

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
Ecole Nationale Polytechnique

Département : GENIE CHIMIQUE

Mémoire pour l'obtention du Diplôme de Magister en Génie Chimique

Présenté à l'Ecole Nationale Polytechnique

Par

SEBTI Aicha

Ingénieur d'Etat en Génie Chimique de l'ENP

VALORISATION DES DECHETS SOLIDES URBAINS

Soutenu en Juin 2 007 devant le jury :

M^f A. SELATNIA

Président, Professeur (ENP)

M^{me} F. SOUABI

Rapporteur, Maître de Conférences (ENP)

M^f S. IGOUD

Rapporteur, Chargé de Recherche (UDES)

M^{me} A. MEFTI

Examinatrice, Chargée de Cours (ENP)

M^{me} F. MOHELLEBI

Examinatrice, Maître de Conférences (ENP)

M. NAKIB

Examineur, Chargé de Cours (ENP)

M^{me} H. NEDJARI

Invitée, Chef de Département SSE (IANOR)

M^f M. YALA

Invité, Directeur Général de l'AND

Année Universitaire 2006/2007

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Adresse: B.P 182 16 200 El-Harrach-Alger

Tel : +213 21 52 53 01/03 Fax : +213 21 52 29 73

Site web : www.enp.edu.dz

REMERCIEMENTS

Ce modeste travail a été réalisé au sein du Département de Génie Chimique de l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP) en collaboration avec le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) de Bouzaréah.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent particulièrement à :

- ❖ Madame F. SOUAHI, Maître de Conférences à l'ENP, qu'elle reçoit toute ma reconnaissance pour son dynamisme et ses compétences scientifiques qui m'ont permis de mener à bien cette étude, Merci Madame de m'avoir fait confiance et de m'avoir soutenue dans les moments les plus difficiles de ma vie ;
- ❖ Monsieur S. IGOUD, Chargé de Recherche à l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES), qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour son suivi et ses précieux conseils ;
- ❖ Monsieur A. SELATNIA, Professeur à l'ENP, qui me fait l'honneur de présider cette commission d'examen ;
- ❖ Monsieur M. NAKIB, Chargé de Cours à l'ENP, pour son aide précieuse, Mesdames A. MEFTI, Chargée de Cours et F. MOUHELLEBI, Maître de Conférences, qui ont accepté de faire partie de mon jury ;
- ❖ Tous mes enseignants du Département de Génie Chimique ;
- ❖ Tout le personnel de la bibliothèque de l'ENP.

J'exprime aussi ma profonde gratitude et sympathie à Madame H.NEDJARI, Chef de Département "Santé, Sécurité et Environnement" au sein de l'Institut Algérien de Normalisation (IANOR), ainsi qu'à Monsieur M. YALA, Directeur Général de l'Agence Nationale des Déchets (AND, MATE), qui m'honorent par leur participation à cette commission d'examen.

تثمين النفايات الحضرية الصلبة

الملخص:

الهدف من هذه الدراسة هو المساهمة في التقييم الكمي و النوعي للنفايات الحضرية الصلبة لولاية الجزائر وكذا تثمينها باستعمال أساليب التثمين الطاقوية و غير الطاقوية.

عملنا يعتمد على دراسة ثلاثة أساليب للتثمين الأكثر استعمالا و هي الاحتراق التخمير في غياب الأكسجين و التخمير بوجود الأكسجين ثم إجراء مقارنة بين الأساليب المقترحة لاختيار الطريقة الأنسب لمعالجة هاته النفايات وذلك بالأخذ بعين الاعتبار خصائص النفايات لولاية الجزائر الإمكانيات المادية للولاية و كذا التأثير على البيئة.

المفاتيح: النفايات الحضرية الصلبة, ولاية الجزائر, التثمين الطاقوي, التثمين الغير الطاقوي, الاحتراق, التخمير بوجود الأكسجين, التخمير بغياب الأكسجين.

Résumé : VALORISATION DES DECHETS SOLIDES URBAINS

L'objet de la présente étude est de contribuer à l'évaluation quantitative et qualitative des déchets solides urbains générés par la Wilaya d'Alger et à leur valorisation par des procédés énergétiques et non énergétique.

Notre travail consiste à étudier les trois modes de valorisation des déchets solides urbains les plus fréquemment utilisés, incinération, méthanisation et compostage, de comparer ces trois modes et de choisir la meilleure méthode adaptée aux caractéristiques des déchets de la Wilaya d'Alger, à ses capacités d'investissement et au respect de l'environnement.

Mots clés : Déchets Solides Urbains, Wilaya d'Alger, Valorisation Energétique, Valorisation non Energétique, Incinération, Méthanisation, Compostage.

Abstract : URBAN SOLID WASTE VALORISATION

The purpose of this study is to contribute to evaluate and to valorise urban solid waste generated by Algiers by using energetic and non energetic process.

Our work consists of a study of three modes of treatment which are frequently used incineration, methanisation and composting. After that, we have made a comparison between these modes to choose the most adapted method to Algiers' urban solid waste characteristics, its investment capacities and environment respect.

Key words: Urban Solid Waste, Algiers, Energetic Valorisation, Non energetic Valorisation, Incineration, Methanisation, Composting.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	01
--------------------------	-----------

PARTIE I

Chapitre I : Généralités

I Définition d'un déchet	02
II Classification des déchets solides.....	02
III Caractéristique des déchets solides urbains.....	05
IV Déchets, Environnement et Santé.....	08
IV.1 Impacts liés à la présence de biogaz.....	08
IV.2 Impacts sur les eaux souterraines.....	09

Chapitre II : Procèdes de Traitement des Déchets Solides Urbains

Procédés de traitement des déchets solides Urbains.....	13
--	-----------

Chapitre II.1 : Traitement Thermique par Incinération

I La combustion.....	16
I.1 Processus d'inflammation.....	16
I.2 Principe de la combustion.....	17
II Description et performance de l'installation d'incinération.....	22
II.1 Fosse de stockage des déchets.....	23
II.2 Four	23
II.3 Système de refroidissement des gaz et de récupération d'énergie.....	24
II.4 Système de traitement des fumées.....	26
II.5 Dispositif de récupération des sous-produits d'incinération et d'évacuation des fumées.....	29
IV Avantages et inconvénients de l'incinération	30
IV.1 Avantages.....	30
IV.2 Inconvénients.....	31
V Analyse et commentaire.....	31

Chapitre II.2 : Traitements Biologiques

I Métabolismes énergétiques et leurs incidences sur le traitement des déchets.....	33
I.1 Aspects théoriques.....	33
I.2 Incidences de la respiration aérobie et de la respiration anaérobie	33

A- Compostage

I. Principe.....	34
II Paramètres du compostage et mise en œuvre.....	36
II.1 Paramètres de conduite et techniques de mise en œuvre du processus.....	36
II.2 Paramètres caractéristiques du déchet.....	40
III Aspects techniques du compostage.....	42
III.1 Compostage accéléré en bio-réacteur	42
III.2 Compostage en tas.....	43
III.3 Compostage en andins.....	43
IV Caractérisation et utilisation du compost mûr.....	43
IV.1 Caractérisation du compost mûr.....	43
IV.2 Utilisation du compost mûr.....	44
V Exemple d'un procédé industriel : Procédé de lombricompostage.....	46
V.1 Lombricompostage.....	46
V.2 Procédé Naturba de tri-lombricompostage.....	47

B- Méthanisation

I Principe et objectifs de la méthanisation.....	48
II Aspects biochimiques et microbiologiques.....	49
III Paramètres de la méthanisation.....	51
III.1 Température.....	51
III.2 pH.....	51
III.3 Charge organique entrante.....	51
III.4 Besoins nutritionnels.....	51
III.5 Oxygène et teneur en eau.....	52
III.6 Agitation.....	52
IV Procédés de méthanisation pour les déchets solides urbains.....	52
IV.1 Fonctionnement discontinu du digesteur.....	52
IV.2 Fonctionnement semi-continu du digesteur.....	53

V Caractéristique et utilisation des produits de la méthanisation.....	53
V.1 Biogaz.....	53
V.2 Digestat.....	54
VI Exemple de réalisation industrielle : Procédé Valorga.....	55
VI.1 Tris.....	55
VI.2 Méthanisation.....	56
VI.3 Pressage de la matière digérée.....	56
VI.4 Affinage.....	56
VII.1 Avantages liés aux traitements biologiques.....	57
VII.2 Inconvénients liés aux traitements biologiques.....	57

PARTIE II

Etude Quantitative et Qualitative des Déchets Solides Urbains de la Wilaya d'Alger et Proposition du mode de traitement

Chapitre I : Etude Quantitative et Qualitative des Déchets Solides Urbains de la Wilaya d'Alger

I PROBLEMATIQUE.....	58
II Gisements de déchets solides urbains -Wilaya d'Alger-.....	58
II.1 Présentation de la région d'études.....	58
III Description des moyens et du système de collecte.....	60
IV Description du système de dépôt et d'élimination	61
V Etude quantitative des DSU de la Wilaya d'Alger	61
V.1 Evolution de la production des DSU.....	64
V.2 Tendance d'évolution quantitative.....	64
V.3 Etude comparative de la production des déchets solides urbains.....	65
VI Etude qualitative des DSU.....	66
VI.1 Composition de la "Poubelle" algéroise.....	66
VI.2 Evolution de la composition de la "Poubelle" algéroise.....	68

VI.3 Tendance d'évolution qualitative.....	69
VI.4 Etude comparative de la composition des DSU	69
VII Caractéristique des déchets solides urbains.....	70
VIII Situation actuelle de la gestion des déchets solides au niveau national.....	71
VIII.1 Gestion des déchets solides industriels en Algérie.....	71
VIII. 2 Gestion des déchets solides urbains à l'échelle nationale.....	72
IX Prolifération des Déchets et leurs impacts sur le citoyen et son environnement...	81

**Chapitre II : Proposition et Choix du Modede Traitement des Déchets Solides
Urbains**

I Tri des déchets solides urbains.....	82
II Hypothèse concernant la valorisation énergétique	83
III Principe de calcul de la puissance électrique et de la quantité de chaleur	83
IV Calcul de la puissance électrique et de la quantité de chaleur.....	84
IV.1 Mode 1 : Incinération.....	84
IV.2 Mode 2 : Méthanisation.....	85
IV.3 Mode 3 : Compostage.....	86
V Choix du mode de valorisation.....	87
V.1 Comparaison entre les trois modes de valorisation.....	88
V.1.1 Comparaison entre les quantités d'énergie produite.....	88
V.1.2 Comparaison entre les quantités de matière produite.....	88
V.1.3 Comparaison entre les coûts de traitement.....	89
V.4 Comparaison vis-à-vis du respect de l'environnement.....	90
VI Conclusion.....	91
CONCLUSION GENERALE.....	93

LISTE DES FIGURES

PARTIE I

Figure I.1.a – Déchets du secteur primaire	04
Figure I.1.b – Déchets industriels	04
Figure I.1.c – Déchets urbains	04
Figure I.2 – Composition du biogaz	09
Figure I.3 – Relation entre la composition et l’inflammabilité d’un mélange de méthane et d’air	10
Figure I.4 - Evolution idéalisée, en fonction du temps, des effluents liquides d’une décharge d’ordures ménagères	12
Figure II.1 – Schéma de fonctionnement d’une unité d’incinération des déchets ménagers ..	22
Figure II.2 - Etapes biologiques du compostage	35
Figure II.3 – Représentation schématique des processus de biodégradation aérobie d’un déchet organique granulaire lors du compostage	36
Figure II.4 – Evolution de la température en fonction du temps	39
Figure II.5 - Courbe de principe des variations de pH au cours de processus de compostage	41
Figure II.6 – Diagramme synoptique du procédé Naturba de tri-lombricompostage des ordures ménagères mis en service par Sovadec	47
Figure II.7 - Étapes biologiques de la filière de méthanisation de déchets organiques	48
Figure II.8 - Représentation simplifiée des étapes de biodégradation anaérobie de la matière organique des déchets	50
Figure II.9 – Diagramme synoptique du procédé Valorga de méthanisation des ordures ménagères	55

Partie II

Figure I.1 - Carte de la Wilaya d’Alger divisée en 13 daïras et découpée en 57 communes Localisation des CET et des décharges sauvages	59
Figure I.2.a - Quantité de DSU produite par commune en 2 003	62
Figure I.2.b - Quantité de DSU produite par commune en 2 003	63
Figure I.3 - Evolution de la production des déchets solides urbains –Wilaya d’Alger-	64

Figure I.4 - Projection de l'évolution de la production des déchets solides urbains	65
Figure I.5 - Comparaison de la production spécifique de déchets des pays industrialisés et des pays en voie de développement (1 999)	66
Figure I.6 - Pourcentage en poids des divers composants des déchets solides urbains – Wilaya d'Alger-	67
Figure I.7 - Evolution de la composition de la poubelle algéroise	68
Figure I.8 - Composition des déchets solides urbains dans les pays industrialisés et les pays en voie de développement	70
Figure I.9 - Niveau de couverture de la collecte dans la Wilaya d'Alger	74

LISTE DES TABLEAUX

PARTIE I

Tableau I.1 - Exemple de critères de classification	03
Tableau II.1 - Pouvoir Calorifique Inférieur de certains combustibles et déchets	19
Tableau II.2 – Pouvoir calorifique de quelques types de déchet	19
Tableau II.3 - Pourcentages massiques d’incinération des déchets solides urbains dans le monde	31
Tableau II.4 - Relation entre le pourcentage d’incinération et la richesse des pays	32
Tableau II.5 - Composition moyenne d’un compost urbain mûr.....	44
Tableau II.6 - Fourchettes de concentrations des principaux constituants du biogaz formé par digestion méthanique de déchets de biomasse	53

PARTIE II

Tableau I.1 - Code des communes intra-muros et extra-muros de la Wilaya d’Alger	60
Tableau I.2 - Evolution de la composition de la poubelle algéroise.....	69
Tableau I.3 - Caractéristiques des DSU de la Wilaya d’Alger	70
Tableau I.4 - Quantité de déchets produite par secteur en Algérie (1995)	71
Tableau I.5 - Quantité de déchets dangereux produite en Algérie (1994)	72
Tableau I.6 - Moyens matériels et humains affectés à la gestion des DSU	73
Tableau I.7 - Montant de la redevance de collecte et de traitement	75
Tableau I.8.a - Communes où la situation de la gestion est critique	76
Tableau I.8.b - Communes où la situation de gestion nécessite un renforcement	76
Tableau I.8.c - Communes où la situation de gestion nécessite une organisation	77
Tableau I.9.a - Situation de la décharge d’Oued Smar - Zone Est-	78
Tableau I.9.b - Situation du Centre d’Enfouissement Technique d’Ouled Fayet- Zone Ouest-	78
Tableau I.9.c - Situation des décharges des zones Nord-Ouest et Sud	79
Tableau I.10 - Prix de vente et quantités de déchets tirées -Décharge de Oued Smar-	80
Tableau I.11 - Projections relatives aux émissions de méthane et d’oxyde nitreux	81
Tableau II.1 - Composition et quantité des DSU générés par les communes de la Wilaya d’Alger	82
Tableau II.2 – Puissance électrique générée selon le mode 1	84

Tableau II.3 – Quantité de chaleur produite selon le mode 1	84
Tableau II.4 – Puissance électrique générée selon le mode 2	85
Tableau II.5 – Quantité de chaleur produite selon le mode 2	86
Tableau II.6 - Caractéristiques chimiques du compost fabriqué et traité par l'usine de compostage de Tlemcen (criblé à 15 mm)	87
Tableau II.7 – Quantité d'énergie produite selon des deux modes de valorisation énergétique	88
Tableau II.8 – Quantité de matière produite	88
Tableau II.9 - Comparaison entre le coût de traitement par incinération, par méthanisation et par compostage	89
Tableau II.10 – Répartition du coût de l'incinération	89
Tableau II.11 – Comparaison entre les 3 modes de valorisation	91

ABREVIATION

T_0	<i>Température initiale d'un Déchet</i>
T_{ig}	<i>Température d'ignition</i>
Φ_0	<i>Flux calorifique</i>
t_{ig}	<i>Délai d'inflammation</i>
ρ	<i>Masse volumique d'un déchet</i>
C_p	<i>Chaleur spécifique d'un déchet</i>
λ	<i>Conductivité thermique d'un déchet</i>
Φ_0/A	<i>Densité de flux thermique incident par unité de surface (irradiance)</i>
α	<i>Coefficient moyen d'absorption du matériau</i>
V_a	<i>Volume d'air comburivore</i>
V_{ac}	<i>Volume d'air de combustion réel</i>
D_v	<i>Débit de vapeur</i>
C_{vs}	<i>Chaleur spécifique de la vapeur surchauffée</i>
C_{eau}	<i>Chaleur spécifique de l'eau d'alimentation</i>
D_m	<i>Débit massique des déchets traités</i>
η	<i>Rendement de l'ensemble four-chaudière</i>
% vol	<i>Pourcentage en volume</i>
A	<i>Surface d'un déchet</i>
AVG	<i>Acides Volatils Gras</i>
C	<i>Teneurs en carbone</i>
C/N	<i>Rapport carbone/azote</i>
C/N/P	<i>Rapport Carbone/ Azote/ Phosphore</i>
CET	<i>Centre d'Enfouissement Technique</i>
Coeff Tech	<i>Coefficient Technique</i>
COV	<i>Composés Organiques Volatils</i>
DSU	<i>Déchets Solides Urbains</i>
DZD	<i>Dinar Algérien</i>
e	<i>Excès d'air</i>

<i>H</i>	<i>Teneurs en hydrogène</i>
Ha	<i>Hectare</i>
Hab	<i>Habitant</i>
j	<i>Jour</i>
KJ	<i>Kilo Joule</i>
KWhé	<i>Kilo Watt heure électrique</i>
M	<i>Masse de Déchets</i>
MATE	<i>Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement</i>
MJ	<i>Million Joule</i>
N/P	<i>Rapport Azote Phosphore</i>
<i>O</i>	<i>Teneurs en oxygène</i>
PCDD	<i>Polychlorodibenzoparadioxines</i>
PCDF	<i>Polychlorodibenzofurannes</i>
PCS	<i>Pouvoir Calorifique Supérieur</i>
PNB	<i>Produit National Brute</i>
ppm	<i>Partie par million</i>
PSI	<i>Pouvoir Calorifique Inférieur</i>
Q	<i>Quantité d'énergie récupérée</i>
Re	<i>Nombre de Reynolds</i>
S	<i>Teneurs en soufre</i>
TE-CO ₂	<i>Tonne Equivalent CO₂</i>
TEP	<i>Tonne Equivalent Pétrole</i>

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les activités humaines sont consommatrices de biens et d'énergie sous différentes formes et par conséquent elles génèrent des sous produits liquides, gazeux et solides. La mauvaise gestion de ces déchets est à l'origine de plusieurs problèmes environnementaux.

Avec l'avancement des connaissances dues aux progrès des sciences et des structures sociales, notre sensibilité face aux problèmes d'environnement nous a conduit à prendre conscience que nos activités peuvent modifier profondément et même d'une manière irréversible, notre cadre de vie. La dégradation des caractéristiques physiques et biologiques des écosystèmes, l'épuisement des ressources naturelles et la perturbation de la couche d'ozone présentent des menaces sérieuses pour le maintien d'un développement durable.

L'Algérie, qui affiche depuis l'indépendance un taux de croissance économique et sociale anarchique et non maîtrisé, commence depuis presque une décennie à mesurer les problèmes écologiques liés à la pollution associée aux activités humaines notamment le problème de la gestion des déchets solides urbains. C'est dans ce contexte que se situe notre étude qui consiste à l'évaluation quantitative et qualitative des déchets solides urbains générés par la Wilaya d'Alger et à leur valorisation par des procédés énergétiques et non énergétique.

Nous avons consacré la première partie de notre étude à une analyse bibliographique des différents procédés de traitement des déchets solides pratiqués dans le monde à savoir le traitement thermique par incinération et les traitements biologiques (méthanisation et compostage). Le principe, les différentes étapes de ces procédés de traitement, leurs avantages et leurs inconvénients ont été également développés.

L'évaluation quantitative et qualitative des déchets solides urbains de la Wilaya d'Alger et leur valorisation ont fait l'objet de la deuxième partie de notre étude. Toutes les données nécessaires ont été collectés, analysées et exploitées et ce pour valoriser le potentiel énergétique et non énergétique de ces déchets selon les trois modes de valorisation cités précédemment et choisir le plus adéquat à la Wilaya d'Alger en prenant en considération les contraintes économiques et environnementales.

Le but de l'étude est donc une contribution à l'optimisation de la mise en œuvre de traitements de déchets solides urbains sous contraintes environnementale et économiques, afin d'éviter une détérioration du climat et de l'environnement.

PARTIE I

Chapitre I : Généralités

Chapitre II : Procédés de Traitement des Déchets Solides Urbains

Chapitre I

Généralités

I Définition d'un déchet

Si le déchet est habituellement défini comme un résidu abandonné par son propriétaire car inutilisable, sale ou encombrant, il a, au regard de l'environnement, une définition juridique.

Selon la Loi Algérienne n° 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets nous entendons par Déchets : « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou, plus généralement, tout objet, bien meuble dont le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer » [1].

II Classification des déchets solides

Les classifications des déchets sont toujours à but finalisé, en effet elles ne sont pas une référence scientifique [2].

Le but d'une classification peut être [2]:

- **D'ordre technique** : afin de maîtriser les problèmes de transport, de stockage intermédiaire, de traitement et d'élimination finale ;
- **D'ordre financier** : pour appliquer le principe du pollueur-payeur, tri entre les communes et entreprises qui a assuré le financement ;
- **D'ordre légal** : pour cerner la responsabilité causale relative à des questions de sécurité des populations ou de protection de l'environnement.

Le tableau I.1 présente les critères de classification que l'on trouve le plus fréquemment. Ils ne permettent pas d'éviter les ambiguïtés, car certains déchets peuvent appartenir à deux classes d'un même critère : il peuvent en effet être à la fois

1. Combustibles (incinérables) ; et
2. Biodégradables (compostables et métabolisables).

Cette double appartenance devient fréquente lorsqu'on considère des mélanges de déchets et non plus un déchet d'un seul type.

Tableau I.1 - Exemple de critères de classification [2]

Critère	Exemple de classe
Composition	Végétaux/ plastiques/ métaux/ matériaux terreux et pierreux
Consistance	Solides/ liquides/ pâteux Solides très compressibles/ solides peu compressibles
Provenance	Industriels/ artisanaux/ ménagers/ miniers/ nucléaires/ agricoles/ commerciaux/ d'installation de traitement/ hospitaliers
Durée de vie de l'objet	Brève (jours à semaine)/ moyenne (mois à année)/ longue (plusieurs années)/ très longue (plusieurs décennies)
Hétérogénéité	Homogènes/ très variables
Type de collecte	Ménagers/ encombrants
Mode de traitement	Incinérables/ compostables/ biodégradables par un autre moyen que le compostage/ stockables en décharge pour inerte/ valorisables
Politique tarifaire	Actionnaire/ non actionnaire de l'installation de traitement
Mode de stockage et de transport	En vrac, en fût, pompé

D'ordre général, la classification des déchets présente deux niveaux. Le premier est celui de l'ensemble des producteurs qui sont répartis en deux classes [2]:

1. **Les producteurs du secteur primaire de production** : agriculture, élevage, pêche et foresterie ;
2. **Les producteurs du secteur industriel** : grandes industries de production et de transformation de matières, industrie nucléaire et industrie minière.

Les déchets appartenants à ces deux secteurs sont tout à fait typés, propres à l'activité en question.

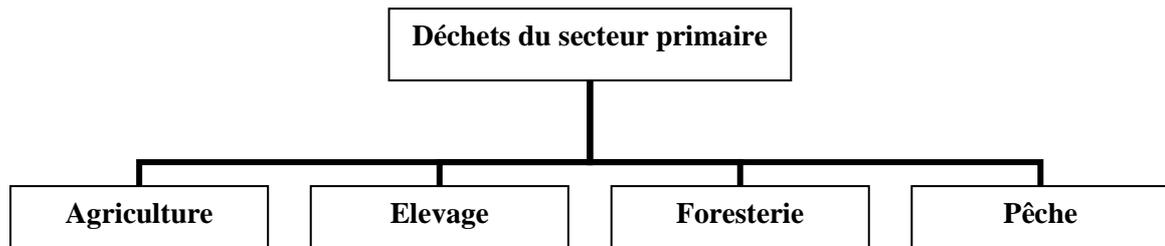


Figure I.1.a - Déchets du secteur primaire [2]

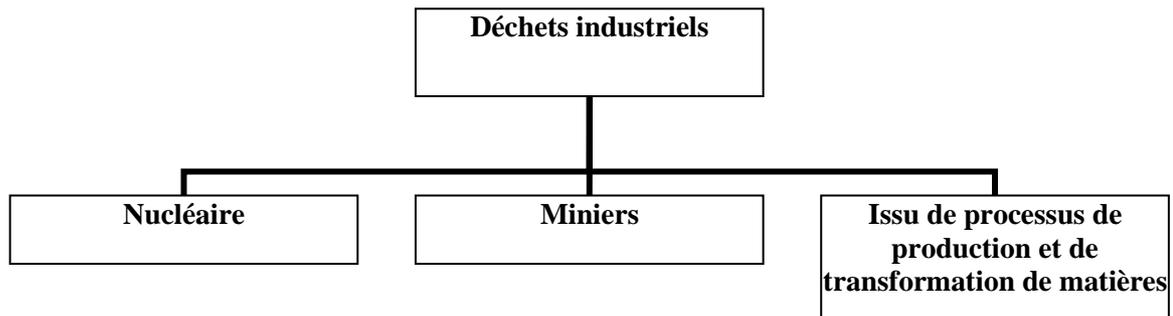


Figure I.1.b - Déchets industriels [2]

Toutes les autres catégories de déchets qui n'appartiennent pas de manière claire à cet ensemble sont appelées "déchets urbains".

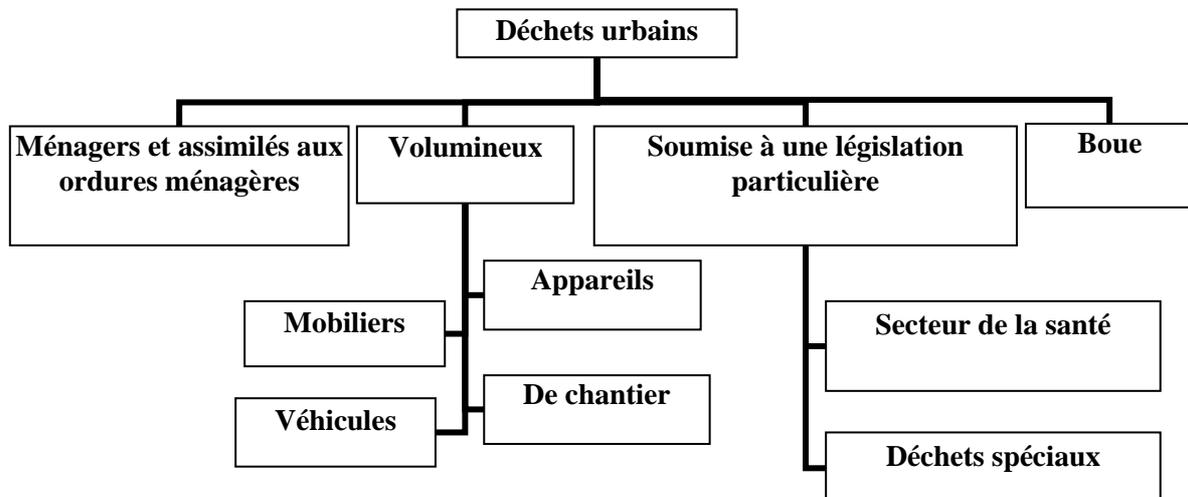


Figure I.1.c - Déchets urbains [2]

La nature des déchets proposée à l'étude à savoir les déchets solides urbains s'intègre dans la classification proposée par la figure I.1.c. Ils comprennent [2]:

- Ce que nous désignons traditionnellement "les ordures ménagères", qu'elles proviennent des ménages ou des commerces, de l'artisanat, de petites entreprises ; ce sont des déchets qui sont, depuis des décennies, collectés par les services municipaux ou des concessionnaires ;

- Des déchets plus volumineux et produits de façon moins quotidienne : mobiliers, appareils grands et petits, véhicules et pneus, déchets de construction, de démolition et de transformation de bâtiments.

III Caractéristique des déchets solides urbains

Les critères qui sont traditionnellement pris en considération concernent les caractéristiques qu'il faut déterminer pour faire le choix du mode de collecte, de transport et de traitement des déchets solides urbains. Les principaux critères à prendre en compte pour la collecte et le transport sont [2]:

- **La consistance** (solide, liquide ou pâteuse) : elle permet de déterminer s'il est nécessaire de prévoir des systèmes de transport étanches ;
- **La densité** : elle est déterminante pour calculer la capacité et le nombre des véhicules de collecte nécessaire ;

Elle varie suivant les pays et le mode de consommation entre 0.12 et 0.5 ;

- **La compressibilité** : lors de la gestion de grandes quantités, il est intéressant de savoir si les déchets peuvent être compactés, ce qui permet de faciliter les modes de stockage et de rentabiliser les transports [2].

Pour le choix de procédés de traitement, les paramètres à prendre en compte sont les suivants [3]:

- le taux d'humidité ;
- le pouvoir calorifique ;
- le rapport carbone/azote (C/N) ;
- les matières organiques.

III.1 Taux d'humidité

Le taux d'humidité ou teneur en eau représente la quantité pondérale d'eau contenue dans une masse de déchets rapportée à la quantité pondérale de ce déchet humide. Pour enflammer les déchets, ils doivent être secs ce qui implique que l'eau contenue soit évaporée.

Pour l'analyse de la teneur en eau, les prélèvements d'échantillons se font sur des déchets frais, non compactés et préalablement répartis en classes de déchets. En règle générale, les échantillons prélevés ont été broyés pour diminuer les caractéristiques d'encombrement des

prélèvements. Le poids de ceux-ci varie de quelques centaines de grammes à un kilogramme [2].

La teneur en eau peut varier de 25 à 60 % en fonction des facteurs suivants [2]:

- les habitudes saisonnières des consommateurs : durant la saison de grande consommation des fruits et légumes, la teneur en eau des déchets augmente ;
- les facteurs climatiques : à la saison des pluies, la même tendance peut être observée ;
- le mode de stockage provisoire des déchets : si avant la collecte ou le traitement, les déchets sont entreposés dans des récipients quelconques non fermés, ils sont exposés aux intempéries et leur humidité va augmenter.

III.2 Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique des ordures ménagères est défini comme étant la quantité de chaleur dégagée par la combustion de l'unité de poids d'ordures brutes.

Le Pouvoir Calorifique Supérieur à volume constant (PCS) suppose que l'eau provenant du combustible ou formée en cours de combustion se retrouve à l'état liquide dans les produits de cette combustion. Si la composition élémentaire du déchet en teneur de carbone (C), hydrogène (H), oxygène (O), et soufre (S) est connue, la formule de *Dulong* peut nous servir pour le calcul de PCS [2,4]

$$PCS = 0,23 \times (33,950 \times C + 144,200 \times (H - O/8) - 9,400 \times S) \quad (I.1)$$

Le Pouvoir Calorifique Inférieur à volume constant (PCI) suppose que toute l'eau provenant du déchet ou formée en cours de combustion reste à l'état de vapeur dans les produits de la combustion. En pratique, le PCI représente l'énergie qui se dégage et qui peut être techniquement récupérée au cours de la combustion.

