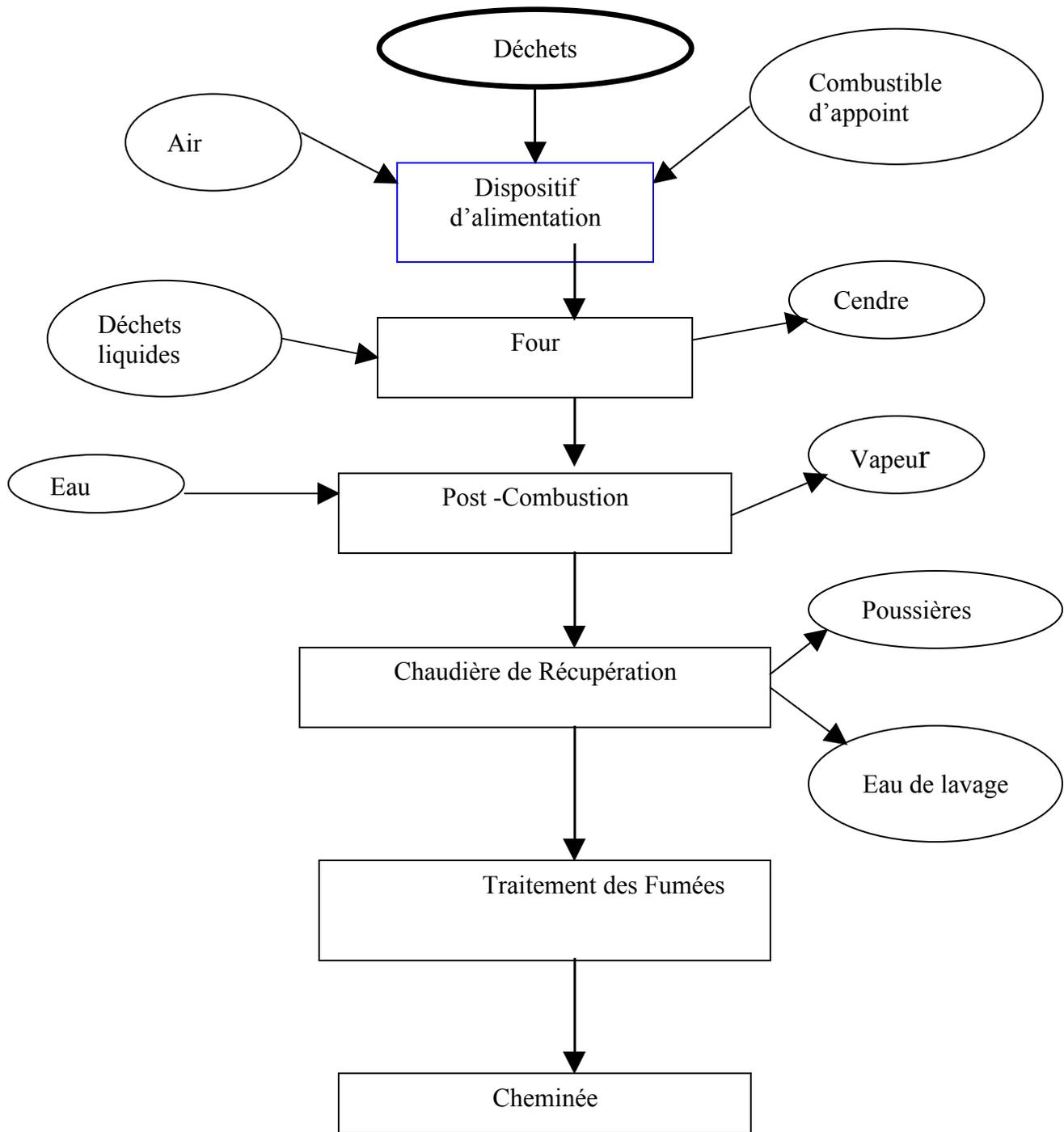
- ✧ Apport interne de chaleur
- ✧ Combustion partielle
- ✧ Défaut d'air (combustion réductrice)
- ✧ $900 < T < 1000^{\circ}\text{c}$
- ✧ Volumes modérés de fumées (CO_2 , CO , H_2 , N_2 )

Pyrolyse

- ✧ Réaction endothermique
- ✧ Absence d'oxygène
- ✧ **$450 < T < 800^{\circ}\text{c}$**
- ✧ Faibles volumes de fumées

Incinération à l'oxygène

- ✧ Réaction exothermique
- ✧ Combustion complète
- ✧ $900 < T < 2100^{\circ}\text{c}$
- ✧ Faibles volumes de fumées (CO_2 , H_2O ...)



Annexe3 Caractéristiques des types de digesteur

Rubrique	Procédés continus	Procédés discontinus	Procédés semi-continus
Natures du substrat	-Effluents liquides -Matières non fibreuses	Matières solides à fortes teneurs en MS	Effluents liquides et /ou solides à faibles teneurs en composés lignocellulosiques
Procédé de fonctionnement	-Alimentation régulière en matières très diluées -Evacuation régulière	-Alimentation périodique en matières solides suivit d'opération subsidiaire -Opération d'évacuation	-Alimentation aléatoire -Evacuation en quantité équivalente, commutative à l'alimentation
Facteur limitant de production	Taux de chargement : 10% du volume du digesteur	-Chargement de la totalité du substrat utilisé -Opération de prés fermentation	Taux de chargement en Moyenne: 25% du volume total du digesteur
Régularité de production	Régulière	Irrégulière sauf utilisation de plusieurs digesteurs en séries	Régulière
Temps de rétention	court	long	moyen
Performance de production m ³ / Kg de MS			

Annexe 4 Additifs du compost

Additifs complémentaires	Composition	Utilisation
Chaux agricole		-Compenser les carences en Ca,

		-Corriger des pH trop faibles du compost et/ou du sol à fertiliser
Compost activateur	Compost riche en micro-organisme	Joue le rôle d'Inoculum
Farine d'algues	Engrais à base d'algues récoltés vivantes	-Compenser les carences en azote et en oligo-éléments -Augmenter les matières organiques
Phosphates naturels	Sédiments naturels finement broyés	
Poudre d'os	Phosphore et de calcium	Corriger les carences en phosphore et en calcium
Poudre de roche	Oligo-éléments	-Réduire le problème des odeurs -Favoriser la formation d'humus stable
Sang desséché	Engrais azoté et organique	Augmenter la qualité du compost
Terre argileuse		-Former des complexes argilo humique -Améliorer la valeur fertilisante du compost -Améliorer la capacité d'échange du sol et de sa structure
Activateurs	<ul style="list-style-type: none"> - activateurs à bases de plantes médicinales - activateurs à base de bactéries ou autres microorganismes 	Accélérer les différents processus lors du compostage

Annexe 5

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <math.h>
```

```
#include <conio.h>
```

```
void main()
```

```
{int i,j,k,l,n;
```

```

float a[100][100],g[100][100],b[100],c[100],x[100],s,q,hva,hra,Sl,Sg,
lamdas,Q,Ta,Tp,Tsb,Tr0,Ri,r0,Tg,Pi;
printf("RESOLUTION D'UN SYSTEME D'EQUATIONS LNEAIRES AX=B\n");
printf("METHODE DE GAUSS\n");
printf("\n");
n=3;
/*VARIABLE D'ENTREE DU SYSTEME AX=B*/
printf("Entrer hva:hva=");
scanf("%f",&hva);
printf("\n");
printf("Entrer hra:hra=");
scanf("%f",&hra);
printf("\n");
printf("Entrer Sl:Sl=");
scanf("%f",&Sl);
printf("\n");
printf("Entrer Sg:Sg=");
scanf("%f",&Sg);
printf("\n");
printf("Entrer lamdas:lamdas=");
scanf("%f",&lamdas);
printf("\n");
printf("Entrer Ri:Ri=");
scanf("%f",&Ri);
printf("\n");
printf("Entrer r0:r0=");
scanf("%f",&r0);
printf("\n");
printf("Entrer Q:Q=");
scanf("%f",&Q);
printf("\n");
printf("Entrer Ta:Ta=");
scanf("%f",&Ta);
printf("\n");

```