Cette caractérisation influe sur le dimensionnement des fours d'incinération, et permet de déduire les quantités de chaleur correspondant aux tonnages collectés. Ces quantités de chaleur multipliées par le rendement thermique du groupe four-chaudière (qui peut varier de 60 à 80 %) donneront l'énergie récupérable, c'est-à-dire l'énergie maximale susceptible d'être utilisée [3].

Le PCI se calcule à partir de la valeur du PCS par l'équation :

$$PCI = PCS \times (1 - Hu) - C_v \times (Hu + 9 \times H) \quad (I.2)$$

Avec :

C_v Chaleur latente de vaporisation de l'eau (2 436 KJ/Kg) ;

Hu Taux d'humidité ;

$9 \times H$ Masse d'eau formée lors de la combustion (combinaison de l'hydrogène des déchets avec l'oxygène de l'air) selon la réaction :



Ce qui donne une masse molaire :



Donc $1 \text{ unité de masse d'hydrogène} \rightarrow 9 \text{ unités de masse d'eau}$

Les PCI tendent généralement à augmenter, ce qui est dû principalement à l'augmentation de la proportion de cellulose et de matières plastiques dont les pouvoirs calorifiques sont très élevés [2].

III.3 Rapport carbone/azote (C/N)

Le rapport carbone/azote permet d'apprécier aussi bien l'aptitude des ordures au compostage que la qualité du compost obtenu. Le rapport idéal est voisin de 30. C'est dans cette zone que les microorganismes trouvent exactement la proportion de carbone et d'azote nécessaire à leur croissance [5].

III.4 Matières organiques

Le caractère fermentescible des déchets solides urbains des pays en voie de développement est très accentué par rapport à d'autres pays. Le taux de matières organiques est pratiquement le double de celui des pays industrialisés (plus de 70 %).

La prise en compte des critères traditionnels est nécessaire pour évaluer l'adéquation technique d'un mode de gestion compte tenu des caractéristiques des déchets à traiter, mais elle ne permet pas de mesurer l'effet à long terme de ces choix sur la santé publique ni sur celle de l'environnement. Pour y remédier, il faut tenir compte des critères suivants [2]:

- la teneur en éléments chimiques et substances complexes ;
- le cycle de vie du produit ;
- **La réparabilité** : ce critère dépend non seulement des matériaux utilisés et des modes d'assemblages, mais aussi des infrastructures existantes telles que les services après vente ;
- **L'adaptabilité** : ce critère dépend des matériaux et mode d'assemblages utilisés, la conception par modules permettrait de ne remplacer que des parties du produit qui sont détériorées ou devenues obsolètes ;

La prise en compte des teneurs en métaux lourds, chlore, fluor et en certaines substances complexes est importante pour permettre de déterminer à l'aide de bilans de flux dans quels compartiments de l'environnement les polluants vont être rejetés, et quelles sont les quantités qui risquent d'être absorbées par les êtres vivants [2].

IV Déchets, Environnement et Santé

Une étude réalisée en 1996 par l'Agence pour la Diffusion de l'Information Technologique (ADIT) a permis de visionner les politiques affichées et celles pratiquées dans quinze pays. En ce qui concerne les déchets solides urbains, il en ressort que la mise en décharge reste, et de loin, le principal mode d'élimination dans le monde [6]:

- inférieure à 20 % : Suisse, Japon, Danemark ;
- supérieure à 30 % et inférieure à 60 % : Pays-Bas, Belgique, Suède, Allemagne, Autriche) ;
- 60 – 70 % : France, Etats-Unis, Canada, Norvège ;
- Supérieure à 70 % : Espagne, Italie.

La décharge devrait être le dernier recours dans la hiérarchie des modes de gestion de déchets, après la collecte, le tri, la récupération et d'autres modes de valorisation et d'élimination. En effet, les décharges sont des sources potentielles d'émissions d'effluents gazeux (biogaz) ou liquides (lixiviats) qui sont à l'origine d'une multitude de nuisances dont les effets sur l'environnement et l'homme sont néfastes.

IV.1 Impacts liés à la présence de biogaz

Les émissions gazeuses d'une décharge pour déchets solides urbains sont constituées par le biogaz, qui contient aussi, en traces ces composés malodorants responsables des nuisances olfactives traditionnellement associées à la présence d'une décharge notamment le sulfure d'hydrogène (H_2S) et ses dérivés : le méthylmercaptane (CH_3SH) et l'éthylmercaptane (C_2H_5SH) [7].

Le biogaz résulte des étapes successives de fermentation de la matière organique biodégradable qui sont [6]:

- Phase I : Hydrolyse ;
- Phase II : Acidogenèse ;
- Phase III : Acitogenèse ;
- Phase IV : Méthanogenèse.

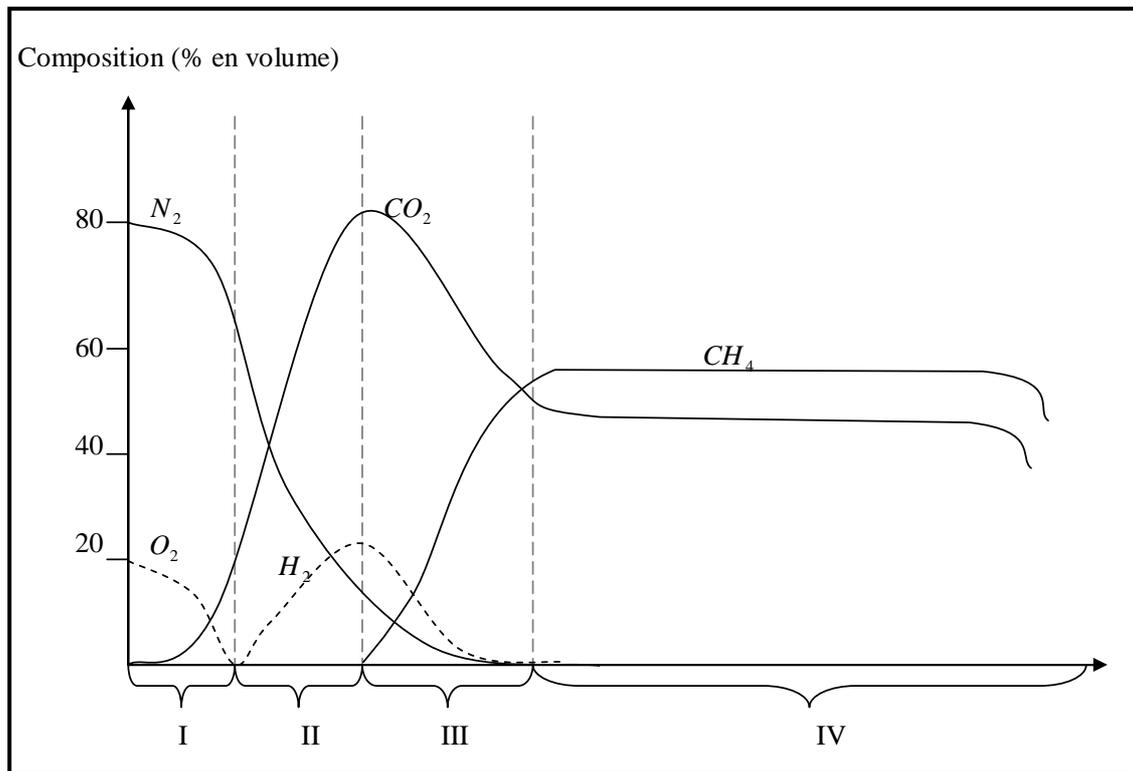


Figure I.2 - Composition du biogaz [8]

Le dioxyde de carbone est produit dès la deuxième étape, alors que le méthane n'apparaît qu'à la dernière. Sur les exploitations, les évolutions sont très rapides en conditions anaérobies et le méthane est naissant à partir de quelques mois de la mise en place de déchets (3 à 12 mois). Les facteurs d'influence de cette production de biogaz ont été identifiés [6]:

- les dimensions de site en effet les processus anaérobiques sont optimaux dès lors que la profondeur des déchets dépasse 5 m ;
- la nature des déchets et richesse en matière dégradables ;
- le degré de compaction.

IV.1.1 Impact immédiat et local

Les véritables risques liés à l'émission de biogaz sont toutefois dus à ses deux constituants principaux, le méthane (CH_4) et le gaz carbonique (CO_2), le premier explosif, le second asphyxiant. Les problèmes de sécurité liés aux émissions de gaz sont donc fondamentalement de deux types [7]:

- les risques d'asphyxie, en raison des concentrations élevées de gaz carbonique;
- le danger d'incendie et/ou d'explosion, lié au méthane.

Le gaz produit dans les profondeurs de la décharge créera une surpression par rapport à l'atmosphère dans le corps de celle-ci. Il aura donc tendance à migrer vers l'extérieur de la

décharge en suivant des voies préférentielles, plus perméables. En cas de mauvaise imperméabilisation des parois ou d'une rupture de celle-ci, il y a risque de migration de gaz dans le sous-sol environnant la décharge. Les conséquences de telles migrations sont [7]:

- odeurs pestilentielles dans le voisinage;
- mort de la végétation environnante par asphyxie ;
- accumulation dans des enceintes fermées environnantes (caves, conduites,...), et donc danger d'asphyxie et d'explosion pour les personnes habitant le voisinage.

Les composants traces peuvent eux être toxiques, même à des concentrations très basses. En outre ils sont souvent malodorants et par là responsables de l'odeur désagréable de la décharge. La concentration de certains éléments traces peut atteindre voire dépasser la valeur moyenne d'exposition. Ils peuvent donc constituer un danger pour la santé du personnel de la décharge [7].

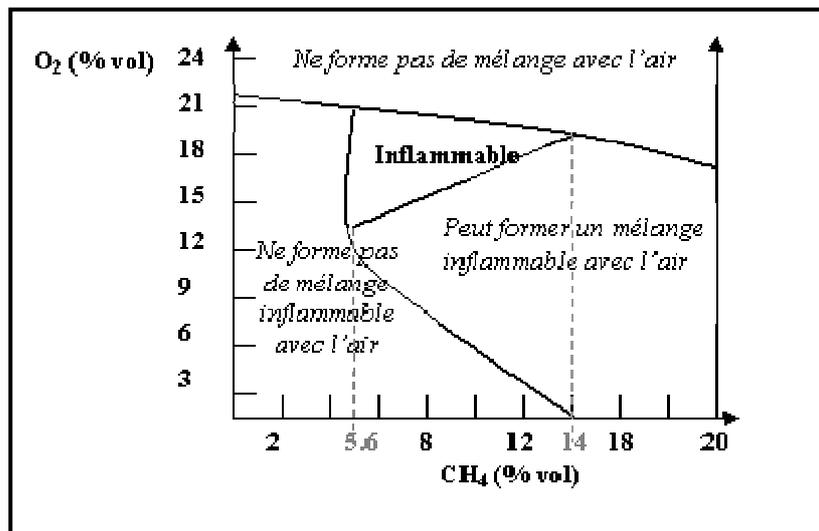


Figure I.3 - Relation entre la composition et l'inflammabilité d'un mélange de méthane et d'air [8]

IV.1.2 Impact retardé et global

Le problème environnemental à un niveau plus global des émissions de biogaz devient toujours plus préoccupant. D'une part, les mesures les plus récentes montrent que la concentration de méthane dans l'atmosphère a fortement crû ces dernières années et on lui attribue un rôle important dans l'effet de serre et les changements climatiques qui y sont liés. D'autre part, nous nous inquiétons de la pollution atmosphérique à l'échelle locale causée par les composés traces du biogaz [7].

Le méthane (CH₄) et le gaz carbonique (CO₂) sont des gaz à effet de serre. On estime qu'au cours des trois derniers siècles la concentration du méthane dans l'atmosphère a augmenté

d'environ 0.7 ppm à 1.7 ppm. Dans les dernières décennies, l'augmentation a été particulièrement rapide, de quelque 1% par an. Cette tendance est sans aucun doute due à l'accroissement de l'activité industrielle [7].

le pouvoir d'effet de serre du méthane est de 21 fois celui du même poids de gaz carbonique ; comme, à quantité égale de carbone, le gaz carbonique pèse beaucoup plus lourd que le méthane (44 g pour une mole de gaz carbonique contre 16 g pour une mole de méthane), une même masse de carbone sous la forme de méthane a un pouvoir d'effet de serre égal à environ 7,6 fois celui du carbone sous la forme de gaz carbonique (car $21 \cdot 16/44 = 7,6$) [9].

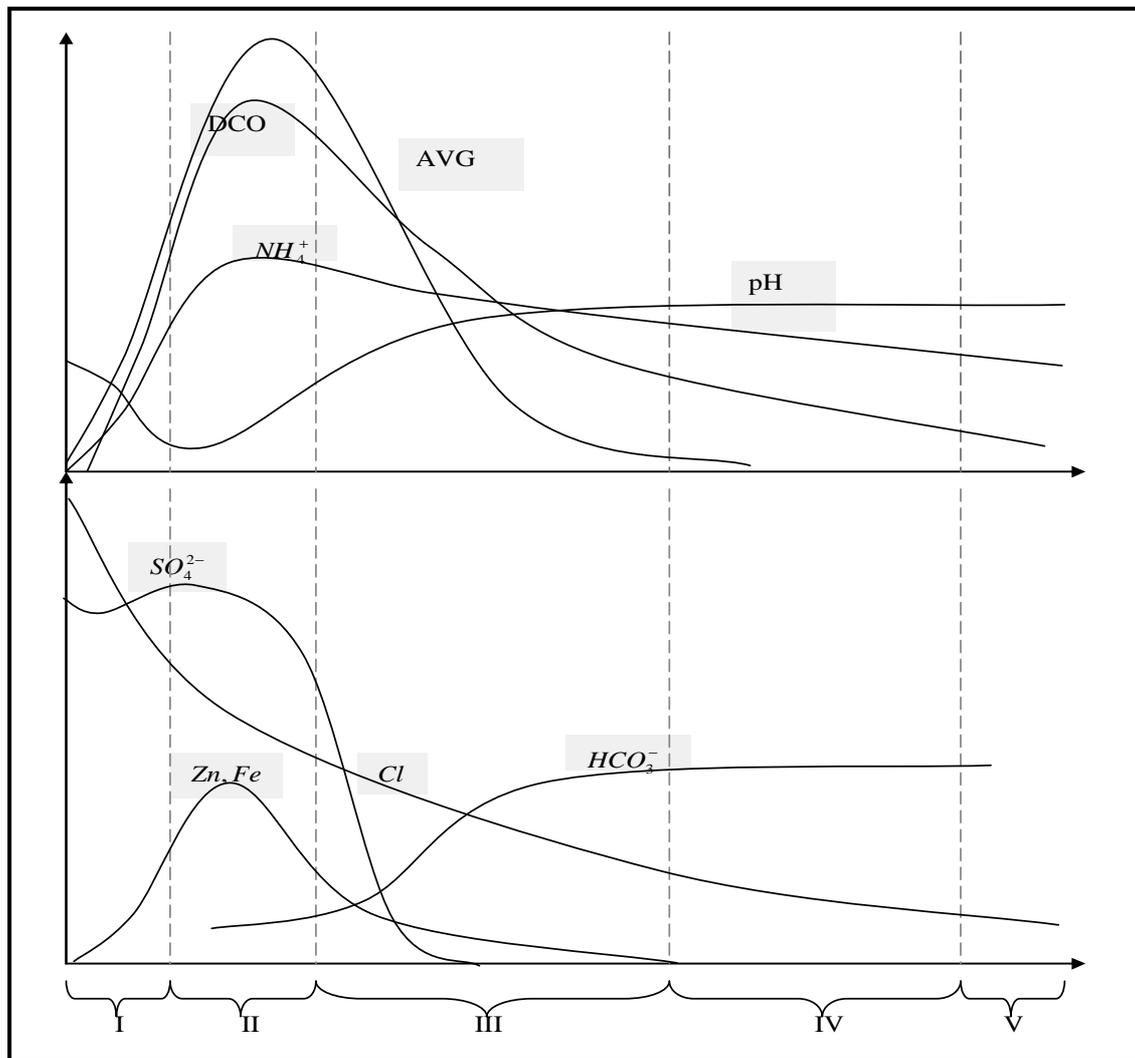
Notons que les émissions de méthane, générées par les décharges dans le monde, ont été évaluées à 40 Million de Tonnes en 1 995 [6].

IV.2 Impacts sur les eaux souterraines

Les eaux limitrophes à la décharge peuvent être contaminées par des émissions liquides appelées lixiviats. En effet, les lixiviats résultent de la percolation à travers le massif de déchets de l'eau contenue dans les déchets et de l'eau apportée par les précipitations. Les mécanismes de formation des lixiviats, de nature biologique et physico-chimique, sont très complexes. Les déchets enfouis, notamment la fraction organique, servent de substrat aux micro-organismes dont l'activité a des effets directs et multiples sur les conditions physico-chimiques du milieu (pH, potentiel rédox,...) ou peuvent déclencher des phénomènes physico-chimiques secondaires. En retour, ces mécanismes biologiques se trouvent sous la dépendance des paramètres physico-chimiques du milieu [7].

La genèse des lixiviats par le mécanisme de nature biologique implique simultanément des processus aérobie et anaérobie. Les mécanismes de nature physico-chimiques font appel à deux réactions principales : la dissolution et la solubilisation (en milieu acide) ou la précipitation (en présence des sulfates et des carbonates).

Les paramètres mesuré dans le lixiviat lors de la biodégradation des déchets évoluent au cours du temps. Si nous observons une variabilité importante d'une décharge à une autre, des tendances peuvent néanmoins être dégagées tel que schématisé ci-dessous.



I-Phase d'Hydrolyse (2 semaines) ; II-Phase d'Acidogenèse (2 mois); III-Phase d'Acétogenèse (2ans) ;
 VI-Phase de Méthanogenèse (10ans) ; V-Phase de Maturation (>10 ans).

Figure I.4 - Evolution idéalisée, en fonction du temps, des effluents liquides d'une décharge d'ordures ménagères [8]

Chapitre II

Procédés de Traitement des Déchets Solides Urbains

La valorisation des déchets sert à la protection de l'environnement puisqu'elle tend à diminuer les quantités de déchets à stocker, qui sont une source de pollution de l'air, des sols, ainsi que des eaux souterraines. Elle permet en même temps de réduire l'exploitation des matières premières.

Nous distinguons deux grands types de procédés de valorisation des déchets solides urbains :

- Les procédés de valorisation énergétique et
- Les procédés de valorisation matérielle.

1. Les procédés de valorisation énergétique : ces procédés ont pour but la récupération du potentiel énergétique contenu dans les déchets. Ils peuvent être classés en deux groupes : les procédés de traitement thermique et les procédés de traitement biologique.

1.1. Les procédés de traitement thermique

- **Le procédé d'incinération** : il est basé sur la combustion des déchets en utilisant l'air ambiant comme gaz comburant.
- **Le procédé d'oxycombustion** : C'est un procédé d'incinération basé sur l'utilisation d'air enrichi ($O_2 > 21\%$), ou bien d'oxygène pur en tant que gaz comburant dans le processus de combustion du déchet. Ceci permet de diminuer le volume des fumées générées lors de la combustion. De plus, l'augmentation de la pression partielle en oxygène du comburant améliore les cinétiques de combustion, permettant alors la combustion de déchets à très faibles teneurs en matière volatiles et difficilement inflammables.
- **Le procédé d'oxydation haute température par plasma** : Le plasma thermique consiste en un milieu gazeux, partiellement ionisé, réducteur ou oxydant, porté à températures élevées allant de 3 000 à 8 000 °C par décharge d'arc appliqué dans un gaz en mouvement, à partir d'une électrode, ou entre deux électrodes [10]. Cette technique de traitement de déchets par torche à plasma, par les températures élevées mises en oeuvre, et la forte réactivité thermochimique du gaz plasmagène utilisé en atmosphère oxydante, permet la destruction thermique poussée de molécules organiques particulièrement récalcitrantes, telles que les composés organochlorés.

L'avantage du procédé réside dans le fait que les temps de traitement sont courts et les taux de destruction thermique obtenus sont élevés ;

- **Le procédé de pyrolyse** : également désignée par thermolyse, consiste en un traitement thermique endothermique, à température modérée, au cours duquel la fraction organique du déchet est décomposée, en l'absence d'air ou en atmosphère réductrice ($O_2 < 2\%$), pour fournir une phase gazeuse et une phase solide [10].



La phase solide obtenue est le coke, essentiellement constituée de carbone fixe. La phase gazeuse est un mélange de deux types de gaz :

- les gaz condensables : huiles, goudrons, aromatiques et H_2O ;

- les gaz incondensables : CO, H_2, CH_4, CO_2 et N_2 .

- **Le procédé de gazéification** : La gazéification d'un déchet résulte d'un processus thermochimique en deux étapes : une étape de pyrolyse suivie d'une étape de gazéification. Ces deux étapes peuvent être réalisées dans la même enceinte thermique ou dans deux réacteurs séparés. L'étape de pyrolyse produit des matières volatiles sous forme d'hydrocarbures gazeux (les gaz condensables tels que le goudron) et du coke. Les hydrocarbures et le carbone fixe sont convertis en gaz combustible (CO, H_2), dans la seconde étape, dite de gazéification, par réactions thermochimiques, en présence d'un agent gazeux de gazéification (air, O_2 ou H_2O).

Les procédés actuels de gazéification des déchets visent essentiellement, non pas la production de gaz de synthèse, considérés comme matière première pour l'industrie chimique, mais la destruction thermique de ces déchets, avec valorisation du contenu énergétique des gaz combustibles produits.

I.2 Le procédé de traitement biologique

- **Le procédé de méthanisation** : c'est un procédé qui consiste à décomposer la fraction organique des déchets solides urbains dans un digesteur en présence des micro-organismes et en absence d'oxygène. Suite à cette décomposition il y a production du biogaz (mélange de gaz carbonique et de méthane) et d'un résidu solide stable appelé "digestat". La méthanisation a un double intérêt. En effet, le biogaz obtenu peut être utilisé comme gaz combustible, et le digestat comme amendement organique.

2. Les procédés de valorisation matérielle : ils ont pour objet la récupération du produit ou de la matière à partir des déchets. Nous pouvons citer à titre d'exemple :

- **Le procédé de récupération des déchets plastiques** : les matières sont broyées, lavées et séparées selon chaque type puis régénérées en granulés qui seront utilisés comme matières premières dans l'industrie plastique.
- **Le procédé de recyclage du papier-carton** : le vieux papier est nettoyé pour enlever les couleurs et les salissures ainsi que les agrafes et autres objets étrangers. Lors de la fabrication du papier recyclé 50 % en moyenne de la matière première utilisée est composée de vieux papier. Le vieux papier est commercialisé et possède ses propres cotations sur le marché mondial [11].
- **Le procédé de recyclage du verre** : dans l'industrie de verre, les matières de base, le sable, la soude et la chaux consomment une grande quantité d'énergie lors de la fusion. En revanche, lors de la fusion du verre récupéré, les besoins en énergie sont moindres. Le verre est broyé et séparés des morceaux de métaux, puis les corps étrangers sont triés et enlevés. Le verre récupéré est alors rajouté à la matière première pour fusion. De nouveaux produits peuvent être ainsi produits.
- **Le procédé de compostage** : la fraction organique des déchets solides urbains est propice à une valorisation matière et ce par le biais du procédé de compostage. C'est un procédé de traitement biologique qui consiste à transformer la matière organique en présence d'oxygène et de micro-organismes en un produit stable et hygiénique appelé "compost". Le compost peut être utilisé comme amendement organique des sols pauvres en éléments nutritifs.

Dans ce chapitre nous proposons d'une façon détaillée les principes et les technologies associés aux procédés de valorisation des déchets solides urbains les plus utilisés notamment : l'incinération, le compostage et la méthanisation.

I Combustion

I.1 Processus d'inflammation

Lors du chauffage d'un déchets solides dans une enceinte de traitement, l'eau incluse au déchet est tout d'abord vaporisée, puis ses matières volatiles constitutives se distillent dès 200 à 300 °C, en phase gazeuse. Ces matières volatiles sont essentiellement des hydrocarbures gazeux.

Dans l'hypothèse où l'atmosphère de traitement est oxydante, ces matières volatiles s'enflamment spontanément en phase gazeuse, après un délai désigné par "délai d'inflammation". Plus la teneur en matières volatiles d'un déchet est élevée, plus l'inflammation de la matière sera rapide.

Le délai d'inflammation d'un déchet solide, initialement à la température T_0 , peut être évalué en estimant le temps mis par la surface A de ce déchet pour atteindre la température critique d'ignition T_{ig} , lorsqu'il est soumis à un flux calorifique Φ_0 . A cette température T_{ig} , les premiers gaz combustibles émis s'enflamment en atmosphère comburante, l'énergie calorifique produite maintenant un processus de dégradation thermique du solide et donc une génération de gaz combustibles par pyrolyse, démarrant ainsi le processus de combustion entretenue du solide, jusqu'à la combustion de son carbone fixe [12].

La température d'inflammation T_{ig} d'un déchet solide varie en sens inverse de son taux de matières volatiles. Dans le cas des produits humides, cette phase de combustion est précédée par l'évaporation de l'eau incluse, retardant ainsi l'inflammation du composé d'un délai t_{ig} , aisément calculable.

Ainsi, pour un matériau de T_{ig} donné, le délai d'inflammation t_{ig} pourra être calculé par la formule suivante [12]:

$$t_{ig} = \frac{\pi}{4} (\rho C_p \lambda) (T_{ig} - T_0)^2 \frac{1}{(\alpha * \Phi_0 / A)^2} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

ρ Masse volumique du matériau (Kg/m^3)

C_p Chaleur spécifique du matériau (KJ/Kg)

λ Conductivité thermique du matériau ($KW/m.K$)

Φ_0/A Densité de flux thermique incident par unité de surface du matériau (irradiance) (KW/m^2)

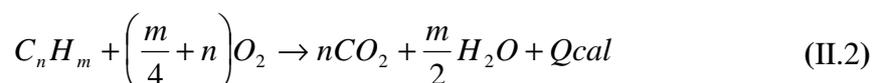
α Coefficient moyen d'absorption du matériau

Notons l'existence d'une irradiance critique pour laquelle ce délai devient infiniment long, c'est-à-dire pour lequel l'inflammation ne peut pas avoir lieu dans la pratique compte tenu des déperditions thermiques.

I.2 Principe de la combustion

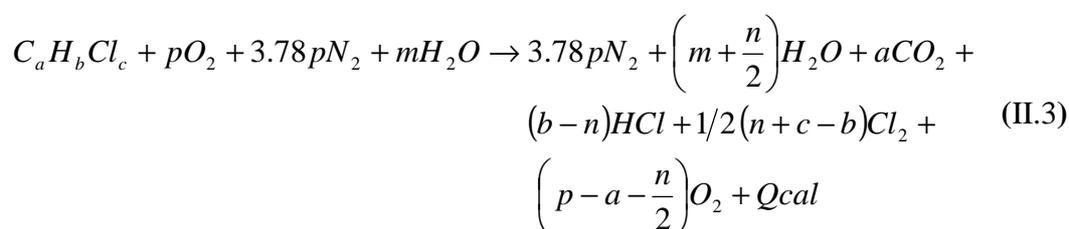
I.2.1 Approche chimique

La combustion désigne la réaction exothermique d'oxydation complète en phase gazeuse des composés élémentaires du déchet avec l'air préchauffé injecté dans le four.



Les molécules organiques constituent essentiellement la part combustible des déchets solides urbains. Elles se composent du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène et dans une moindre mesure de l'azote, du chlore, du sodium, du potassium et du soufre. Mais s'y trouvent également des traces de la plupart des éléments non radioactifs du tableau de Mendéléév, soit dans la matière organique, soit dans la matière inerte. La combustion s'effectue de façon étagée au fur et à mesure de l'échauffement de la matière qui se décompose progressivement. L'humidité contenue dans le déchet s'élimine par évaporation. Puis les chaînes organiques macromoléculaires se rompent en formant des molécules plus petites. Certaines sont des gaz inertes ou combustibles qui s'échappent du déchet en décomposition. Ces derniers ($CO, H_2, CH_4, SO_2, \dots$) s'oxydent immédiatement au contact de l'air et constituent des flammes. Celles-ci permettent de poursuivre l'échauffement des déchets et des intermédiaires formés. De nouvelles molécules plus courtes se forment [13].

Les composés chlorés, comme les matières plastiques, libèrent des atomes de chlore qui réagissent pour former de l'acide chlorhydrique gazeux. Il en est de même pour le fluor qui génère de l'acide fluorhydrique en proportion nettement inférieure [14].

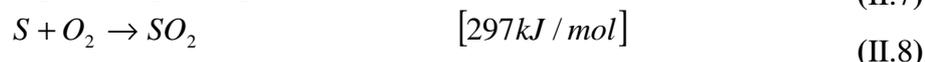
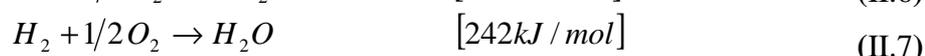
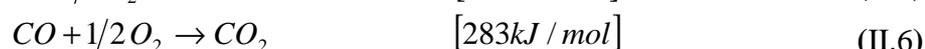
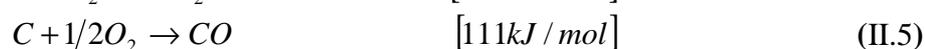
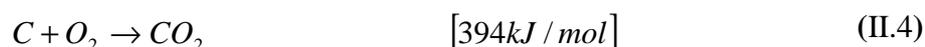


Les métaux lourds (plomb, zinc, ...) s'oxydent et sont entraînés en partie à l'état gazeux ou fixés sur les poussières formées et dénommées "cendres volantes" avec les fumées. Une autre partie demeure dans la matière en cours d'oxydation qui évolue progressivement vers l'état de mâchefer.

De la masse incandescente des déchets, les chaînes organiques se réduisent progressivement pour arriver au carbone qui finit par s'oxyder. Nous obtenons en sortie des mâchefers qui représentent en moyenne 25% de la matière entrante. Il reste néanmoins des composés organiques non dégradés et non éliminés désignés par le terme d'imbrûlés.

Les réactions de combustion sont donc multiples et extrêmement variées, nous ne citons que les principales dont l'aspect exothermique est prépondérant dans la formation et l'entretien de la flamme [13]:

Il y a à noter que la formation de monoxyde de carbone qui est un gaz très toxique est due à un déficit d'oxygène, elle peut être évitée par un dosage contrôlé de l'air de combustion.



A haute température, l'azote issu des déchets ou l'azote apporté par l'air ambiant est oxydé par l'oxygène disponible pour former des oxydes d'azote NO , NO_2 et N_2O désignés sous le terme générique NO_x . Cette dernière réaction dépend en grande partie de la température et de l'excès d'air [13, 14].



I.2.2 Approche thermodynamique

A l'échelle industrielle, une combustion s'opère dans un réacteur ouvert, où se superposent de nombreux échanges thermiques. L'ensemble de ces transferts de chaleur doit conduire à un équilibre autoentretenu répondant aux conditions optimales choisies pour obtenir une efficacité de destruction la plus grande possible. Cet équilibre est régi par certains paramètres dont les principaux sont décrits ci-après :

a) Caractéristiques physiques de déchets

La taille des particules solides a une influence sur la vitesse de combustion. La combustion d'un solide est un processus répétitif comprenant les phases suivantes [14]:

- 1- Gazéification des matières organiques ;
- 2- Combustion des matières organiques ;
- 3- Combustion des structures carbonées résiduelles.

Une nouvelle couche de solide est de nouveau remise en jeu dans le réacteur et ainsi de suite, le processus (1,2, 3) se répète jusqu'à la combustion complète de la particule solide. Ainsi,

plus la particule solide est grosse, plus le temps nécessaire à la complète combustion sera long.

b) Caractéristiques chimiques de déchets

▪ Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique d'un combustible donne la quantité de chaleur dégagée par ce combustible lors de sa combustion. La connaissance de cette caractéristique est un élément important de la conduite d'un incinérateur. A titre d'exemple les ordres de grandeur des PCI des combustibles et des déchets sont [13, 15]:

Tableau II.1 - Pouvoir Calorifique Inférieur de certains combustibles et déchets [13]

Types de combustibles	PCI (KJ/Kg)
Gaz naturel	46 000
Pétrole	42 000
Charbon	33 000
Bois	19 000
Huiles usagées	38 000
Solvants résiduaires	27 000

Les ordures ménagères sont constituées principalement de divers dérivés de la cellulose : papiers, cartons, bois, végétaux, tissus et dont le PCI s'élève entre 12 540 et 14 630 KJ/Kg [15]. Le PCI des ordures ménagères est toutefois toujours inférieur à ces chiffres car les dérivés cellulosiques contiennent une part importante d'eau et sont accompagnés de matières non combustibles.

Dans la pratique, il est considéré que les produits de PCI égale à 14 630 KJ/Kg sont autocombustibles, c'est-à-dire qu'ils ne nécessitent pas l'appoint de combustible pour être détruits.

Actuellement, avec un PCI de l'ordre de 6 200 à 7 106 KJ/Kg, les ordures ménagères peuvent bien être considérées comme un combustible mais à faible pouvoir calorifique [15].

Tableau II.2 – Pouvoir calorifique de quelques types de déchets [13]

Types de déchets	PCI (KJ/Kg)
Carton	9 516
Papier	10 032
Déchets putrescibles	4 180
Plastiques	22 990

- **Humidité**

La teneur en eau est très variable ; elle se situe en général entre 25 et 60 % de la masse des déchets bruts, selon leur origine, les saisons et l'état atmosphérique du moment.

L'humidité doit être éliminée lors de la phase de séchage préalable à la combustion. Cette évaporation nécessite un apport de chaleur prélevée sur le pouvoir calorifique du déchet. Ce paramètre modifie sensiblement les équilibres chimiques relatifs au processus de combustion. La phase de séchage permet d'arriver à la température d'inflammation, elle est plus au moins de longue durée suivant le rayonnement de la flamme, ainsi que le brassage et l'aération des ordures [16].

- **Air de combustion**

La fraction combustible des déchets solides urbains est composée grossièrement de carbone et d'hydrogène. Ces deux éléments principaux confèrent aux déchets leurs caractéristiques thermiques à savoir : débit d'air nécessaire à la combustion, débit de fumées et pouvoir calorifique.

L'oxygène nécessaire à la combustion est apporté par l'air. En effet, la composition d'un combustible quelconque détermine la quantité stoechiométrique d'oxygène nécessaire pour sa combustion. La formule suivante donne la relation entre le volume d'air comburivore et la composition chimique du combustible [13]:

$$V_a = 0.089C + 0.266H + 0.033S - 0.033O \quad (\text{II.10})$$

Où :

V_a S'exprime en Nm^3/Kg de combustible ;

C, H, S et O étant les teneurs en carbone, hydrogène, soufre et oxygène exprimées en pourcentage de la masse de combustible.

Mais en pratique, la combustion des déchets solides urbains ne s'effectue jamais à la stoechiométrie, un important excès d'air doit toujours être utilisé. Cet excès d'air peut atteindre parfois 100% pour les installations de récupération de chaleur.

Nous pouvons exprimer le volume d'air de combustion réel par la formule suivante [13] :

$$V_{ac} = V_a \times \left(1 + \frac{e}{100} \right) \quad (\text{II.11})$$

Où

e désigne l'excès d'air exprimé en pourcentage.

D'autres formules approchées ont été développées, elles permettent, en effet, de relier le pouvoir calorifique inférieure à son pouvoir comburivore. Véron a proposé la formule

$V_a = PCI/1000$. Selon d'autres auteurs, cette relation est bonne pour des pouvoirs calorifiques inférieurs élevés, mais demeure peu précise pour des déchets ménagers à humidité importante et au pouvoir calorifique inférieur modeste [13].

- **Conditions et nécessités d'emploi de l'excès d'air**

Les études réalisées montrent que les résidus de combustion (cendres et mâchefers) ont un point de ramollissement situé entre 1 000 et 1 150°C. Pour cette raison la température des gaz, dans la chambre de combustion, ne doit pas dépasser 900 à 1 000°C. Une température supérieure provoquerait la fusion des cendres, avec des conséquences des dépôts sur les parois pouvant atteindre des épaisseurs très importantes. Outre son rôle dans la combustion, l'excès d'air a donc pour objet de limiter la température du foyer [13].

- **Temps de séjour**

Le temps de séjour est la durée pendant laquelle les molécules sont exposées aux hautes températures produites dans la chambre de combustion. Il doit être suffisamment long pour assurer le complet déroulement des différentes réactions [14].

Le temps de séjour sera d'autant plus court que les températures sont élevées à condition que tous les autres facteurs restent constants.

Si des temps de séjour de l'ordre des secondes sont nécessaires pour des liquides, le temps de séjour des solides peut atteindre plusieurs heures (2 à 3 heures). La combustion des déchets solides s'opère généralement dans un incinérateur multichambre. Dans une première sont volatilisés les composants organiques et dans une seconde chambre de post combustion, les produits gazeux terminent leur combustion. La température de la chambre de post combustion peut être maintenue par l'appoint de combustible [14].

- **Turbulence**

Le rendement de combustion dépend également de l'intimité du mélange des gaz combustibles et du comburant. Ce mélange est assuré par la turbulence du flux gazeux traversant la chambre de combustion. Ce paramètre dépend essentiellement de la conception des installations de combustion. Ces dernières doivent être dimensionnées pour que les flux gazeux, aux conditions nominales de fonctionnement, soient toujours en régime turbulent ($Re > 2\,500$). En pratique, les gaz de combustion doivent avoir une vitesse allant de 3 à 5 m/s [14].

La turbulence peut être augmentée par le positionnement des brûleurs et des entrées d'air de combustion [14].

II Description et performance de l'installation d'incinération

Une usine d'incinération comporte cinq unités [17]:

- 1- la fosse de stockage des déchets ;
- 2- le four ;
- 3- le système de refroidissement des gaz et de récupération d'énergie;
- 4 - le système de traitement des fumées ;
- 5- le dispositif de récupération des sous-produits de l'incinération et d'évacuation des fumées.

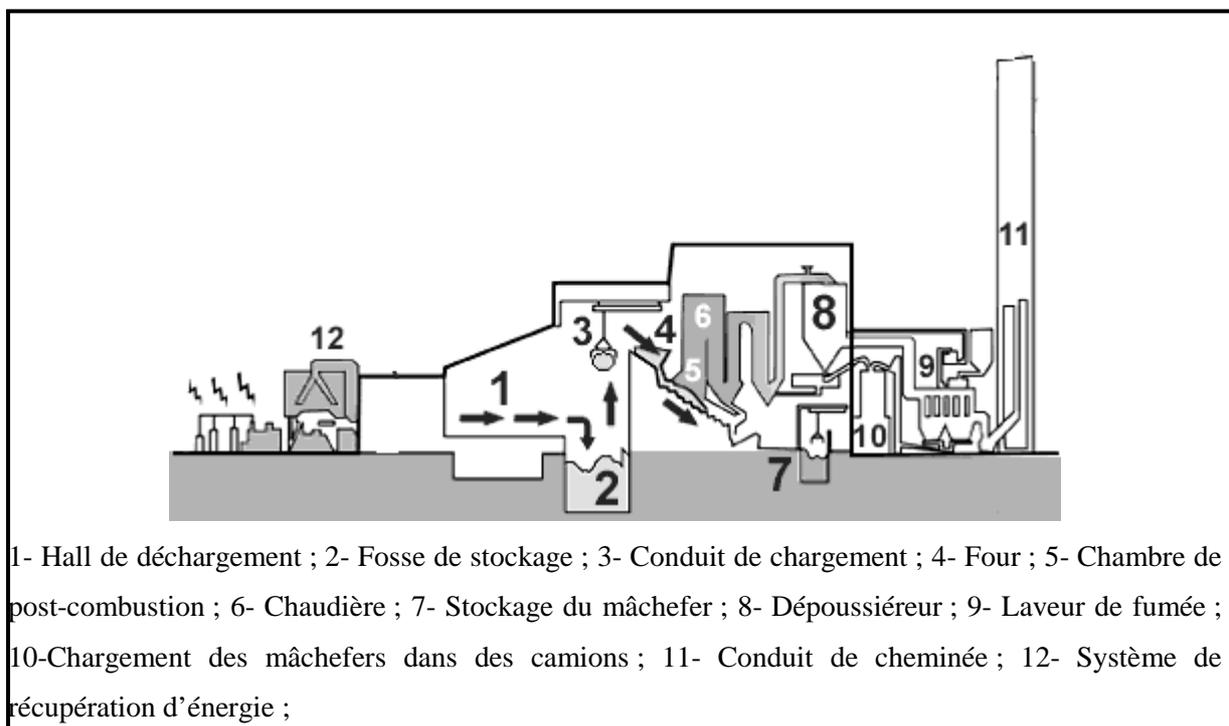


Figure II.1 – Schéma de fonctionnement d'une unité d'incinération des déchets ménagers [17]

La mise en oeuvre d'un processus de traitement thermique des déchets telle que l'incinération nécessite, la plupart du temps, des opérations de préparation et/ou de mise en forme préalables des déchets. Celles-ci peuvent être décomposées en plusieurs opérations élémentaires [10].

▪ Réception et stockage des déchets

Les déchets sont, en général déchargés sur un quai par camions puis pesés, identifiés, analysés et entreposés sur une aire de stockage ou en fosse ventilée, équipée ou non de dispositifs d'abattage des poussières et des vapeurs générées lors du déchargement.

▪ Préparation des déchets

Les déchets nécessitent parfois un prétraitement avant leur introduction dans le four.

Ce prétraitement vise à en éliminer les éléments incombustibles massifs (matériaux inertes ou métalliques), par séparation ainsi que les objets ferreux, par extraction magnétique. Ce type de séparation permet, par ailleurs, la valorisation des matières de certains constituants des déchets bruts. Pour le cas des ferrailles, celles-ci peuvent être également extraites, de la même manière, après incinération.

Un ajustement granulométrique par broyage des déchets est souvent indispensable, et ce, en fonction du procédé de traitement thermique utilisé.

Des opérations de homogénéisation peuvent être également pratiquées, afin de minimiser les fluctuations de composition des déchets. Leur pouvoir calorifique peut également être ajusté par déshydratation préalable du déchet brut à traiter.

II.1 Fosse de stockage des déchets

La fosse où les bennes déversent les ordures doit être couverte pour éviter l'envol des détritiques : l'aire de déchargement doit être close et en dépression. L'air aspiré est utilisé comme comburant et évite la propagation des odeurs et des poussières. La fosse doit également être étanche et doit pouvoir accepter un volume de déchets équivalent de deux à trois jours de collecte [17].

II.2 Four

Le four est la partie où les déchets sont séchés et où leur fraction combustible est oxydée. Un four performant est conçu pour que les déchets soient bien répartis sur le support de combustion (la grille) et correctement brassés. Ce brassage a pour objet de mettre le déchet en contact avec l'air chaud issu du four "air primaire" afin de le sécher, de distiller les matières volatiles et de décomposer le produit en molécules simples qui finissent par atteindre leur température d'inflammation [17,13].

La grille comporte une charge pondérale généralement comprise entre 250 et 450 Kg d'ordures ménagères par m^2 . Les gaz produits par la combustion se dégagent au dessus du foyer pour passer dans une chambre où ils se trouvent mélangés à une arrivée d'air préchauffé "air secondaire" qui parachève la combustion : c'est la chambre de postcombustion [13].

Les gaz de combustion doivent être portés pendant au moins deux secondes à une température de 850 °C en présence d'au moins 6 % d'oxygène afin d'assurer au mieux la destruction des dioxines présentes.

La qualité de la combustion est donc liée principalement aux quatre paramètres cités auparavant [13, 17]:

- une teneur en oxygène suffisante pour assurer une bonne combustion ;
- une température suffisante (entre 900 et 1000 °C) ;
- une turbulence suffisante tout en évitant les envolées de poussières qui constituent des cendres volantes ;
- un temps de séjour des déchets approprié.

En fin de grille de combustion, nous trouvons le mâchefer à l'état d'incandescent (400 °C), il est recueilli alors dans l'extracteur qui comporte une garde d'eau qui le refroidit. Les mâchefers se composent essentiellement de SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 [17].

II.3 Système de refroidissement des gaz et de récupération d'énergie

A la sortie de la chambre de combustion, les gaz atteignent des températures très élevées (1 000 °C). Il est nécessaire de les refroidir à des températures inférieures à 250 °C avant de les traiter car les systèmes de dépoussiérage ne supportent pas les hautes températures. Cela permet également de récupérer par condensation la plupart des métaux lourds vaporisés dans les gaz ou adsorbés sur les particules les plus fines des fumées. Il existe actuellement trois systèmes principaux de refroidissement [17, 16]:

- 1- La dilution par l'air qui nécessite d'importantes installations car il faut un volume d'air à 15 °C trois ou quatre fois plus important que le volume de gaz à refroidir ;
- 2- L'injection d'eau qui consiste à pulvériser de l'eau pour refroidir les gaz. C'est un procédé assez coûteux à l'exploitation car il consomme de l'eau.
- 3- L'échange thermique utilisé également dans les usines à valorisation énergétique. Cela permet une production d'eau surchauffée ou de vapeur.

II.3.1 Valorisation énergétique

La chaleur dégagée par la combustion des déchets est récupérée sous forme de vapeur surchauffée dans un ensemble four-chaudière, constitué d'un circuit d'eau placé en sortie de foyer ou intégré dans celui-ci. Cette vapeur est produite par échanges thermiques radiatifs (foyer/tubes d'eau) et/ou convectifs (fumées/tubes d'eau). L'alimentation en eau de la chaudière passe par un échangeur secondaire (économiseur), afin de préchauffer l'eau avant son introduction dans le ballon. Cela permet une récupération thermique plus poussée de l'énergie disponible dans les fumées. Un réchauffeur d'air est quelquefois placé en aval du circuit des fumées, afin de préchauffer l'air de combustion, améliorant le rendement thermique global de récupération et permettant également la combustion de déchets à faibles pouvoirs calorifiques et la réduction de consommation en combustibles d'appoint.

Le rendement η_c de la chaudière peut être estimé par [10]:

$$\eta_c = D_v (C_{vs} - C_{eau}) / D_m \times PCI \quad (\text{II.12})$$

Avec :

D_v Débit de vapeur (Kg/h) ;

C_{vs} Chaleur spécifique de la vapeur surchauffée produite, fonction de son niveau de température et de pression (KJ/Kg) ;

C_{eau} Chaleur spécifique de l'eau d'alimentation ;

D_m débit massique des déchets traités (Kg/h) ;

PCI pouvoir calorifique inférieur des déchets traités (KJ/Kg).

La vapeur produite est typiquement de la vapeur 30-45 bars, surchauffée à 320-400 °C.

Cette vapeur surchauffée produite peut être valorisée par trois voies principales [10,17]:

a) Production de la chaleur

C'est le cas le plus simple, la vapeur servant à véhiculer la chaleur extraite des fumées jusqu'au point d'utilisation (chauffages centralisés ou industries).

Les seules pertes énergétiques à envisager sont les pertes en réseau, d'autant plus faibles que la longueur de celui-ci sera plus courte et que le plus grand soin aura été porté à son isolation thermique.

b) Production d'électricité

La vapeur surchauffée est amenée jusqu'à une turbine à aubes dans laquelle elle se détend (0,2 bar en sortie) en produisant un travail moteur qui est transmis à l'arbre machine. Celui-ci, à son tour entraîne un alternateur qui produit l'énergie électrique. Des rendements de conversion atteignant 35 % peuvent être atteints. La vapeur détendue quitte la turbine et entre dans le condenseur où elle redevient liquide. L'eau ainsi condensée est recyclée, elle circule donc dans un circuit fermé. Pour assurer la régularité de la fourniture de l'électricité, la combustion doit être bien régulée et bien surveillée pour éviter toute fluctuation.

c) Cogénération ou production mixte chaleur/électricité

Lorsque nous disposons de vapeur basse pression avec un excédent suffisant par rapport aux besoins du réseau de chauffage, cet excédent peut être détendu dans une turbine et fournir au moins les besoins de l'usine en électricité.

II.3.2 Bilan énergétique

La quantité d'énergie à récupérer est le produit de la masse des déchets par son pouvoir calorifique et par le rendement thermique de l'ensemble four-chaudière [16]:

$$Q = M.PCI.\eta \quad (\text{II.13})$$

En retranchant de cette valeur la consommation propre de l'usine nous obtenons la quantité d'énergie nette susceptible d'être utilisée.

II.4 Système de traitement des fumées

Les polluants contenus dans les fumées de combustion se présentent sous la forme de solides particulaires (poussières) ou sous forme gazeuse (HCl , SO_x , $NO_x...$). Il convient donc, après récupération thermique, d'effectuer des opérations de dépoussiérage et de neutralisation des fumées, avant leur rejet à l'atmosphère [10].

II.4.1. Système de dépoussiérage

Quatre types de dépoussiéreurs existent : mécaniques, humides, à couches filtrantes et électrostatiques [10].

a. Dépoussiéreurs mécaniques

Ces dispositifs utilisent les forces d'inertie et gravitaire pour la séparation gaz/solide, ils regroupent les cyclones et les chambres de sédimentation.

Les dispositifs cycloniques offrent une efficacité de séparation de 95 % pour des particules de 150 à 200 μm . Leur efficacité peut être améliorée par l'emploi de multicyclones, constitués d'une batterie de cyclones de plus petit diamètre. Le rendement de captation peut alors atteindre 95 % pour des particules de 20 à 30 μm . Cependant, ces équipements ne permettent pas la séparation de poussières de diamètres inférieurs à 5 à 10 μm . Ils laissent passer l'essentiel des métaux lourds condensés sur les particules les plus fines [10, 13].

b. Dépoussiéreurs humides

Ces dispositifs, appelés également "laveurs Venturi", utilisent une pulvérisation d'eau, à contre courant des fumées chargées, au col d'un conduit Venturi où les gouttelettes venant capter les poussières. Ils ont une efficacité de 95 % pour des particules de 3 μm et pour une perte de charge au col de 15 mbar, mais ne permettent pas la captation de particules sub-microniques. Leur efficacité de captation croît avec l'augmentation de la perte de charge, ce même rendement de 95 % étant obtenu pour des particules de 1 μm , pour une perte de charge de 50 mbar. Ainsi, les laveurs Venturi ne permettent de capter les particules sub-microniques qu'au détriment d'une perte de charge élevée.

Ces dispositifs sont simples du point de vue de leur construction et permettent de traiter des débits atteignant 200 000 Nm^3/h [10, 16].

c. Dépoussiéreurs à couches filtrantes

Ces dispositifs, également désignés par "filtre à manche", utilisent un média filtrant (tissu ou fibres) en poche, pour effectuer la séparation solide/gaz.

Ces filtres sont décolmatables par injection séquentielle d'air comprimé, à contre-courant. Leur température de fonctionnement doit être limitée à 125 °C ou à 250 °C, en fonction de la nature du média filtrant utilisé. La perte de charge associée à ce type de filtre est de l'ordre de 10 à 20 *mbar*. Ils permettent des efficacités de captation de 95 % pour des particules de 0,1 μm . Les performances des filtres à manche autorisent des teneurs, après dépoussiérage, de l'ordre de 3 à 5 mg/Nm^3 [17, 10].

d. Dépoussiéreurs électrostatiques

Désignés également par "électrofiltres", ils permettent la séparation gaz/solides dans les fumées par attraction électrostatique des particules chargées par des électrodes émissives puis collectées par des électrodes réceptrices (plaques). La perte de charge associée à ce type de filtre est relativement faible, de l'ordre de 1 à 3 *mbar*. Une efficacité de captation de 95 % peut être obtenue pour des particules de 4 μm .

Avec les électrofiltres nous pouvons atteindre des valeurs limites en sortie de l'ordre de 10 mg/Nm^3 [10].

II.4.2 Système de neutralisation des fumées

Il est nécessaire de procéder à une neutralisation des fumées une fois que l'opération de dépoussiérage est terminée. La neutralisation des fumées a pour objectif de limiter l'émission des gaz acides, notamment *HCl*, *HF* et *SO₂*.

Plusieurs procédés d'abattage sont actuellement disponibles notamment [10]:

a. Épuration par voie sèche et réactif alcalin

L'épuration des fumées par voie sèche consiste à injecter dans les fumées un réactif (chaux ou bicarbonate de soude), sous forme de solide pulvérulent sec, pour assurer la neutralisation des gaz acides.

b. Épuration par voie semi-humide

Comme dans le cas du procédé sec, le principe du procédé semi-humide consiste à neutraliser les gaz acides par injection de chaux, celle-ci étant, dans ce cas, préalablement mélangée à de

l'eau, pour former un lait de chaux, à une concentration comprise entre 30 et 150 g/l, et pulvérisé dans un réacteur/contacteur [13].

c. Épuration par voie humide

Le procédé s'apparente à un procédé de lavage de gaz, à l'eau additionnée d'un réactif basique (soude, chaux). Une fois les gaz sont dépoussiérés et refroidis jusqu'à une température de 65 °C, ils passent à travers un laveur vertical dans lequel est envoyée la solution de lavage, celle-ci étant recyclée en permanence.

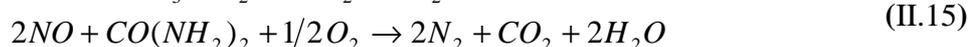
Pour améliorer la captation des gaz acides, deux étages de captation sont mis en place : un premier étage dit "acide" pour la captation de HCl et des métaux lourds par lavage à l'eau, suivi d'un deuxième étage, dit "basique", pour la captation du SO_2 et finition de la captation de HCl par lavage avec une solution de soude [10].

Des soutirages en bas de chaque laveur permettent de récupérer les sels dissouts. Les liqueurs de purge sont transférés dans une fosse puis traités, les produits finaux étant récupérés sous forme de gâteaux de filtration à 40 % en matières sèches, contenant les sels ($CaSO_4$, $CaCl_2$, CaF_2) et les métaux lourds précipités, ainsi qu'un rejet liquide (eau salée).

La captation des oxydes d'azote, des dioxines/furanes (en particulier les *polychlorodibenzoparadioxines (PCDD)* et les *polychlorodibenzofurannes (PCDF)*) et des composés organiques volatils (*COV*) nécessite des techniques spécifiques citons à titre d'exemple [13, 10]:

a. Procédé de réduction sélective non catalytique des NO_x

Ce procédé vise à la dénitrification des fumées par injection d'un agent réducteur (ammoniac ou urée) directement dans le four sans catalyseur. Les réactions de réduction des NO_x en azote moléculaire s'effectuent naturellement entre 850 et 1 100 °C [10]:



La zone d'injection de la solution doit être à une température voisine de 900 °C. Au-delà, le NH_3 se décompose, impliquant une augmentation de la consommation en réactif. En deçà, la cinétique de réduction est trop lente, ce qui entraîne des teneurs élevées en réactif n'ayant pas réagi (fuite d'ammoniac). L'efficacité d'abattage des NO_x , par ce procédé, est généralement comprise entre 40 et 70 %.

b. Procédés d'adsorption sur charbon actif

Les charbons actifs sont des médias solides poreux, à grande surface spécifique interne (500-1 000 m^2/g). Leur fonction principale est de capter les composés organiques tels que les dioxines et les furannes et de finir la captation des métaux lourds : plus particulièrement du mercure.

La consommation spécifique en charbons actifs est de 1 à 2 *Kg/Tonne* de déchets traités, pour atteindre un rejet à moins de 0,1 mg/Nm^3 en mercure, et à moins de 0,1 ng/Nm^3 *Tonne équivalent* en dioxines [10].

c. Procédés de traitement des composés organiques volatiles (COV)

Les composés organiques volatiles résiduels issus d'un procédé de traitement thermique de déchet sont, la plupart du temps, détruits dans un intervalle de température allant de 700 à 800 °C par postcombustion.

II.5 Dispositif de récupération des sous-produits d'incinération et d'évacuation des fumées

Les résidus ultimes de l'incinération des déchets sont essentiellement des produits minéraux solides ou des boues résiduelles toxiques. Il convient de les stabiliser, pour éviter les processus de lixiviation naturelle. En effet, l'absence de la stabilité entraîne le relargage vers le milieu naturel, des polluants contenus dans ces résidus (chlorures, métaux lourds,...) [13].

Un résidu est considéré comme stabilisé quand sa perméabilité et sa fraction lixiviable ont été réduites et quand sa tenue mécanique a été améliorée. Ces résidus stabilisés sont enfin stockés en centre de stockage approprié.

Les résidus d'incinération de déchets solides, comprennent [10]:

- les cendres volantes (cendres sous chaudière, cendres sous filtre) ;
- les résidus de neutralisation des fumées ;
- les gâteaux de filtration des eaux de lavage des fumées.

Deux principales techniques de stabilisation sont actuellement utilisées :

a. Stabilisation/Solidification par liants hydrauliques

Ceux-ci consistent en différents réactifs: liants hydrauliques (chaux, ciments), silicates, argiles,... Les résidus à stabiliser sont incorporés par malaxage dans une formulation spécifique des liants minéraux avec lesquels ils réagissent (transformation de l'eau libre en eau liée, adsorption, réduction, précipitation), puis conditionnés sous forme de blocs solidifiés ou de couches solides, disposés en stockage ultime.

b. Vitrification

La vitrification des résidus solides peut être réalisée dans des dispositifs adjoints à l'unité principale de traitement des déchets et placés en aval des traitements de fumées, ou bien, après transport, dans des unités spécialisées, par regroupement géographique des résidus à traiter [19].

Les principaux procédés de vitrification utilisés sont basés sur la fusion des résidus minéraux (1 400 à 1 800 °C), préalablement introduits dans des poches de fusion, chauffés par torche à plasma, ou bien sont vitrifiés après introduction dans une enceinte haute température, chauffée par brûleurs, permettant la séparation/récupération, par distillation thermique, des chlorures métalliques inclus dans les résidus à traiter ainsi que la fusion de leur fraction minérale. Les minéraux fondus sont enfin refroidis, par air ou par eau, conduisant à la formation d'une matrice vitreuse, désignée par "vitrifiât dense" si les métaux lourds sont majoritairement inclus dans la matrice, ou "allégée", si ces métaux lourds ont été préalablement distillés et récupérés. Ces matériaux sont en général en granulés [13,10].

IV Avantages et inconvénients de l'incinération

IV.1 Avantages

Sur le plan technique, économique et environnemental ce mode de traitement présente les avantages suivants [13,18]:

- la réduction la plus complète et la plus rapide du volume des déchets au moyen d'une minéralisation presque totale des produits incinérés. Dans le cas des déchets solides urbains, l'incinération permet de détruire plus de 70 % de la masse des déchets entrant et en réduit le volume de plus de 90 % ;
- la plus grande partie des sous produits formés (les mâchefers) qui se trouve non éliminée en décharge, est valorisée comme remblai dans les travaux routiers ;
- une faible consommation d'espace notamment par rapport à la mise en décharge ;
- une valorisation énergétique sous forme de chaleur distribuée par un réseau ou sous forme de production d'électricité ;
- la destruction des germes pathogènes (températures supérieure à 800 °C) ;
- la concentration de la majeure partie des métaux lourds dans les résidus d'épuration des fumées d'incinération d'ordures ménagères (les métaux lourds en question sont : le mercure, le plomb, le cuivre, le zinc, le manganèse, le cobalt, le nickel et le bore) [15] ;
- par rapport à la mise en décharge l'incinération présente une image de modernité.

IV.2 Inconvénients

Le coût du traitement des déchets dans une unité d'incinération, conçue d'une manière à ne pas provoquer de nouveaux problèmes de pollution pour l'environnement, est relativement élevé par rapport aux autres filières de traitement. Notons que cet écart tend à s'amenuiser [19].

V Analyse et commentaire

Le tableau suivant présente un état approximatif des pourcentages massiques d'incinération des déchets à travers le monde.

Tableau II.3 - Pourcentages massiques d'incinération des déchets solides urbains dans le monde [18]

Pays	% massique	Pays	% massique
Suisse, Luxembourg	80	Norvège, Allemagne	25
Japon	75	Italie	17
Danemark	65	Etats-Unis	15
Suède, Belgique	60	Royaume Uni, Espagne, Canada	6
France, Pays bas	40	Autres pays	0 à moins de 5
Moyenne mondiale			
moins de 5 %			

Nous pouvons observer que l'incinération est surtout le fait de divers pays européens et du Japon. A l'échelle mondiale, elle ne s'applique qu'à moins de 5% du tonnage total d'ordures ménagères ; la mise en décharge reste la solution la plus courante. La synthèse de ce tableau nous a permis de formuler les constatations suivantes :

- tous les noms de pays qui apparaissent sur la diagonale de la matrice sont riches. Le paramètre de richesse que nous avons pris en considération est le produit national brut (PNB) par habitant. Le tableau suivant illustre davantage la relation entre le pourcentage d'incinération et la richesse :

Tableau II.4 - Relation entre le pourcentage d'incinération et la richesse des pays [18]

Taux d'incinération	PNB par habitant en 2 001 (\$ US)			
	> 30 000	20 000 à 30 000	10 000 à 20 000	<10 000
Plus de 50 %	Suisse, Danemark, Japon, Luxembourg	Suède, Belgique		
20 à 50 %	Norvège	Autriche, Pays bas, Allemagne, France		
10 à 20 %		Etats-Unis, Italie		
< de 10 %		Royaume Uni, Canada	Espagne, Grèce, Corée de Sud	Arabie Saoudite, Brésil, Chine, Corée de Nord, Inde

L'analyse des données enregistrées sur ces derniers tableaux confirme qu'effectivement l'incinération est un signe de modernité et de développement.

- En outre l'incinération avec récupération d'énergie n'est pas le fait des pays pauvres en ressources énergétiques seulement tel que le Japon et le Danemark qui a rejeté le nucléaire au profit de l'incinération et des énergies renouvelables. Mais des pays riches en ressources énergétiques pratiquent l'incinération avec des taux assez élevés tels que la Norvège et la France (pour cette dernière et grâce au nucléaire, l'énergie électrique est abondante).

I Métabolismes énergétiques et leurs incidences sur le traitement des déchets

I.1 Aspects théoriques

Le métabolisme énergétique de tous les êtres vivants repose sur des réactions d'oxydoréduction. Cela signifie que les organismes vivants retirent l'énergie nécessaire à leur vie en oxydant des substrats (qualifiés de donneurs d'électrons) et en réduisant un ou des accepteurs. L'énergie qu'ils retirent est proportionnelle à la différence de potentiel entre le couple donneur et le couple accepteur.