```

printf("Entrer Pi:Pi=");
scanf("%f",&Pi);
printf("\n");
/*Calcul des a:[i][j]*/
printf("\n");
a[1][1]=-(hva+hra+(hva*S1)/(Sg+S1));
a[1][2]=(hva*S1)/(Sg+S1);
a[1][3]=0;
a[2][1]=0;
a[2][2]=-(lamdas*(Ri-r0)+0.75*Pi*(pow(Ri,2))*(hva+hra));
a[2][3]=lamdas*(Ri-r0);
a[3][1]=0;
a[3][2]=-4*lamdas;
a[3][3]=4*lamdas;
/*Calcul des b[i]*/
printf("\n");
b[1]=-(hra+hva)*Ta;
b[2]=-0.75*Pi*pow(Ri,2)*(hva+hra)*Ta;
b[3]=Q*(pow(Ri,2)-pow(r0,2));
printf("Voici notre systeme \n");
printf("\n");
for(i=1;i<=n;i++)
    {for(j=1;j<=n;j++)
        {printf("%1.2f\t",a[i][j]);
        }
        printf("\t%1.2f\n",b[i]);
        printf("\n");
    };
printf("\n");
/*CHANGEEMENT DE PIVOT*/
for(l=1;l<=n-1;l++)
    {j=l;i=l;
        for(k=i+1;k<=n;k++)
            {if(fabs(a[i][j])<fabs(a[k][j]))

```

```

    {do
        {g[i][j]=a[k][j];c[i]=b[k];
        j=j+1;
        }
        while(j<=n);
        j=1;
    do
        {a[k][j]=a[i][j];b[k]=b[i];
        j=j+1;
        }
        while(j<=n);
        j=1;
    do
        {a[i][j]=g[i][j];b[i]=c[i];
        j=j+1;
        }
        while(j<=n);
        j=1;
    }
}

printf("\n");
/*TRIANGULARISATION DU SYSTEME*/
{for(i=1+1;i<=n;i++)
    {q= a[i][1];
    for(j=1;j<=n;j++)
        {a[i][j]=a[i][j]-(q*a[1][j])/a[1][1];
        };
    b[i]=b[i]-(q*b[1])/a[1][1];
    };
}
};

printf("Voici le systeme triangulaire\n");
printf("\n");
for(i=1;i<=n;i++)

```

```

    {for(j=1;j<=n;j++)
        {printf("%1.2f\t",a[i][j]);
          }
    printf("\t%1.2f\n",b[i]);
    printf("\n");
};
printf("\n");
/*CALCUL DES SOLUTIONS X=(x[i]*/
i=n;
if(a[i][i]!=0)
    {do
        {s=0;k=n;
          while(k>i)
              {s=s+a[i][k]*x[k];
                k=k-1;
              };
          x[i]=(b[i]-s)/a[i][i];
          i=i-1;
        }
    while(i>=1);
/*AFFICHAGE DES SOLUTIONS*/
printf("Les solutions sont\n");
printf("\n");

printf("Tp=%1.2f\n",x[1]);