Lorsque les réactions d'oxydoréduction peuvent se dérouler en l'absence de lumière, les organismes compétents sont qualifiés de chimiotrophes. Ces micro-organismes, très nombreux et très divers, sont à la base des principales biodégradations microbiennes possibles sur la fraction organique des déchets solides urbains. Une substance quelconque ne peut être oxydée que si une autre substance peut, en se réduisant, accepter les électrons arrachés à la première. Cela est thermodynamiquement possible si, dans les conditions du milieu, le potentiel du couple donneur est inférieur à celui du couple accepteur [20].

I.1.1 Respiration aérobie

Un accepteur très courant chez les organismes chimiotrophes est l'oxygène moléculaire O_2 . Le potentiel normal du couple $O_2 / 2 H_2O$ est de $+1,23 \text{ mV}$ par rapport à l'électrode normale à hydrogène, ce qui rend possible l'oxydation de très nombreux substrats. Les organismes compétents sont qualifiés d'aérobies. Les organismes aérobies stricts ne peuvent se passer d'oxygène, alors que les organismes aérobies facultatifs peuvent utiliser, en l'absence d'oxygène, d'autres accepteurs de remplacement. Par extension, les traitements biologiques qui utilisent des microorganismes aérobies sont eux-mêmes appelés des traitements aérobies [20].

I.1.2 Respiration anaérobie et fermentations

D'autres substances minérales que l'oxygène ou des substances organiques peuvent être utilisées comme accepteurs finals d'électrons. Il s'agit respectivement de respiration anaérobie et de fermentations. Les micro-organismes compétents sont dits anaérobies stricts s'ils sont incapables d'utiliser l'oxygène ou anaérobies facultatifs s'ils peuvent utiliser l'oxygène lorsqu'il est présent.. Par extension, les traitements biologiques, qui utilisent des micro-organismes anaérobies, sont eux-mêmes appelés des traitements anaérobies.

I.2 Incidences de la respiration aérobie et de la respiration anaérobie

Les micro-organismes aérobies peuvent retirer, à partir d'un substrat donné, beaucoup plus d'énergie pour leur croissance que les micro-organismes anaérobies. Ainsi, si l'on considère

comme substrat modèle le glucose, nous pouvons écrire les réactions globales suivantes pour le métabolisme aérobie (II.16) ou anaérobie (II.17) de cette molécule, où le ΔG^0 est la variation d'enthalpie libre standard à pH = 7 [20, 13]:



De ce fait, la croissance des micro-organismes aérobies est généralement plus rapide que celle des micro-organismes anaérobies et les traitements biologiques aérobies sont donc eux-mêmes plus rapides que leurs concurrents anaérobies. D'autre part, du fait des grandes quantités d'énergie libérées par les métabolismes oxydatifs aérobies, l'activité microbienne aérobie est susceptible de céder de la chaleur au milieu traité qui peut ainsi s'échauffer comme c'est le cas lors du compostage. Il n'est donc pas nécessaire de chauffer un déchet en cours de compostage, alors que cela est indispensable pour une digestion méthanique ou une fermentation alcoolique qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur quasi nul. Enfin, si les processus de biodégradation anaérobie s'accompagnent de si faibles libérations d'énergie, c'est que cette énergie se retrouve stockée dans l'un des produits formés (plus de 85 % de l'énergie chimique potentielle du glucose se retrouve dans le méthane formé) [2, 20].

Dans cette partie de travail nous allons développer davantage les aspects du processus de biodégradation de la matière organique issue des déchets solides urbains notamment "le compostage" et "la méthanisation".

A Compostage

Le compostage est défini comme étant un procédé bio-oxydatif aérobie permettant la transformation d'un substrat organique solide ou semi-solide instable à un composé mûr. Ce passage est accompagné d'une production calorifique d'origine biologique, avec un dégagement de CO_2 et de H_2O et une libération de minéraux.

I Principe

La mise en oeuvre du compostage comporte généralement deux étapes biologiques, auxquelles s'ajoutent des prétraitements et post-traitements éventuellement nécessaires.

- La première étape biologique, dite de **fermentation chaude**, permet à la fois de stabiliser le déchet et de réduire sa masse d'environ 40 % et son volume d'environ 50 % [20]. Au cours de cette étape, la matière organique la plus facilement biodégradable (glucides, protides et lipides) est oxydée par des micro-organismes aérobies qui consomment de l'oxygène et libèrent de la chaleur. Si le déchet est suffisamment biodégradable et aéré et si les pertes

thermiques sont réduites, une élévation de la température sera enregistrée et elle pourra atteindre 80 °C, voire davantage.

La durée de cette première étape varie de quelques jours à quelques semaines en fonction de la nature du déchet, des conditions opératoires et de contraintes diverses. À l'issue de cette étape, le déchet est beaucoup moins bioévolutif qu'avant traitement puisque sa fraction la plus biodégradable a été éliminée, et, en outre, les cellules indésirables (micro-organismes pathogènes, graines végétales) ont pu être détruites par effet thermique si la température dépasse 60 °C pendant au moins 5 à 24 heures [5].

Nous obtenons donc un déchet relativement stabilisé pouvant être stocké ou valorisé dans des conditions plus acceptables que le déchet de départ à savoir :

- la masse organique est moins bioévolutive ;
- le volume est réduit ;
- l'odeur est moins nauséabonde.

▪ La deuxième étape biologique, dite de **maturation**, est très indispensable si l'objectif visé est la production d'un amendement organique. En effet, il est nécessaire de modifier les caractéristiques de la matière organique résiduelle pour lui conférer des propriétés proches de celles de l'humus. Cette étape ne s'accompagne que d'une faible dégradation de matière et, de ce fait, les besoins en oxygène sont faibles et l'échauffement est limité. La température en cours de maturation est de l'ordre de 20 à 30 °C [13,20].

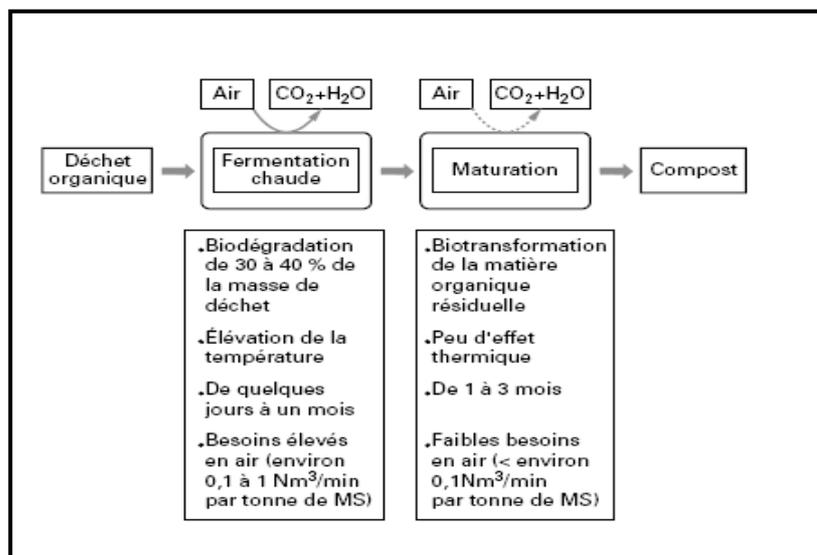


Figure II.2 - Etapes biologiques du compostage [20]

II Paramètres du compostage et sa mise en oeuvre

Les paramètres du compostage sont ceux pouvant influencer l'activité microbienne. Ils peuvent être répartis en deux catégories à savoir les paramètres de conduite du procédé et les paramètres caractéristiques du déchet [20].

- **Les paramètres de conduite du procédé** sont ceux qui, pour un cas de figure donné, permettent de contrôler et de suivre l'avancement du processus. Il s'agit essentiellement de l'aération, de la température et de la teneur en eau. Ces trois paramètres sont interdépendants.
- **Les paramètres caractéristiques du déchet à traiter** ne peuvent, en revanche, pas être modifiés au cours du traitement et ne permettent donc pas de piloter le procédé. Il s'agit notamment de la biodégradabilité et de la granulométrie du déchet, de son pH et de son rapport C/N/P [20].

II.1 Paramètres de conduite et techniques de mise en oeuvre du compostage

II.1.1 Teneur en O₂

Le contrôle des paramètres de conduite est surtout important pour l'étape de fermentation chaude du compostage. Dans cette étape, reposant sur des réactions de biodégradation aérobie, la teneur en oxygène est le premier paramètre à contrôler. Dans le cas de déchets organiques solides, le processus de biodégradation consiste en la dégradation microbienne d'un matériau granulaire poreux. Les micro-organismes dégradent les grains de déchet à partir de leurs surfaces externes sur lesquelles ils se fixent.

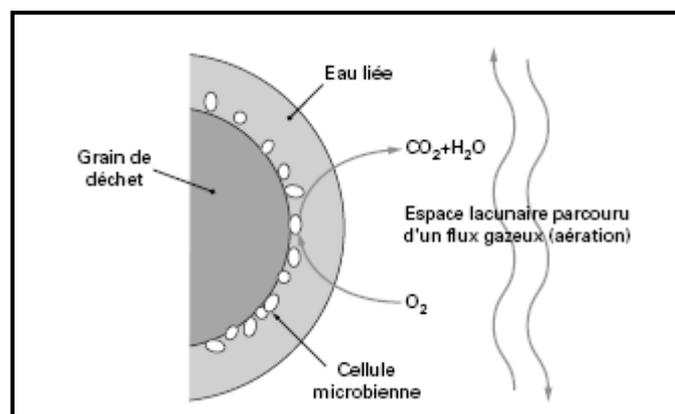


Figure II.3 - Représentation schématique des processus de biodégradation aérobie d'un déchet organique granulaire lors du compostage [20]

Ces surfaces sont recouvertes d'une pellicule d'eau liée, plus ou moins épaisse et plus ou moins continue, indispensable à l'activité microbienne [20]. Les micro-organismes, dégradant la matière organique des grains solides du déchet, utilisent l'oxygène présent dans la phase

gazeuse des espaces libres existants entre les grains et libèrent leurs produits de respiration ($CO_2 + H_2O$). Il est nécessaire que la teneur en O_2 dans la phase gazeuse des pores soit au moins égale à 5 % pour que les métabolismes de biodégradation aérobies se déroulent correctement. L'activité microbienne tend à appauvrir la phase gazeuse en oxygène d'autant plus rapidement que le déchet est facilement biodégradable. Il est donc nécessaire, pour maintenir une activité microbienne aérobie optimale, de réoxygéner le déchet en l'aérant.

II.1.2 Techniques d'aération

Le renouvellement de l'oxygène au sein de la masse du déchet peut s'effectuer sans intervention extérieure par un effet naturel de cheminée. Cependant, cette approche n'est envisageable que dans les cas où le déchet est suffisamment poreux pour faciliter la circulation de l'air (porosité supérieure ou égale à 0,5 avec des pores intragranulaires de l'ordre du centimètre au moins) et relativement peu biodégradable pour que la consommation d'oxygène soit faible (inférieure à $0,1 m^3$ par minute et par tonne de matière sèche).

Dans la plupart des cas pour la fraction organique, il est nécessaire d'aérer le déchet par intervention extérieure. Nous pouvons procéder [23]:

- soit par retournement mécanique périodique ou continu du déchet ;
- soit par aération forcée.
- Dans le premier cas, la fréquence des retournements dépend de la biodégradabilité du déchet et de l'avancement du traitement. Pour un déchet fortement biodégradable, un retournement quotidien, voire continu, peut être nécessaire pendant les premiers jours, puis l'intervalle de temps entre deux retournements s'accroît à mesure que la biodégradation avance et que les besoins en oxygène diminuent.
- Dans le cas de l'aération forcée, le déchet est disposé sous forme de tas ou d'andains sur une couche drainante permettant de forcer la circulation d'air par aspiration ou insufflation à la base du tas ou de l'andain.

Le débit d'aération dépend à la fois de la biodégradabilité du déchet et de l'état d'avancement de la biodégradation. Le suivi de la température permet une bonne évaluation des besoins en oxygène car l'augmentation de température est liée à l'activité microbienne aérobie qui a besoin d'un apport d'oxygène. Nous pouvons donc réguler l'aération en fonction de l'évolution de la température, notamment dans les procédés à aération forcée. Nous augmentons ainsi le débit d'air si la température tend à croître, et nous le réduisons si la température tend à diminuer, en tenant compte toutefois de l'inertie thermique du système. En phase thermophile ($T > 45 ^\circ C$), les débits d'aération recommandés sont de l'ordre de $1 m^3$ d'air par minute et par tonne de matière sèche [20].

II.1.3 Température

Si le compostage est avant tout un phénomène microbiologique, c'est aussi, dans la pratique, un véritable problème thermique. L'énergie, stockée sous forme de liaisons chimiques dans les molécules organiques du déchet, peut être libérée de plusieurs façons :

- libération brutale par combustion ;
- libération progressive par oxydation partielle lors de la biodégradation aérobie avec production d'autres composés organiques et de chaleur [20, 23].

La température du déchet traduit l'équilibre thermique qui se crée entre, d'une part, la production de chaleur due essentiellement à la biodégradation aérobie de la matière organique du déchet et, d'autre part, l'ensemble des pertes thermiques. Ces pertes sont liées aux phénomènes de :

- conduction : refroidissement de la masse de déchet en contact avec des matières non isolées par dissipation de chaleur vers l'extérieur ;
- convection : entraînement d'air chaud par circulation liée à l'aération du déchet ;
- évaporation de l'eau.

L'élévation de la température est souhaitée au cours de l'étape de fermentation chaude pour deux raisons [20,23]:

- D'une part, les vitesses de biodégradation augmentent de manière très significative avec la température. L'expérience montre qu'une augmentation de 10 °C entraîne le doublement de ces vitesses. Une température élevée permet donc d'accélérer considérablement le traitement biologique avec toutes les conséquences positives du point de vue économique.
- D'autre part, l'élévation de température répond également à l'objectif d'hygiénisation du déchet visant à détruire les organismes indésirables initialement présents, tels que les germes pathogènes ou les graines végétales. Cet effet sanitaire est atteint si la température dépasse 60 °C pendant au moins quelques heures. Cependant, des températures trop élevées (supérieures à 80 °C) conduisent à un assèchement trop rapide du déchet, modifient la population microbienne et donc l'évolution ultérieure du déchet et augmentent les risques de réactions chimiques non souhaitées pouvant conduire à la formation de produits indésirables. Dans la plupart des cas, nous cherchons donc à favoriser l'élévation de la température sans toutefois dépasser 75 à 80 °C.

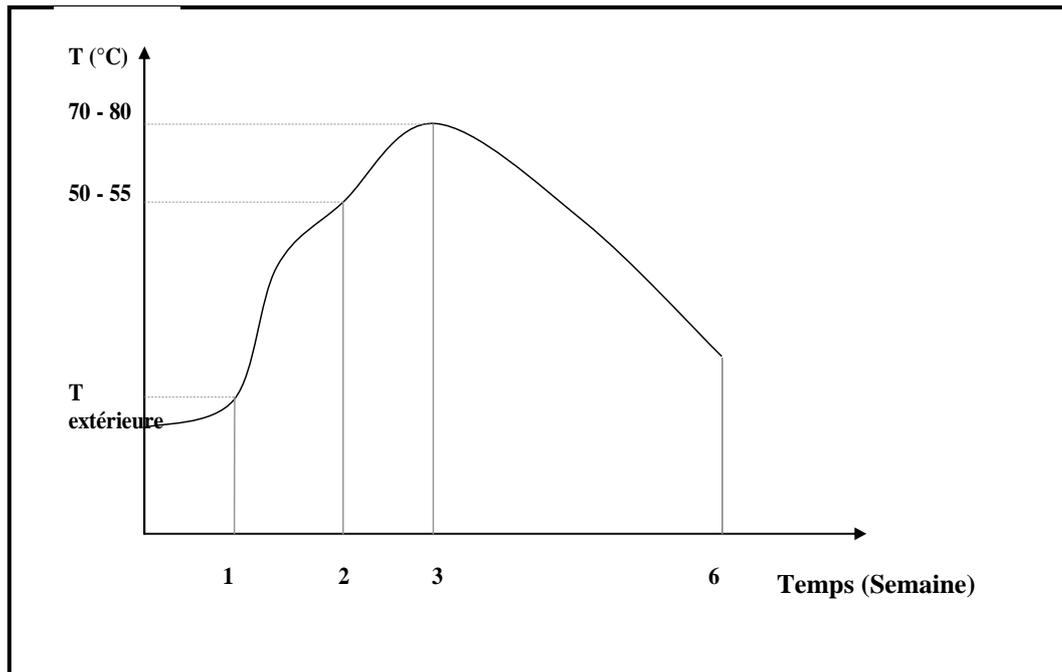


Figure II.4 - Evolution de la température en fonction du temps [24]

Pour favoriser l'élévation de la température il convient de réduire les pertes thermiques et stimuler l'activité microbienne oxydative aérobie. La réduction des pertes par convection conditionne le dimensionnement des tas ou des andains. Il est intéressant de travailler avec un faible rapport surface/volume puisque la dissipation de chaleur a lieu à la surface du tas. En outre, il est possible de disposer à la surface du tas ou de l'andain une couverture isolante dont le double objectif est de réduire l'assèchement et les pertes thermiques par convection [20].

D'après ce qui précède il est clair que les paramètres de conduite du procédé sont interdépendants et il est nécessaire de rechercher le meilleur compromis permettant d'optimiser le traitement. Généralement, la température est considérée comme le paramètre de suivi de l'avancement du traitement. Dans le cas d'un procédé utilisant une aération forcée, le débit d'air peut être conditionné par l'évolution de température.

II.1.4 Teneur en eau

Pour que le déchet à traiter puisse être le siège d'une bonne activité microbienne, il est indispensable que sa teneur en eau minimale soit de l'ordre de 50 % de sa masse brute. Cependant, un déchet trop humide devient difficile à aérer car sa porosité à l'air diminue. La teneur en eau optimale dépend de la nature du déchet considéré. Elle est généralement comprise entre 60 et 80 % de la masse brute pour la plupart des déchets organiques. Le compostage d'un déchet très humide impose l'apport d'un matériau visant, d'une part, à réduire la fraction en eau libre (rôle d'éponge) et, d'autre part, à conférer au mélange une structure granulaire macroporeuse permettant de faciliter l'aération [23].

L'activité microbienne aérobie conduit à la libération d'eau, néanmoins l'élévation de la température et l'aération au cours de l'étape de fermentation chaude conduisent à un assèchement pouvant être important. Il convient donc de contrôler périodiquement l'humidité du déchet au cours du traitement et, si nécessaire, de procéder à des ajouts d'eau pour maintenir l'humidité à son niveau jugé optimal.

II.2 Paramètres caractéristiques du déchet

La nature et les caractéristiques du déchet ont bien évidemment une influence sur la faisabilité du traitement et sur la définition des conditions opératoires. Il s'agit notamment de sa biodégradabilité et de sa granulométrie, de son pH et de son rapport C/N/P.

II.2.1 Biodégradabilité

Elle conditionne directement l'activité microbienne et a donc un effet direct sur l'évolution de la température et sur les besoins en oxygène.

Ce paramètre est lié à la structure des molécules constituant la matière organique du déchet, qui conditionne sa biodégradabilité intrinsèque, et à sa granulométrie qui conditionne l'accessibilité de la matière aux micro-organismes. Pour la fraction organique des déchets solides urbains, la biodégradabilité intrinsèque augmente avec la teneur en sucres libres et en hémicelluloses ou amidons, et diminue avec la teneur en cellulose et en lignine. Les déchets d'industries agroalimentaires, les déchets d'élevage et les déchets de cuisine sont ainsi généralement plus biodégradables que les déchets végétaux lignocellulosiques. Les micro-organismes effectuant la biodégradation à partir de la surface des particules constituant le déchet, l'augmentation de la surface spécifique du déchet, par réduction de sa granulométrie, améliore l'accessibilité de ses constituants aux micro-organismes et favorise donc sa biodégradation.

Il est donc recommandé d'opérer le compostage avec un déchet dont la taille maximale des particules ne dépasse pas 10 *cm* environ, ce qui peut contraindre à un broyage initial de certains déchets. Cependant, une granulométrie trop fine augmente la compacité du déchet et rend l'aération forcée plus difficile. Nous travaillons donc généralement sur des déchets de granulométrie comprise entre 2 et 10 *cm* environ [22].

II.2.2 pH

Le pH optimal pour l'activité de la plupart des micro-organismes est aux alentours de la neutralité, ce qui est généralement le cas pour la fraction organique des déchets solides urbains. Au cours du compostage, une acidification du milieu est enregistrée durant les premiers jours, liée notamment à [23]:

▪ la forte production de CO_2 lors de la dégradation aérobie. Ce dernier se dissout dans l'eau pour donner naissance à l'acide carbonique: $CO_2 + H_2O \rightarrow HCO_3^- + H^+$; (II.18)

▪ la production de certains acides organiques à partir des glucides et des lipides : $Substrat\ organique \rightarrow R-COOH + H_2O \rightarrow R-COO^- + H^+$. (II.19)

Cette acidification est suivie d'une remontée progressive du pH par suite de:

▪ la production ammoniacale à partir de la dégradation des amines : $RNH_2 \rightarrow NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4^+ + OH^-$; (II.20)

▪ la libération des bases auparavant intégrées à la matière organique ;

▪ la consommation des acides initialement libérés et la faible production de CO_2 [23, 24].

Le pH se stabilise, après cette phase d'alcalinisation, à des valeurs proches de la neutralité. Ceci est dû essentiellement :

▪ à la diminution du rapport C/N de la matière organique ce qui implique le ralentissement des réactions de biosynthèse ;

▪ au pouvoir tampon de la matière humique produite.

L'évolution du pH au cours du compostage est alors un indicateur qui peut renseigner sur les différentes phases du processus microbologique en cours.

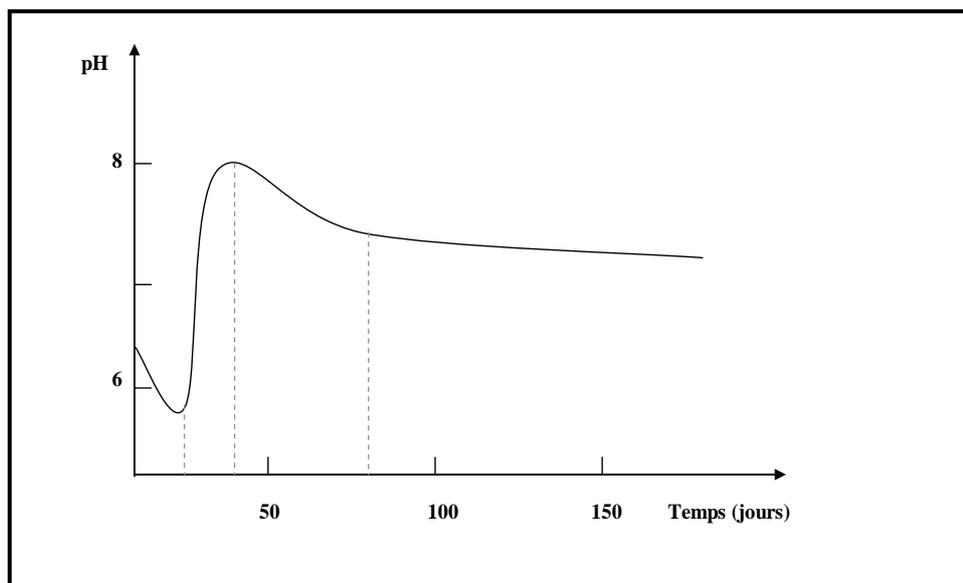


Figure II.5 - Courbe de principe des variations de pH au cours de processus de compostage [25]

II.2.3 Rapport entre les éléments majeurs Carbone, Azote et Phosphore

a. Rapport Carbone/Azote (C/N)

Le carbone est le principal constituant des molécules organiques. Pendant les phases du compostage, les micro-organismes consomment de 20 à 30 fois plus de carbone que d'azote dans le substrat.

Au cours de leur évolution, les substrats organiques perdent plus rapidement leur carbone que leur azote. Le rapport C/N décroît donc constamment au cours du compostage pour se stabiliser vers 10 dans un compost fini [16].

Lorsque le carbone se trouve en excès et peu mobilisable, l'azote en déficit est un facteur limitant. Le peu d'azote disponible freine la croissance microbienne, le compost n'arrive pas à maturation et la vitesse de fermentation aérobie est alors réglée par la fourniture de l'azote pour la chaîne trophique de la destruction des molécules organiques.

A l'inverse si le rapport C/N est bas et que l'azote est libéré en excès par la décomposition aérobie, la vitesse du compostage est réglée par la teneur en carbone disponible pour les micro-organismes, et l'excédent d'azote est perdu par volatilisation de l'ammoniac, ou par percolation des nitrates [23].

b. Teneur Azote /Phosphore (N/P)

Les teneurs optimales N/P varient entre 2 et 5 [23]. Elles sont fonctions de la biodégradabilité des matériaux entrant en compostage.

III Aspects techniques du compostage

Le processus de compostage conduit à :

- la réduction du volume brut initial ;
- l'augmentation de la teneur en matière sèche ;
- l'hygiénisation du produit final par la chaleur ;
- l'obtention d'un résidu riche en matières humifiées, sels minéraux et micro-organismes.

Il existe plusieurs techniques de compostage. Elles peuvent être classées en 3 catégories principales : le compostage en bio-réacteur, en tas statique et en andains retournés. En général, le procédé se décompose en une étape de préparation physique du déchet, une étape biologique suivie d'une phase de maturation et enfin, une phase d'affinage du compost si nécessaire.

III.1 Compostage accéléré en bio-réacteur [24]

La fermentation dure une à trois semaines et a lieu dans un réacteur fermé. Les paramètres clés du processus (température, aération et humidité) sont contrôlés à des points de consignes optimaux. A la sortie du réacteur, le compost est stocké plusieurs semaines : c'est la phase de maturation. Le gain de place et de temps sont les principaux avantages de cette technique.

III.2 Compostage en tas

Les produits à composter sont disposés en tas statiques aérés par une ventilation naturelle ou forcée. Cette aération peut se réaliser à partir d'une boucle de tuyaux perforés alimentés par un ventilateur connu sous le nom de procédé de "Beltsville", ou à partir de planchers perforés par lesquels se fait l'insufflation d'air c'est le procédé "Bioterra". Typiquement les tas ont une hauteur de 2 à 3 m sur un diamètre à la base de 3 à 5 m.

III.3 Compostage en andins

Les andins sont des tas dont la longueur peut atteindre une centaine de mètre selon lesquels est disposé le déchet à composter. Il s'agit d'une fermentation lente avec retournement d'andin. L'aération et l'homogénéisation peuvent être accomplis par des appareils spéciaux. Cette technologie suppose des surfaces importantes. La mise en œuvre de cette technique est facile et permet de récupérer un compost de qualité dans des conditions satisfaisantes.

IV Caractérisation et utilisation du compost mûr

IV.1 Caractérisation du compost mûr

Un compost mûr est un compost qui a atteint un degré de stabilisation suffisante provoquant l'arrêt de dégradation ou de décomposition, il est alors débarrassé des germes pathogènes et des parasites et ne provoque plus d'effets phytotoxiques sur les cultures [5]:

- l'évolution de la température est négligeable ;
- le rapport C/N est proche de la valeur idéale ;
- les métabolites et les acides organiques ont disparu ;
- l'azote a été transformé en nitrates ;
- les sels excédentaires ont été éliminés par les pluies.

Le compost urbain mûr a l'aspect d'un terreau granuleux et noirâtre, sa densité se situe entre 0,5 et 0,8 selon la teneur en eau ; ses caractéristiques chimiques moyennes sont données au tableau suivant :

Tableau II.5 - Composition moyenne d'un compost urbain mûr [5]

Constituant	Valeur moyenne	Constituant	Valeur Moyenne
Humidité (% de matière organique brute)	43,7	S	3,820
pH (compost de 4 mois)	7,6	Cu	357
C/N (compost de 4 mois)	22,3	Mn	854
<i>mg/kg de matière sèche</i>		Fe	17,110
P ₂ O ₅	9,140	Zn	1,525
K ₂ O	2,380	Pb	599
Mg	2,190	Cd	8,5
Ca	44,100	Hg	3,4
Na	2,980	Cr	219
Cl	1,870	Ni	196

IV.2 Utilisation du compost mûr

Il est désigné par le terme "humus" la matière organique du sol dégradée et stabilisée par voie biologique. L'humus apporte aux végétaux les éléments minéraux directement assimilable, nécessaires à leur croissance et stimule la vie microbienne par les matières organiques qui le constituent. Les cultures, principalement intensives, épuisent progressivement l'humus, celui-ci doit être reconstitué périodiquement [23,5]:

- par des moyens naturels, en laissant les sols en repos temporaire pendant lequel aucune culture n'est entreprise ;
- par des moyens artificiels, en apportant au sol les engrais minéraux et organiques dont il a besoin.

Le compost urbain est un produit d'amendement du sol utilisé dans le but de remplacer ou de renouveler l'humus. L'intérêt du compost comme engrais est toutefois discuté par de nombreux spécialistes qui lui contestent sa valeur nutritive minérale. Comparé au fumier, le compost se présente cependant comme un produit beaucoup plus riche en éléments fertilisants [5]. En dépit de ces griefs, le compost a une action très bénéfique sur les propriétés physiques et chimiques du sol.

IV.2.1 Effets du compost mûr sur les propriétés physiques du sol [23]

a. Amélioration des propriétés thermique

Par leur couleur foncée, le compost rend le sol plus absorbant de l'énergie solaire incidente.

b. Amélioration de la rétention d'eau

Grâce à sa structure colloïdale gonflante le compost est capable de retenir plusieurs fois sa masse d'eau.

c. Amélioration de la stabilité structurale

L'état de division et d'agrégation des particules terreuses peut être amélioré et stabilisé par l'apport du compost. Le compost réagit en permanence avec les composés minéraux du sol, notamment l'argile, pour former un complexe argilo-humique jouant le rôle de liant entre les particules minérales dispersées.

IV.2.2 Effets du compost mûr sur les propriétés chimiques du sol**a. Augmentation de la capacité d'échange**

Le complexe argilo-humique est un colloïde électronégatif ; il possède la propriété de retenir à sa surface externe les ions échangeables avec les solutions du sol notamment les cations. L'expérience montre que pour un cation donné, les échanges se poursuivent jusqu'à l'obtention d'un équilibre dynamique où les proportions de ce cation dans les solutions du sol et les proportions fixées sur le complexe argilo-humique sont identiques. L'addition de ce cation dans les solutions du sol entraînera sa fixation sur le complexe argilo-humique jusqu'à l'obtention d'un nouvel état d'équilibre.

La diminution de la concentration de ce cation dans la solution du sol entraînera le relargage de ce cation à partir du complexe argilo-humique qui fixera d'autres cations pour maintenir l'équilibre.

Cette propriété d'échange d'ions et d'équilibre dynamique du complexe argilo-humique est à l'origine du pouvoir tampon du sol c'est-à-dire sa capacité à résister aux variations induites du pH (cas particulier du cation H^+).

Cette capacité d'échange ionique permet aussi d'avoir une régulation meilleure du stockage et de la fourniture des ions nutritifs aux plantes.

b. limitation des blocages et rétrogradations des ions minéraux

Certains ions minéraux nutritifs subissent des rétrogradations, c'est-à-dire une insolubilisation sous forme minérale ou une fixation irréversible par réaction chimique. Le compost mûr, par sa forte capacité d'échange, les soustrait en partie par fixation réversible à cette action, et les maintient disponibles pour les solutions du sol et la nutrition des plantes.

L'apport aux sols d'un amendement organique, tel que le compost mûr, permet donc de réduire l'érosion et l'appauvrissement des sols et d'améliorer leur qualité de support et de croissance des végétaux.

Quelle que soit sa qualité agronomique, le compost n'a cependant qu'une faible valeur marchande. En outre, il ne joue pas suffisamment le rôle d'engrais et l'apport de nutriments minéraux complémentaires reste nécessaire pour les cultures [23].

Des éléments, substances ou organismes indésirables peuvent toutefois être véhiculés par le compost. Le risque lié à la présence d'organismes ou de produits de leur métabolisme indésirables est relativement marginal si le traitement est correctement mené avec une phase de fermentation chaude garantissant une hygiénisation thermique.

V Exemple d'un procédé industriel : Procédé de lombricompostage

V.1 Lombricompostage

Le lombricompostage est une variante reposant sur l'utilisation de vers de terre (lombrics) pour dégrader la matière organique du déchet à travers sa digestion. Les conditions de la bonne conduite du procédé sont celles qui assurent l'activité et le développement des vers lambriciens, elles sont les suivantes :

- une bonne aération ;
- une humidité moyenne ;
- une élévation faible de température, limitée autour de l'optimum thermique de 25 °C, avec des maximaux qui ne dépassent pas 35 °C à 40 °C ;
- un pH proche de la neutralité;
- la présence de matières organiques fraîches en quantités et qualités convenables.

Le procédé de lombricompostage peut s'utiliser :

- soit en une étape unique de traitement ;
- soit après une étape de fermentation chaude en substitution de l'étape classique de maturation.
- La première approche concerne essentiellement le domaine agricole car elle nécessite des surfaces relativement importantes (de l'ordre de 2,5 m²/m³ de déchet). En effet, pour éviter un échauffement du déchet qui serait néfaste au développement des lombrics, il est nécessaire de travailler avec des tas ou andains présentant un rapport surface/volume élevé. Typiquement, la hauteur des tas ou andains ne dépasse pas 30 à 40 cm pour que la température reste bien inférieure à 40 °C [23,25].
- La deuxième approche évite le problème de l'échauffement car le lombricompostage s'effectue après que la fraction la plus biodégradable du déchet ait été éliminée par une étape chaude de fermentation classique. Elle permet donc de travailler dans des systèmes plus

compacts. Le compost obtenu (lombricompost) est alors constitué par les excréments des vers qui ingèrent et digèrent la matière organique.

Le produit obtenu est plus calibré et donc plus facile à séparer par criblage des éléments indésirables pouvant se trouver dans le déchet.

V.2 Procédé Naturba de tri-lombricompostage

Le procédé Naturba de tri-lombricompostage des ordures ménagères a été développé au tout début des années 1990 en France par la Société Sovadec qui l'exploite pour le traitement des ordures ménagères issues de collectes sélectives ou non. La figure II.6 présente le synopsis du procédé. L'approche suivie consiste à utiliser le lombricompostage comme étape de maturation de la matière organique après une étape de fermentation chaude [20].

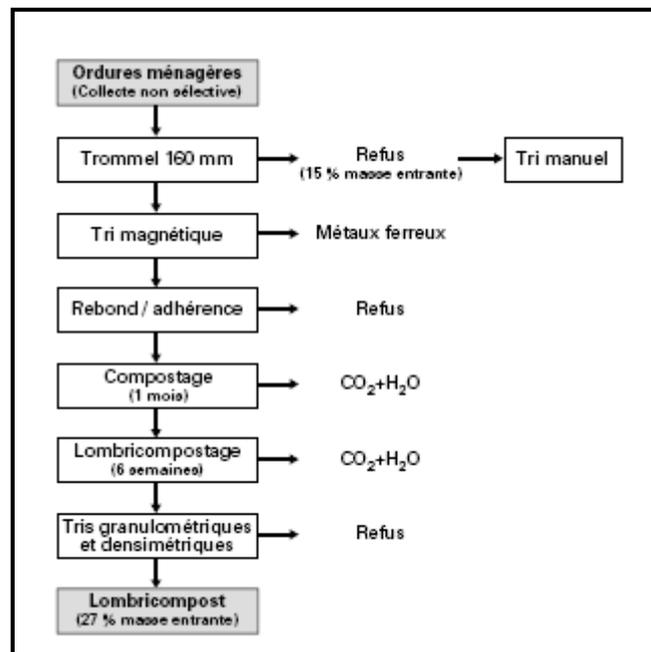


Figure II.6 - Diagramme synoptique du procédé Naturba de tri-lombricompostage des ordures ménagères mis en service par Sovadec [20]

Les opérations de tri occupent une place importante dans le procédé. La première étape est un tri granulométrique sur grille tournante de mailles de 160 mm. Les matériaux de plus petite dimension supérieure à 160 mm, constituant environ 15 % de la masse entrante, sont exclus du trommel et subissent un tri manuel permettant de séparer des fractions recyclables. Le reste subit un tri magnétique permettant de séparer les métaux ferreux, puis un tri densimétrique sur table à rebond éliminant les matériaux durs tels que bouteilles, aérosols, piles, etc.

Le déchet ainsi trié contient la matière organique biodégradable mais aussi encore de nombreux éléments indésirables comme des morceaux de films plastiques. Elle est traitée par

fermentation chaude dans un silo horizontal sous hangar ventilé, la matière étant aérée par retournement quotidien à l'aide d'un grappin qui permet de faire progresser le déchet d'un bout à l'autre du silo, avec un temps de séjour moyen d'un mois environ [20].

La température atteint 70 °C, assurant une hygiénisation du déchet. Après cette phase, la matière est humidifiée puis introduite dans des casiers verticaux dans lesquels se développent des lombrics. Les casiers sont constitués de parois en grillage métallique permettant une bonne aération du déchet. La matière fraîche est apportée par le haut des casiers, la matière digérée étant récoltée par grattage de la grille basse des casiers. Le temps de séjour moyen de la matière dans les casiers est de 8 semaines, la température de l'ordre de 30 °C.

B- Méthanisation

I Principe

La méthanisation est un processus de digestion anaérobie poursuivant en général un double objectif de valorisation énergétique par récupération de méthane (CH_4) et de stabilisation des déchets organiques. La filière globale de traitement comporte souvent au moins deux étapes comme l'illustre la figure II.7.

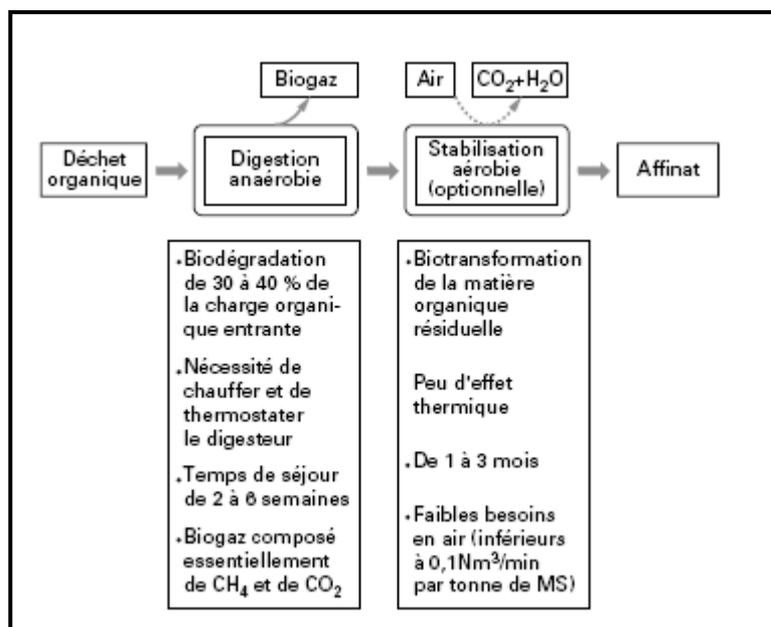


Figure II.7 - Étapes biologiques de la filière de méthanisation de déchets organiques [20]

▪ La première étape constitue la **digestion méthanique** proprement dite et se déroule en anaérobiose, c'est-à-dire en l'absence totale d'oxygène. Elle consiste en la biodégradation d'une fraction de la matière organique du déchet conduisant à la libération d'un biogaz formé des métabolites gazeux de biodégradation. Le biogaz contient de 50 à 70 % de méthane environ. La durée globale de la digestion méthanique est généralement de l'ordre de deux à

six semaines en fonction de la nature du déchet, des conditions opératoires (température notamment) et des objectifs visés [5]. Le temps de séjour sera réduit pour favoriser une forte production de biogaz par unité de temps et de volume de digesteur, et augmenté si l'objectif recherché est plutôt d'accroître le taux de biodégradation. À l'issue de l'étape de traitement anaérobie, nous obtenons le digestat qui est constitué par le déchet initial débarrassé de sa fraction organique la plus biodégradable.

- La seconde étape consiste à **une stabilisation aérobie** du digestat, en effet le digestat doit en général subir un certain nombre de post-traitements pour être rendu stockable ou valorisable.

II Aspects biochimiques et microbiologiques

Contrairement au processus de compostage, la connaissance des aspects biochimiques et microbiologiques est fondamentale pour une bonne maîtrise de la digestion méthanique. La biodégradation anaérobie de la matière organique est en effet un processus séquentiel comportant quatre étapes biochimiques réalisées par trois groupes bactériens fonctionnant en symbiose comme l'illustre la figure. Ces trois groupes bactériens ont des exigences nutritives et des caractéristiques physiologiques très distinctes [16, 20].

a. Les étapes d'hydrolyse et d'acidogénèse

Elles sont réalisées par des bactéries anaérobies facultatives dont le développement est relativement rapide (leur temps de génération G , défini comme la durée permettant de doubler la population en conditions optimales, est de quelques heures). Ces bactéries tolèrent des pH relativement acides allant jusqu'à 5 [20, 2].

Nous pouvons expliciter les réactions chimiques qui ont lieu au cours de ces deux étapes par le schéma suivant :



b. L'étape d'acétogénèse

Elle est réalisée par des bactéries anaérobies strictes très particulières. Ces bactéries, très spécialisées vis-à-vis des substrats qu'elles sont capables de dégrader, ont un développement lent à très lent (G de plusieurs jours) et sont inhibées à des pH inférieurs à 6 [20, 2].

c. L'étape de méthanogènes

Les bactéries méthanogènes sont également anaérobies strictes, capables de consommer un nombre très faible de molécules organiques très simples, possèdent un développement

relativement lent (G de quelques heures sur $H_2 + CO_2$, mais de quelques jours sur acétate) et sont également inhibées à des pH inférieur à 6 [20, 2].

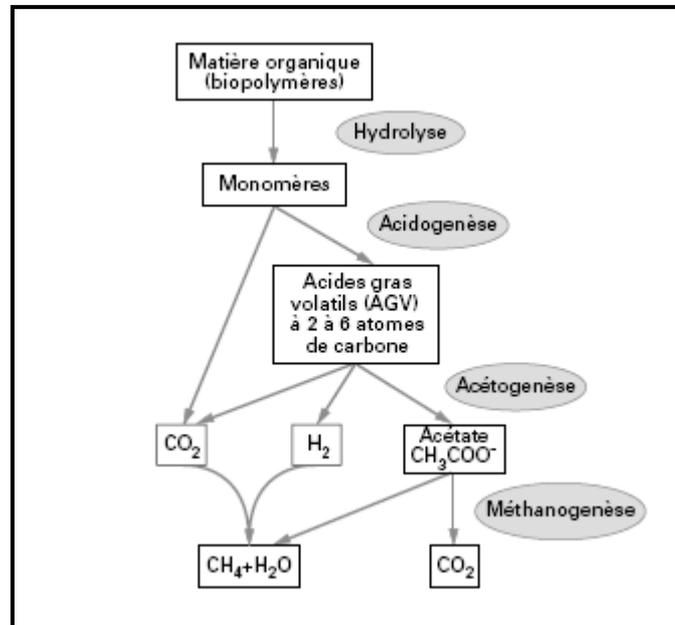
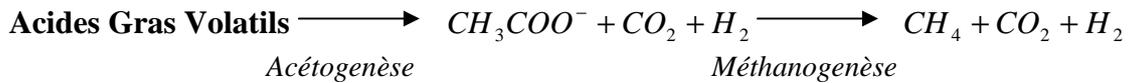


Figure II.8 - Représentation simplifiée des étapes de biodégradation anaérobie de la matière organique des déchets [23]

Le processus global de biodégradation anaérobie de la matière organique repose donc sur un équilibre dynamique relativement fragile susceptible d'être rompu si l'un des groupes bactériens voit son métabolisme perturbé pour une raison ou pour une autre. Ainsi, par exemple, une variation brutale de la charge organique entrante d'un digesteur est susceptible de déséquilibrer le processus.

En effet, le premier groupe bactérien, de développement rapide, peut s'adapter à l'augmentation de charge et produire ainsi de plus en plus d'acide gras volatil. En revanche, le deuxième groupe bactérien, de développement considérablement plus lent, n'aura pas la possibilité de se développer aussi rapidement pour consommer le surplus d'acide gras volatil formé. Nous assistons donc à une accumulation progressive d'acide gras volatil dans le milieu. Lorsque le pouvoir tampon du déchet est dépassé, l'accumulation d'acide gras volatil peut entraîner une acidification susceptible d'inhiber les bactéries acétogènes et méthanogènes. Nous aboutissons alors à une véritable réaction en chaîne qui conduit à bloquer totalement le processus de biodégradation [22].

La fragilité relative de l'équilibre microbien impose donc d'éviter des variations trop brutales des paramètres de conduites du procédé, notamment, la charge organique et la température.

III Paramètres de la méthanisation

III.1 Température

La digestion anaérobie de la matière organique nécessite de chauffer les digesteurs pour maintenir une température compatible avec une bonne activité microbienne. Ce chauffage est assuré généralement en consommant une partie du méthane produit. Pour limiter cette autoconsommation, les opérateurs isolent thermiquement les digesteurs et préfèrent généralement travailler en zone mésophile, c'est-à-dire dans un domaine de températures compris entre 25 et 40 °C. L'autoconsommation est alors de l'ordre de 15 à 25 % du méthane produit [20]. Il est possible de travailler en zone thermophile, c'est-à-dire entre 45 et 55 °C, pour accroître les vitesses de biodégradation et donc la productivité de méthane. Cependant, cette approche exige une isolation thermique optimale, pour ne pas trop accroître l'autoconsommation, et est plus difficile à maîtriser. Dans tous les cas, les variations brutales de température (plus de 1°C en moins d'une journée) sont à éviter.

III.2 pH

La zone optimale de pH pour la méthanisation est située aux alentours de la neutralité. Les bactéries méthanogènes sont fortement inhibées en dessous de 6. Les bactéries acidogènes supportent mieux les pH inférieurs à 6. Une chute de pH est le signe d'un dysfonctionnement et doit être corrigée immédiatement par addition d'alcali jusqu'à pH 7 à 7,5. Pour éviter l'inhibition acide des bactéries acétogènes et méthanogènes, on préfère en général travailler, en routine, à des pH compris entre 7,5 et 8,0 pour se garantir une plage de sécurité permettant d'intervenir pour corriger le pH si une baisse régulière est constatée. Le pH est donc le principal paramètre de contrôle du processus de méthanisation.

III.3 Charge organique entrante

Si le déchet est biodégradable, il faut éviter les surcharges brutales (augmentation de plus de 20 % en moins d'une journée) qui risquent de déséquilibrer le processus et d'acidifier le milieu par suite d'une trop rapide production d'acides gras volatil. Pour la fraction organique des déchets, l'expérience montre que nous pouvons obtenir environ 1 Nm³ de biogaz par Kilogramme de matière organique dégradée [23].

III.4 Besoins nutritionnels

Les besoins nutritionnels des micro-organismes anaérobies sont quantitativement moins importants que ceux des micro-organismes aérobies, la production de biomasse étant

nettement plus faible. Le rapport optimal C/ N/ P est du même ordre que pour le compostage, à savoir de l'ordre de 100/(2 à 3)/1 [20].

III.5 Oxygène et teneur en eau

L'oxygène O_2 est extrêmement toxique pour les bactéries anaérobies strictes que sont les cétogènes et les méthanogènes. Il est donc indispensable de protéger le milieu de toute entrée d'air. Une façon simple de procéder est de travailler en système noyé dans un digesteur avec un ciel de faible volume. Les procédés de méthanisation sont donc spécialement adaptés pour des déchets très humides. Cependant, il est possible de méthaniser des déchets plus secs moyennant certaines précautions techniques pour garantir l'anaérobiose et la bonne agitation du milieu.

III.6 Agitation

C'est un point relativement délicat à maîtriser, sur le moyen et le long terme, car les matériels utilisés sont fortement sollicités et l'état physique du déchet (solide ou boueux) rend l'agitation difficile. L'agitation peut être assurée par [20, 2]:

- brassage mécanique à l'aide d'un dispositif immergé tournant lentement (20 à 50 *tr/min*) tels que vis tubée ou hélicomélangeur ;
- brassage par injection de biogaz comprimé à la base du digesteur.

Il n'est pas nécessaire de maintenir une agitation en permanence. En général le système d'agitation fonctionne de façon périodique (par exemple, 15 *min* toutes les 2 *h*) et un peu avant et après l'alimentation pour les systèmes semi-continus.

IV Procédés de méthanisation pour les déchets solides urbains

Les digesteurs sont généralement constitués d'une cuve cylindrique, isolée thermiquement et souvent enterrée. La cuve est totalement étanche à l'air. Une sortie au sommet de la cuve permet de collecter le biogaz produit vers un gazomètre souple. La cuve est remplie par le déchet à traiter, en laissant un ciel gazeux de volume le plus faible possible.

Pour la matière organique issue des déchets solides urbains deux modes de fonctionnement du digesteur sont envisageables [20, 16]:

IV.1 Fonctionnement discontinu du digesteur

La digestion de la matière organique se déroule dans un réacteur fonctionnant d'une manière discontinue. Une fois la matière organique est fermentée le réacteur s'arrête temporairement pour qu'il puisse être rechargé de nouveau avec de la matière organique fraîche. C'est une

technique relativement rustique bien adaptée pour des déchets à teneur en matières sèches supérieure à 20 % en masse.

IV.2 Fonctionnement semi-continu du digesteur

C'est l'approche la plus généralement retenue. Le déchet est digéré en cuve étanche. Le digestat est périodiquement retiré et remplacé par du substrat frais. Le temps de séjour moyen varie de 10 à 40 jours pour des températures de l'ordre de 30 à 35 °C [5,20].

Dans certains procédés, la digestion anaérobie est conduite en deux étapes successives réalisées dans deux réacteurs distincts afin de séparer les phases d'hydrolyse-acidogénèse et de acétogénèse-méthanogénèse. Si cette approche augmente les coûts d'investissement, elle permet de mieux contrôler le processus global de biodégradation et de réduire notamment les risques d'inhibition acide discutés auparavant. En effet, les acides gras volatils sont produits dans le premier réacteur et dégradés dans le second où peut s'effectuer un contrôle du flux d'alimentation pour éviter toute surcharge.

V Caractéristique et utilisation des produits de la méthanisation

V.1 Biogaz

La composition du biogaz formé dépend de la nature du déchet et des conditions opératoires. Les constituants principaux sont le méthane et le dioxyde de carbone. D'autres constituants peuvent être rencontrés comme l'indique le tableau. L'acide sulfurique provient de la réduction du soufre ou des sulfates éventuellement présents dans le déchet. Ce gaz peut poser des problèmes liés notamment à son odeur caractéristique à laquelle le nez humain est très sensible (œuf pourris), à son caractère neurotoxique et à ses propriétés corrosives vis-à-vis de nombreux métaux. D'autres constituants gazeux (N_2 , H_2 , CO) peuvent être détectés sous forme de traces dans le biogaz, notamment lors de la méthanisation des ordures ménagères.

Tableau II.6 - Fourchettes de concentrations des principaux constituants du biogaz formé par digestion méthanique de déchets [20]

Constituants	Teneur (en % volume/volume du gaz sec)
CH_4	50 à 70
CO_2	24 à 30
H_2S	0,5 à 5
N_2	0,5 à 3
H_2	0,1 à 1
CO	< 0,1

Le biogaz peut connaître, a priori, toutes les formes de valorisation énergétique d'un combustible gazeux, à savoir :

- la combustion en chaudière pour la production de chaleur (pour chauffage, eau chaude sanitaire, réseau de vapeur) ;
- la combustion en groupe électrogène pour transformation en énergie électrique ;
- la combustion en moteur à explosion pour transformation en énergie mécanique (motopompes, véhicules automobiles).

La production de chaleur et/ou d'électricité est la forme de valorisation la plus classique. Des chaudières classiques pour gaz de ville peuvent être utilisées sans précaution particulière si la teneur en méthane dépasse 60 % et la teneur en H_2S est inférieure à 1 % [16]. Si la teneur en H_2S est supérieure, il est recommandé d'épurer le biogaz avant son utilisation. Pour ce faire, il convient d'utiliser des cartouches de limaille de fer ou des solutions de fer ferreux qui réagissent avec l' H_2S pour former du sulfure de fer insoluble. Pour la transformation en énergie électrique, les systèmes de cogénération permettant de récupérer la chaleur dissipée par le groupe électrogène sont préconisés.

V.2 Digestat

Le digestat est par définition la matière résiduelle obtenue après digestion anaérobie du déchet. Le déchet conservant l'intégralité de ses éléments nutritifs principaux (N , P , K) au cours de la digestion, le digestat est un produit potentiellement valorisable comme amendement organique des sols agricoles et éventuellement enrichi avec des engrais minéraux.

Le digestat est logiquement beaucoup moins bioévolutif que le déchet initial puisque la matière la plus biodégradable a été dégradée au cours du traitement biologique. Cependant, la valorisation directe du digestat est rarement pratiquée car elle rencontre bon nombre de problèmes. En effet, la recherche d'une productivité élevée en méthane conduit souvent les opérateurs du traitement à privilégier un temps de séjour relativement court (2 à 3 semaines) au détriment du rendement d'épuration. Le digestat contient alors, dans ce cas, une fraction organique biodégradable non négligeable, rendant problématique sa valorisation agricole. Enfin, la matière organique du digestat ne possède pas de bonnes propriétés agronomiques car il ne s'agit pas d'une matière humifiée. Aussi un certain nombre de risques sanitaires peuvent exister car l'effet thermique d'hygiénisation du compostage n'a pas lieu en anaérobiose [5]. Il est donc généralement nécessaire de procéder à des post-traitements du digestat pour envisager son stockage ou sa valorisation dans de bonnes conditions.

Le traitement biologique est le plus adéquat pour le digestat issu de la méthanisation de la fraction organique des déchets solides urbains.

V.2.1 Traitements biologiques

Comme le digestat contient encore une fraction organique biodégradable, un traitement complémentaire aérobie de fermentation chaude est envisageable pour poursuivre la biodégradation et sécher le digestat. Pour une valorisation agricole du digestat, une étape finale de stabilisation aérobie est nécessaire, dont l'objectif est similaire à celui de l'étape de maturation du compostage. Nous obtenons à la fin un matériau similaire au compost, généralement appelé affinât.

Les remarques faites sur la présence possible d'éléments indésirables et/ou de micro-polluants dans le compost sont également valables pour le digestat.

VI Exemple de réalisation industrielle : Procédé Valorga

Le procédé "Valorga" de méthanisation des ordures ménagères a été développé au début des années 1980 en France pour traiter environ 8 000 Tonnes d'ordures par an. La figure II.8 présente le synopsis du procédé. La filière de traitement comporte quatre étapes principales [20]:

- tris en amont sur les ordures entrantes ;
- méthanisation ;
- pressage et affinage de la matière digérée.

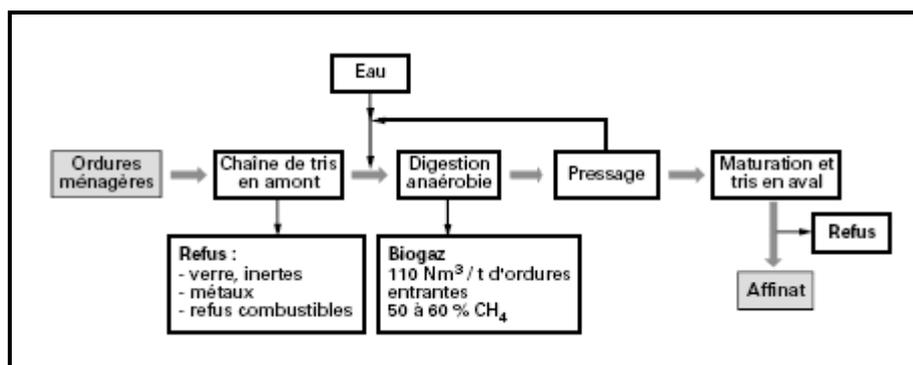


Figure II.9 - Diagramme synoptique du procédé Valorga de méthanisation des ordures ménagères [23]

VI.1 Tris

Les opérations de tri occupent une place importante dans la filière de traitement lorsque les ordures sont issues d'une collecte non sélective. La chaîne de tri comporte des opérations de :

- tri granulométrique ;
- tri magnétique ;

- broyage de la fraction grossière préalablement déferraillée ;
- tri densimétrique sur table à adhérence/rebond.

Le tri, en amont, extrait environ 35 % de la masse d'ordures entrantes, qui sont constitués de refus de différentes natures (verre, inertes, métaux) et de refus combustibles qui sont : le plastiques et le bois.

VI.2 Méthanisation

Le reste de la matière subit le traitement biologique de méthanisation. La matière organique est d'abord humidifiée et malaxée sous forme de boues très épaisse à 30-35 % de matières sèches. Ceci constitue une particularité technique du procédé Valorga, la plupart des procédés de méthanisation opérant à des taux de matières sèches bien moindres. Puis la matière est transférée dans les digesteurs constitués par quatre cuves cylindriques de 2 400 m^3 chacune [20, 23].

La température est maintenue à 37-40 °C, ce qui nécessite une autoconsommation de biogaz de l'ordre de 10 % de la production. Le temps de séjour est de 18 à 25 jours. L'homogénéisation et la circulation de la matière dans les digesteurs sont assurées par injection de biogaz comprimé à la base des digesteurs. La production de biogaz est de l'ordre de 150 $Nm^3/Tonne$ de matière entrant dans les digesteurs. Le biogaz produit contient de 50 à 60 % en volume de CH_4 et le complément n'est quasiment constitué que de CO_2 . Les teneurs en autres gaz sont en effet faibles (par exemple H_2S : 0,02 à 0,25 %) [20].

VI.3 Pressage de la matière digérée

Après digestion, la matière soutirée des digesteurs est traitée sur filtre presse. On en extrait des jus qui sont recyclés, après centrifugation, pour être malaxés avec les ordures entrantes. Le pressât, contenant environ 55 % en masse de matières sèches est alors dirigé vers la chaîne d'affinage.

VI.4 Affinage

Le pressât est disposé en andains, sous hangar. L'aération, lors de sa manutention, permet une maturation aérobie et un séchage progressif de la matière. Le temps de séjour est d'au moins un mois. L'affinât est ensuite tamisé puis débarrassé des inertes dans un épierreur pour en faire un amendement organique. La production massique d'amendement organique est de l'ordre de 25 à 30 % de la masse des ordures entrantes.

VII.1 Avantages liés aux traitements biologiques

Lorsque les traitements biologiques sont applicables, leur avantage principal par rapport aux techniques concurrentes de traitement physico-chimiques (stabilisation, etc.) ou thermiques (incinération, etc.) est généralement lié à un coût moindre, soit au niveau de l'investissement ou du fonctionnement, soit au niveau du post-traitement des déchets de seconde génération, c'est-à-dire des sous-produits générés par le procédé de traitement lui-même. En effet, les traitements biologiques mettent souvent en oeuvre des technologies relativement peu sophistiquées et peu énergivores, utilisent relativement peu de réactifs et génèrent ainsi relativement peu de sous-produits. D'autre part, les traitements biologiques bénéficient souvent d'une image relativement positive auprès du public.

VII.2 Inconvénients liés aux traitements biologiques

Un certain nombre d'inconvénients majeurs limitent l'utilisation des procédés biologiques. Notamment, la durée des traitements biologiques est généralement plus longue que celle des traitements thermiques ou physico-chimiques concurrents. Par ailleurs, les activités microbiennes sont sensibles aux conditions de milieu et peuvent être perturbées voire inhibées par la présence (chronique ou accidentelle) dans le déchet de composés particulièrement toxiques pour les micro-organismes utilisés. Enfin, l'accessibilité des polluants aux micro-organismes est une limite cinétique parfois importante dont l'effet sur la durée du traitement peut être difficilement prévisible.

PARTIE II

Chapitre I : Etude Quantitative et Qualitative des DSU de la Wilaya d'Alger

**Chapitre II : Proposition et Choix du Mode de Traitement des DSU
de la Wilaya d'Alger**

Chapitre I

Etude Quantitative et Qualitative des DSU de la Wilaya d'Alger

I PROBLEMATIQUE

Le tissu urbain de la Wilaya d'Alger est en pleine expansion depuis l'indépendance, conséquence de l'évolution qu'a connue la majorité des villes algériennes en terme d'industrialisation, de modes de vie et de consommation. La croissance démographique, conjuguée à l'exode rural, sont à l'origine de l'explosion de l'organisme urbain de la Wilaya d'Alger, ce qui a donné naissance à plusieurs problèmes environnementaux, notamment la gestion des déchets solides urbains.

Avec une population de près de 4 000 000 d'habitants, la Wilaya d'Alger génère annuellement 1 055 580 Tonnes de DSU [25]. En l'absence d'une stratégie de gestion adéquate, ces ordures sont évacuées directement après collecte vers des décharges sauvages qui sont sources de multiples nuisances pour le citoyen et l'environnement.

La situation épineuse, en terme de salubrité et d'hygiène à laquelle les communes de la Wilaya d'Alger sont confrontées, nécessite une prise en charge effective de ce type de déchets basée sur des approches techniques et scientifiques.

Nous avons consacré cette partie d'étude à une analyse de la situation actuelle de gestion des DSU au niveau de la Wilaya d'Alger, en se référant aux données du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), de la Direction de l'Environnement de la Wilaya d'Alger et du NET-COM. Ces valeurs portent essentiellement sur la gestion de la collecte, sur la caractérisation des déchets générés et sur les modes du traitement adoptés.

La deuxième partie consiste à exploiter ces données pour valoriser le potentiel énergétique et non énergétique de ces déchets selon les trois modes de valorisation cités précédemment et choisir le plus adéquat à la Wilaya d'Alger en prenant en considération les contraintes économiques et environnementales.

II Gisements des déchets solides urbains de la Wilaya d'Alger

II.1 Présentation de la région d'études

Avec une superficie de 809 Km² et une population de 3 700 000 habitants, soit une densité de 4 573 Hab/Km², la wilaya d'Alger englobe 13 daïras et 57 communes (Figure I.1) [26].

Selon l'organisation du système de collecte des DSU, les 57 communes sont réparties en deux catégories [25]:

- La première comporte 28 communes "intra-muros" situées dans la première couronne de l'agglomération et regroupées autour d'un opérateur public de nettoyage et de salubrité qui est le NET-COM (Entreprise de Nettoyage et de Collecte des Ordures Ménagères).