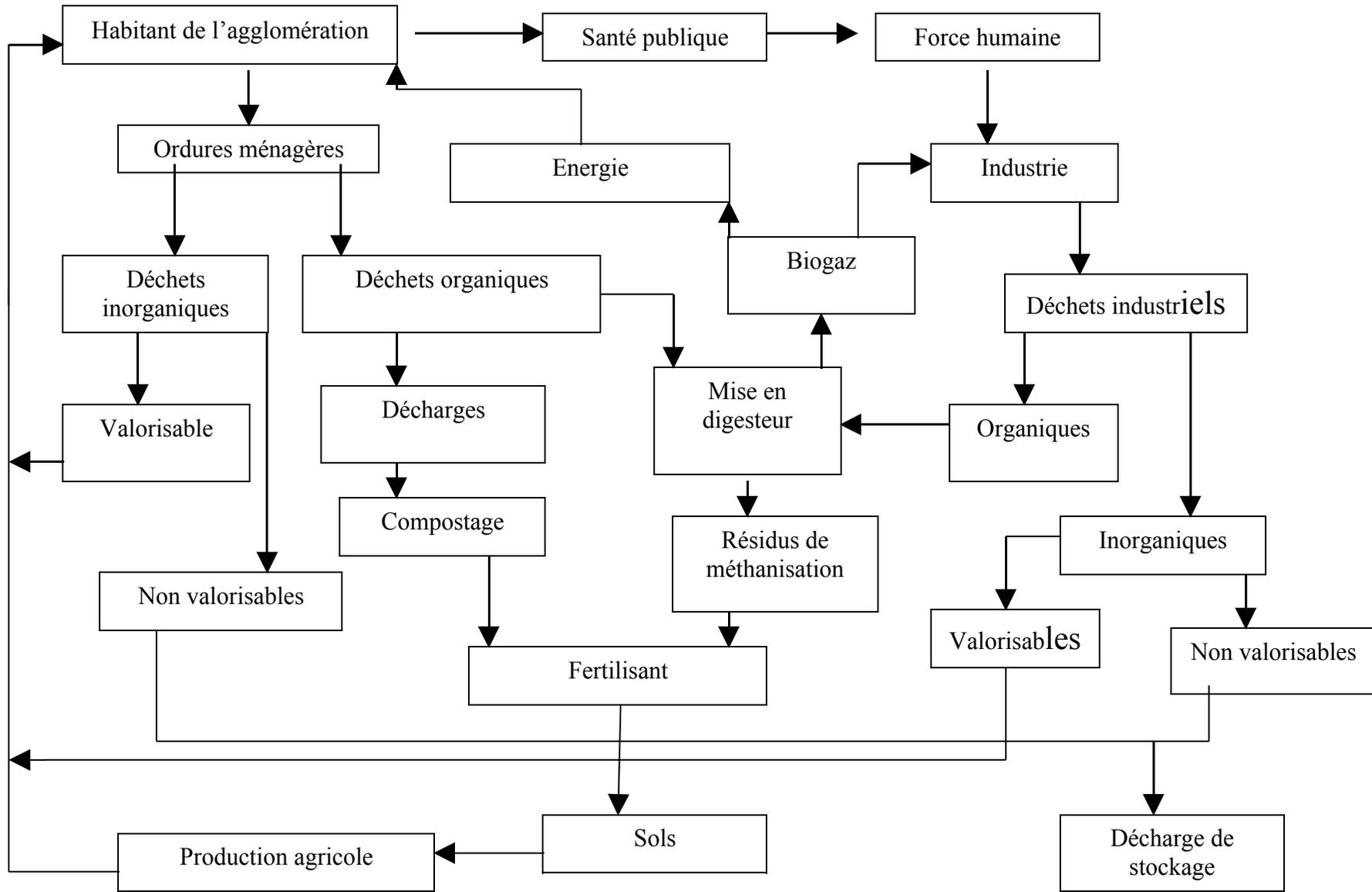
printf("\n");
printf("Tsb=%1.2f\n",x[2]);

printf("\n");
printf("Tr0=%1.2f\n",x[3]);
scanf("%f",&Tp);
scanf("%f",&Tsb);
printf("\n");

```

```
    }  
else  
    {printf("Le systeme n'a Pas de solutions\n");  
    }  
/*Calcul de Tg*/  
Tg=(Tp*Sg+Tsb*Sl)/(Sg+Sl);  
printf("Tg=%01.2fn",Tg);  
printf("\n");  
  