- La deuxième compte 29 communes "extra-muros", gérées individuellement par les services municipaux de nettoyage.

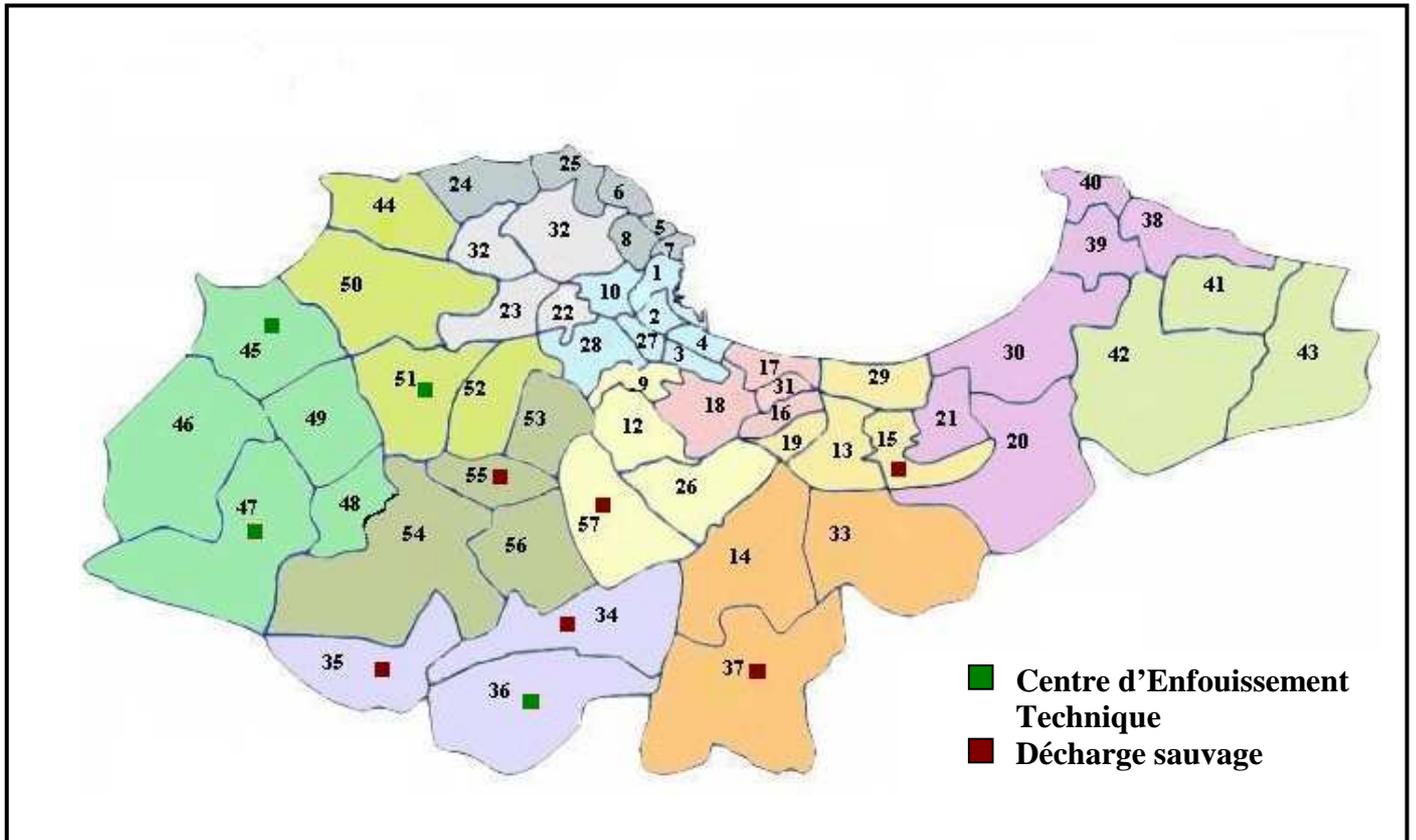
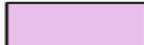


Figure I.1 - Carte de la Wilaya d'Alger divisée en 13 daïras et découpée en 57 communes
Localisation des CET et des décharges sauvages [25,27]

	ALGER CENTRE		DAR EL BEÏDA
	BAB EL OUED		CHERAGA
	HUSSEIN DEY		ZERALDA
	BOUZAREAH		DRARIA
	BIR MOURAD RAÏS		BIRTOUTA
	EL HARRACH		BARAKI
			ROUIBA

Le tableau I.1 regroupe la répartition des 57 communes en zone intra et extra muros ; à chaque commune un code a été attribué.

Tableau I.1 - Code des communes intra-muros et extra-muros de la Wilaya d'Alger [25]

Communes intra-muros	Code	Communes extra-muros	Code
ALGER CENTRE	01	BIR KHADEM	12
SIDI M'HAMED	02	BARAKI	14
EL MADANIA	03	OUED SMAR	15
HAMMA ANASSERS	04	DAR EL BEIDA	20
BAB EL OUED	05	BORDJ EL KIFFAN	30
BOULOUGHINE	06	BIRTOUTA	34
CASBAH	07	TASSALA EL MERDJA	35
OUED KORICHE	08	OULED CHEBEL	36
BIR MOURAD RAIS	09	SIDI MOUSSA	37
EL BIAR	10	AIN TAYA	38
BOUZAREAH	11	BORDJ EL BAHRI	39
EL HARRACH	13	EL MARSA	40
BOUROUBA	16	HARAOUA	41
HUSSEIN DEY	17	ROUBA	42
KOUBA	18	REGHAIA	43
BACH DJERRAH	19	AIN BENIAN	44
BAB EZZOUAR	21	STAOUELI	45
BEN AKNOUN	22	ZERALDA	46
DELY BRAHIM	23	MAHELMA	47
BAINS ROMAINS	24	RAHMANIA	48
RAIS HAMIDOU	25	SOUIDANIA	49
GUE DE CONSTANTINE	26	CHERAGA	50
EL MOURADIA	27	OULED FAYET	51
HYDRA	28	EL ACHOUR	52
MOHAMMADIA	29	DRARIA	53
EL MAGHARIA	31	DOUERA	54
BENI MESSOUS	32	BABA H'SSEN	55
EUCALYPTUS	33	KHRAISSIA	56
		SAOULA	57

III Description des moyens et du système de collecte

La collecte constitue le premier maillon de la chaîne de traitement des déchets puisqu'elle représente la source principale des unités de traitement et de recyclage en matières premières.

Deux modes de collecte sont utilisés au niveau de la Wilaya d'Alger [11]:

- la collecte en porte à porte (ou système d'enlèvement) : le service communal chargé de l'enlèvement des ordures passe dans les rues à des intervalles réguliers pour ramasser les déchets ; la fréquence de collecte est une fois par jours au centre ville et au minimum tous les deux jours en banlieue ;
- la collecte par point de regroupement ou point R.

Le mode le plus généralement adopté est celui de collecte porte à porte, cependant il existe également des secteurs où la collecte s'effectue à partir des points de regroupement, il s'agit surtout des déchets de marchés et certaines institutions et des habitats collectifs [15].

Notons que les systèmes de collecte et de transport des déchets diffèrent d'une commune à une autre en fonction des effectifs et du matériel technique disponible. La collecte la plus répandue est celle par camions à benne entrepreneur. Les véhicules à benne tasseuse sont utilisés dans les grandes communes. Dans les zones inaccessibles aux véhicules motorisés la collecte de déchets est assurée par des tracteurs à remorque ou par des dumpers, voire dans le cas particulier de la Casbah, par des éboueurs à l'aide des moyens à traction animale. Le chargement de ces véhicules est effectué manuellement par les éboueurs sauf pour les caissons, ils sont mis en place et enlevés par les camions lève-conteneurs.

Le parc véhicule de l'ensemble de la Wilaya est de 430 véhicules, dont 40% de dumpers d'une capacité de 1 à 2 m³, des bennes tasseuses et de camions lève-conteneurs [15].

IV Description du système de dépôt et d'élimination

La Wilaya d'Alger élimine ses déchets par le moyen le plus simple, à savoir la mise en décharge. Hormis la décharge de Oued Smar, il existe une dizaine de décharges communales dont l'exploitation actuelle n'obéit à aucune règle d'hygiène et de protection de l'environnement [28,15].

Parmi les quatre centres d'enfouissement technique mentionnés sur la figure I.1, trois sont en cours de réalisation à savoir le centre d'enfouissement technique de Staouali, de Sidi Abdellah et de Ouled Chebel; pour ce qui est du quatrième qui est le centre d'enfouissement technique d'Ouled Fayet, les travaux ont été limités à la réalisation des casiers d'enfouissement. Notons que ce site a été exploité avant l'achèvement des travaux d'aménagement et de réhabilitation.

V Etude quantitative des DSU de la Wilaya d'Alger

Selon la Direction Générale de l'Environnement de la Wilaya d'Alger, le ménage Algérois produit 1 Kg de déchets par jour et par habitant, une valeur qui dépasse la moyenne nationale qui est de l'ordre de 0,77 Kg/Hab.j. Avec une population de 3 700 000 habitants, les 57 communes de la Wilaya génèrent une quantité de 3 700 Tonnes/j de déchets solides urbains.

Les quantités de déchets solides urbains générées par commune dans la Wilaya d'Alger sont illustrées sur les figures suivantes [15]:

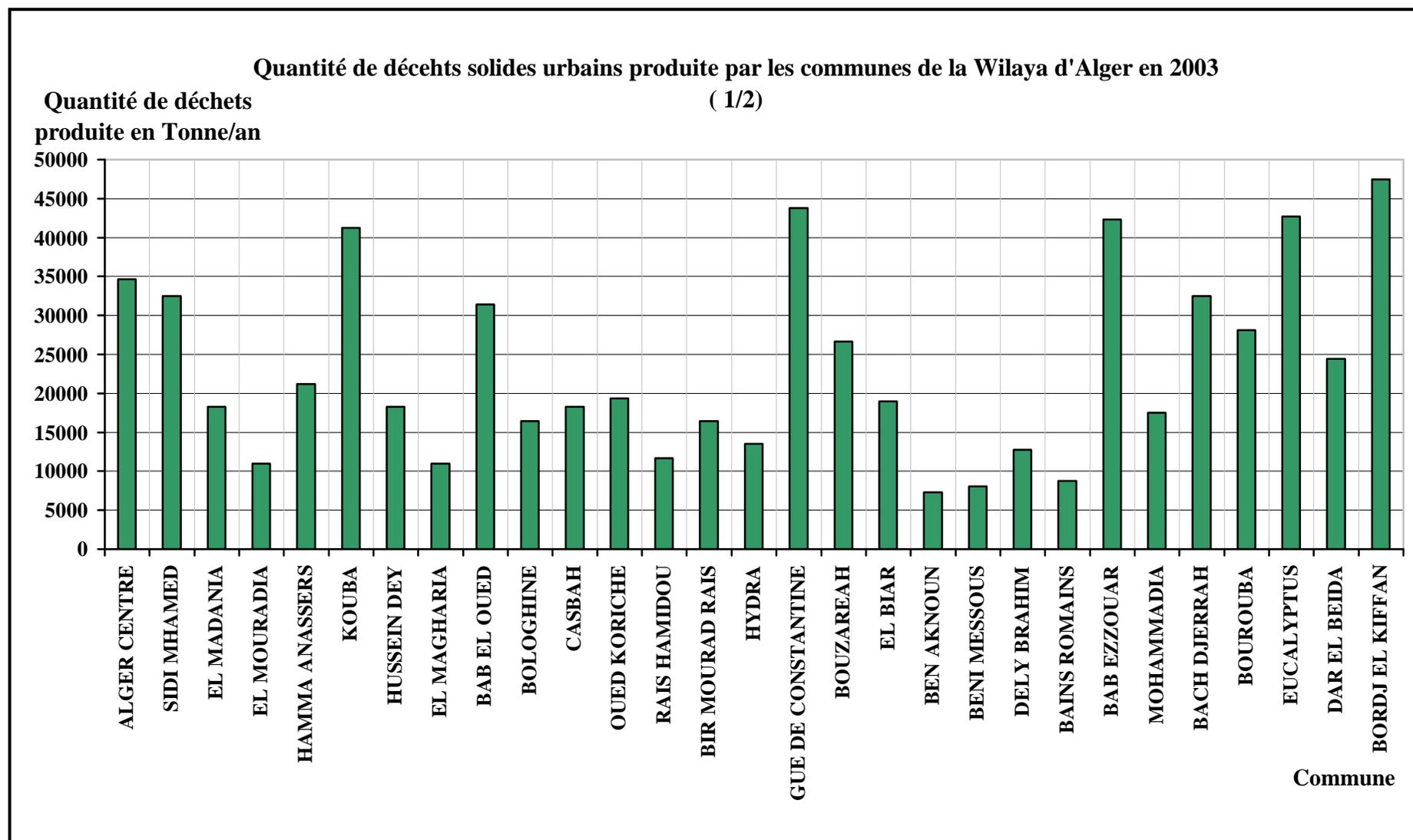


Figure I.2.a - Quantité de DSU produite par commune en 2003 [15]

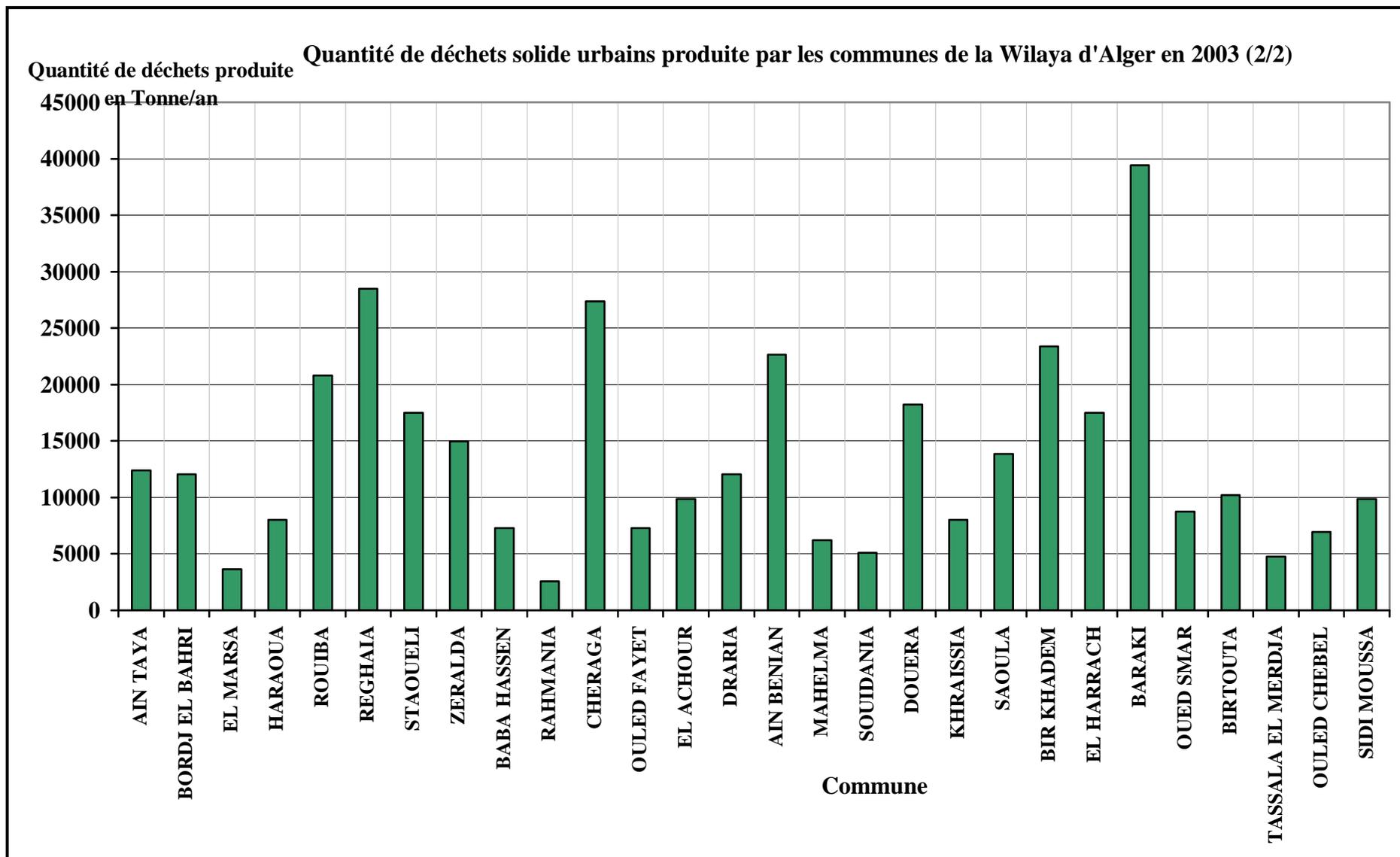


Figure I.2.b - Quantité de DSU produite par commune en 2003 [15]

V.1 Evolution de la production des DSU

Pour la Wilaya d'Alger l'évolution depuis l'indépendance de la production des DSU est représentée sur la figure suivante :

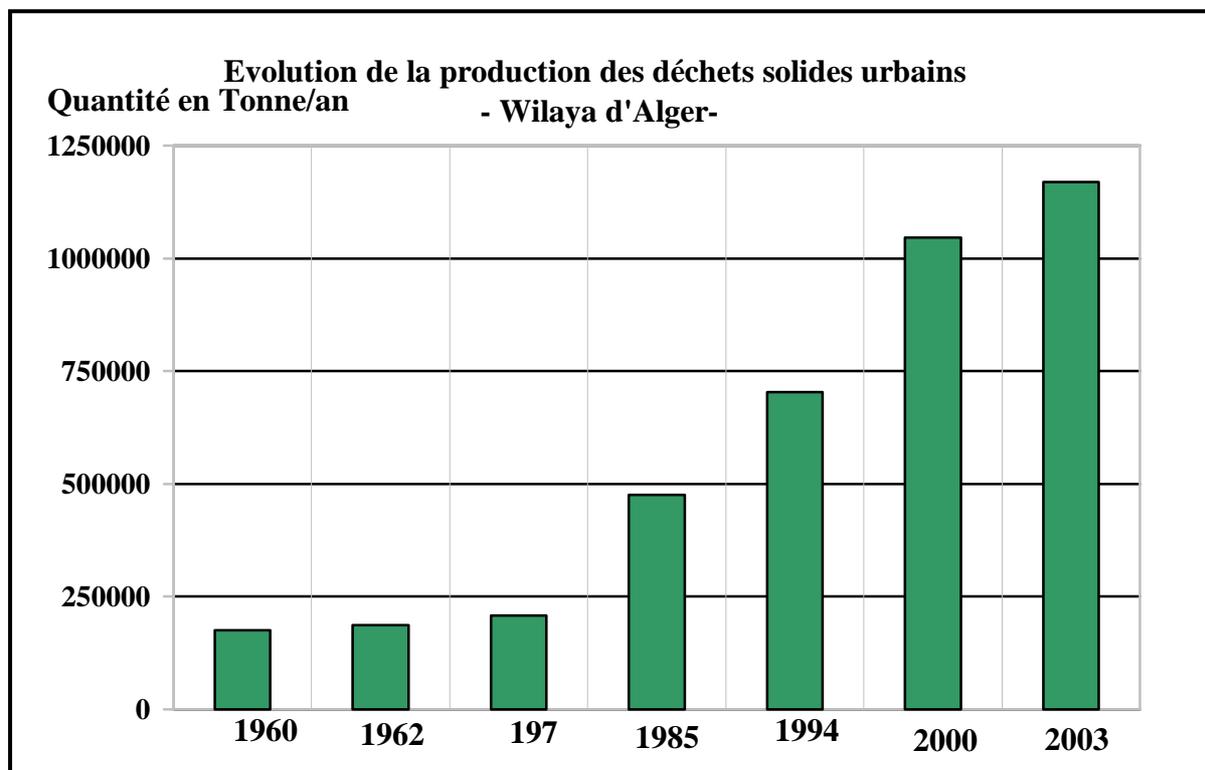


Figure I.3 - Evolution de la production des déchets solides urbains –Wilaya d'Alger- [29]

Nous constatons que la quantité de déchets produite a augmenté entre 1960 et 1985 de près de 300 % ; entre 1985 et 2000, elle a doublé. En effet, depuis l'indépendance, les villes algériennes littorales, notamment la Wilaya d'Alger, ont connu un développement urbain accéléré, liée à un accroissement démographique soutenu et à la réalisation de nombreux projets d'infrastructures, ainsi qu'à la création d'importantes zones d'habitats et d'activités industrielles et tertiaires.

V.2 Tendence d'évolution quantitative

L'historgramme I.4 décrit ; selon les données du MATE, l'évolution de la quantité de déchets solides urbains générée à l'horizon 2 020.

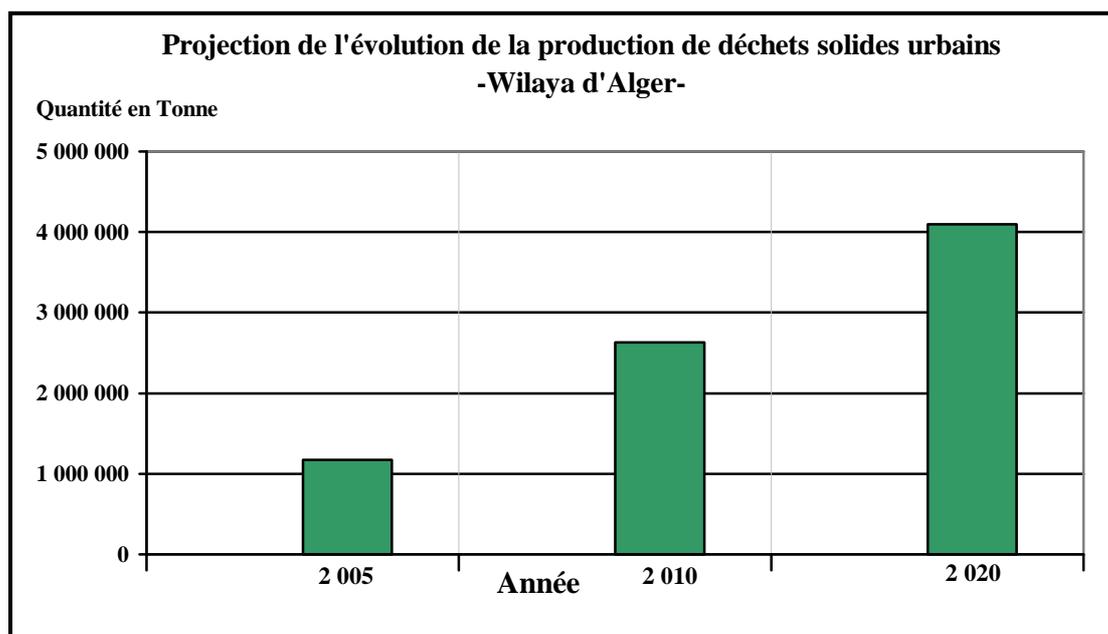


Figure I.4 - Projection de l'évolution de la production des déchets solides urbains [30,31]

Le tissu urbain algérois est appelé à atteindre les 6 000 000 habitants pour l'horizon 2 010 et 8 000 000 habitants pour 2 020. La même source (le MATE) confirme que la production spécifique connaîtra également une élévation de sa valeur et pourra atteindre 1,4 Kg/ Hab.j. [30,31]. De ce fait, une quantité de 2 628 000 Tonnes de déchets sera générée par la Wilaya d'Alger à l'horizon 2 010 et à l'horizon 2 020 la quantité prévoyait sera de l'ordre de 4 099 200 Tonnes.

V.3 Etude comparative de la production des déchets solides urbains

A l'échelle nationale, les quantités de déchets solides urbains générées sont estimées annuellement à 8.5 Millions de Tonnes. Selon le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement la production spécifique est de 0.77 Kg/Hab.j, soit 281 Kg/Hab.an. Cependant, pour les zones très urbanisées, tel que la Wilaya d'Alger, le taux est généralement supérieur [32,33].

La production spécifique est un indicateur qui permet de comparer entre elles diverses régions ou des situations à des dates différentes. De plus, il reflète en grande partie l'essor économique des différents pays. Sur la figure ci-après nous avons comparé la production spécifique des pays industrialisés et des pays en voie de développement notamment l'Algérie.

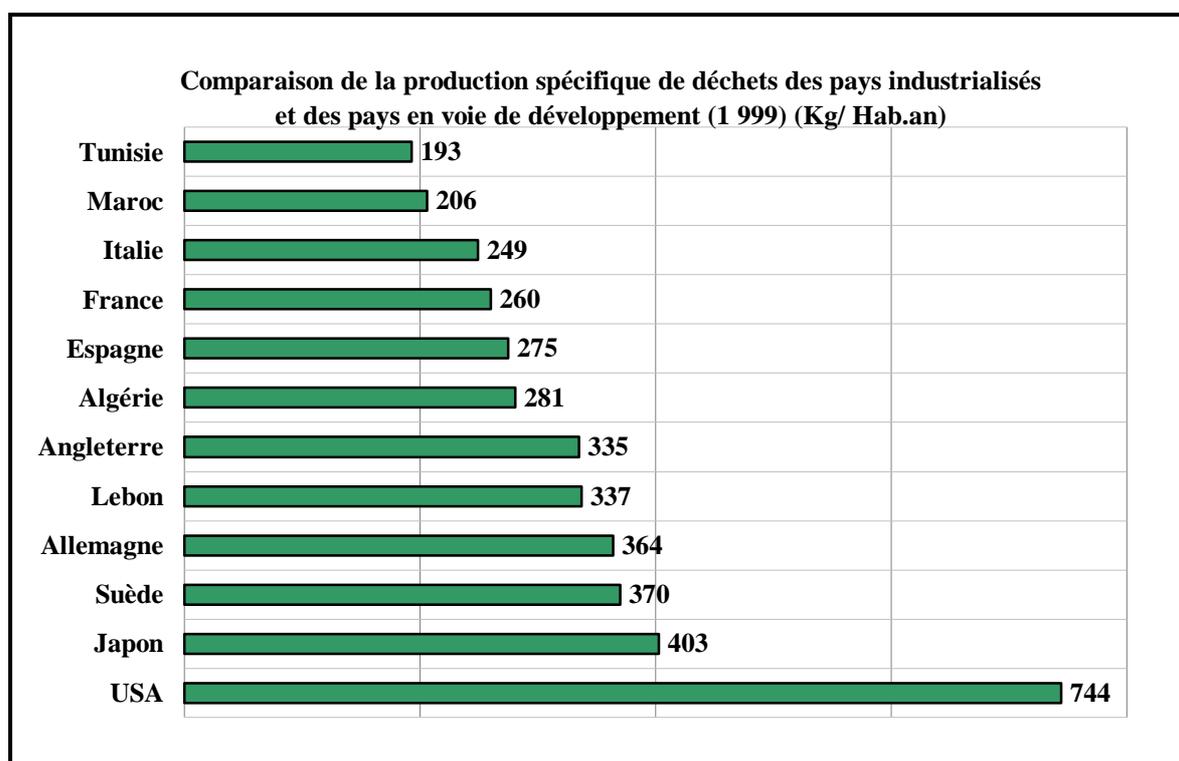


Figure I.5 - Comparaison de la production spécifique de déchets des pays industrialisés et des pays en voie de développement (1 999) [34,35]

Chaque habitant des USA génère annuellement en moyenne 750 Kg de déchets, dans les pays du Maghreb comme l'Algérie, la Tunisie ou le Maroc la quantité correspondante se situe en dessous de 290 Kg. D'après ce graphique nous remarquons que lorsque la prospérité augmente, les quantités des déchets augmentent aussi, mais il en ressort également que des pays comme la Suède ou l'Allemagne, qui pratiquent intensément la protection de l'environnement, produisent des quantités des déchets modérées, malgré leur haut niveau de vie [35,36].

VI Etude qualitative des DSU

VI.1 Composition de la "Poubelle" algéroise

La détermination des caractéristiques physiques et de la composition des déchets répond à deux objectifs [37]:

1. Evaluer le risque pour l'environnement en fonction de la nature et de la concentration des substances contenues dans les déchets. L'identification des dangers potentiels des déchets permet de prendre à chaque étape (tri, conditionnement, collecte transport, valorisation ou traitement) des mesures de prévention adaptées ;
2. Prévenir les difficultés techniques lors des opérations à effectuer sur les déchets.

La caractérisation a pour but donc de fournir toutes les informations utiles pour déterminer avec précision la filière de valorisation ou de traitement appropriée ainsi que les conditions de sécurité dans lesquelles des déchets seront triés, conditionnés et transportés.

Pour définir la composition des déchets solides urbains, il est indispensable de regrouper les constituants en catégories présentant une certaine homogénéité [11] :

- Les fines particules ayant un diamètre inférieur à 20 mm ;
- Les matières plus spécialement combustibles (les plastiques, les chiffons,...) ;
- Les matières inertes (métaux, verres, porcelaine, faïence) ;
- Les matières fermentescibles (toutes matières végétales putrescibles) ;
- Les papiers et cartons qui sont combustibles et fermentescibles à la fois.

La composition aussi bien qualitative que quantitative des déchets varie considérablement d'un pays à un autre en fonction des habitudes de consommation, de mode de vie, de la répartition en habitat rural et habitat urbain, des activités économiques, des ressources locales et du climat [11,37].

Nous avons reporté sur la figure I.5 le pourcentage en poids des divers composants des DSU de la Wilaya d'Alger.

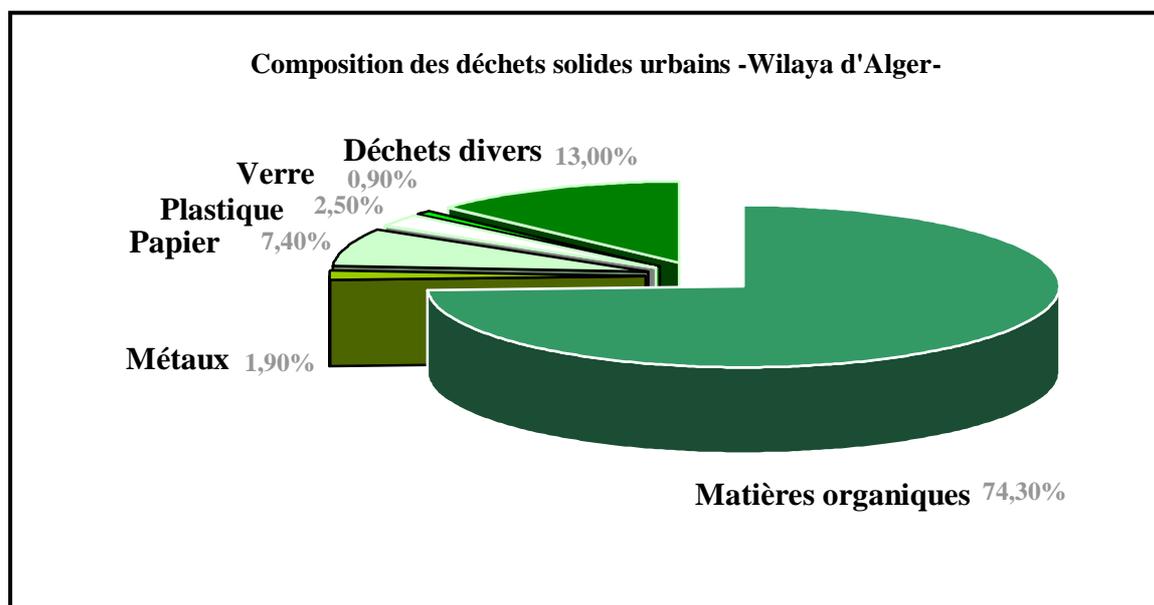


Figure I.6 - Pourcentage en poids des divers composants des déchets solides urbains – Wilaya d'Alger-[38]

La fraction de matières organiques est prédominante. Elle est de 74% pour une masse totale triée de une Tonne. Ceci s'explique par le comportement nutritionnel des habitants qui favorisent les légumes frais non conditionnés aux autres nutriments. Le groupe papier est bien représenté avec une fraction de 7%. Cela est lié aux modifications dans le comportement de consommation et de production des matières consommables. Les groupes plastique

(2.5%), métaux (1.9%) et verre (0.9%) figurent dans la composition de la poubelle algéroise mais avec de très faibles proportions. Il est évident que leur récupération est facile par un simple tri au niveau des ménages.