getch();  
}
```

Annexe 6 : Schéma principale des activités de la valorisation des ordures ménagères



Liste des références

- [1] N. G.A.RAHARIJHON, Déchets urbains, partie Elimination et gestion des déchets, Mais 1999
- [2] H. NAOILIDINE, Elimination des déchets aux Comores. Etude de faisabilité de l'enfouissement des déchets dans une décharge contrôlée, octobre 1999, Université de l'Océan Indien
- [3]. N. A. RAKOTOMIRAHO et V. RASOANAMBINANA, Rpport de la formation des agents de la commune rurale de Tanjombato sur le traitement des déchets ménagères par le Lombricompost, mai 2000.
- [4]] OFICE NATIONAL POUR L'ENVIRONNEMENT, Notes sur la valorisation des ordures ménagères dans les centres urbains à Madagascar.
- [5] Bultin Africain N°10 Bio ressource Energie, Développement, Environnement : Evaluation des ordres de grandeurs des émissions et de séquestration ou des élimination des gaz à effet de serre, octobre 1998.
- [6][http:// www.energie.plus.com/](http://www.energie.plus.com/)
- [7] INSTAT, Enquête prioritaire au prés des ménages 1999, Rapport principal, Août 2000
- [8] S.RANDRIABOLOLONA et A. B. RAKPTOARIVELO, Biogaz: Contribution aux études sur la valorisation de quelques résidus de fermentation des bio digesteurs, mémoire d'Ingénieur, Génie Chimie, Etablissement d'Enseignement Supérieur Polytechnique d'Antananarivo, 1989
- [9] O. BANTON et L. M. BANGOY, Hydrogéologie Multi sciences Environnement des eaux souterraines, presses de l'université du Québec AUPELF 1997

- [10] V. BILLANT, F. VARAGNAL.et N. BRICAS, Dossiers du Biogaz: Est – il possible de faire un installation de Fermentation Méthanique? Dossier A, Ministère de Relations Extérieures- Coopération et Développement, 1983.
- [11] V. BILLANT, F. VARAGNAL.et N. BRICAS, Dossiers du Biogaz: le Choix du système – la construction du digesteur, Dossier B, Ministère de Relations Extérieures- Coopération et Développement, 1983.
- [12] V. BILLANT, F. VARAGNAL.et N. BRICAS, Dossiers du Biogaz: Utilisation et maintenance d'une unité de Fermentation Méthanique – les équipements périphériques et la maintenance de l'installation, Dossier C, Ministère de Relations Extérieures- Coopération et Développement, 1983.
- [13] V. BILLANT, F. VARAGNAL.et N. BRICAS, Dossiers du Biogaz: Stratégie de développement – Trois études de Cas -Dossier D, Ministère de Relations Extérieures- Coopération et Développement, 1983.
- [14] www.arenidf.com/RECHERCHE/NRJ/enr/IDFbiogaz.htm
- [15]A. RANZIVOSOLOARIMALALA, Etude et évaluation des techniques de production de biogaz, Mémoire de DEA énergétique, Université d'Antananarivo, 1990
- [16] H. T. RAKOTONDRAMIANANA, Traitement ultime des boues des stations d'épuration à la réunion, 2^{ème} partie des travaux, Université de l'Océan Indien
- [17] S. RANDRIABOLOLONA et A. O. RAVONINJATOVO, Contribution à la valorisation énergétique, agronomique et technique de la jacinthe d'eau , mémoire de DEA, Chimie Minérale, Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo, 1999
- [18] H. Michel, la Filière Biogaz dans les pays en développement: "Etudes et Filières " 1993: 28-55

- [19] H. T. RANDRIAMANANTENA, Conception d'un système de suivi automatique et de régulation de la température avec un analyseur de gaz dans un bio digesteur, mémoire de DEA, Mécanique et physique de l'environnement, Université d'Antananarivo, 2001
- [20] R. T. ANDRIANTAHIANA, Etude technique et socio-économique d'une installation de biogaz dans une station agricole du moyen ouest, Mémoire de DEA , énergétique , Université d'Antananarivo, 1991
- [21]<http://www.geocities.com/oscaraguilarj/3.pdf>.
- [22]<http://www.bseri.com/fenvironm7.htm>
- [23]<http://www.inra.fr/dpenv/lopezcOO.htm>
- [24]http://users.swing.be/compost.Main_CCM.htm
- [25] MINISTERE DE LA COOPERATION ET DU DEVELOPPEMENT R, FRANÇAIS, Mémento de l'agriculture, 4^{ème} édition.
- [26] F. KREITH, Transmission de la chaleur et thermodynamique, Université de Colorado, 1967.
- [27] G. GOUTONLY, Génie Enzymatique, Paris Milan Barcelone Bonn, 1991
- [28] Banque Africaine pour le Développement, Monographie Energétique de Madagascar, 1993
- [29] http://www.webep.inso-roven.fr/francais/projet/Stroh_ZabcEep4/SITE/biogaz.IV.htm
- [30] O. ANDRIAMIFIDY, Expérimentation agricole en vue d'améliorer la fermentation biologique des Géranium Rosat. Cas de l'utilisation du compost à la ferme de Betampona, Mémoire de fin d'étude à Ecole Supérieure des Sciences Agricoles d'Antananarivo, 2001
- [31] MINISTERE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT, Recherche et Développement: Série Sciences Technologique N°2, Antananarivo, 1989

Nom : ALI
Prénom : MOUSSA MOINDZE

Titre du mémoire : Contribution à la justification de la valorisation énergétique et agronomique des ordures ménagères.

Résumé

Ce travail a pour objectif d'apporter des améliorations des traitements des ordures ménagères par valorisation énergétique et agronomique. Des essais de méthanisation ont été effectués. Des données bibliographiques sur la production d'engrais organique complètent cette étude.

Les résultats ont montré que la fermentation biologique est le moyen le plus efficace pour traiter les ordures ménagères. Cette technique permet d'obtenir du biogaz considérable et un bon fertilisant du sol.

Mots clés : Ordures ménagères, Traitement, Biogaz et engrais organique

Encadreur : Monsieur RAZAFIMAHEFA Alexandre, Professeur Titulaire
Laboratoire de Mécanique et Physique de l'Environnement