VI.2 Evolution de la composition de la "Poubelle" algéroise

La figure suivante illustre l'évolution de la composition de la poubelle algéroise depuis 1974.

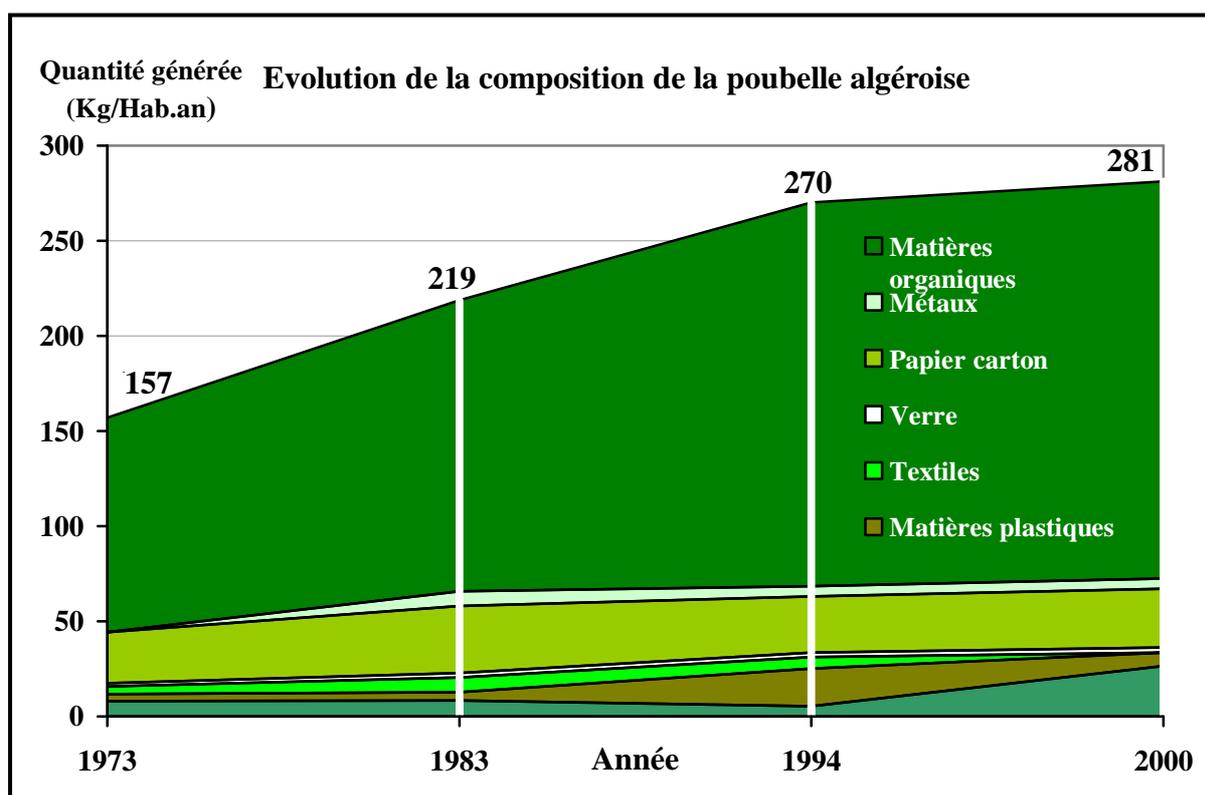


Figure I.7 - Evolution de la composition de la poubelle algéroise [38, 29]

Nous constatons que la fraction de la matière organique était toujours importante ceci peut être expliqué par le fait que les Algérois ont gardé leurs mêmes habitudes de consommation (légumes frais non conditionnés). Entre 1973 et 1993 le pouvoir calorifique inférieur a augmenté d'une manière remarquable, ceci est dû à :

- la diminution de la teneur en eau ; et
- l'élévation de la quantité de la matière plastique générée.

Le tableau I.2 donne plus de détails sur l'évolution de la composition des déchets.

Tableau I.2 - Evolution de la composition de la poubelle algéroise [38,29]

		Année			
Composants	Unité	1 973	1 983	1 994	2 000
Production spécifique	Kg/Hab.an	157	219	270	281
Teneur en eau	%	60	55	49	-
PCI	KJ/Kg	3762	900/4 180	6270	-
Matières plastiques	Kg/Hab.an	3,6	4,38	19,7	7
Textiles	Kg/Hab.an	4,08	7,9	6,21	-
Verre	Kg/Hab.an	1,7	2,4	2,16	2,5
Papier-carton	Kg/Hab.an	26,7	35,04	29,7	30,9
Métaux	Kg/Hab.an	0,157	7,6	5,13	5,33
Matières organiques	Kg/Hab.an	112,6	153,3	201,69	208,9
Déchets divers	Kg/Hab.an	8,2	8,3	5,41	26,67

VI.3 Tendance d'évolution qualitative

En ce qui concerne l'évolution qualitative des déchets solides urbains générés par les ménages algériens les tendances suivantes sont à prévoir:

- Evolution de la quantité de papier générée, (très forte percée d'emballage, augmentation des supports des communications journaux, revues, magazines) ;
- Accroissement des résidus de produits d'entretien ;
- Accroissement du gisement de produits électriques et électroniques en fin de vie ;
- Multiplication des déchetteries et des quantités collectées par cette voie;
- L'ouverture du marché algérien vers l'économie extérieur en particulier l'économie européenne, influencera d'une manière indirecte, le mode de vie des ménages.

VI.4 Etude comparative de la composition des DSU

Dans la composition des déchets, c'est la part de la matière organique qui fait, principalement, la différence entre les pays hautement industrialisés et les autres pays. La figure suivante nous renseigne sur les résultats d'analyse des déchets par matière de différents pays industrialisés et en voie de développement [11].

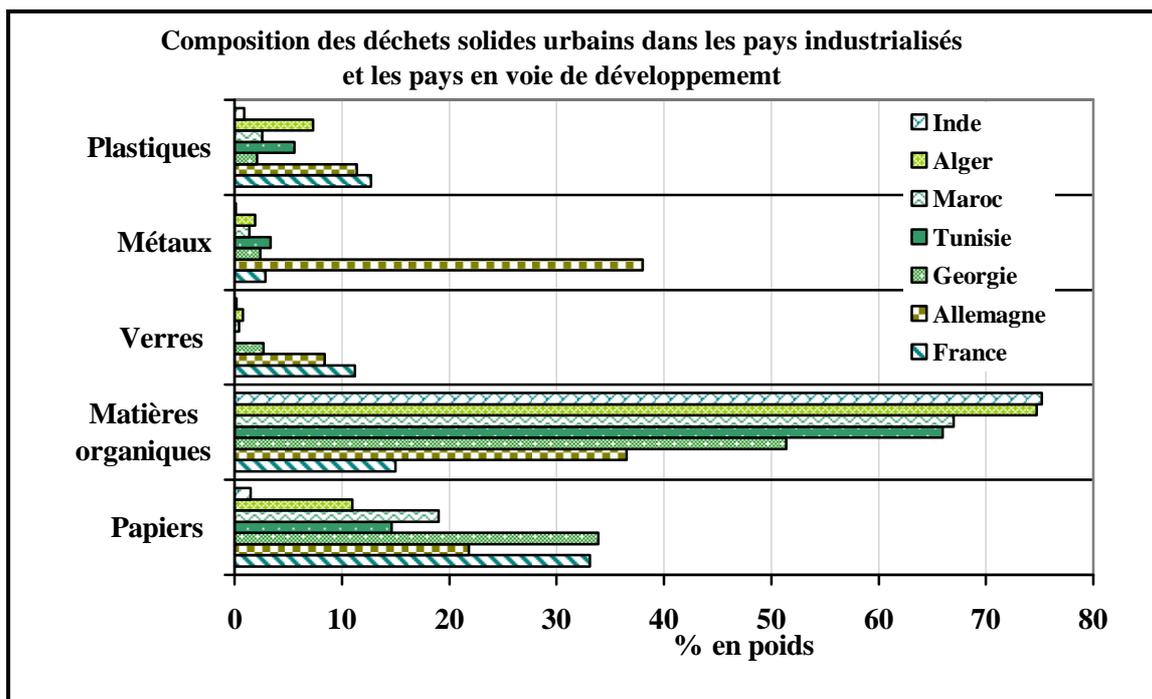


Figure I.8 - Composition des déchets solides urbains dans les pays industrialisés et les pays en voie de développement (1 997) [38,22]

Pour l'Algérie et l'Inde la proportion de la matière organique dépasse les 70%, pour l'Allemagne et la France elle représente moins de 40%. En revanche, pour ces pays industrialisés ainsi que pour la Wilaya de Georgie (USA) les emballages de produits constituent une part importante (papier, plastique et métaux) dans la composition. Signalant que 45 millions de Tonnes de déchets d'emballage sont produits chaque année par les pays de l'OCDE [39].

VII Caractéristique des déchets solides urbains

D'après les données du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, les caractéristiques des DSU générés par la Wilaya d'Alger sont regroupées au tableau ci-dessous :

Tableau I.3 - Caractéristiques des DSU de la Wilaya d'Alger [11]

Caractéristique	Valeur
Densité	0,3 - 0,5
Taux d'humidité	60 - 62 %
Pouvoir calorifique	3 762 - 6 688 KJ/Kg
Rapport Carbone/Azote (C/N)	30

Les DSU de la Wilaya d'Alger se caractérisent par une forte teneur en eau qui est de l'ordre de 62 % et par un faible pouvoir calorifique. Ceci est dû principalement à la prédominance de la fraction organique dans la composition de ces déchets qui est de l'ordre de 74 %.

Le rapport C/N exprime l'équilibre qui existe entre les principaux constituants de la fraction biodégradable d'un déchet qui sont le carbone et l'azote. La valeur optimum correspond à un rapport C/N de 30 à 35. La connaissance de cette valeur est primordiale lorsque le but est la valorisation biologique des déchets car la nutrition et la croissance des microorganismes qui décomposent la matière organique sont très dépendantes de ce rapport.

Nous constatons que la valeur du rapport C/N des déchets solides urbains de la Wilaya d'Alger est idéale en ce sens.

VIII Situation actuelle de la gestion des déchets solides au niveau national

VIII.1 Gestion des déchets solides industriels en Algérie

Les quantités de déchets produites par secteur industriel en Algérie sont indiquées dans le tableau I.4.

Tableau I.4 - Quantité de déchets produite par secteur en Algérie (1995) [40]

Origine	Quantité (Tonne/an)
Déchets des mines et carrières	212 000
Industries alimentaires, tabac, allumettes	2 100
Déchets agricoles et forestiers	-
Textile, bonneterie, confection	4 400
Cuirs et chaussures	12 300
Bois, papier, imprimerie	2 700
Chimie, caoutchouc, plastiques	3 200
Industries sidérurgiques, métallurgiques, mécaniques et électriques	955 700
Déchets résultants de la production d'énergie (hydrocarbures)	49 700

Dans l'industrie, nous trouvons des déchets de différentes sortes, qui ne peuvent pas être traités ni comme ni avec les déchets ménagers. Pour remédier à cette situation, les déchets industriels peuvent être classés en 2 catégories [34, 41]:

- Les déchets inertes (déblais, gravats, etc.) ;
- Les déchets spéciaux.

Ces derniers qui ont un potentiel de dangerosité important et qui doivent être soumis à un traitement très particulier peuvent eux même, être classés en 3 groupes :

- a. Déchets organiques, composés essentiellement des déchets d'hydrocarbures, goudrons, solvants... ;
- b. Déchets minéraux liquides : boues de traitement ;
- c. Déchets minéraux solides : sables de fonderie, sels de trempes de cyanure.

Une étude menée par le bureau d'études Allemand BC-Berlin, datant de 1994, a estimé que la production de déchets industriels dangereux en Algérie est d'environ 185 500 Tonnes/an.

87 % de ces déchets figurent sur la liste des déchets très toxiques [42].

Tableau I.5 - Quantité de déchets dangereux produite en Algérie (1 994) [42]

Déchets dangereux	Quantité (Tonne/an)
Déchets d'origine minérale	55 000
Boues minérales	18 000
Résidus de pétrochimie et de cokéfaction	58 000
Boues pollués au zinc	25 000
Solvants organiques, résidus de peinture	4 000
Boues métalliques et électrolytiques	2 000
Résidus de fabrication	2 500

Ces déchets sont particulièrement générés par les grandes villes notamment : Annaba (36.6 %), Médéa (16.5%), Tlemcen (15.1%), Oran (14.1%).

Le tonnage de déchets dangereux stockés au niveau des entreprises et des unités industrielles dépasse 340 000 Tonnes réparti comme suit : Tlemcen 66% et Annaba 24%.

Cette situation met en évidence le fait que les entreprises et les unités industrielles ont du mal à assumer la gestion de leurs déchets. Une prise de conscience par les dirigeants des risques que génèrent les déchets et du bénéfice que leur prise en charge peut induire s'avère indispensable.

VIII. 2 Gestion des déchets solides urbains à l'échelle nationale

L'analyse de la situation en matière de prise en charge des déchets solides urbains (collecte, transport, mise en décharge, manque de moyens d'élimination et de valorisation) attribue les difficultés actuelles en matière de gestion des déchets à des facteurs multiformes d'ordre organisationnel, technique, institutionnel et jusqu'à une date récente à l'absence d'une réglementation claire et précise en la matière [11].

Ces insuffisances multiformes qui constituent une contrainte majeure à la création de conditions favorables au développement d'un marché national des déchets, ont eu pour conséquence le dysfonctionnement du mode d'organisation des services chargés de la gestion des déchets qui n'est plus adapté aux exigences d'un cadre de vie à la mesure des attentes des citoyens.

La situation est encore plus marquée dans les grandes agglomérations urbaines qui génèrent sans cesse de grandes quantités de résidus sous la pression conjuguée d'une urbanisation non contrôlée et de la nette régression des moyens humains et matériels affectés à la gestion [28,11].

Tableau I.6 - Moyens matériels et humains affectés à la gestion des DSU [11]

		1980	2000
Volumes des déchets générés en kg/hab/j	Villes moyennes	0.5	1
	Grandes villes	-	1.2
Moyens humains affectés		1 agent pour 500 habitants	1 agent pour 1 500 habitants
Moyens matériels affectés			1 véhicule pour 7 500 habitants
Norme standard : 1 véhicule pour 4 000 habitants		-	

A cette insuffisance au plan quantitatif, les moyens mécaniques ne sont plus adaptés à la mission de collecte, de transport, de traitement et d'enfouissement des déchets.

Le nombre de véhicules recensés est de 4 100 dont 267 bennes tasseuses et 3 833 engins de différentes marques. Le taux de mobilisation de ces véhicules est de 50%. Il est dû à des problèmes d'entretien et de non maîtrise de la gestion [11].

A cette contrainte matérielle majeure, s'ajoute la sous qualification des agents affectés à la gestion des déchets. Sur un effectif total au niveau national de 20 000 agents, le taux de qualification de ces derniers ne dépasse pas les 4% dans les villes moyennes et se situe entre 7 et 10% dans les grandes villes [28].

VIII.2.1 Situation actuelle de la gestion des déchets solides urbains au niveau de la Wilaya d'Alger

a. Situation de couverture de la collecte

Selon les données du NET-COM la situation de couverture de la collecte au niveau de la Wilaya d'Alger peut être présentée par la figure suivante [25]:

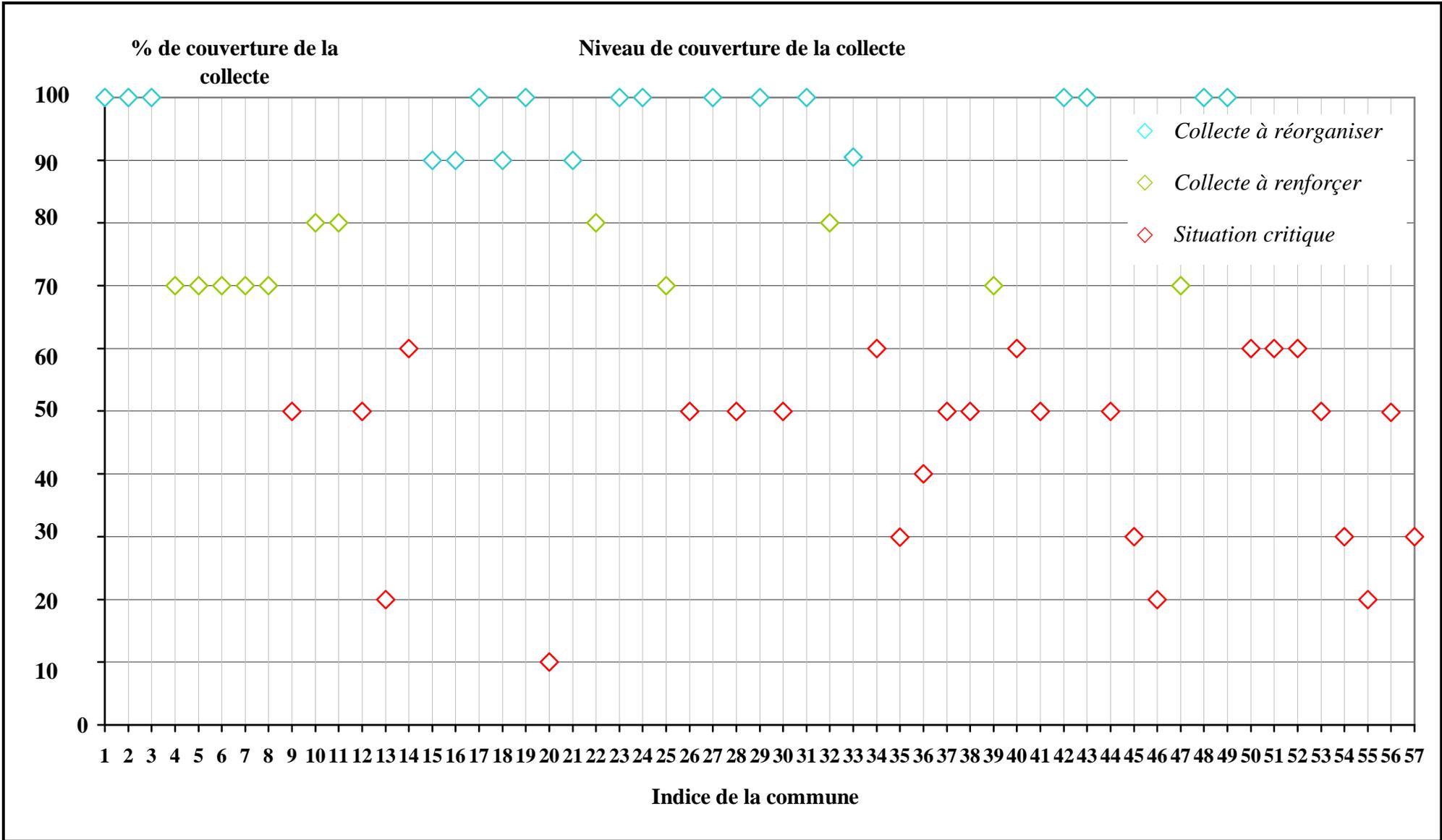


Figure I.9 - Niveau de couverture de la collecte dans la Wilaya d'Alger [25]

D'après cette figure nous constatons que plus de 66% des communes de la Wilaya d'Alger sont confrontées à une situation très délicate et épineuse en matière de collecte des déchets solides. Cette défaillance en terme de ramassage et de balayage est principalement dû au :

- Manque de données fiables sur les flux produits ;
- Relief accidenté de certains quartiers périphériques qui accueillent une population démunie (les bidon villes);
- Insuffisance des moyens matériels et humains et le sous encadrement des agents. En effet la Wilaya d'Alger avec une population de 3 700 000 habitants ne dispose que de 3 658 agents d'entretien (y compris les ingénieurs et chefs de services), soit 1 agent pour 1 100 habitants. Par conséquent, plus de 20% de la population Algéroise est loin d'être desservie par le service de nettoyage [28] ;
- Absence de schéma local de gestion de l'environnement urbain et le manque de formation et d'information des collectivités locales;
- Recouvrement partiel de la taxe de la collecte, insuffisante pour assurer les coûts de fonctionnement. En Algérie, la taxe d'enlèvement des ordures ménagères, qui est en fait un impôt local, à été institué dans la loi de finances de 1993 sur toutes les propriétés bâties [11]. Cette taxe d'enlèvement des ordures ménagères vise à permettre aux communes de disposer de ressources financières pour accomplir les prestations qui leur incombent en la matière.

Tableau I.7 - Montant de la redevance de collecte et de traitement [11]

Habitants par commune	Montant de la taxe en DZD	
	Par foyer	Par local commercial
Jusqu'à 50 000	500 à 1 000	1 000 à 10 000
Plus de 50 000	500 à 1000	1 000 à 10 000

Une tranche allant de 2 500 DZD à 50 000 DZD est déterminée par local industriel, commercial et artisanal produisant des quantités de déchets plus importantes quel que soit le nombre d'habitants de la commune. Considérant que le coût réel de l'évacuation et l'élimination des déchets pour un foyer est au minimum 4 000 DZD par an, il est évident que la taxe reste nettement insuffisante par rapport aux coûts de fonctionnement et de maintenance des systèmes de gestion des déchets. Nous pouvons estimer qu'en Algérie, pratiquement, ce sont les communes qui paient l'évacuation et l'élimination des déchets et non pas les générateurs d'où la nécessité d'appliquer le principe pollueur-payeur.

Afin de mieux cerner la problématique de collecte au niveau de la Wilaya d'Alger, nous avons classifié les 57 communes, selon le niveau de couverture de la collecte, en 3 zones. A chaque zone nous avons transcrit nos observations.

Tableau I.8.a - Communes où la situation de la gestion est critique [25]

Commune	Zone I - Situation critique :
BIR MOURAD RAIS, BIRKHADEM, EL HARRACH, DAR EL BEIDA, GUE DE CONSTANTINE, TESSALA EL MERDJA, BORDJ EL KIFFAN, OULED CHEBEL, SIDI MOUSSA, AIN TAYA, HERAOUA, DRARIA, BABA H'SSEN, KHRAISSIA, STAOUELI, ZERALDA, DOUERA, SHAOULA, EL MARSA, REGHAIA, ROUBA.	<p>Communes Périurbaines dont la situation est alarmante :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Moyens humains insuffisants ; ▪ Parc roulant insuffisant, et totalement vétuste ; ▪ Recours des communes à la location pour compenser le déficit ; ▪ Manque de civisme (apport volontaire).

Tableau I.8.b - Communes où la situation de gestion nécessite un renforcement [25]

Commune	ZONE II - Situation à renforcer :
HAMMA ANASSERS, BAB EL OUED, CASBAH, OUED KORICHE, BOULOUGHINE, BOUZAREAH, BARAKI, RAIS HAMIDOU, BEN AKNOUN, BENI MESSOUS, BIRTOUTA, BORDJ EL BAHRI, EL MARSA, MAHELMA, CHERAGA, OULED FAYET, EL ACHOUR.	<p>Communes urbaines populaires et périurbaines dont la situation en matière de propreté est très insuffisante :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Moyens peu suffisants ; ▪ Parc roulant insuffisant en partie vétuste ; ▪ Quartiers inaccessibles aux véhicules conventionnels (utilisation des animaux) ; ▪ Manque de civisme (apport volontaire).

Tableau I.8.c - Communes où la situation de gestion nécessite une organisation [25]

Commune	
ALGER CENTRE, SIDI M'HAMED, EL MADANIA, EL MOURADIA, HAMMA ANASSERS, KOUBA, HUSSEIN DEY, EL MAKARIA, HYDRA, BOUZARÉAH, EL BIAR, BEN AKNOUN, DELY BRAHIM, BAINS ROMAINS, BAB EZZOUAR, MOHAMMADIA, BACH DJERRAH, BOUROUBA, SOUIDANIA	<p>ZONE III- Situation à réorganiser : Communes urbaines dont la situation en matière de propreté connaît une nette amélioration mais nous avons enregistré les insuffisances suivantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Moyens assez suffisants ; ▪ Manque de civisme (apport volontaire).

b. Installations de traitement des déchets

▪ Décharges

En ce qui concerne les conditions d'élimination des déchets, nous constatons que la situation générale demeure préoccupante, même si depuis quelques années des efforts sont déployés pour organiser la mise en décharge des déchets municipaux.

Il n'en demeure pas moins que les critères de choix de site de décharge ne s'appuyaient sur aucune étude d'impact sur l'environnement. Les travaux d'aménagement et d'exploitation des décharges ne respectent même pas les règles élémentaires de protection de l'environnement [28].

Toutes les décharges publiques sont actuellement dans un état d'insalubrité très prononcée et constitue de ce fait un danger permanent pour l'environnement et pour la santé publique.

Dans ces décharges destinées aux déchets des ménages, des déchets toxiques provenant des activités économiques et des établissements de soins y compris des déchets anatomiques sont déversés de manière illicite, en même temps que les déchets ménagers.

L'enquête réalisée par des services de Ministère de l'Environnement fait état de 3 000 décharges sauvages sur le territoire national, dont 350 décharges sauvages au niveau des 40 grandes villes du pays et occupant une superficie totale de 150 000 Ha. Ces décharges sauvages sont souvent localisées le long des oueds, des routes ou sur des terres agricoles ou d'élevage.

Tableau I.9.a - Situation de la décharge d'Oued Smar - Zone Est- [25,26]

Morphologie du terrain	Impacts sur l'environnement
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Terrain plat de 30 Ha de superficie; ▪ Capacité annuelle 528 885 Tonnes ; ▪ Ancien excavation d'une carrière d'argile ; ▪ Située au bord de l'autoroute est, proximité de la zone industrielle ; ▪ Proximité de l'aéroport international H. Boumediene 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Risque de pollution des eaux souterraines ; ▪ Dégagement de fumées lors des incendies, impact sur l'habitat avoisinant ; ▪ Péril aviaire à cause de la proximité de l'aéroport international ; ▪ Risques d'explosion, le biogaz n'étant pas capté ni brûlé.

Tableau I.9.b - Situation du Centre d'Enfouissement Technique d'Ouled Fayet- Zone Ouest- [25,26]

Morphologie du terrain	Impacts sur l'environnement
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 40 Ha de superficie ; ▪ Capacité annuelle 242 360 Tonnes ; ▪ Zone agricole ; ▪ Terrain vallonné ; ▪ Aménagé en C.E.T ; ▪ (casiers imperméabilisés) ▪ Terrain argileux ; ▪ Proximité d'habitation (<400 m). 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Risque de pollution des eaux souterraines par ruissellement de lixiviat vers l'oued situé en aval ; ▪ Risque de dégagement de fumées lors des incendies éventuels, impact sur l'habitat avoisinant ; ▪ Trafic intensifié d'où encombrement de la route menant vers le CET à cause de son étroitesse et des multiples virages.

Tableau I.9.c - Situation des décharges des zones Nord-Ouest et Sud [25,26]

Décharge	Capacité Annuelle Tonne	Superficie en Ha	Morphologie du terrain	Impacts sur l'environnement
Staoueli	7 300	5	- Sol agricole ; - Proximité d'oued	Pollution des eaux, du sol et de l'air -Travaux d'aménagement en cours
Sidi Abdellah	4 380	2	- Sol agricole ;	- Pollution des eaux, du sol et de l'air
Lotissement Ali Khodja	10 950	2	- Sol agricole ; - Très proche des habitations	- Pollution des eaux, du sol et de l'air
Baba Hassen	17 520	3	- Sol agricole - Carrière désaffectée	- Pollution des eaux, du sol et de l'air
Baba Ali – Zouines	10 220	2,5	- Terrain non agricole	- Pollution des eaux, du sol et de l'air
Tassala El Merdja	3 650	4	- Sol agricole	- Pollution des eaux, du sol et de l'air
Ouled Chebel	5 110	2	- Sol agricole	- Pollution des eaux, du sol et de l'air
Oued Djemaa	5 110	3	- Sol agricole	- Pollution des eaux, du sol et de l'air

Les sites de mise en décharge sont le plus souvent exploités de façon non appropriée et leur contrôle (lorsqu'il existe) ne se limite qu'au gardiennage par des agents inopérants et sans aucune qualification. Ce qui a eu pour conséquence l'émergence et le développement d'activités incontrôlées de récupération de matériaux réutilisables pratiquées toujours dans des conditions d'insalubrité totale, le plus souvent par des adolescents ne s'entourant d'aucune mesure de protection [28].

▪ Valorisation

Concernant la valorisation des déchets, notre pays enregistre un retard considérable dans le domaine en raison de l'absence d'une politique favorable au développement d'un marché de déchets. Les estimations faites par les services du Ministère de l'Environnement font état de la possibilité de récupération de 760.000 Tonnes/an de déchet se décomposant comme suit :

- 385 000 Tonnes/an de papier ;
- 130 000 Tonnes/an de plastique ;
- 100 000 Tonnes/an de métaux ;
- 50 000 Tonnes/an de verre ;
- 95 000 Tonnes/an de matières diverses [28].

La valorisation de ce volume de déchets correspondrait à 3,5 milliards de dinars.

L'essentiel de l'activité de récupération se déroule sur les décharges publiques, les matières valorisables sont triées à des fins commerciaux par les chiffonniers et les ferrailleurs (au nombre de 300) selon un circuit informel. Ces matières récupérées sont exploitées par des entreprises spécialisées en recyclage [43]. Le tableau indique les prix de vente, ainsi que la quantité de déchets triée au niveau de la décharge d'Oued Smar :

Tableau I.10 - Prix de vente et quantités de déchets tirées -Décharge de Oued Smar- [29]

Produits	Prix de vente DZD/Kg (2000)	Quantités triées	
		Mars 1 994	Février 2 000
<i>Matières plastiques</i>			
Poly-éthylène	8	2,5-7 Tonne/ 2 mois	1,8Tonne/jour
Caisse détériorée	15		
Caisse neuve	60		
Caoutchouc	10		
<i>Papier-Carton</i>	2	10 Tonne/jour	80 Tonne/jour
<i>Verre</i>	2	2 000-3 000 bouteilles/2 mois	-
Cuivre	75	1 T/onnemois	5 00 Kg/mois
Plomb	5	-	100 Kg/mois
Aluminium	30	1 T/mois	20-30 Kg/mois
Batterie usée	20/ unité	-	-

Il y a lieu de signaler que ce sont les chiffonniers qui bénéficient de ce marché. L'organisme de la Wilaya chargé du contrôle de la décharge touche uniquement les droits d'entrée pour les véhicules de récupération, qui sont de l'ordre de 200 DZD [29].

L'organisation progressive d'un système de collecte sélectif à la source et la mise en oeuvre de mesures d'incitation devront faciliter à terme la mise en place de ce marché des matériaux recyclables.

Pour ce qui est de la fraction organique (qui représente plus de 70% de poids de nos déchets) l'état n'a consacré aucun effort sur le plan technique pour exploiter ce gisement bioénergétique.

IX Prolifération des Déchets et leurs impacts sur le citoyen et son environnement

Les incendies sont pratiquement permanents au niveau de nos décharges à cause de la présence de biogaz et de certains produits inflammables et parfois explosifs. Les fumées dégagées par ceux-ci polluent l'atmosphère qui devient irrespirable à certains endroits, de plus, les odeurs nauséabondes empoisonnent les régions avoisinantes. En 1 999, le Ministère de la Santé a recensé 37 571 malades ayant des difficultés respiratoires à cause des fumées dégagées par les décharges sauvages, 1 106 d'entre eux ont trouvé la mort [33].

De plus, la contribution du secteur des déchets aux émissions des gaz à effet de serre est évaluée à 4,815 Millions de TE-CO₂, ce qui présente 4,59 % des émissions brutes. 85,34 % de ces émissions sont dues à la mise en décharge. Les émissions dues aux secteurs des déchets se répartissent à raison de 91,37 % pour le méthane et 8,63 % pour le N₂O [31].

Le tableau I.11 donne les projections relatives aux émissions de méthane et d'oxyde nitreux :

Tableau I.11 - Projections relatives aux émissions de méthane et d'oxyde nitreux [25]

Gaz à effet de serre (Milliers de Tonne)	1 994	2 005	2 010	2 020
Méthane	238,0	342,4	402,7	582,1
Oxyde nitreux	2,0	2,74	3,3	4,6

Si des mesures de traitement ne seront pas envisagées d'une manière rigoureuse, les quantités de méthane et d'oxyde nitreux émises vont presque doubler à l'horizon 2 020.

Aggravant la situation, la contamination des ressources hydriques par le lixiviat qui a des conséquences dramatiques sur la santé et sur l'environnement. D'après le Ministère, de la Santé, 2 000 enfants meurent chaque année à cause des maladies à transmission hydrique.

Notons que la lutte contre les maladies liées à la pollution du milieu est une mission ambitieuse et souvent onéreuse. Chaque année l'état y consacre près de 1 564 millions de DZD [28].

Chapitre II

Proposition et Choix du Mode de Traitement des DSU de la Wilaya d'Alger

Après une étude et analyse bibliographique sur les techniques de traitement des déchets pratiquées dans différents pays développés ou en voie de développement, nous avons constaté qu'il existe deux grands types de valorisation des déchets solides urbains :

1- Procédés de valorisation énergétique :

- Mode 1 : Incinération
- Mode 2 : Méthanisation

2- Procédés de valorisation non énergétique : Compostage.

Avant de procéder à la valorisation en terme d'optimisation du potentiel énergétique et non énergétique, il convient de trier les DSU dans un centre de tri afin d'en déterminer la quantité d'énergie et de matière produite.

I Tri des déchets solides urbains

Nous supposons que les 1 055 580 Tonnes de déchets produits ont été collectées d'une manière sélective, c'est-à-dire qu'il y eu séparation des déchets biodégradables et non biodégradables [25].

Le tri d'un Kilogramme de cette quantité nous permet d'établir la composition et la quantité par type de matière :

Tableau II.1 - Composition et quantité des DSU générés par les communes de la Wilaya d'Alger [38]

Type de matière	Composition (%)	Quantité en Tonne Pour 1 055 580
Matière organique	74,30	784 295
Métaux	1,90	20 056
Papier-carton	7,40	78 112
Plastique	2,50	26 389
Verre	0,90	9 500
Déchets divers	13,00	137 225

Les types de matière qui sont propices à une valorisation énergétique ou non énergétique sont :

- La matière organique;
- Le papier-carton ; et
- Le plastique.

Leur composition présente plus de 84 % de la quantité totale de déchets. Le verre et les métaux peuvent être destinés à la récupération.

▪ **Coût d'investissement et de fonctionnement d'un centre de tri**

L'optimisation des coûts de fonctionnement d'un centre de tri dépend en grande partie de sa dimension. Par conséquent, il faut éviter les tendances extrêmes lors de dimensionnement c'est-à-dire les centres trop petits, peu rentables (moins de 1 000 Tonnes/an) et les trop gros (plus de 100 000 Tonnes/an) dont les coûts d'investissement sont élevés.

L'aménagement d'un centre de tri nécessite un financement de l'ordre de 10120 DZD/Tonne de déchets dont [45]:

- les coûts d'investissement (construction et équipement) sont de 1840 DZD;
- les coûts de fonctionnement sont d'environ 8280 DZD.

II Hypothèse concernant la valorisation énergétique

Pour les procédés de valorisation énergétique à savoir l'incinération et la méthanisation, le contenu énergétique est évalué selon deux options:

a. Option électricité

1. La combustion des déchets fournit de la vapeur. Celle-ci pourra actionner une turbine pour la production d'électricité.
2. Le biogaz alimente un moteur à gaz (ou une turbine), qui produit de l'électricité.

b. Option chaleur

1. La chaleur transportée par les fumées d'incinération peut être récupérée au moyen d'un échangeur.
2. le biogaz peut être utilisé comme combustible de chaudière.

III Principe de calcul de la puissance électrique et de la quantité de chaleur

Le principe de calcul est basé sur la connaissance de la valeur du coefficient technique qui exprime l'énergie utilisable issue de l'incinération ou de la méthanisation d'une Tonne de déchet.

D'après le rapport de H.PREVOT (2 000) portant sur la récupération de l'énergie issue du traitement des déchets, la valeur du coefficient technique dépend [9]:

- du type de déchet à valoriser ;
- du pouvoir calorifique inférieur de déchet à valoriser ;
- du rendement de l'installation de valorisation énergétique et sa capacité à produire le maximum d'électricité ou de chaleur.

La puissance électrique et la quantité de chaleur se calculent en multipliant le coefficient technique par la masse de déchet : $Q = M \times \text{Coeff Tech}$.

IV Calcul de la puissance électrique et de la quantité de chaleur

IV.1 Mode 1 : Incinération

L'incinération est le mode majeur de traitement des DSU déchets solides urbains et concerne toute la partie incinérable qui est de l'ordre 888 796 Tonnes.

IV.1.1 Calcul de la quantité d'énergie produite

a. Option Electricité

Les résultats de calcul sont donnés au tableau II.2.

Tableau II.2 – Puissance électrique générée selon le mode 1

Groupe de matière	Composition (%)	Masse de déchets (Tonne/an)	PCI (MJ/Tonne)	Coeff Tech (KWhé/Tonne)	Electricité (MegaWhé/an)
Plastique	2,50	26 389	22 990	1 197	31
Papier-carton	7,40	78 112	10 032	522	40
Matière organique	74,30	784 295	4 180	213	167
Total	84,2	888 796			238

b. Option Chaleur

Nous avons regroupé les résultats de calcul au tableau II.3.

Tableau II.3 – Quantité de chaleur produite selon le mode 1

Groupe de matière	Composition (%)	Masse de déchets (Tonne/an)	PCI (MJ/Tonne)	Coeff Tech (TEP/Tonne)	Chaleur (TEP/an)
Plastique	2,50	26 389	22 990	0,4	10 555
Papier-carton	7,40	78 112	10 032	0,18	14 060
Matière organique	74,30	784 295	4 180	0,07	54 900
Total	84,2	888 796			79 515

IV.1.2 Interprétation des résultats

L'incinération du plastique, papier-carton et de la fraction organique génère 238 MegaWhé. C'est une puissance qui permet de couvrir les besoins en électricité d'une ville de 330 000 habitants (soit plus de 10% de la population de la Wilaya d'Alger), étant donné qu'en Algérie, la consommation annuelle en électricité par habitant est de 716 KWh [46].

Dans le cas où l'incinération est orientée vers la production de chaleur, une quantité de chaleur équivalente à 79 515 TEP est produite. En absence d'un réseau de chauffage urbain au niveau de la Wilaya d'Alger, la chaleur produite peut être consommée au sein de l'unité d'incinération.

IV.2 Mode 2 : Méthanisation

Ce traitement biologique concerne toute la partie méthanisable des DSU de la Wilaya d'Alger et qui s'élève à 862 407 Tonnes.

IV.2.1 Calcul de la quantité d'énergie produite

a. Option Electricité

Les résultats de calcul sont donnés au tableau II.4.

Tableau II.4 – Puissance électrique générée selon le mode 2

Groupe de matière	Composition (%)	Masse de déchets (Tonne/an)	PCI (MJ/Tonne)	Coeff Tech (KWhé/Tonne)	Electricité (MegaWhé/an)
Papier-carton	7,40	78 112	10 032	400	31
Matière organique	74,30	784 295	4 180	230	180
Total	81,7	862 407			211

b. Option Chaleur

Les résultats de calcul sont illustrés au tableau II.5.

Tableau II.5 – Quantité de chaleur produite selon le mode 2

Groupe de matière	Composition (%)	Masse de déchets (Tonne/an)	PCI (MJ/Tonne)	Coeff Tech (TEP/Tonne)	Chaleur (TEP/an)
Papier-carton	7,40	78 112	10 032	0,08	6 248
Matière organique	74,30	784 295	4 180	0,06	47 057
Total	81,7	862 407			53 305

IV.2.2 Interprétation des résultats

La méthanisation de 862 407 Tonnes de matière fermentescible génère 211 MegaWhé, une puissance qui permet de couvrir les besoins en électricité d'une ville de 290 000 habitants.

Si le but de la méthanisation est la production de chaleur, une quantité équivalente à 53 305 TEP peut être récupérée.

IV.3 Mode 3 : Compostage

La partie fermentescible des DSU de la Wilaya d'Alger est une source potentielle pour la fabrication de matière humique. L'ajout de matière humique aux sols permet d'augmenter le rendement de la productivité tout en diminuant la consommation de pesticides et d'engrais chimiques. Les besoins des sols algériens en matière humique ont été mis en évidence dans les travaux réalisés par l'Imphos (Etudes Imphos/Inra El- Harrach/ Ferphos/1989) sur l'analyse de 300 échantillons. Le résultat obtenu fait ressortir un besoin immense en matière organique et une dégradation nette de la fraction granulométrique [47].

Pour estimer la quantité et la qualité du compost produit à partir de 862 407 Tonnes de matière fermentescible collectée d'une manière sélective, nous avons utilisé les résultats obtenus par l'usine de compostage de Tlemcen. Cette dernière a produit 0,5 Tonne de compost fin à partir de 1 Tonne de déchets fermentescibles. Les caractéristiques physico-chimiques du compost obtenu sont illustrées au tableau II.6 [13].

Tableau II.6 - Caractéristiques chimiques du compost fabriqué et traité par l'usine de compostage de Tlemcen (criblé à 15 mm) [13]

Eléments	Compost	Eléments	Compost
Humidité, en %	40	Cl, en %	0,5
pH	7,8	SO ₄ ²⁻ , en %	0,8
Carbone, en %	20,2	Fe ppm	900
Azote, en %	1,3	Zn ppm	680
Rapport C/N	15,3	Cu ppm	81
P ₂ O ₅ , en %	1,9	Mn ppm	120
K ₂ O, en %	1,8	B ppm	33,4
CaO, en %	5,8	Cd ppm	<7
Mg O, en %	0,9	Cr ppm	6,8
Na ₂ O, en %	0,5	Pb ppm	<9

Le compost obtenu est riche en éléments fertilisants et a un rapport C/N de l'ordre de 15, valeur pour laquelle il peut être considéré comme un bon amendement du sol. De plus, la maîtrise de la composition chimique de la charge entrant à l'usine a rendu le compost conforme aux normes européennes qui fixent les concentrations limites en métaux lourds.

En s'inspirant de ces résultats, les 862 407 Tonnes de déchets fermentescibles générés par la Wilaya d'Alger peuvent produire 439 043 Tonnes de compost. Cette quantité du compost fertilise 439 043 Ha à raison de 1 Tonne du compost/Ha.

V Choix du mode de valorisation

Les résultats obtenus précédemment montrent que les trois modes de valorisation sont efficaces et éprouvés pour la réduction de la masse des DSU de la Wilaya d'Alger et assurent la réutilisation des résidus stabilisés (compost ou digestât). Le choix du mode le plus approprié au cas de la Wilaya d'Alger est basé sur la comparaison entre ces trois modes de valorisation en prenant en compte les critères suivants :

- Quantité d'énergie et de matière produite ;
- Coûts d'exploitation;
- Respect de l'environnement.

Toutefois, il est indispensable d'examiner, les caractéristiques des déchets générés; les besoins de la Wilaya d'Alger en compost et en énergie et les prescriptions réglementaires.

V.1 Comparaison entre les trois modes de valorisation

V.1.1 Comparaison entre les quantités d'énergie produite

Selon les deux modes de valorisation énergétique que nous avons proposés à savoir l'incinération et la méthanisation, les quantités d'énergie récupérées sont données au tableau II.7 :

Tableau II.7 – Quantité d'énergie produite selon des deux modes de valorisation énergétique

	Mode 1 : Incinération (888 796 Tonnes)	Mode 2 : Méthanisation (862 407 Tonnes)
Option Electricité (MegaWhé)	238	211
Option Chaleur (TEP)	79 515	53 305

Nous remarquons que la production d'énergie est moins importante dans le cas de la méthanisation, de l'ordre de 211 MegaWhé, car nous n'avons pas pris en considération le PCI des plastiques, de l'ordre de 22 990 MJ/Tonne. De plus, l'énergie venant des papiers-cartons sous forme de biogaz dans un digesteur est très inférieure à celle que donne la combustion.

V.1.2 Comparaison entre les quantités de matière produite

Nous avons exposé au tableau II.8 les quantités de matière organique récupérée suite à la valorisation par méthanisation ou par compostage de 862 407 Tonnes de déchets fermentescibles.

Tableau II.8 – Quantité de matière produite

Mode 2 : Méthanisation	Mode 3 : Compostage
258 722 Tonnes de digestât A raison de 300 Kg de digestât/Tonne de déchets fermentescibles	439 043 Tonnes de compost

La quantité du compost obtenue est deux fois plus importante que celle du digestât. En effet, la production de biogaz au cours de la méthanisation s'accompagne par une forte consommation de la matière organique.

V.1.3 Comparaison entre les coûts de traitement

Les coûts de valorisation varient en fonction de la technologie utilisée et de la capacité de l'unité de traitement.

Pour une installation de capacité de traitement de 100 000 Tonnes/an, les coûts d'investissement et d'exploitation sont indiqués ci-dessous :

Tableau II.9 - Comparaison entre le coût de traitement par incinération, par méthanisation et par compostage [48,45]

Coûts	Mode de valorisation		
	Incinération	Méthanisation	Compostage
Coûts d'investissement (Million DZD)	4 600	2 300	1 380
Coûts d'exploitation (DZD/Tonne)	9 200	8 280	4 232

a. Comparaison entre les coûts de l'incinération et les coûts de la méthanisation

L'incinération est un procédé très coûteux qui demande un investissement deux fois plus lourd que celui de la méthanisation puisque les résidus issus de la combustion des déchets, à savoir les fumées et les mâchefers, sont très toxiques et leur rejet dans la nature ne peut s'effectuer qu'après traitement. Le tableau ci-dessous donne une idée sur la répartition du coût de l'incinération :

Tableau II.10 – Répartition du coût de l'incinération [45]

Répartition du coût de l'incinération	% du coût total
Fonction principale (réception, combustion, personnel ...)	60 %
Traitement des fumées	10 %
Valorisation énergétique	8 %
Extraction des mâchefers	2 %
Gestion des sous-produits (transport et traitement des mâchefers et des REFIOM)	20%

Nous constatons que 40 % du coût total de l'incinération est réservé au traitement des fumées, à la valorisation énergétique, à l'extraction des mâchefers et à la gestion des sous produits.

b. Comparaison entre les coûts du compostage et de la méthanisation

Le compostage est le procédé de valorisation le moins coûteux qui peut être adapté à des petites unités disposant de matériels agricoles ou forestiers existant localement. On peut également envisagé l'utilisation d'un matériel mobile destiné à plusieurs petites unités dans le but de réduire les coûts.

En ce qui concerne la méthanisation, et compte tenu des investissements nécessaires et de la moindre souplesse de ce procédé, les unités doivent être dimensionnées au minimum pour 20 000 Tonnes de déchets par an.

V.4 Comparaison vis-à-vis du respect de l'environnement

L'incinération dégage cinq types de produits : de l'eau, des gaz (dont le gaz carbonique et les oxydes d'azote), de la poussière minérale (cendres et mâchefers), des métaux lourds (plomb, mercure,...) et des molécules organiques (carbone, acide chlorhydrique et fluorhydrique et les fameuses dioxines issues des résidus chlorés, peu biodégradables et cancérigènes). Dans les pays industrialisés la réglementation concernant certains de ces composés est très contraignante, visant à limiter à l'extrême la production des plus dangereux. L'incinération s'accompagne de production de fumées. L'émission dans l'atmosphère est aussi soumise à des dispositions légales appelés normes de rejet.

A l'heure actuelle, il n'existe pas de normes Algérienne qui fixe les seuils de rejet des résidus de l'incinération. De plus, dans notre contexte législatif, le recours au traitement des DSU par incinération est la dernière solution dans la hiérarchie des modes de gestion : après les centres d'enfouissement technique et les traitements biologiques.

La méthanisation de la partie fermentescible des déchets solides urbains ne génère pratiquement pas de déchets ultimes. En effet, la captation du biogaz permet de limiter sa contribution à l'effet de serre et l'utilisation du digestât comme amendement organique participe à la préservation de l'environnement en diminuant l'emploi d'engrais chimiques.

Le compostage est un mode de traitement respectueux de l'environnement par le fait que nous ne constatons pas de rejets incontrôlés des lixiviats qui peuvent être envoyés en station d'épuration ou injectés sur les tas de compost. De plus, les concentrations en éléments gazeux

polluants (CO_2) sur les unités sont, pour la majorité, équivalents aux teneurs rencontrées en site urbain.

L'intérêt environnemental du compostage est la production d'un amendement organique en vue de l'épandage ce qui permet de rendre au sol ce qui lui a été puisé. Par ce biais, les utilisations annexes d'amendement chimique sont réduites et la préservation de nos sols est alors assurée.

Au tableau II.11, nous avons récapitulé tous les résultats obtenus dans cette partie de travail dans le but de faciliter la comparaison entre les trois modes de valorisation.

Tableau II.11 – Comparaison entre les 3 modes de valorisation

mode de valorisation	Incinération	Méthanisation	Compostage
Critères de comparaison			
Quantité d'énergie produite	++	+	-
Quantité de matière produite susceptible d'être utilisée comme amendement organique	-	+	++
Coûts d'exploitation	-	+	++
Respect de l'environnement	-	+	++

++ : Très performant

+ : Performant

- : Moins performant

VI Conclusion

L'incinération est une technique qui permet la réduction la plus complète et la plus rapide du volume des déchets (plus de 70%) et la valorisation de leur potentiel énergétique sous forme d'électricité. Cependant, les coûts d'investissement et de fonctionnement sont très élevés par rapport aux autres modes de valorisation. Pour les réduire, il faut penser à la vente de l'électricité produite. Or, en Algérie, grâce au gaz naturel, l'électricité est abondante donc la production d'électricité par incinération des déchets solides urbains ne présente guère d'intérêt économique. De plus, l'ensemble des lacunes que nous avons constatées, en examinant le cadre normatif et réglementaire en terme de protection de l'environnement, exprime l'inconsistance du droit des déchets en Algérie. De ce fait, à l'heure actuelle

l'Algérie n'est pas en mesure d'adopter l'incinération comme mode de traitement des déchets solides urbains.

L'attention portée à la composition du gisement des déchets solides urbains de la Wilaya d'Alger permet de mettre en lumière une forte teneur en matière organique (74%) et un taux important d'humidité (62%). La prise en compte des carences en humus des sols algériens favorise l'orientation de choix du mode de valorisation vers le procédé de méthanisation et le procédé de compostage. Sur le plan économique, ces procédés sont moins chers pour l'investissement, car ne nécessitant pas d'équipements sophistiqués, et pour l'exploitation qui requière un personnel moins qualifié. Les deux procédés respectent l'environnement et ne génèrent aucune substance dangereuse susceptible d'altérer le sol, l'eau ou l'air.

La combinaison de ces deux procédés de traitement biologique offre aux communes de la Wilaya d'Alger, notamment pour les plus modestes d'entre elles, un ensemble de solutions adaptables à leur capacité d'investissement et de gestion.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La Wilaya d'Alger génère annuellement un million de Tonnes de déchets solides urbains. Notre démarche qui s'est basée sur une analyse quantitative et qualitative de ce type de déchets nous a permis de conclure que ces déchets doivent être considérés comme un gisement de matière première que nous devrions valoriser par des procédés thermiques ou des procédés biologiques.

Les modes de traitement que nous avons proposés au cours de cette étude sont l'incinération, la méthanisation et le compostage. Ces trois modes de traitement permettent la réduction de la masse de déchets et en même temps la récupération des quantités importantes d'énergie et de matière organique.

La prise en considération du caractère fermentescible des déchets solides urbains de la Wilaya d'Alger, des besoins des sols Algériens en amendement organique et des prescriptions réglementaires nous a orienté vers le choix des procédés biologiques à savoir la méthanisation et le compostage. Vis-à-vis du respect de l'environnement ces deux procédés ne génèrent pratiquement pas de déchets ultimes, et de point de vue économique, les coûts d'investissement et les coûts d'exploitation sont moins élevés dans les conditions d'un pays comme l'Algérie. Ce choix n'exclut pas l'incinération mais l'adoption d'un tel mode de traitement nécessite la mise en place d'un dispositif réglementaire et normatif concernant les rejets issus des unités d'incinération (mâchefers et fumées) et une veille rigoureuse et permanente de leur application.

L'exploitation du potentiel énergétique et non énergétique des déchets solides urbains a donc un double intérêt : la préservation de cadre de vie et l'économie de matières premières en substituant l'utilisation des énergies fossiles par des énergies renouvelables.

L'Algérie doit s'intéresser à ce gisement d'énergie propre et durable et considérer la gestion de ces déchets comme un secteur de l'économie nationale à l'instar des secteurs de l'industrie de production. Ce n'est qu'après l'intégration de ces déchets dans le circuit économique que nous pouvons épargner nos ressources et préserver un cadre de vie meilleur pour les générations futures.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Principaux Textes Législatifs et Réglementaires Relatifs à la Protection de l'Environnement ; Titre 1 Dispositions Générales, Chapitre I Objet et Champ d'Application, Article 3 ; Algérie ; 2 002.
- [2] **L. YVES MAYSTER et al-** *Déchets Urbains Nature et Caractérisation* ; Presse Polytechnique et Universitaire Romandes ; 1^{ère} Edition ; Lausanne, 1 994.
- [3] *Manuel de Gestion des Déchets Solides Urbains* ; Direction Générale de l'Environnement ; Ministère de l'Aménagement du Territoire et de Développement ; Algérie ; Février 2 001.
- [4] **G-SORACE-** *Traitement des Déchets dans les Installations à Technologie Complexe* ; Programme de Formation sur la Gestion des Déchets ; Coopération Algéro-Italienne, Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement ; Algérie ; 2 003.
- [5] **N. DOTREPPE-GRISARD-** *Les Traitements Classiques, Le Compostage* ; La Tribune de CEBEDEAU; Edition CEBEDOC, Belgique ; 1 986.
- [6] **H. BILARD-** *Centre de Stockage des Déchets, Impacts et Perspective* ; Traité Environnement ; Volume G 2 100 ; Techniques de l'Ingénieur ; France ; 2 001.
- [7] **M. GANDOLLA-** *La Décharge, Impact Environnemental des Décharges* ; 1 997.
- [8] **H. BILARD-** *Centre de Stockage des Déchets, Exploitation* ; Traité Environnement ; Volume G 2 102 ; Techniques de l'Ingénieur ; France ; 2 001.
- [9] **H. PREVOT-** *La Récupération de l'Energie Issue du Traitement des Déchets* ; Rapport du Conseil Général des Mines ; Ministère de l'Economie, des Finances et de l'industrie ;
- [10] **G.ANTONINI-** *Traitement Thermique des Déchets, Procédés Technologies Associées* ; Volume G 2 051 ; Techniques de l'Ingénieur ; France ; 2 003.
- [11] *Manuel d'Information sur la Gestion et l'Elimination des Déchets Solides Urbains* ; Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement ; Edition GTZ Coopération Technique Allemande ; Algérie ; 2 003.
- [12] **G. ANTONINI-** *Traitements Chimiques des Déchets, Processus Thermo-chimiques* ; Traité Environnement ; Volume G 2 050 ; Techniques de l'Ingénieur ; France ; 2 003.
- [13] **A. DAMIEN-** *Guide Du Traitement des Déchets* ; Technique et Ingénierie ; Série Environnement ; Edition DUNOD ; Paris ; 2 002.
- [14] **G. MILLERET-** *La Destruction des PCB (Produits Chlorés Benzoliques), Le Procédé par Incinération* ; RGE ; France ; Septembre 1 987.

- [15] **P.SAMALENS-** *La Récupération de Chaleur dans les Usines d'Incinération d'Ordures Ménagères* ; Technique Urbain ; France ; 1 980.
- [16] **AGHTM-** *Les Résidus Urbains ; Traitement et Valorisation* ; Tome 2 ; Edition Technique de Documentation LAVOISIER ; Paris ; 1 985.
- [17] **L. GUERIN-** *Devenir des Polluants Inorganiques Contenus dans les Résidus Solides Issus de la Combustion des Déchets Ménagers* ; Thèse de Doctorat ; Université de Toulon et du Var ; France ; Mai 2 000.
- [18] **G. BERTOLINI-** *Approche Socio-économique des Déchets* ; Traité Environnement ; Volume G 2 300 ; Techniques de l'Ingénieur ; France ; 2 001.
- [19] **G. KECK- E. VERNUS-** *Déchets et Risques pour la Santé* ; Traité Environnement ; Volume G 2 450 ; Techniques de l'Ingénieur ; France ; 2 003.
- [20] **R. GOURDON-** *Traitement Biologique des Déchets* ; Traité Environnement ; Volume G 2 060 ; Techniques de l'Ingénieur ; France ; 2 003.
- [22] **K. MÜNIKH- G.ZIEHMANN- K. FRICKE-** *Biological Pre-treatment of Municipal Solid Waste in Low Income Countries* ; International Symposium on Environmental Pollution Control and Waste Management (EPCOWM'2 002) ; Tunisie ; Janvier 2 002.
- [23] **M. MUSTIN-** *Le Compost Gestion de la Matière Organique* ; Edition François Dubusc ; 1^{ère} Editions ; France ; 1 987.
- [24] **R. HACHICHA-** *Application du Processus de Compostage sur les Grignons* ; International Symposium on Environmental Pollution Control and Waste Management (EPCOWM'2 002) ; Tunisie ; Janvier 2 002.
- [25] *Rapport de la Direction Générale de l'Environnement sur la Quantité de Déchets Générée par les 57 Communes de la Wilaya d'Alger* ; Bureau d'étude Allemand KITTELBERGER & Entreprise de l'hygiène de la Wilaya d'Alger NET-COM ; Algérie ; 2 003.
- [26] *Rapport de la Direction Générale de l'Environnement situation des CET et des décharges sauvages* ; Bureau d'étude Allemand KITTELBERGER ; Alger ; 2 005.
- [27] www.eldjazeir.com
- [28] *Rapport sur l'Etat et l'Avenir de l'Environnement 2 003* ; Observatoire Nationale de l'Environnement et du Développement Durable ; Algérie ; 2 004.
- [29] **M. ZEBDJI-** *Gestion des Déchets Solides Urbains dans le Gouvernorat du Grand Alger* ; Séminaire International sur la Gestion Intégrée des Déchets Solides ; Edition GTZ ; Algérie ; 2 000.

- [30] *Aménager l'Algérie de 2 020* ; Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement ; Algérie ; 2 004.
- [31] *Elaboration de la Stratégie et du Plan d'Action National des Changements Climatiques* ; Direction Générale de l'Environnement ; Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement ; Algérie ; 2 001.
- [32] **S. ABDERREZAK-** *Gestion des Déchets Solides en Algérie* ; Séminaire International sur la Gestion Intégrée des Déchets Solides ; Edition GTZ, Algérie ; 2 000.
- [33] **PROGDEM** *Stratégie Opérationnelle* ; Programme de Formation sur la Gestion des Déchets Soldes ; Coopération Algéro-Italienne ; Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement ; Algérie ; 2 003.
- [34] **P. BLIEFERT-** *Chimie de l'Environnement : Air, Eau, Sols, Déchets* ; Edition De Boeck Université ; 1^{ère} Edition ; Belgique ; 2 004.
- [35] *Municipal Solid Waste Management Strategy Metap Mashreq and Maghreb Countries* ; METAP Project Preparation Unit ; Avril ; 2 000.
- [36] **B. FRIEDRICH-** *Politique et Organisation Nationales en Matières de Gestion de Déchets, Représentation de l'Etude Préparatoire* ; Séminaire International sur la Gestion Intégrée des Déchets Solides ; Edition GTZ, Algérie ; 2 000.
- [37] **A. GHRABI- A.R'HOUMA- M. ENNABLI- F. PICOUD-** *Caractérisation des Déchets Ménagers dans la Région du Sahel de la Tunisie* ; International Symposium on Environmental Pollution Control and Waste Management (EPCOWM'2 002) ; Tunisie ; Janvier 2 002.
- [38] *Les Déchets Solides Urbains*, Dépliant du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Algérie, 2 003 ;
- [39] **M. LEFÈVRE-** *La Gestion des Déchets en Europe Notions de Droit Communautaire Droit Allemand et droit Français* ; Séminaire International sur la Gestion Intégrée des Déchets Solides ; Edition GTZ ; Algérie ; 2 000.
- [40] **N. KAID TLILANE-** *Espace et Environnement, Cas de l'Algérie* ; Laboratoire Economie et Développement Université Abderrahmane Mira ;Bejaia ; 2 005.
- [41] **P. BLIEFERT-** *Chimie de l'Environnement : Air, Eau, Sols, Déchets* ; Edition De Boeck Université ; 1^{ère} Edition ; Belgique ; 2 004.
- [42] *Report on the State and the Future of Environment*, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement ; Algérie ; 2 000.

[43] **O. MAKHOUKH-** *La Gestion Des Déchets Solides en Algérie et les Possibilités de Participation du Secteur Privé* ; Séminaire International sur la Gestion Intégrée des Déchets Solides ; Edition GTZ ; Algérie ; 2 000.

[45] **Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie** – *Les Techniques de Gestion des Déchets Ménagers* ; France ; 2 000.

[46] *Situation Energétique en Algérie* ; Revue de la Presse Internationale d'Hydro-Quebec ; Canada ; 2 003.

[47] **F. HALFAOUI** – *Gestion et Traitement des Ordures Ménagères en Assimilées, Exemple de la Décharge et de l'Usine de Compostage de Tlemcen* ; Séminaire International sur la Gestion Intégrée des Déchets Solides ; Edition GTZ ; Algérie ; 2 000.

[48] **W.MEYER** – *Traitements des Déchets Urbains par les Procédés Thermiques ou Biologiques, Applications pour l'Algérie* ; Séminaire International sur la Gestion Intégrée des Déchets Solides ; Edition GTZ ; Algérie ; 2 000.